ISSN 2435-5860

Juntendo Health Science Journal

順天堂保健医療学雑誌

vol.

7

順天堂大学保健医療学雑誌第7巻第1号

目　　次

巻頭言

順天堂保健医療学雑誌第 7 巻発行にあたって…… 藤原　俊之…… 1

論説

Cerebral hemodynamics during mobilization with aneurysmal subarachnoid hemorrhage:
A narrative review and clinical implications …… Kenji Oike, Tetsuya Takahashi…… 2
Disease-specific features of dynapenia and their clinical relevance…… Keisuke Okano, Tetsuya Takahashi…… 10
Functional outcomes and rehabilitation strategies in infratentorial stroke:
toward personalized care: a narrative review…… Shota Kishimoto, Koshiro Haruyama…… 18
Characteristics and prevalence of cachexia in patients with heart disease,
chronic obstructive pulmonary disease, and chronic kidney disease and
those undergoing hemodialysis…… Taiki Hamada, et al.…… 26
Current status of visual-motor illusion research in healthy individuals and stroke patients:
A narrative review…… Hiroki Sugita, et al.…… 36
前十字靭帯再建術後の再損傷に関連する動作の特徴…… 池永　真、相澤　純也…… 43
AI の意思決定解釈のための可視化技術の概要 …… 赤沼　優文、臼井　桂介…… 48
偏平足を有する者における足部への内側縦アーチサポートが
動的膝外反に及ぼす影響…… 森　香奈　他…… 55
腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションの開始時期と
介入内容の現状：ナラティブレビュー…… 桐山　魁生、飛山　義憲…… 60
頭部定位放射線治療における体表面画像誘導放射線治療装置の役割と、
オープンシェルの導入について…… 武江　響、黒河　千恵…… 65
頸動脈プラークの画像診断…… 高玉　湧斗、後藤　政実…… 80
小線源治療における線源位置誤差が線量分布に与える影響…… 櫻井　大斗、黒河　千恵…… 85
前十字靭帯再建後の膝伸展 Rate of Force Development …… 成政　貴弘、相澤　純也…… 92
放射線治療における呼吸性移動を伴う
腫瘍の画像化技術の進展と課題…… 比内　聖紀、臼井　桂介…… 96
転移性脳腫瘍における放射線治療の役割と課題…… 樋川　陽向、臼井　桂介…… 104
ICU リハビリテーションにおけるプロトコル化の歴史と現在の課題…… 柳澤　佑哉　他…… 113

実践報告・その他

順天堂大学保健医療学部第 5 回国際シンポジウム
― Working in Global Environment: International Qualifications,
Licensing Compatibility, and Research Fellowships の開催報告 ―…… 宮森　隆行…… 119

国際シンポジウム抄録

The ABC of working abroad:
licensing, culture, personal and professional growth…… Jenny Sim …… 123
Navigating international careers:
A Singapore perspective for Japanese radiological technologists …… Li Hoon Sng …… 124
Australian physiotherapy education and the potential collaborations
for both students and academics between the universities…… Anthony G. Schneiders …… 125
From patient care to knowledge creation:
My journey as a physiotherapist ……I Putu Gde Surya Adhitya …… 126

A collaborative online international learning (COIL) initiative for students of radiological technology:
Practice report on the Radiographer Asia-Pacific Youth Symposium…… Yuh Morimoto, et al.…. 127
専門教育型短期留学（台湾）…… 新井　雅人　他…. 132
臨床実習型短期留学（台湾）…… 香田　　葵、花井　香純…… 136
臨床実習型短期留学（台湾）…… 岩本　徳宏　他…. 140
専門教育型海外短期留学プログラム（台湾）…… 近藤　秀海　他…. 145
第 1 回順天堂大学保健医療学部大学祭「順白祭」での
レモネードスタンドの実践…… 前原　栄一　他…. 149
2025 年度保健医療学部公開講座
「子どもの健康、運動、姿勢〜正しく知ってケガを防ごう〜」…… 相澤　純也…… 152
2025 年度保健医療学部市民公開講座
「子どもの健康、運動、姿勢〜正しく知ってケガを防ごう〜」の実践…… 中村　絵美…… 157
診療放射線学領域の学生を対象とした人工知能教育講座の開発…… 佐藤　裕斗　他…. 160

2024 年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録…… 166

2025 年版　保健医療学部教員の代表的な研究・教育活動…… 174

投稿規程…… 178

編集後記…… 181

順天堂保健医療学雑誌第7巻発行にあたって

順天堂大学保健医療学部は2019年4月に本学6番目の学部として開設され、2023年4月に大学院保健医療学研究科（修士課程）開設、2025年4月に博士課程開設と順調に発展を遂げてまいりました。

保健医療学部の発展とともに順天堂保健医療学雑誌が創刊され、このたび第7巻が発行されました。年を追うごとに掲載論文数の増加を認め、その質も向上しているように思います。特に、若い大学院生の投稿数が増加しており、本学部の大学院教育の充実を物語っているかと思います。また、掲載論文の内容も理学療法学、診療放射線学の多岐にわたり、時代の流れか、AI に関する論文も掲載されております。

医療・医学の中でも、特に理学療法学、診療放射線学の分野は科学技術の進歩を直接臨床に応用できる分野であり、近年の進歩は著しいものです。

我々の順天堂保健医療学雑誌が、今後とも理学療法学、診療放射線学の進歩に寄与し、多くの学生、研究者に役立つ雑誌として発展していくことを期待しております。

2026年8月吉日

順天堂大学保健医療学部長
藤原俊之

Review

Cerebral hemodynamics during mobilization with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: A narrative review and clinical implications

Kenji Oike[1, 2], Tetsuya Takahashi[1]

[1] Graduate School of Health Sciences, Juntendo University
[2] Department of Rehabilitation, Tsuchiura Kyodo General Hospital

Abstract

Aneurysmal subarachnoid hemorrhage (aSAH) is a rare and serious condition; however, it can also occur in young patients and has a high mortality rate. Even among survivors, nearly half have residual functional disability at the time of discharge, thus, acute rehabilitation is required. However, symptomatic cerebral vasospasm occurs within 14 days of onset, along with the risk of reduced cerebral hemodynamics. Consequently, standardized protocols for early mobilization remain lacking. This narrative review explores the current understanding of cerebral hemodynamics during early mobilization in patients with aSAH, and evaluates available monitoring techniques, particularly near-infrared spectroscopy (NIRS), in the context of early mobilization.

Cerebral perfusion and hemodynamics are generally performed by positron emission tomography and single photon emission computed tomography; Computed tomography is the standard imaging modality in aSAH. NIRS can also measure cerebral oxygenation dynamics at the bedside.

In stroke, several studies have examined the relationship between head elevation and functional outcomes, and have generally reported no significant association. In contrast, although some studies in aSAH have investigated cerebral hemodynamics changes related to head elevation, the link between these changes and functional prognosis remains largely unestablished.

Based on current findings, we argue that integrating dynamic cerebral hemodynamics monitoring−especially using portable methods like NIRS−may help bridge the gap between patient safety and early functional recovery in aSAH rehabilitation. Further research is needed to establish clinical protocols that balance the benefits of mobilization with the physiological challenges unique to this population.

Key Words: aneurysmal subarachnoid hemorrhage, cerebral hemodynamics, early mobilization

Juntendo Health Science Journal 7(1): 2-9, 2026（Received Feb. 10. 2025 ; Accepted Jul. 18. 2025）

Introduction

Eighty-five percent of aneurysmal subarachnoid hemorrhage (aSAH) are due to aneurysmal rupture[1], accounting for 5% of all strokes[2]. However, it can also affect young people, with mortality rates of 12% before the hospital arrival and 30% after 3 months[3, 4]. Among strokes, aSAH has a poor prognosis.

Although radical aneurysm repair is performed early after onset, patients are at a risk of intracranial complications such as delayed cerebral ischemia, rebleeding, and hydrocephalus, mainly due to symptomatic cerebral vasospasm (SCV), as well as specific systemic complications such as cardiogenic pulmonary edema, takotsubo cardiomyopathy, and postoperative electrolyte abnormalities[5]. Therefore, strict intensive care management is required 14 days after onset, which is known as the cerebral vasospasm phase[5, 6].

Acute brain damage in aSAH can be broadly categorized into early brain injury and delayed cerebral ischemia. Early brain injury is a complex interaction of various factors, including increased intracranial pressure due to hematoma and decreased cerebral return pressure, and ultimately leads to apoptosis of neurons[7]. Delayed cerebral ischemia refers to delayed neurological symptoms 4–14 days after onset, is defined as a decrease of ≥ 2 points on the Glasgow Coma Scale[8], and is reported to occur in approximately

Corresponding author: Tetsuya Takahashi
Department of Graduate School of Health Sciences, Juntendo University
3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033
E-mail: te-takahashi@juntendo.ac.jp

30% of cases. It is characterized by focal symptoms (aphasia, hemianopia, neglect, etc.) that last for > 1 h, which cannot be explained by conventional SCV alone and is the main cause of functional impairment[8, 9]. SCV is the main cause of Delayed cerebral ischemia, and it is related to various factors such as age[10-12], severity[10-12], aneurysm location[13, 14], and hematoma thickness[10-13]. In the acute management of aSAH, early brain injury must be mitigated and delayed cerebral ischemia prevented and detected early.

Regarding the functional prognosis and economic loss associated with aSAH, even in patients who survived the acute phase, physical and cognitive impairments remain at discharge[6], which leads to a decline in the quality of life and economic burden caused of difficulties in returning to society. In the UK, annual losses amount to $645 million[15].

Acute rehabilitation may play a crucial role, particularly, early mobilization. Previous guidelines did not recommend early mobilization for aSAH[16, 17]. SCV develops within 14 days of onset[18, 19], therefore, in daily intensive care, the approach to early mobilization varies among facilities[20, 21]. Concerns have arisen regarding changes in cerebral blood flow dynamics due to postural changes. Decreased cerebral blood flow due to cerebral vasospasms can cause cerebral infarction[17] and is said to be related to poor prognosis[22], requiring management. Thus, patients are often forced to remain in bed postoperatively, and nearly half of the patients are left with functional disabilities at discharge[23].

However, recent observational studies have suggested that early mobilization is feasible without adverse events and, has been associated with improved physical function at discharge[5, 24-30]. Some recent observational studies have also indicated the lack of association between SCV and early mobilization[31]. Thus, recent guidelines have mentioned the benefits of early mobilization[32]. This study aimed to review cerebral blood flow measurement and its contribution to safe and effective early mobilization for aSAH.

Cerebral blood flow measurement

1. General cerebral blood flow measurements

In general, cerebral blood flow measurement can be broadly divided into functional magnetic resonance imaging and nuclear medicine devices such as positron emission tomography and single photon emission computed tomography[33, 34].

Functional magnetic resonance imaging is performed to evaluate relative changes in brain activity associated with blood flow changes. A decrease in deoxygenated hemoglobin levels increases the signal intensity in magnetic resonance imaging, which is called the blood oxygenation level-dependent effect[33]. Conversely, nuclear medicine diagnostic devices are used for estimating brain function from the distribution of the administered radioactive materials in the brain[34]. Measuring local cerebral blood flow and metabolic indicators such as cerebral blood volume, cerebral blood flow rate, and mean transit time is possible, which play important roles in diagnosis and treatment planning. However, functional magnetic resonance imaging and positron emission tomography/single photon emission computed tomography requires patients to lie supine on the bed and have their heads firmly fixed, which greatly limits their application to motor tasks[33].

2. Cerebral blood flow velocity measurement in aSAH

To measure cerebral blood flow in aSAH, computed tomography　angiography and transcranial Doppler ultrasonography are used to detect delayed cerebral ischemia[35, 36]. The gold standard is computed tomography angiography, with 79.6% sensitivity and 93.1% specificity[35]. Transcranial Doppler defined mild cerebral vasospasm as MVm94cm/s or MVs/IVs ratio of 3.6 and moderate-to-severe cerebral vasospasm as MVs182 cm/s[36]. It can be performed at the bedside.

Cerebral oxygenation dynamics measurement using near-infrared spectroscopy (NIRS)

1. Basic concepts

NIRS uses near-infrared light to obtain information about the internal features of a living body noninvasively and easily[37]. It mainly measures local oxygen saturation (rSO_2), oxygenated hemoglobin (oxy-Hb), total hemoglobin (t-Hb), and deoxygenated hemoglobin (deoxy-Hb). Increased brain activity is accompanied by increased oxygen consumption in the active

area and an even greater increase in blood flow[38]. Therefore, NIRS generally shows an increase in oxy-Hb and a decrease in deoxy-Hb while t-Hb may increase or remain unchanged. Although t-Hb and deoxy-Hb may not show such changes, oxy-Hb often reflects changes in regional cerebral blood flow. For these reasons, oxy-Hb is considered a sensitive indicator of blood flow changes[39]. The normal rSO_2 has been reported to be approximately 60%–75%[40-42]. Measurements using near-infrared light were first reported in 1977[37], and in 1993, several methods for measuring local brain activity were reported[43, 44]. Since then, these methods have been adopted in various fields.

2. Advantages and disadvantages

NIRS has three major advantages. First, it uses only light for measurement and is not affected by ambient electromagnetic noise. Second, it is relatively tolerant of head movements, allowing measurements in an environment similar to everyday life. Third, the device is small and inexpensive, and the procedure can be performed at bedside[33].

Conversely, its disadvantages include difficulty measuring deep areas of the brain and low spatial resolution, and the light detected by the light-receiving unit passes not only through the brain parenchyma but also through extracerebral tissues such as the scalp, skull, and cerebrospinal fluid, so care must be taken when interpreting blood flow changes[33].

Owing to the aforementioned advantages and disadvantage, as a physical therapist, considering that it is clinically important to investigate cerebral blood flow dynamics not only at rest but also when getting out of bed, cerebral oxygenation measurement using NIRS, which can measure dynamic cerebral oxygenation dynamics, is clinically meaningful, despite its disadvantages.

Cerebral oxygenation dynamics in aSAH using NIRS

Most previous studies have reported[45-49] that NIRS measurements in aSAH are performed using two-channel probes placed on the bilateral prefrontal cortex. The following shows the cerebral oxygenation dynamics using NIRS in aSAH. In relation to delayed cerebral ischemia, studies have reported a moderate correlation with transcranial Doppler[50], and a 12% decrease from baseline was associated with a better predictive value compared with transcranial Doppler[45]. The sensitivity and specificity of detecting delayed cerebral ischemia in severe aSAH were at 86%[46]. Regarding the relationship with outcomes, a study reported that cerebral oxygen desaturation was associated with poor 90-day outcomes (modified Rankin Scale [mRS] > 3) but not with those at 12 months[47] and that patients with poor outcomes experienced a long period of decreased cerebral oxygen saturation, and decreases lasting for > 2 h are associated with poor outcomes[48]. Furthermore, a study reported that the maintenance of cerebrovascular reactivity was associated with good 90-day outcomes[51]. However, no intervention studies have reported long-term outcomes.

Cerebral hemodynamics with head elevation

1. Cerebral blood flow velocity with head elevation in cerebral infarction

In stroke, some studies have reported the effect of head elevation on cerebral blood flow velocity in patients with cerebral infarction[52-56]. Although some studies have suggested a relationship between head elevation and cerebral blood flow, some have reported negative relationship. Against this background, a multicenter international collaborative study was conducted in 2017[57], with neurological outcome as the endpoint. It included more than 10,000 patients with stroke at 116 facilities in nine countries. Patients were randomly assigned by the hospital to either a group in which their heads were placed flat on the bed or a group in which their heads were elevated 30° for 24 h after admission. The primary outcome was mRS after 90 days, and no significant difference was observed between the two groups. Moreover, no significant difference was noted in mortality or complications. The results reveal the lack of association between cerebral blood flow dynamics associated with head elevation and functional prognosis in cases of cerebral infarction.

2. Cerebral hemodynamics with head elevation in SAH

Few studies have reported the cerebral hemodynamics associated with head elevation in aSAH. Previous reports included small sample sizes and traumatic SAH and did not report on the presence or absence of cerebral vasospasm[58-60].

In recent years, several studies have revealed the effects of head elevation on cerebral hemodynamics during the cerebral vasospasm phase in aSAH. Five studies used transcranial Doppler[61-65], and one study used NIRS[49]. The number of patients ranged from 3 to 21. The patients' average age was as follows: one study was in the 40s[64], three in the 50s[61, 62, 65], one in the 60s[63], and one in the 70s[49]. Regarding measurement positions, two studies have compared the 0° and head-elevated positions[61, 62], two compared the 0° and sitting position[63, 64], and two used a tilt table and compared the supine and tilt-up positions[49, 65].

All studies have reported that head elevation does not affect cerebral hemodynamics and that EM is possible without increasing the incidence of cerebral vasospasm. This study had several limitations. First, the measurement positions were limited. Second, the sample size was small. Finally, functional prognosis was not mentioned in any of the studies.

Conclusion

Few studies have reported cerebral hemodynamics during mobilization in aSAH. The relationship between cerebral hemodynamics during early mobilization and the functional prognosis is unclear; thus, further studies are needed.

Ethical approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1) Maher M, Schweizer TA, Macdonald RL: Treatment of spontaneous subarachnoid hemorrhage: guidelines and gaps. Stroke. 2020: 51: 1326-1332.

2) Feigin VL, Lawes CMM, Bennett DA, Barker-Collo SL, Parag V: Worldwide stroke incidence and early case fatality reported in 56 population-based studies: A systematic review. Lancet Neurol. 2009: 8: 355-369.

3) Nieuwkamp DJ, Setz LE, Algra A, Linn FHH, Rooij NKd, Rinkel GJE: Changes in case fatality of aneurysmal subarachnoid haemorrhage over time, according to age, sex, and region: A meta-analysis. Lancet Neurol. 2009: 8: 635-642.

4) Lovelock CE, Rinkel GJE, Rothwell PM: Time trends in outcome of subarachnoid hemorrhage: Population-based study and systematic review. Neurology. 2010: 74: 1494-1501.

5) Robba C, Busl KM, Claassen J, Diringer MN, Helbok R, Park S: Contemporary management of aneurysmal subarachnoid haemorrhage. An update for the intensivist. Intensive Care Med. 2024: 50: 646-664.

6) Karic T, Røe C, Nordenmark TH, Becker F, Sorteberg W, Sorteberg A: Effect of early mobilization and rehabilitation on complications in aneurysmal subarachnoid hemorrhage. J Neurosurg. 2017: 126: 518-526.

7) Lauzier DC, Jayaraman K, Yuan JY, Diwan D, Vellimana AK, Osbun JW, et al: Early Brain Injury After Subarachnoid Hemorrhage: Incidence and Mechanisms. Stroke. 2023: 54: 1426-1440.

8) Vergouwen MD, Vermeulen M, Van Gijn J, Rinkel GJE, Wijdicks EF, Muizelaar JP, et al: Definition of delayed cerebral ischemia after aneurysmal subarachnoid hemorrhage as an outcome event in clinical trials and observational studies: proposal of a multidisciplinary research group. Stroke. 2010: 41: 2391-2395.

9) Thompson JC, Chalet FX, Manalastas EJ, Hawkins N, Sarri G, Talbot DA: Economic and Humanistic Burden of Cerebral Vasospasm and Its Related Complications after Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage: A Systematic Literature Review. Neurol Ther. 2022: 11: 597-620.

10) Mijiti M, Mijiti P, Axier A, Amuti M, Guohua Z, Xiaojianget C, et al: Incidence and predictors of

angiographic vasospasm, symptomatic vasospasm and cerebral infarction in Chinese patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage. PLoS One. 2016: 11: e0168657.
11) Charpentier C, Audibert G, Guillemin F, Civit T, Ducrocq X, Bracard S, et al: Multivariate analysis of predictors of cerebral vasospasm occurrence after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. Stroke. 1999: 30: 1402-1408.
12) Macdonald RL, Rosengart A, Huo D, Karrison T: Factors associated with the development of vasospasm after planned surgical treatment of aneurysmal subarachnoid hemorrhage. J Neurosurg. 2003: 99: 644-652.
13) McGirt MJ, Blessing R, Alexander MJ, Nimjee SM, Woodworth GF, Friedman AH, et al: Risk of cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage reduced by statin therapy: a multivariate analysis of an institutional experience. J Neurosurg. 2006: 105: 671-674.
14) Qureshi AI, Sung GY, Razumovsky AY, Lane K, Straw RN, Ulatowski JA: Early identification of patients at risk for symptomatic vasospasm after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. Crit Care Med. 2000: 28: 984-990.
15) Rivero-Arias O, Gray A, Wolstenholme J: Burden of disease and costs of aneurysmal subarachnoid haemorrhage (aSAH) in the United Kingdom. Cost Eff Resour Alloc. 2010: 8: 6.
16) Connolly ES, Rabinstein AA, Carhuapoma JR, Derdeyn CP, Dion J, Higashida RT, et al: Guidelines for the management of aneurysmal subarachnoid hemorrhage: A guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. Stroke. 2012: 43: 1711-1737.
17) Miyamoto S, Ogasawara K, Kuroda S, Itabashi R, Toyoda K, Itoh Y, et al: Japan Stroke Society Guideline 2021 for the Treatment of Stroke. Int J Stroke. 2022: 17: 1039-1049.
18) Harders AG, Gilsbach JM: Time course of blood velocity changes related to vasospasm in the circle of Willis measured by transcranial Doppler ultrasound. J Neurosurg. 1987: 66: 718-728.
19) Milovanovic A, Grujicic D, Bogosavljevic V, Jokovic M, Mujovic N, Markovic IP: Efficacy of early rehabilitation after surgical repair of acute aneurysmal subarachnoid hemorrhage: Outcomes after verticalization on days 2-5 versus day 12 post-bleeding. Turk Neurosurg. 2017: 27: 867-873.
20) Marzolini S, Robertson AD, Oh P, Goodman JM, Corbett D, Du X, et al: Aerobic training and mobilization early post-stroke: Cautions and considerations. Front Neurol. 2019: 10: 1187.
21) Editorial Committee of the National Circulation and Stroke Data Bank 2021: The Japan Stroke Data Bank 2021. Tokyo. NAKAYAMA. 2021: 92-95. (in Japanese)
22) AlMatter M, Péreza MM, Bhogal P, Hellstern V, Ganslandt O, Henkes H: Results of interdisciplinary management of 693 patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: Clinical outcome and relevant prognostic factors. Clin Neurol Neurosurg. 2018: 167: 106-111.
23) Schütz H, Krack P, Buchinger B, Bödeker RH, Laun A, Dorndorf W, et al: Outcome of patients with aneurysmal and presumed aneurysmal bleeding. A hospital study based on 100 consecutive cases in a neurological clinic. Neurosurg Rev. 1993: 16: 15-25.
24) Olkowski BF, Binning MJ, Sanfillippo G, Arcaro ML: Early mobilization in aneurysmal subarachnoid hemorrhage accelerates recovery and reduces length of stay. J Acute Care Phys Ther. 2015: 6: 47-55.
25) Karic T, Røe C, Nordenmark TH, Becker F, Sorteberg A: Impact of early mobilization and rehabilitation on global functional outcome one year after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. J Rehabil Med. 2016: 48: 676-682.
26) Okamura M, Konishi M, Sagara A, Shimizu Y, Nakamura T: Impact of early mobilization on discharge disposition and functional status in patients with subarachnoid hemorrhage: A retrospective cohort study. Medicine (Baltimore). 2021: 100: e28171.
27) Klein AM, Howell K, Straube A, Pfefferkorn T, Bender A: Rehabilitation outcome of patients with severe and prolonged disorders of conscio-

usness after aneurysmal subarachnoid hemorrhage (aSAH). Clin Neurol Neurosurg. 2013: 115: 2136-2141.
28) Yokobatake K, Ohta T, Kitaoka H, Nishimura S, Kashima K, Yasuoka M, et al: Safety of early rehabilitation in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: A retrospective cohort study. J Stroke Cerebrovasc Dis. 2022: 31: 106751.
29) Takara H, Suzuki S, Satoh S, Abe Y, Miyazato S, Kohatsu Y, et al: Association Between Early Mobilization and Functional Outcomes in Patients with Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage: A Multicenter Retrospective Propensity Score-Matched Study. Neurocrit Care. 2024: 41: 445-454.
30) Oike K, Ishibashi O, Nosaka N, Hirota S: The Impact of Multidisciplinary Team Intervention for Early Mobilization of Patients with Aneurysmal Subarachnoid Hemorrhage in Stroke Care Unit: A Retrospective Cohort Study. Phys Ther Res. 2024: 27: 166-172.
31) Takara H, Kohatsu Y, Suzuki S, Satoh S, Abe Y, Miyazato S, et al: Initiating mobilization is not associated with symptomatic cerebral vasospasm in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: A retrospective multicenter case-control study. Phys Ther Res. 2022: 25: 134-142.
32) Hoh BL, Ko NU, Amin-Hanjani S, Chou SHY, Cruz-Flores S, Dangayach NS, et al: 2023 Guideline for the management of patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage: A guideline from the American Heart Association/American Stroke Association. Stroke. 2023: 54: e314-e370.
33) Miyauchi T. Non-invasive study of human brain function and psychophysiology. Japanese Psychological Review. 2010: 56: 414-454.
34) Sato M: What can we know by SPECT and PET? —examples from case and activation studies— Higher Brain Function Research. 2010: 30: 387-397. (in Japanese)
35) Binaghi S, Colleoni ML, Maeder P, Uské A, Regli L, Dehdashti AR, et al: CT angiography and perfusion CT in cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage. AJNR Am J Neuroradiol. 2007: 28: 750-758.
36) Diringer MN, Bleck TP, Claude Hemphill J 3rd, Menon D, Shutter L, Vespa P, et al: Critical care management of patients following aneurysmal subarachnoid hemorrhage: recommendations from the Neurocritical Care Society's Multidisciplinary Consensus Conference. Neurocrit Care. 2011: 15: 211-240.
37) Jöbsis FF: Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. Science. 1977: 198: 1264-1267.
38) Fox PT, Raichle ME: Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects. Proc Natl Acad Sci USA. 1986: 83: 1140-1144.
39) Hoshi Y, Kobayashi N, Tamura M: Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. J Appl Physiol. 2001: 90: 1657-1662.
40) Baikoussis NG, Karanikolas M, Siminelakis S, Matsagas M, Papadopoulos G: Baseline cerebral oximetry values in cardiac and vascular surgery patients: a prospective observational study. J Cardiothorac Surg. 2010: 5: 1-7.
41) Heringlake M, Garbers C, Käbler JH, Anderson I, Heinze H, Schön J, et al: Preoperative cerebral oxygen saturation and clinical outcomes in cardiac surgery. Anesthesiology. 2011: 114: 58-69.
42) Chan MJ, Chung T, Glassford NJ, Bellomo R. Near-infrared spectroscopy in adult cardiac surgery patients: a systematic review and meta-analysis. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2017: 31: 1155-1165.
43) Hoshi Y, Tamura M: Detection of dynamic changes in cerebral oxygenation coupled to neuronal function during mental work in man. Neurosci Lett. 1993: 150: 5-8.
44) Villringer A, Planck J, Hock C, Schleinkofer L, Dirnagl U: Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. Neurosci Lett. 1993: 154: 101-104.
45) Park JJ, Kim C, Jeon JP: Monitoring of Delayed Cerebral Ischemia in Patients with Subarachnoid

Hemorrhage via Near-Infrared Spectroscopy. J Clin Med. 2020: 9:1595.
46) Park JJ, Kim Y, Chai CL, Jeon JP: Application of Near-Infrared Spectroscopy for the Detection of Delayed Cerebral Ischemia in Poor-Grade Subarachnoid Hemorrhage. Neurocrit Care. 2021: 35: 767-774.
47) Yousef KM, Balzer JR, Crago EA, Poloyac SM, Sherwood PR, et al: Transcranial regional cerebral oxygen desaturation predicts delayed cerebral ischaemia and poor outcomes after subarachnoid haemorrhage: a correlational study. Intensive Crit Care Nurs. 2014: 30: 346-352.
48) Burzyńska M, Uryga A, Kasprowicz M, Czosnyka M, Dragan B, Kübler A: The relationship between the time of cerebral desaturation episodes and outcome in aneurysmal subarachnoid haemorrhage: a preliminary study. J Clin Monit Comput. 2020: 34: 705-714.
49) Moriya M: Changes in prefrontal cortical oxygenation during tilt table orthostatic hypotension in subarachnoid haemorrhage patients. Adv Exp Med Biol. 2022: 1395: 35-38.
50) Ekelund A, Kongstad P, Säveland H, Romner B, Reinstrup P, Kristiansson KA, et al: Transcranial cerebral oximetry related to transcranial Doppler after aneurysmal subarachnoid haemorrhage. Acta Neurochir (Wien). 1998: 140: 1029-1035.
51) Silverman A, Kodali S, Strander S, Gilmore EJ, Kimmel A, Wang A, et al: Deviation from personalized blood pressure targets is associated with worse outcome after subarachnoid hemorrhage. Stroke. 2019: 50: 2729-2737.
52) Schwarz S, Georgiadis D, Aschoff A, Schwab S, et al: Effects of body position on intracranial pressure and cerebral perfusion in patients with large hemispheric stroke. Stroke. 2002: 33: 497-501.
53) Wojner AW, El-Mitwalli A, Alexandrov AV: Effect of head positioning on intracranial blood flow velocities in acute ischemic stroke: a pilot study. Critical care nursing quarterly. 2002: 24: 57-66.
54) Wojner-Alexander AW, Garami Z, Chernyshev OY, Alexandrov AV, et al: Heads down: flat positioning improves blood flow velocity in acute ischemic stroke. Neurology. 2005: 64: 1354-1357.
55) Hunter AJ, Snodgrass SJ, Quain D, Parsons MW, Levi CR, et al: HOBOE (Head-of-Bed Optimization of Elevation) Study: association of higher angle with reduced cerebral blood flow velocity in acute ischemic stroke. Physical therapy. 2011: 91: 1503-1512.
56) Olavarría VV, Arima H, Anderson CS, Brunser AM, Muñoz-Venturelli P, Heritier, S, et al: Head position and cerebral blood flow velocity in acute ischemic stroke: a systematic review and meta-analysis. Cerebrovasc Dis. 2014: 37: 401-408.
57) Anderson CS, Arima H, Lavados P, Billot L, Hackett ML, Olavarría VV, et al: Cluster-randomized, crossover trial of head positioning in acute stroke. N Engl J Med. 2017: 376: 2437-2447.
58) Feldman Z, Kanter MJ, Robertson CS, Contant CF, Hayes C, Sheinberg MA, et al: Effect of head elevation on intracranial pressure, cerebral perfusion pressure, and cerebral blood flow in head-injured patients. J Neurosurg. 1992: 76: 207-211.
59) Schneider GH, von Helden GH, Franke R, Lanksch WR, Unterberg A: Influence of body position on jugular venous oxygen saturation, intracranial pressure and cerebral perfusion pressure. Acta Neurochir Suppl (Wien). 1993: 59: 107-112.
60) Morraine JJ, Berre J, Melot C: Is cerebral perfusion pressure a major determinant of cerebral blood flow during head elevation in comatose patients with severe intracranial lesions? J Neurosurg. 2000: 92: 606-614.
61) Blissitt PA, Mitchell PH, Newell DW, Woods SL, Belza B, et al: Cerebrovascular dynamics with head-of-bed elevation in patients with mild or moderate vasospasm after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. Am J Crit Care. 2006: 15: 206-216.
62) Zhang Y, Rabinstein AA: Lower head of the bed position does not change blood flow velocity in subarachnoid hemorrhage. Neurocrit Care. 2011: 14: 73-76.
63) Kung DK, Chalouhi N, Jabbour PM, Starke RM, Dumont AS, Winn HR, et al: Cerebral blood flow dynamics and head-of-bed changes in the

setting of subarachnoid hemorrhage. Biomed Res Int. 2013: 640638.

64) Merino C, Heap P, Vergara V, Yáñez A, Rivera R, et al: Changes in cerebral blood flow velocity in supine and sitting position in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage. Rev Med Chil. 2014: 142: 1502-1509.

65) Yamamoto H, Watanabe K, Kojima N, Takada Y, Matsuki R: Safe early mobilisation of patients with acute subarachnoid haemorrhage using transcranial colour doppler assessment of cerebral haemodynamics: Three Cases Report. Physical Therapy Japan. 2024: 51: 125-132. (in Japanese)

Review

Disease-specific features of dynapenia and their clinical relevance

Keisuke Okano, Tetsuya Takahashi

Juntendo University Graduate School of Health Sciences

Abstract

Background: Dynapenia, which is defined as an age-related decline in muscle strength, has recently received a lot of attention due to its association with reduced physical function and adverse health outcomes. Unlike sarcopenia, which focuses on muscle mass, dynapenia focuses on strength rather than muscle mass, and it may serve as an early indicator of functional decline in older adults.

Methods: We conducted a narrative review using PubMed to identify studies related to physical therapy for individuals with dynapenia. Our focus was on articles involving hospitalized or frail older adults.

Results: Several studies have reported on the presence and clinical implications of dynapenia in populations with chronic conditions such as heart failure, chronic obstructive pulmonary disease, chronic kidney disease, and cancer. Many of these reports have examined the relationship between dynapenia and clinical outcomes, highlighting its potential relevance across different disease states. However, studies specifically addressing physical therapy interventions remain relatively limited.

Conclusion: This review summarized recent literature on dynapenia in the context of various chronic diseases. While there is growing clinical interest in dynapenia, especially in relation to physical therapy, further research is needed to clarify its role in patient care, such as longitudinal and intervention studies. Further research is needed to clarify the definition of dynapenia, and to investigate how individuals with dynapenia respond to physical therapy interventions.

Key Words: dynapenia, sarcopenia, rehabilitation, physical therapy, muscle strength

Juntendo Health Science Journal 7(1): 10-17, 2026（Received Jun. 11. 2025；Accepted Jul. 24. 2025）

Introduction

In recent years, the assessment of skeletal muscle has become increasingly important as attention has focused on frailty and sarcopenia, both of which are associated with a loss or reduction in skeletal muscle mass due to the population aging. The Asian Working Group for Sarcopenia (AWGS) has set diagnostic criteria for sarcopenia which recommend measuring skeletal muscle mass and strength[1].

Alongside sarcopenia, "dynapenia" derived from the Greek words for "dyna" (force) and "penia" (decrease), has attracted attention in recent years. However, the definition of "dynapenia" has yet to be determined. For example, one study operationally defined four groups of patients based on the AWGS diagnostic criteria for community-dwelling patients, and defined dynapenia as low muscle function and normal muscle mass[2]. In a study on the prognostic value of dynapenia in patients with cardiovascular disease, dynapenia was defined as having low muscle function (low muscle strength in this paper)[3]. As the definition of dynapenia is thus uncertain, it is expected that the definition of dynapenia will be clarified in the future.

Research into the clinical characteristics of dynapenia in each disease is still ongoing. This article describes the clinical relevance of dynapenia in each disease.

Methods

To investigate the clinical features of dynapenia, we conducted a PubMed article search on 5 January 2025. We used the filter 'Humans' and the keyword 'dynapenia', and obtained 357 articles. We assume that the definition of dynapenia varies from report to report, and that the categories of "low muscle function only"

Corresponding author: Tetsuya Takahashi
Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University
3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033
E-mail: te-takahashi@juntendo.ac.jp

and "normal muscle mass and low muscle function" are mixed. Based on these results, we identified the seven clinical conditions most frequently associated with dynapenia and compiled their key features, which are summarized in Table 1.

Results

1. Dynapenia and low muscle function

Muscle strength is defined by neural and muscular factors, and is reported to be proportional to muscle cross-sectional area. Neural factors include an increase in the type and total number of motor units mobilized (recruitment), an increase in the frequency of alpha motor nerve firing (recording), and the regulation of the time phase of motor unit activity (synchronization), which affect muscle strength[4]. In other words, dynapenia is mainly caused by a functional decline in muscle strength due to neurological factors, so evaluation and exercise therapy must be selected according to the pathophysiological condition.

2. Diabetes and dynapenia

The prevalence of dynapenia ranges from 3.9 to 28.2%[5-7]. Persistent hyperglycemia has multifaceted effects on muscles, nerves, and blood vessels, and may promote the development and progression of dynapenia. Sustained hyperglycemia causes an increase in reactive oxygen species, protein glycation, and the accumulation of advanced glycation end products (AGEs), which impair muscle cells and accelerate muscle protein degradation, resulting in decreased muscle contractile function and low muscle function. Chronic hyperglycemia also increases glucose production in the liver and induces insulin resistance in the liver and skeletal muscles. This results in decreased glucose uptake into muscles and an insufficient energy supply, leading to decreased muscle strength and endurance. Furthermore, hyperglycemia causes macrovascular and microvascular damage, resulting in reduced blood flow to muscle tissue and nerves. Furthermore, diabetic neuropathy contributes to low muscle function

Table 1 Prevalence, pathophysiological mechanisms, and risk factors of dynapenia across major chronic diseases

	Prevalence	Mechanisms	Risk factors
Diabetes	3.9 to 28.2%	• Hyperglycemia • Insulin resistance • AGEs accumulation	• Older age • High body fat • Obesity (type 2 diabetes)
Postmenopause	9.4 to 72.0%	• Estrogen deficiency • Visceral fat accumulation • Bone loss (FSH-related)	• Aging • Obesity • Low bone density
Cancer	Gastrointestinal cancer 20.1-43.8% Colorectal cancer 3.67 – 5.14% Breast cancer 54.4%	• Cancer cachexia • Chemotherapy effects • Inflammation	• Advanced cancer stage • Chemotherapy • Low physical activity
COPD	35.0%	• Systemic inflammation • Oxidative stress • Proteolysis	• Low physical activity • Severe airway obstruction • Nutritional imbalance
Musculoskeletal diseases	19.2-33.3%	• Joint dysfunction • Pain-induced disuse • Postural imbalance	• Obesity • Low trunk muscle mass • Higher back pain scores
CVD	7.6-44.6%	• Muscle dysfunction • Peripheral weakness • Impaired aerobic capacity	• Aging • Quad weakness • Abdominal obesity
PD	31.4-75.5%	• Dopamine neuron loss • Motor nerve dysfunction	• Disease severity • Rigidity & akinesia • Appetite loss

and loss of motor function. These combined factors may cause structural and functional changes in muscles, contributing to the progression of dynapenia[8].

In a Japanese study investigating the clinical characteristics of patients with type 2 diabetes mellitus found that the prevalence of dynapenia was approximately twice that of sarcopenia, and that the dynapenia group was characterized by a high body fat percentage and advanced age. Knee extensor muscle strength was particularly affected, suggesting that the accumulation of AGEs is associated with low muscle function and may contribute to muscle dysfunction in diabetic patients. Furthermore, the risk of low muscle function is higher in obese patients with type 2 diabetes[9]. Furthermore, a study that used the Fall Efficacy Scale to evaluate the fear of falling in diabetic patients found a statistically significant difference in dynapenia only in men. The study concluded that screening could help to identify patients with a fear of falling at an early stage[7].

Patients with diabetes and dynapenia have lower muscle function in their lower limbs than healthy subjects, but we have not found any studies reporting the effects of physical therapy interventions. We look forward to future reports on the most suitable exercise therapy for these patients.

3. Postmenopause and dynapenia

Since dynapenia prevalence ranges widely from 9.4% to 72.0%, and low muscle function is likely to occur after menopause, evaluating muscle strength is important[10-13]. Estrogen deficiency associated with menopause interacts with the aging process, accelerating the loss of muscle strength and muscle mass. It is also involved in adverse changes to body composition and the redistribution of fat to visceral areas, making patients more prone to abdominal obesity than before menopause[10]. Therefore, evaluating muscle strength is important in postmenopausal women. Grip strength, which is simple and easy to measure, has been validated as an effective screening tool in at least one study[14]. As grip strength testing is simple and easy to perform, it is recommended that it be performed as a screening tool.

In addition, postmenopausal women are at increased risk of osteoporosis, often accompanied by hormonal changes related to menopause. The mechanism is reported to involve decreased estrogen stimulating the secretion of follicle-stimulating hormone (FSH), a pituitary hormone which acts directly on bone tissue, causing bone loss[15]. Postmenopausal obesity can also lead to renal dysfunction due to metabolic abnormalities caused by insulin resistance, as well as renal damage induced by inflammatory cytokines secreted from adipocytes. Since vitamin D levels in the blood are reduced in chronic kidney disease, postmenopausal obesity and renal dysfunction may create a vicious cycle that further increases the risk of osteoporosis. These bone and metabolic changes may also be linked to muscle dysfunction. For example, dynapenic obesity has been reported to be associated with reduced cortical bone thickness and trabecular bone density[16], suggesting a possible interplay between decreased muscle function and skeletal fragility. Conversely, individuals with higher femoral T-scores are reported to have a lower risk of developing dynapenia[17], indicating that regular bone density monitoring after menopause may help identify individuals at risk of both osteoporosis and muscle weakness.

Several reports have examined the association of dynapenia after menopause. For example, a genetic polymorphism of the vitamin D receptor gene (the TT type) has been linked to reduced grip strength and dynapenia compared to the CC or CT types[11], and protein intake has been associated with the development of dynapenia[12].

Furthermore, a 12-week Tai Chi program for menopausal women was found to improve grip strength and physical function in the dynapenia group[18], and further reports on the effects of exercise therapy on dynapenia are anticipated.

4. Cancer and dynapenia

The prevalence of dynapenia in oncology ranges from 3.67 to 54.4% (half of all cases, depending on the report), with the most common sites being gastrointestinal cancer, hepatobiliary pancreatic cancer and colorectal cancer, as well as breast cancer[19-25]. Cancer cachexia is accompanied by the progression of secondary sarcopenia, which is the continuous loss of

skeletal muscle that is often difficult to reverse completely with conventional nutritional support. This leads to progressive functional impairment, including low muscle function. In oncology, decreased grip strength has been reported to be associated with decreased quality of life, cancer-related fatigue, decreased quadriceps muscle strength, an increased incidence of sarcopenia and complications, and mortality within 6 months after surgery[26-28]. Most studies used the AWGS or EWGSOP2 criteria to define the cutoff values for grip strength. However, although grip strength is a simple and easy test, some argue that a cancer-specific criterion should be established. For example, when the cut-off point for dynapenia was set using the EWGSOP2 criteria (below 27 kg for men and below 16 kg for women) and the median, the prevalence rates were 9.4% and 43.8%, respectively. One report proposed setting a threshold for dynapenia[21]. While the EWGSOP2 and AWGS criteria focus on age-related loss of muscle mass and muscle strength, they do not necessarily reflect cancer-specific low muscle function, such as that caused by chemotherapy and cachexia. This suggests the need to consider disease-specific criteria for dynapenia in the future.

Some studies have reported on the effects of exercise therapy in cancer patients with dynapenia. In a randomized controlled trial, breast cancer patients undergoing chemotherapy were assigned to one of three groups: aerobic exercise, resistance training, or usual care. The study lasted for the duration of chemotherapy (median 17 weeks) and reported that the resistance training group showed reversible improvement in dynapenia[25]. However, this improvement was insufficient to enhance QOL indices, suggesting the need for further intervention studies with cancer patients with dynapenia.

5. Chronic obstructive pulmonary disease and dynapenia

One such report that defined dynapenia as a decrease in grip strength and found that, in a sample 20 Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) patients, the prevalence was 35%[29]. COPD is a progressive respiratory disease characterized by persistent airflow limitation. Exacerbation of systemic inflammation causes an increase in inflammatory mediators and oxidative stress in the blood. This accelerates proteolysis and contributes to the development of skeletal muscle dysfunction. Nutritional imbalance and hypoxemia also affect metabolic abnormalities in skeletal muscle and contribute to a decline in physical function in COPD patients.

Several reports have investigated dynapenia in COPD patients as part of these musculoskeletal effects. Dynapenia in COPD patients was found to manifest as a decrease in maximal inspiratory pressure (MIP), grip strength and incremental shuttle walking test (ISWT) distance compared to patients without dynapenia. Furthermore, the study reported that the cut-off values for detecting dynapenia in COPD patients were: forced expiratory volume in one second (FEV1) < 40%, MIP < 71 cmH2O, maximum expiratory pressure < 110 cmH2O, and ISWT distance < 230 m[29]. Additionally, a study investigating the association between COPD patients and activity level revealed a negative correlation between dynapenia prevalence and activity levels in non-obese male COPD patients. This suggests that interventions aimed at increasing activity level in COPD patients could potentially reduce dynapenia[30].

6. Musculoskeletal disorders and dynapenia

The prevalence of dynapenia in musculoskeletal diseases has been reported to range from 19.2% to 33.3%[31-32]. As dynapenia is defined by muscle strength and physical function, the presence of musculoskeletal disease is important. In one report, lower extremity muscle strength was set in tertiles for knee osteoarthritis patients aged 60 years and over was categorized into tertiles using an isokinetic muscle strength device, with the lowest tertile being defined as dynapenia. Knee osteoarthritis patients who are obese and have dynapenia have been reported to have decreased gait speed, physical function scores and activities of daily living (ADLs), highlighting the need for screening and intervention[31].

The prevalence of dynapenia in patients with spinal disease aged 65 years or older has been reported to be 19.2%, being associated with poorer sagittal spinal

alignment of the spine, lower trunk muscle mass, higher back pain scores, and a lower health-related quality of life than in a group with preserved muscle strength[32].

Other reports on community-dwelling older patients highlight the importance of addressing low muscle strength. For example, a combination of obesity and low muscle strength was found to increase the risk of future knee replacement by 3.4-fold compared to a group without obesity or low muscle strength[33].

To date, no studies have investigated exercise therapy for dynapenia in musculoskeletal diseases, highlighting the need for future research.

7. Cardiovascular disease and dynapenia

The prevalence of dynapenia in patients with cardiovascular disease (CVD) ranges from 7.6% to 44.6%[3, 34-37]. A high frequency of diaphragm muscle dysfunction has been reported in heart failure patients with dynapenia, with increasing age and decreased knee extensor muscle strength leading to a shorter 6-minute walking distance[36]. Furthermore, the presence of dynapenia alongside abdominal obesity increases the likelihood of myocardial infarction and peripheral arterial disease, as well as leading to an elevated risk of cardiovascular mortality. This underscores the importance of early screening and interventions for low muscle function[3, 34, 37].

To date, no studies have investigated exercise therapy for dynapenia in CVD, highlighting the need for future research.

8. Parkinson's disease and dynapenia

The prevalence of dynapenia in Parkinson's disease (PD) patients is 31.4-75.5%, which is higher than in patients with other diseases[38-41]. PD is a neurodegenerative disorder characterized by motor symptoms such as tremor, involuntary movement at rest, muscle rigidity, and akinesia. These symptoms are caused by a decrease in dopamine neurons in the substantia nigra and striatum and cortex. PD patients often experience decreased appetite and reduced food intake due to medication side effects of medication, constipation, sensory disorders, weight loss, muscle weakness, and impaired motor nerve function. These factors may contribute to the development and progression of muscle weakness (dynapenia).

Several reports have investigated the relationship between muscle mass and muscle strength in PD and activities of daily living. It has been reported that there is no significant difference in muscle mass between PD patients and healthy people of the same age. Furthermore, functional decline in grip strength and walking speed has been associated with impairment in activities of daily living. It has also been reported that dynapenia is likely to be at the core of clinical disability in PD[38]. It has also been reported that PD is a progressive disease, and that dynapenia is associated with disease severity[39]. PD is classified according to the Hoehn & Yahr classification; dynapenia is reported to be most prevalent in women at stage 2 and in men at stage 3. Early muscle strength assessment and rehabilitation intervention are essential, and prevention and improvement of dynapenia may contribute to improved clinical outcomes[41].

To date, no studies have investigated exercise therapy for dynapenia in Parkinson's disease, highlighting the need for future research.

Conclusion

This article describes the clinical characteristics of dynapenia and its associated diseases. While there are currently many reports of associations based on observational studies, few intervention studies have been conducted. We hope that future research on dynapenia will progress in the future and clarify the significance of rehabilitation for this condition.

Ethical approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1） Okura Y, Ramadan MM, Ohno Y, Mitsuma W, Tanaka K, Ito M, et al: Impending epidemic: future projection of heart failure in Japan to the

year 2055. Circ J. 2008: 72: 489-491.
2) Yamada M, Kimura Y, Ishiyama D, Nishio N, Abe Y, Kakehi T, et al: Differential Characteristics of Skeletal Muscle in Community-Dwelling Older Adults. J Am Med Dir Assoc. 2017: 18: 807.e9-807.e16.
3) Uchida S, Kamiya K, Hamazaki N, Nozaki K, Ichikawa T, Nakamura T, et al: Prognostic utility of dynapenia in patients with cardiovascular disease. Clin Nutr. 2021: 40: 2210-2218.
4) Takahashi T, Okada Y, Takara Y, Morisawa T, Saito M, Fujiwara T: Practice and evidence of skeletal muscle assessment in heart failure patients. Jpn J Rehabil Med. 2020: 57: 1136-1142.
5) Santos DNDD, Coelho CG, Diniz MFHS, Duncan BB, Schmidt MI, Bensenor IJM, et al: Dynapenia and sarcopenia: association with the diagnosis, duration and complication of type 2 diabetes mellitus in ELSA-Brasil. Cad Saude Publica. 2024: 40: e00081223.
6) Mori H, Kuroda A, Yoshida S, Yasuda T, Umayahara Y, Shimizu S, et al: High prevalence and clinical impact of dynapenia and sarcopenia in Japanese patients with type 1 and type 2 diabetes: Findings from the Impact of Diabetes Mellitus on Dynapenia study. J Diabetes Investig. 2021: 12: 1050-1059.
7) Ida S, Murata K, Ishihara Y, Imataka K, Kaneko R, Fujiwara R, et al: A comparison of the associations of dynapenia and sarcopenia with fear of falling in elderly diabetic patients. Nihon Ronen Igakkai Zasshi. 2017: 54: 537-545. (in Japanese)
8) Nebuloni CC, Máximo RO, de Oliveira C, Alexandre TDS: Uncontrolled Diabetes as an Associated Factor with Dynapenia in Adults Aged 50 Years or Older: Sex Differences. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2020: 75: 1191-1197.
9) Mori H, Kuroda A, Ishizu M, Ohishi M, Takashi Y, Otsuka Y, et al: Association of accumulated advanced glycation end-products with a high prevalence of sarcopenia and dynapenia in patients with type 2 diabetes. J Diabetes Investig. 2019: 10: 1332-1340.
10) Choi Y, Cho J, Kim J, Bae JH, Cho EJ, Chang E, et al: Dynapenic-abdominal obesity as an independent risk factor for chronic kidney disease in postmenopausal women: a population-based cohort study. Menopause. 2022: 29: 1040-1046.
11) García-Vigara A, Monllor-Tormos A, García-Pérez MÁ, Tarín JJ, Cano A: Genetic variants of the vitamin D receptor are related to dynapenia in postmenopausal women. Maturitas. 2023: 171: 40-44.
12) Filion ME, Barbat-Artigas S, Dupontgand S, Fex A, Karelis AD, Aubertin-Leheudre M: Relationship between protein intake and dynapenia in postmenopausal women. J Nutr Health Aging. 2012: 16: 616-619.
13) Álvarez-Córdova LR, Artacho R, Chedraui P, Arteaga-Pazmiño C, Sánchez-Briones M, Ruiz-López MD: Arm muscle area is correlated to handgrip strength in postmenopausal women. Gynecol Endocrinol. 2024: 40: 2420937.
14) Dulac M, Boutros GE, Pion C, Barbat-Artigas S, Gouspillou G, Aubertin-Leheudre M: Is handgrip strength normalized to body weight a useful tool to identify dynapenia and functional incapacity in post-menopausal women? Braz J Phys Ther. 2016: 20: 510-516.
15) Sun L, Peng Y, Sharrow AC, Iqbal J, Zhang Z, Papachristou DJ, et al: FSH directly regulates bone mass. Cell. 2006: 125: 247-260.
16) Nakano W, Ozaki E, Kato M, Tsukamoto T, Ono S, Tomida S, et al: Association between bone health and dynapenic obesity in postmenopausal women. Geriatr Gerontol Int. 2024: 24: 378-384.
17) García-Alfaro P, García S, Rodríguez I, Pérez-López FR: Handgrip strength, dynapenia, and related factors in postmenopausal women. Menopause. 2021 : 29: 16-22.
18) Barbat-Artigas S, Filion ME, Dupontgand S, Karelis AD, Aubertin-Leheudre M: Effects of tai chi training in dynapenic and nondynapenic postmenopausal women. Menopause. 2011: 18: 974-979.
19) Botsen D, Ordan MA, Barbe C, Mazza C, Perrier M, Moreau J, et al: Dynapenia could predict

chemotherapy-induced dose-limiting neurotoxicity in digestive cancer patients. BMC Cancer. 2018: 18: 955.
20) Perrier M, Ordan MA, Barbe C, Mazza C, Botsen D, Moreau J, et al: Dynapenia in digestive cancer outpatients: association with markers of functional and nutritional status (the FIGHTDIGO study). Support Care Cancer. 2022: 30: 207-215.
21) Martin P, Botsen D, Brugel M, Bertin E, Carlier C, Mahmoudi R, et al: Association of Low Handgrip Strength with Chemotherapy Toxicity in Digestive Cancer Patients: A Comprehensive Observational Cohort Study (FIGHTDIGOTOX). Nutrients. 2022: 14: 4448.
22) Rechinelli AB, Marques IL, de Morais Viana ECR, da Silva Oliveira I, de Souza VF, Petarli GB, et al: Presence of dynapenia and association with anthropometric variables in cancer patients. BMC Cancer. 2020: 20: 1010.
23) Jiménez-Sánchez A, Pereira-Cunill JL, Limón-Mirón ML, López-Ladrón A, Salvador-Bofill FJ, García-Luna PP: A Cross-Sectional Validation Study of Camry EH101 versus JAMAR Plus Handheld Dynamometers in Colorectal Cancer Patients and Their Correlations with Bioelectrical Impedance and Nutritional Status. Nutrients. 2024: 16: 1824.
24) Nasu N, Yasui-Yamada S, Kagiya N, Takimoto M, Kurokawa Y, Tani-Suzuki Y, et al: Muscle strength is a stronger prognostic factor than muscle mass in patients with gastrointestinal and hepatobiliary pancreatic cancers. Nutrition. 2022: 103-104: 111826.
25) Adams SC, Segal RJ, McKenzie DC, Vallerand JR, Morielli AR, Mackey JR, et al: Impact of resistance and aerobic exercise on sarcopenia and dynapenia in breast cancer patients receiving adjuvant chemotherapy: a multicenter randomized controlled trial. Breast Cancer Res Treat. 2016: 158: 497-507.
26) Kilgour RD, Vigano A, Trutschnigg B, Hornby L, Lucar E, Bacon SL, et al: Cancer-related fatigue: the impact of skeletal muscle mass and strength in patients with advanced cancer. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2010: 1: 177-185.
27) Chen CH, Ho-Chang, Huang YZ, Hung TT: Hand-grip strength is a simple and effective outcome predictor in esophageal cancer following esophagectomy with reconstruction: a prospective study. J Cardiothorac Surg. 2011: 6: 98.
28) Kilgour RD, Vigano A, Trutschnigg B, Lucar E, Borod M, Morais JA: Handgrip strength predicts survival and is associated with markers of clinical and functional outcomes in advanced cancer patients. Support Care Cancer. 2013: 21: 3261-3270.
29) Mansour KMK, Goulart CDL, Carvalho-Junior LCS, Trimer R, Borghi-Silva A, Silva ALGD: Pulmonary function and functional capacity cut-off point to establish sarcopenia and dynapenia in patients with COPD. J Bras Pneumol. 2019: 45: e20180252.
30) Choi YA, Lee JS, Kim YH: Association between physical activity and dynapenia in older adults with COPD: a nationwide survey. Sci Rep. 2022: 12: 7480.
31) Batsis JA, Zbehlik AJ, Pidgeon D, Bartels SJ: Dynapenic obesity and the effect on long-term physical function and quality of life: data from the osteoarthritis initiative. BMC Geriatr. 2015: 15: 118.
32) Tanaka Y, Miyagi M, Inoue G, Hori Y, Inage K, Murata K, et al: Muscle strength rather than appendicular skeletal muscle mass might affect spinal sagittal alignment, low back pain, and health-related quality of life. Sci Rep. 2023: 13: 9894.
33) Balogun SA, Graves SE, Lorimer M, Cicuttini F, Scott D, Jones G, et al: Do Older Adults with Low Muscle Mass or Strength, in the Presence of Obesity, Have an Increased Risk of Joint Replacement Over 13 Years? Calcif Tissue Int. 2020: 107: 10-17.
34) da Silva CA, Mendes RML, de Moraes Santana N, Dos Santos NF, Pinho CPS: Dynapenic abdominal obesity in hospitalized elderly patients with acute myocardial infarction. Exp Gerontol. 2021: 154: 111512.
35) Ramírez PC, de Oliveira DC, de Oliveira Máximo R, de Souza AF, Luiz MM, Delinocente MLB, et

al: Is dynapenic abdominal obesity a risk factor for cardiovascular mortality? A competing risk analysis. Age Ageing. 2023: 52: afac301.
36) Kinugasa Y, Miyagi M, Sota T, Yamada K, Ishisugi T, Hirai M, et al: Dynapenia and diaphragm muscle dysfunction in patients with heart failure. Eur J Prev Cardiol. 2018: 25: 1785-1786.
37) Zheng Y, Sun Y, Zhang Z, Chen X, Han P, Xu C, et al: Combined Effect of Dynapenia and Abdominal Obesity on the Prevalence of Peripheral Artery Disease in Older Adults Over 75 Years Old in China. Clin Appl Thromb Hemost. 2023: 29: 10760296231169503.
38) Barichella M, Pinelli G, Iorio L, Cassani E, Valentino A, Pusani C, et al: Sarcopenia and Dynapenia in Patients With Parkinsonism. J Am Med Dir Assoc. 2016: 17: 640-646.
39) Ozer FF, Akın S, Gultekin M, Zararsız GE: Sarcopenia, dynapenia, and body composition in Parkinson's disease: are they good predictors of disability?: a case-control study. Neurol Sci. 2020: 41: 313-320.
40) de Medeiros LC, da Luz MCL, da Costa Pereira JP, Bezerra GKA, Cabral PC: Nutritional status and dynapenia in people living with Parkinson's disease: a cross-sectional study. Neurol Sci. 2022: 43: 2509-2517.
41) Yazar T, Yazar HO, Zayimoğlu E, Çankaya S: Incidence of sarcopenia and dynapenia according to stage in patients with idiopathic Parkinson's disease. Neurol Sci. 2018: 39: 1415-1421.

Review

Functional outcomes and rehabilitation strategies in infratentorial stroke: toward personalized care: a narrative review

Shota Kishimoto[1)], Koshiro Haruyama[1, 2)]

[1)] Department of Rehabilitation, Juntendo University Hospital
[2)] Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Abstract

Infratentorial stroke (ITS) accounts for approximately 15%–20% of all strokes and is often associated with high mortality and diverse neurological symptoms. Even when motor paresis is mild, cerebellar ataxia, trunk dysfunction, and dysphagia frequently limit independence in gait and activities of daily living. Despite this, research on rehabilitation and functional outcomes after ITS remains limited compared with supratentorial stroke.

This narrative review summarizes literature published between 1990 and 2025, focusing on outcome measures used to evaluate functional recovery and the effectiveness of various rehabilitation interventions. Recent evidence indicates that robotic-assisted gait training can improve balance and walking independence in patients with cerebellar ataxia or trunk dysfunction. However, most studies to date have been small and short-term, and evidence remains insufficient regarding interventions tailored to diverse symptom profiles and their long-term outcomes.

Future multicenter studies incorporating objective assessments of cerebellar ataxia and vestibular dysfunction are needed to develop personalized rehabilitation strategies and enhance patients' quality of life.

Key Words: infratentorial stroke, gait, functional recovery

Juntendo Health Science Journal 7(1): 18-25, 2026（Received Jan. 6. 2026 ; Accepted Feb. 19. 2026）

Introduction

Infratentorial stroke (ITS) refers to cerebrovascular lesions involving the brainstem and cerebellum and accounts for approximately 15%–20% of all strokes worldwide[1-3)]. Although ITS is often associated with high mortality, patients frequently present with neurological symptoms that are severe and diverse. Tailored rehabilitation, however, has the potential to facilitate meaningful functional recovery, resulting in highly heterogeneous prognoses[4)].

In contrast, supratentorial stroke (STS) involves ischemic or hemorrhagic lesions located above the cerebellar tentorium, affecting cortical and subcortical structures of the cerebral hemispheres. Most prior studies have focused on STS, and systematic evidence regarding lesion-specific characteristics and functional outcomes in ITS remains limited.

Brainstem hemorrhage accounts for approximately 10% of all intracerebral hemorrhages, with reported mortality rates ranging from 40% to 60%[5)]. In particular, primary pontine hemorrhage has a 30-day mortality rate of up to 58%[6, 7)], and major risk factors include hypertension, diabetes mellitus, dyslipidemia, and smoking[8)]. In contrast, approximately 60% of patients with medullary infarction achieve favorable outcomes 1 year after onset[9)], and midbrain infarction generally has a relatively good prognosis[10)]. However, because these lesions affect centers that regulate respiration, circulation, and consciousness, even minor structural damage can lead to severe complications[11)].

Clinically, ITS presents with a wide range of neurological symptoms, including balance disorders, cerebellar ataxia, oculomotor disturbances, and dysphagia[11)]. These conditions are characterized by substantial variation in severity and recovery potential[4, 12)].

Corresponding author: Koshiro Haruyama
Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science Juntendo University
2-1-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-8421
E-mail: k.haruyama.us@juntendo.ac.jp

Studies using the Barthel Index have shown that patients with ITS demonstrate significantly greater improvements in activities of daily living (ADL) compared with those with STS[4, 12]. However, prognosis varies according to lesion site and clinical presentation; for example, only 34% of patients with pontine infarction are discharged home[13]. Persistent cerebellar ataxia and trunk dysfunction have also been reported as major factors limiting the recovery of gait and daily activities[14].

Thus, ITS represents a heterogeneous group of disorders with diverse trajectories in survival and functional outcomes. Establishing rehabilitation strategies based on lesion- and symptom-specific understanding is therefore essential.

Therefore, this narrative review aims to summarize the clinical characteristics, functional recovery processes, and rehabilitation implications for patients with ITS, with a particular focus on symptom-specific impairments such as trunk control and coordination that are not fully captured by motor paralysis alone.

Materials and methods

1. Data collection

To investigate the current status of research on patients with ITS, a comprehensive literature search was conducted using domestic and international databases. For Japanese publications, the Ichushi Web (Igaku Chuo Zasshi) database was searched, while PubMed and Web of Science were used for international publications.

Articles published between 1990 and 2025 were included. The following keywords were combined using Boolean operators (AND/OR): "brainstem," "stroke," "pontine," "medulla," "midbrain," "infratentorial," "rehabilitation," "gait," "walking," "ambulation," and "mobility." Studies were included if they met the following criteria: (1) participants were adults (≥18 years old) diagnosed with stroke, and (2) outcome measures included assessments of physical functions such as gait or trunk control. Each database was searched from its inception to the final search date of September 27, 2025.

2. Study selection and data extraction

The retrieved literature was screened to include studies that specifically targeted patients with ITS. Reviews, expert opinions, case reports, and studies that did not analyze ITS as a distinct subgroup were excluded.

For each eligible study, the following information was extracted: author(s), year of publication, study design, participating institutions, disease stage, participant characteristics, assessment items, and main findings (Figure 1).

Results

1. Study selection process

The database search initially identified 436 articles addressing gait function in stroke patients and involving lesions of the brainstem or other infratentorial regions. Of these, 123 were published in Japanese and 313 in international journals. After screening titles and abstracts, 15 international studies met the eligibility criteria and were ultimately included in this review (Table 1).

2. Functional recovery and prognostic factors in ITS

1) Functional prognosis of pontine infarction and lesion-specific differences.

Several studies have reported that patients with ITS generally exhibit favorable functional recovery, including marked improvements in walking ability during the subacute phase and high rates of independent ambulation at discharge[15, 16].

In contrast, large lacunar infarcts (LLIs)−defined as small perforating artery infarctions exceeding the conventional lacunar infarct size (≤15 mm in diameter)−have been associated with poorer functional outcomes following acute-phase rehabilitation.

In a study categorizing 68 patients with acute pontine infarction into ventral lacunar, dorsal lacunar, and LLI groups, the LLI group demonstrated significantly higher rates of cognitive impairment, motor weakness, and dysphagia at discharge. Patients in the LLI group also tended to have longer hospital stays, and the proportion discharged home was lower (25.6%) compared with the dorsal (53.9%) and ventral (40.0%) lacunar groups[13].

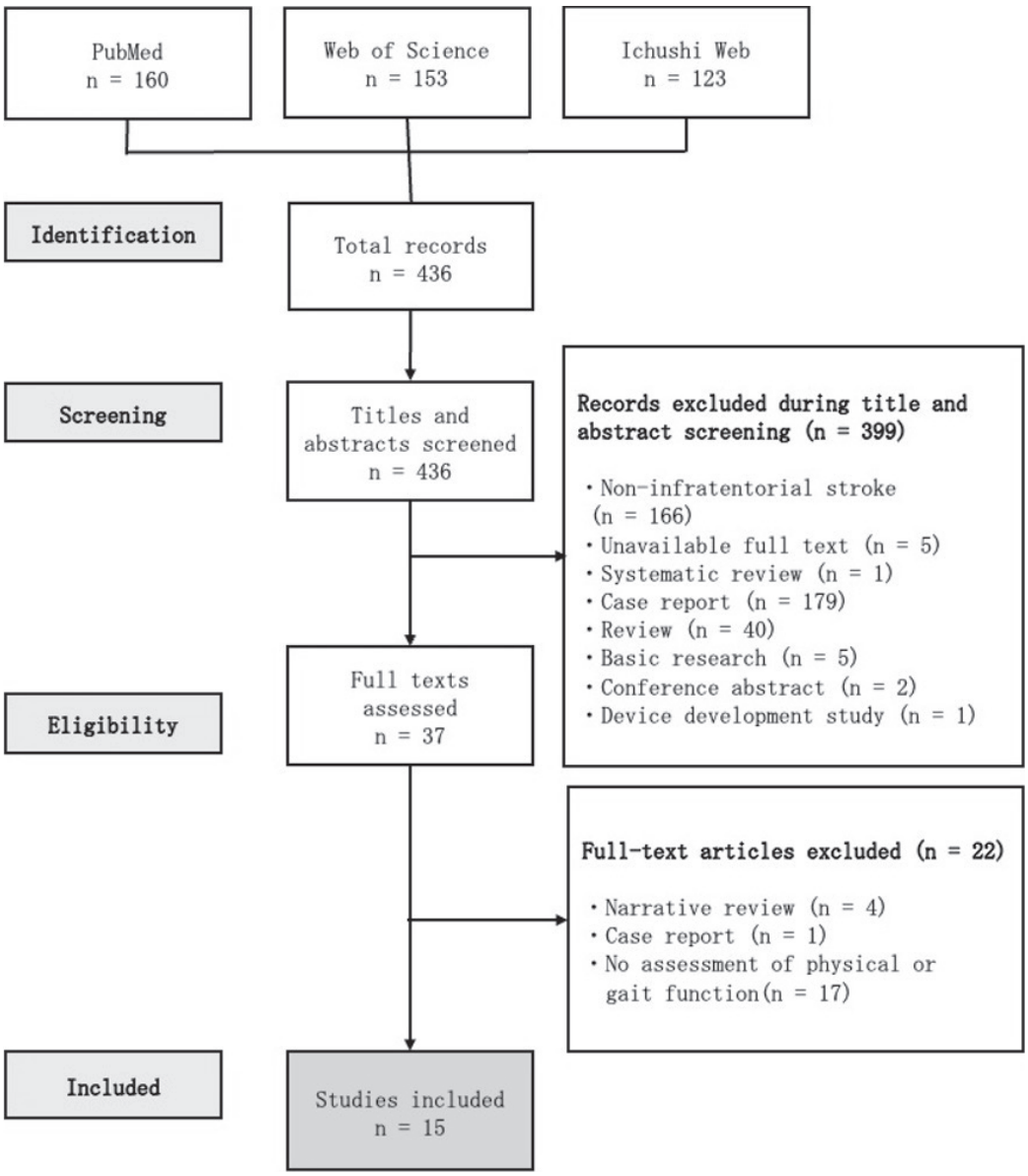


Fig.1 Flowchart of study selection for the narrative review

2) Major factors determining functional recovery

The National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) has been reported as the strongest predictor of functional recovery in patients with ITS. Patients with higher NIHSS scores demonstrated significantly poorer walking ability, as measured by the Lindmark Scale, and reduced mobility, as assessed by the Rivermead Mobility Index (RMI), compared with those with lower scores[15]. In contrast, factors such as age, stroke subtype, lesion extent, and time from onset to the initiation of rehabilitation were not significantly associated with walking outcomes.

The importance of trunk function has also been emphasized. Trunk Control Test (TCT) scores at admission were significantly correlated with basic ADL (BADL) at discharge ($p < 0.01$)[16].

3. Differences in gait patterns between ITS and STS

A kinematic study of patients with mild motor paresis following ischemic stroke reported distinct differences in gait patterns between STS and ITS.

In patients with STS, characteristic findings included excessive pelvic obliquity in the frontal plane, exaggerated hip internal rotation, and bilateral plantar flexor weakness.

In contrast, patients with ITS commonly exhibited anterior pelvic tilt in the sagittal plane, predominant hip flexion with limited extension, incomplete knee extension, and excessive ankle dorsiflexion[17].

Table 1 Summary of studies involving patients with ITS

Author (Year)	Participants	Institutions	Disease phase	Study design	Outcomes	Main findings
Chua et al. (1996)[4]	Brainstem stroke (n=53)	Single center	Subacute	Case series	MBI, ataxia/dysphagia	MBI improved after rehabilitation, admission MBI predicted discharge MBI (β =0.597, p<.001).
Bassetti et al. (1996)[26]	Pontine infarction (n=36)	Single center	Acute	Prospective observational	Outcome at 1 month	Three pontine syndromes (ventral/tegmental/bilateral), ~2/3 had good outcomes, large ventral infarcts predicted poor prognosis.
Nelles et al. (1998)[14]	Medullary infarction (n=18)	Single center	Acute	Prospective observational	FIM-motor, SF-36	FIM-motor improved (50.9→84.9), 85% achieved independent walking, larger initial deficit associated with greater gain, PICA lesions showed delayed recovery.
Teasell et al. (2002)[12]	Brainstem stroke (n=85)	Single center	Recovery	Retrospective observational	Hemiparesis, ataxia, diplopia, dysarthria, dysphagia	Differences among pons, cerebellum, and medulla: hemiparesis (p<.0001), ataxia (p=.0055), pneumonia (p=.0395).
Gialanella et al. (2007)[15]	Infratentorial stroke (n=72)	Single center	Acute	Retrospective observational	Lindmark Scale, RMI, NIHSS	Lindmark and RMI improved (p<.001), improvement correlated with initial NIHSS, age/lesion size not predictive.
Gialanella et al. (2008)[16]	Infratentorial stroke (n=45)	Single center	Acute	Prospective observational	Lindmark Scale, Katz Index, FMA, TCT	ITS group showed greater gains (BI/Lindmark/Katz) vs supratentorial, discharge BADL correlated with initial TCT (r=-0.483).
Morton et al. (2010)[24]	Cerebellar disorders (n=25)	Single center	Chronic	Prospective observational	ICARS; gait speed, step length, cadence	ICARS worsened over 1 year in degenerative group (posture/gait subscores), stable or improved in static lesions (infarction/tumor resection).
Maeshima et al. (2012)[13]	Pontine infarction (n=68)	Single center	Acute	Retrospective observational	FIM, home discharge rate	Recovery differed by lesion type, LLI—more paresis, lower FIM, longer stay, DLI—milder symptoms, shorter stay, better recovery.
Bultmann et al. (2014)[23]	Cerebellar infarction (n=23)	Multicenter	Acute	Prospective observational	ICARS, stabilometer	ICARS revealed moderate to severe gait, posture, and lower-limb ataxia, especially in the SCA group, with marked improvement after 3 months.
Lee et al. (2017)[20]	Infratentorial lesions (n=16)	Single center	Recovery	Longitudinal study	Falls, WBA, PSV	No group difference in BBS, WBA, PSV, falls predicted by age and PSV (EC/soft), not lesion site.
Kim et al. (2019)[18]	Infratentorial stroke (n=19)	Single center	Subacute	Crossover study	BBS, TIS, FMA, 10MWT, SARA	RAGT + CPT improved BBS, balance, FMA-LE, SARA vs CPT, no difference in TIS, FAC, 10MWT.
Belayeva et al. (2020)[17]	Supratentorial (n=15) vs infratentorial (n=9)	Multicenter	Recovery	Prospective observational	Gait kinematics	Kinematic gait differences, infratentorial-pelvic anterior tilt, hip hyperflexion, ankle dorsiflexion, supratentorial-pelvic elevation, hip internal rotation, knee limited extension.
Naoi et al. (2020)[25]	Brainstem infarction (n=47)	Multicenter	Acute	Retrospective observational	Days to achieve static standing and straight walking, SCP	Lower lateral medulla group showed fewer days to static standing and lower SCP vs other groups.
Chu et al. (2020)[27]	Infratentorial stroke (n=84)	Single center	Subacute	Retrospective observational	BI, mRS, BBS, FMA	No recovery difference between ICH and IS (ΔBI, ΔFMA, ΔBBS n.s.).
Son et al. (2022)[19]	Cerebellar and brainstem stroke (n=22)	Single center	Acute	Retrospective observational	BBS, FAC, MBI	EXOWALK improved BBS, FAC, MBI in ataxic and hemiparetic groups, no differences by demographics or stroke type.

SCA, superior cerebellar artery; PICA, posterior inferior cerebellar artery; ICARS, International Cooperative Ataxia Rating Scale; MBI, Modified Barthel Index; STS, supratentorial stroke; ITS, infratentorial stroke; RMI, Rivermead Mobility Index; NIHSS, National Institutes of Health Stroke Scale; VA, vertebral artery; FIM, functional independence measure; LMI, lateral medullary infarctions; BI, Barthel Index; BADL, basic activities of daily living; RAGT, robotic-assisted gait training; CPT, conventional physical therapy; FMA, Fugl-Meyer assessment; TIS, trunk impairment scale; BBS, Berg Balance Scale; FAC, functional ambulation categories; 10MWT, 10-meter walk test; FES, falls efficacy scale; SARA, Scale for the Assessment and Rating of Ataxia; SCP, scale for contraversive pushing; CNS, Canadian Neurological Scale; MMSE, Mini-Mental State Examination; LLI, large lacunar infarct; DLI, dorsal lacunar infarct; VLI, ventral lacunar infarct; TCT, trunk control test; WBA, weight bearing asymmetry; PSV, postural sway velocity; mRS, modified Rankin scale; EQ-5D, EuroQol 5 dimensions; 6-MWT, 6-minute walk test; MAL, motor activity log; IS, ischemic stroke; ICH, intracerebral hemorrhage

4. Individualized rehabilitation strategies and the role of robotic technology

1) Effectiveness of robotic-assisted gait training (RAGT)[18]

(1) Improvement in dynamic and static balance

Following RAGT combined with conventional physical therapy, Berg Balance Scale (BBS) score increased by an average of 6.5 points, exceeding the minimal detectable change (MDC) of 6 points and indicating a clinically meaningful improvement. Moreover, the mediolateral velocity of the center of pressure (COP), an indicator of static balance, significantly decreased—particularly under eyes-closed conditions, where visual input was restricted.

(2) Reduction of cerebellar ataxia

RAGT combined with conventional therapy significantly improved the gait and stance subscores of the Scale for the Assessment and Rating of Ataxia (SARA) compared with conventional therapy alone.

(3) Enhancement of lower-limb motor function

Lower extremity Fugl-Meyer Assessment (FMA-LE) scores were significantly higher in the RAGT group than in the control group (p = 0.001), indicating

greater recovery of lower-limb motor function.

2) Exoskeleton-based RAGT and task-specific training for cerebellar ataxia[19)]

Intervention studies using exoskeleton-type RAGT, such as EXOWALK®, have reported significant improvements in gait ability, BBS scores, Modified Barthel Index (MBI), and Functional Ambulation Category (FAC) in patients with cerebellar ataxia, including those with ITS.

5. Prediction of fall risk using quantitative balance assessment

Studies employing quantitative balance assessment systems, such as the Balance Master (BM), have identified key factors associated with fall risk in poststroke patients[20)]. Results showed that older age (≥ 65 years) and increased postural sway velocity (PSV) under eyes-closed and soft-surface conditions were significant predictors of falls. In particular, PSV under the eyes-closed, soft-surface (ECSS) condition was markedly higher in the fall group, and a cutoff value of 5.30°/s predicted falls with high sensitivity and specificity.

These findings indicate that postural sway under conditions with restricted visual and proprioceptive input represents the most critical dynamic characteristic for assessing fall risk.

Discussion

Patients with ITS generally demonstrate favorable functional recovery following rehabilitation; however, some individuals still experience suboptimal outcomes, and the factors influencing walking independence in ITS remain incompletely understood. Clinical variability in outcomes has been reported in pontine infraction[26)], and lateropulgon may affect functional recovery[25)]. Recovery patterns may differ according to strake subtype[27)], suggesting heterogeneity in ITS.Lesions involving the brainstem and cerebellum can affect multiple nuclei and relay pathways responsible for ocular movements, vestibular function, somatosensory processing, and voluntary motor control. Consequently, balance impairment in ITS is thought to result from disrupted sensory integration, impaired postural control, and muscle weakness[18)]. These heterogeneous neurological deficits may produce a characteristic gait pattern marked by excessive anterior pelvic tilt and increased hip flexion, leading to reduced step length and step width and ultimately contributing to gait instability[17)]. Longitudinal changes in gait and posture have been reported in cerebellar stroke[23, 24)]. Therefore, developing individualized, multidimensional rehabilitation programs is essential. Such programs should integrate exercises that promote reweighting of visual, vestibular, and proprioceptive inputs for postural and gait relearning[21)], along with coordination training and vestibular rehabilitation[22)].

Recently, RAGT and exoskeleton-type walking assist devices have received increasing attention. These systems enhance sensory feedback during walking and provide task-specific training that facilitates the reorganization of trunk–lower limb coordination. They are considered clinically valuable rehabilitation tools that support and complement sensorimotor integration.

In patients with ITS, RAGT has been reported to improve trunk stability and reduce lateral sway, thereby contributing to better dynamic balance.

However, current clinical assessment tools have several limitations. Conventional measures, such as the FMA and the BBS, primarily evaluate the severity of motor paralysis and balance ability but do not adequately capture trunk function, cerebellar ataxia, or vestibular dysfunction−key features of ITS.

Recent studies using quantitative balance assessment systems, such as the BM, have identified factors predictive of fall risk in poststroke patients, including older age and increased PSV under challenging sensory conditions. These findings highlight the growing need to quantitatively assess postural instability in ITS patients to better understand their balance-control mechanisms and to guide targeted rehabilitation strategies.

Looking ahead, it will be essential to establish a comprehensive, multidimensional assessment framework for ITS by integrating various quantitative technologies−such as the video head impulse test (vHIT) for evaluating the vestibulo-ocular reflex (VOR), inertial measurement units (IMUs) for motion

analysis, stabilometric measurements of postural sway, and three-dimensional motion capture systems.

To further advance rehabilitation for patients with ITS, three key directions should be prioritized. First, promoting multicenter collaborative research will be critical for enhancing generalizability and improving data robustness. Second, developing rehabilitation programs specifically tailored to address cerebellar ataxia and vestibular dysfunction will be essential for establishing novel and effective intervention strategies. Third, implementing quantitative evaluation technologies, such as vHIT and IMUs, will help visualize individual sensory-integration characteristics and enable the optimization of rehabilitation protocols based on objective data.

Conclusion

This review summarized current evidence on functional outcomes and prognostic factors in patients with ITS and highlighted the unique features and rehabilitation challenges associated with this population. Although patients with ITS generally demonstrate favorable functional recovery, some individuals still experience suboptimal outcomes, and the factors influencing walking independence remain insufficiently understood.

Even when motor paralysis is mild, cerebellar ataxia, impaired trunk control, dysphagia, and dysarthria can substantially limit walking ability and independence in daily activities. These findings indicate that in patients with ITS, rehabilitation strategies focusing solely on motor paralysis are insufficient, and that comprehensive assessment and intervention targeting trunk control and sensory integration are essential to address disease-specific impairments. Accurate identification of these deficits is therefore essential for designing effective rehabilitation strategies and predicting functional outcomes.

Recent studies have demonstrated the effectiveness of RAGT and the prognostic value of ataxia-specific assessment tools, such as the SARA, which increasingly complement traditional motor impairment-based evaluation systems.

Nevertheless, several challenges remain, including small sample sizes, an emphasis on short-term outcomes, and the limited availability of symptom-specific rehabilitation approaches. Future efforts should focus on conducting large-scale multicenter studies and establishing multidimensional assessment frameworks that incorporate trunk function, coordination, and vestibular function.

Moreover, integrating sensor-based motion analysis and objective evaluation technologies will support the development of individualized rehabilitation programs tailored to each patient's sensory and motor characteristics, ultimately improving functional outcomes and reducing fall risk in patients with ITS.

Acknowledgements

The authors would like to thank Enago (www.enago.jp) for the English language review.

Ethical approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1) Lekic T, Krafft PR, Coats JS, Obenaus A, Tang J, Zhang JH: Infratentorial strokes for posterior circulation folks: clinical correlations for current translational therapeutics. Transl Stroke Res. 2011: 2: 144-151.
2) Nouh A, Remke J, Ruland S: Ischemic posterior circulation stroke: a review of anatomy, clinical presentations, diagnosis, and current management. Front Neurol. 2014: 5: 30.
3) Mehndiratta M, Pandey S, Nayak R, Alam A: Posterior circulation ischemic stroke-clinical characteristics, risk factors, and subtypes in a north Indian population: a prospective study. Neurohospitalist. 2012: 2: 46-50.
4) Chua KS, Kong KH: Functional outcome in brain stem stroke patients after rehabilitation. Arch Phys Med Rehabil. 1996: 77: 194-197.
5) Jang JH, Song YG, Kim YZ: Predictors of 30-day mortality and 90-day functional recovery

after primary pontine hemorrhage. J Korean Med Sci. 2011: 26: 100-107.
6) Wessels T, Möller-Hartmann W, Noth J, Klötzsch C: CT findings and clinical features as markers for patient outcome in primary pontine hemorrhage. AJNR Am J Neuroradiol. 2004: 25: 257-260.
7) Meguro T, Kuwahara K, Tomita Y, Okuma Y, Tanabe T, Muraoka K, et al: Primary pontine hemorrhage in the acute stage: clinical features and a proposed new simple scoring system. J Stroke Cerebrovasc Dis. 2015: 24: 860-865.
8) Kumral E, Bayülkem G, Evyapan D: Clinical spectrum of pontine infarction. Clinical-MRI correlations. J Neurol. 2002: 249: 1659-1670.
9) Kim TJ, Nam H, Hong JH, Yeo MJ, Chang JY, Jeong JH, et al: Dysphagia may be an independent marker of poor outcome in acute lateral medullary infarction. J Clin Neurol. 2015: 11: 349-357.
10) Sheetal S, Thomas R, Byju P, Sasidharan A, Mathew F, Madhusudanan M: A cross-sectional study of clinical spectrum and outcome of pure midbrain strokes. Neurol India. 2024: 72: 784-790.
11) Wieruszewski ED: Brain stem stroke: a complex neurological event. J Exp Stroke Transl Med. 2024: 16: 283-284.
12) Teasell R, Foley N, Doherty T, Finestone H: Clinical characteristics of patients with brainstem strokes admitted to a rehabilitation unit. Arch Phys Med Rehabil. 2002: 83: 1013-1016.
13) Maeshima S, Osawa A, Miyazaki Y, Takeda H, Tanahashi N: Functional outcome in patients with pontine infarction after acute rehabilitation. Neurol Sci. 2012: 33: 759-764.
14) Nelles G, Contois KA, Valente SL, Higgins JL, Jacobs DH, Kaplan JD, et al: Recovery following lateral medullary infarction. Neurology. 1998: 50: 1418-1422.
15) Gialanella B, Monguzzi V, Santoro R, Bertolinelli M: Walking and mobility before and after rehabilitation in patients with infratentorial stroke. Clin Ter. 2007: 158: 297-301.
16) Gialanella B, Bertolinelli M, Santoro R: Rehabilitative outcome in supratentorial and infratentorial stroke: the role of motor deficits. Aging Clin Exp Res. 2008: 20: 310-315.
17) Belayeva IA, Martynov MY, Pehova YG, Vershinin AA, Rachin AP, Eremushkin MA, et al: Kinematic parameters of gait in patients with supra- or subtentorial focus location during the early rehabilitation period after ischemic stroke. Zh Nevrol Psikhiatr Im S S Korsakova. 2020: 120: 67-74.
18) Kim HY, Shin JH, Yang SP, Shin MA, Lee SH: Robot-assisted gait training for balance and lower extremity function in patients with infratentorial stroke: a single-blinded randomized controlled trial. J Neuroeng Rehabil. 2019: 16: 99.
19) Son S, Lim KB, Kim J, Lee C, Cho SI, Yoo J, et al: Comparing the effects of exoskeletal-type robot-assisted gait training on patients with ataxic or hemiplegic stroke. Brain Sci. 2022: 12: 1261.
20) Lee HH, Jung SH: Prediction of post-stroke falls by quantitative assessment of balance. Ann Rehabil Med. 2017: 41: 339-346.
21) Haran FJ, Keshner EA: Sensory reweighting as a method of balance training for labyrinthine loss. J Neurol Phys Ther. 2008: 32: 186-191.
22) Fan H, Ding Y, Elmadhoun A, Mangal R, Feng J, Geng X, et al: Vestibular rehabilitation in patients with stroke: A comprehensive review of past and current evidence. Brain Circ. 2025: 11: 107-112.
23) Bultmann U, Pierscianek D, Gizewski ER, Schoch B, Fritsche N, Timmann D, et al: Functional recovery and rehabilitation of postural impairment and gait ataxia in patients with acute cerebellar stroke. Gait Posture. 2014: 39: 563-569.
24) Morton SM, Tseng YW, Zackowski KM, Daline JR, Bastian AJ: Longitudinal tracking of gait and balance impairments in cerebellar disease. Mov Disord. 2010: 25: 1944-1952.
25) Naoi T, Morita M, Kosami K, Mashiko T, Kameda T, Okada S, et al: Clinical characteristics and clinical course of body lateropulsion in 47 patients with brainstem infarctions. J Stroke Cerebrovasc Dis. 2020: 29: 105183.

26） Bassetti C, Bogousslavsky J, Barth A, Regli F: Isolated infarcts of the pons. Neurology. 1996: 46: 165-175.
27） Chu CL, Chen YP, Chen CC, Chen CK, Chang HN, Chang CH, et al: Functional recovery patterns of hemorrhagic and ischemic stroke patients under post-acute care rehabilitation program. Neuropsychiatr Dis Treat. 2020: 16: 1975-1985.

Review

Characteristics and prevalence of cachexia in patients with heart disease, chronic obstructive pulmonary disease, and chronic kidney disease and those undergoing hemodialysis

Taiki Hamada[1)], Masakazu Saitoh[1, 2)], Kohei Shiota[1)], Yu Shimano[1)], Kotaro Iwatsu[1, 2)], Tetsuya Takahashi[1, 2)]

[1)] Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University
[2)] Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Abstract

Cachexia is a complex metabolic syndrome associated with underlying illness and characterized by loss of muscle with or without loss of fat mass. Cachexia is characterized by chronic inflammation and anorexia, significantly impacting prolonged hospitalizations, increased health care costs, and prognosis. In oncology, the diagnostic criteria for cachexia have been established. However, there are no standardized criteria in other disease areas, resulting in the use of multiple diagnostic approaches. Furthermore, cachexia requires assessment that considers severity. Severe cases are considered refractory, necessitating intervention starting from the early stage of cachexia. This review investigated the prevalence of cachexia, as defined by the varying criteria used in heart disease, chronic obstructive pulmonary disease (COPD), chronic kidney disease (CKD), and those undergoing hemodialysis (HD), and to summarize its characteristics in each condition. The prevalence of cachexia among patients with heart disease, COPD, and CKD and those undergoing HD was 10.5% to 37.8%, 4.6% to 29.1%, 5.5% to 47.3%, and 3.2% to 80% respectively. Cachexia is driven by systemic inflammation, upon which disease-specific symptoms are superimposed. Therefore, understanding the characteristics of cachexia specific to each disease is crucial for implementing appropriate countermeasures.

Key Words: cachexia, protein-energy wasting

Juntendo Health Science Journal 7(1): 26-35, 2026（Received Jan. 21. 2026 ; Accepted Feb. 24. 2026）

Introduction

Cachexia is defined as "a complex metabolic syndrome associated with underlying illness and characterized by loss of muscle with or without loss of fat mass." In adults, weight loss is the prominent clinical feature of cachexia. Anorexia, inflammation, insulin resistance, and increased muscle protein breakdown are frequently associated with cachexia[1)].

Cachexia is a complication of chronic diseases, including cancer, chronic heart failure, and chronic obstructive pulmonary disease (COPD), which can lead to substantial economic burden, including prolonged hospitalizations and increased health care cost, and influence prognosis[2, 3)].

Although cachexia has been extensively reported in the field of oncology, few studies have reported its association with other conditions, including cardiac, respiratory, and metabolic diseases. In oncology, the diagnostic criteria for cachexia have been established. However, there are no standardized criteria in other disease areas, resulting in the use of multiple diagnostic approaches. Therefore, the prevalence of cachexia in patients with heart disease, COPD, and chronic kidney disease (CKD) and those undergoing hemodialysis (HD) remains unclear because the criteria vary between studies.

Consequently, this review aimed to report the prevalence of cachexia, as defined by the varying criteria used in heart disease, COPD, CKD, and HD, and to

Corresponding author: Masakazu Saitoh
Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University
3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033
E-mail: m.saito.tl@juntendo.ac.jp

summarize its characteristics in each condition.

Definition of cachexia

Table 1 presents the commonly used diagnostic criteria for cachexia. The diagnostic criteria established by Evans et al. have generally been used to diagnose cachexia[1].

The Fearon et al. criteria for cancer cachexia also define the severity of cachexia. The initial stage is termed pre-cachexia, which is considered as a reversible stage, emphasizing the importance of early diagnosis. Conversely, the advanced stage is referred to as refractory cachexia, which is characterized by ongoing hypercatabolism and short survival[4].

In patients with CKD, protein-energy wasting (PEW), which was proposed by the International Society of Renal Nutrition and Metabolism (ISRNM), has widely been used compared with cachexia[5]. The most severe stage of PEW is classified as cachexia[6]. Koppe et al[7]. define cachexia as a condition that is continuous with PEW.

In addition, some reports define cachexia solely based on significant weight loss. In 2023, the Asian Working Group for Cachexia (AWGC) established new diagnostic criteria for cachexia[8]. Due to differences in body composition, the Evans and Fearon criteria may underestimate the prevalence of cachexia in Asian populations. Therefore, the AWGC criteria adopted a BMI cut-off value specific to Asian populations. In the future, the AWGC criteria are expected to become the standard for evaluating cachexia.

Search methods

We summarized studies that were published since the 2008 consensus definition by Evans et al[1].

English-language articles that were published in the PubMed database from 2008 to 2025 were included. The following search string was used:

((“Heart Failure”[Mesh] OR “Pulmonary Disease, Chronic Obstructive”[Mesh] OR “chronic kidney disease” OR “chronic kidney failure” OR “chronic renal disease” OR “chronic renal failure” OR “end-stage renal disease” OR “Renal Dialysis”[Mesh] OR “Renal Insufficiency, Chronic”[Mesh]) AND (“cachexia” [Mesh] OR PEW) AND (“Prevalence”[Mesh] OR “Therapeutics”[Mesh])) NOT “Sarcopenia”[Mesh] NOT “Neoplasms”[Mesh] NOT “Review”[Publication Type] NOT “Editorial”[Publication Type]

Papers were selected if they clearly documented the prevalence of cachexia in patients with heart disease, COPD, and non-dialysis CKD or those undergoing HD. The exclusion criteria included studies focusing solely on sarcopenia, patients with cancer, review articles, and editorials.

Results

The initial search yielded 247 papers, 46 of which were ultimately included in the analysis. The included papers for each disease category are summarized below.

1. Heart disease

Six studies on heart disease were identified, one of which was a study investigating cardiac surgery (Table 2)[9-14]. The prevalence of cachexia ranged from 10.5% to 37.8%, and that in postoperative surgical patients was 13.6%. Three studies assessed cachexia using either the Evans or AWGC criteria. Meanwhile, the remaining three studies utilized assessments based solely on body weight or body composition.

2. COPD

Three studies reported the prevalence of cachexia in patients with COPD (Table 3)[15-17]. The prevalence of cachexia was 4.7% using the Evans criteria, 29.1% using skeletal muscle mass, and 4.6% using weight loss.

3. CKD

Four studies on CKD were identified (Table 4)[18-21]. The prevalence of cachexia ranged from 5.5% to 47.3%. The prevalence increased with advancing CKD stages. The diagnostic criteria used were predominantly the criteria defined by the ISRNM.

4. HD

Thirty-three studies on HD were identified (Table 5)[22-54]. The prevalence of cachexia in patients undergoing HD ranged from 3.2% to 80%. Although the Evans, AWGC, and Fearon criteria were used for assessing cachexia, the ISRNM criteria were primarily

Table 1 Diagnostic criteria for cachexia

	Evans	Fearon	Protein energy wasting	AWGC
Definition	A complex metabolic syndrome associated with underlying illness and characterized by loss of muscle with or without loss of fat mass	Multifactorial syndrome defined by an ongoing loss of skeletal muscle mass (with or without loss of fat mass) that cannot be fully reversed by conventional nutritional support and leads to progressive functional impairment.	The state of decreased body stores of protein and energy fuels (that is, body protein and fat masses).	A metabolic imbalance related to chronic diseases that are associated with weight loss, inflammatory conditions, and/or anorexia The AWGC criteria adopt BMI cut-off value specifically tailored to the Asian populations.
Disease	Chronic heart failure, COPD, CKD, Chronic infection, Sepsis, Cancer	Cancer	CKD	Cancer, Chronic heart failure, COPD, CKD, Rheumatoid arthritis, other collagen diseases, Chronic respiratory failure, Chronic liver failure, Progressive worsening or uncontrolled chronic infections
Mandatory item	Weight loss of at least 5% in 12 months or less or BMI < 20 kg/m^2			・Cancer, Chronic heart failure, COPD, CKD, Rheumatoid arthritis, Other collagen diseases, Chronic respiratory failure, Chronic liver failure, Progressive worsening or uncontrolled chronic infections ・Weight loss > 2%/3–6 months or low BMI (< 21 kg/m^2)
Optionary item	**Muscle mass** ・Low fat-free mass index **Anorexia** ・Limited food intake or poor appetite **Muscle strength** ・Decreased handgrip strength **Biochemistry** ・C-reactive protein > 5.0 mg/L, IL-6 > 4.0 pg/mL ・Hemoglobin < 12 g/dL ・Albumin < 3.2 g/dL **Fatigue** ・Physical and/or mental weariness resulting from exertion	Over past 6 months ① Weight loss > 5% ② BMI <20 kg/m^2 and any degree of weight loss > 2% ③ Appendicular skeletal muscle index consistent with sarcopenia and any degree of weight loss > 2%	**Body mass (One of the following)** ・BMI < 18.5 kg/m^2 (Westerners, < 23 kg/m^2) ・Unintentional weight loss over time (5% over 3 months or 10% over 6 months) ・Total body fat percentage < 10% **Muscle mass (One of the following)** ・Muscle wasting (reduced muscle mass 5% over 3 months or 10% over 6 months) ・Creatinine appearance ・Reduced mid-arm muscle circumference area (reduction > 10% in relation to 50th percentile of reference population) **Dietary intake (One of the following)** ・Unintentional low dietary protein intake < 0.80 g/kg/day for at least 2 months for dialysis patients or < 0.6 g/kg/day for patients with CKD stages 2–5 ・Unintentional low dietary energy intake < 25 kcal/kg/day for at least 2 months **Biochemistry (One of the following)** ・Serum albumin < 3.8 g/dL ・Serum prealbumin (transthyretin) < 30 mg/dL ・Serum cholesterol < 100 mg/dL	〈**Subjective symptom**〉 ・Anorexia 〈**Objective measurement**〉 ・Decreased grip strength 〈**Biomarker**〉 ・C-reactive protein > 0.5 mg/dL
Diagnosis	In addition to mandatory criteria, cachexia is diagnosed when three or more of the following apply: muscle mass, anorexia, muscle strength, biochemistry, and fatigue.	When any of Body mass ① to ③ apply, cachexia is diagnosed.	PEW is diagnosed when three or more of the following criteria are met: body mass, muscle mass, dietary intake, and serum biochemistry.	In addition to the mandatory criteria, cachexia is diagnosed when one of the following apply: subjective symptom, objective measurement, or biomarker.

COPD, chronic obstructive pulmonary disease; CKD, chronic kidney disease; BMI, body mass index; AWGC, Asian Working Group for Cachexia

Table 2 Prevalence of cachexia in patients with heart disease

First author, year, and country	Disease	Age, years	Sample size	Severity	Diagnostic criteria	Prevalence of cachexia, %
Morishita T (2021)[9] Japan	Chronic heart failure	69	370	NYHA Ⅰ - Ⅳ	Evans	31
Kato M (2024)[12] Japan	Cardiac disease	78	115	NYHA Ⅰ - Ⅲ	AWGC	30
Christensen HM (2013)[11] Denmark	Chronic heart failure	77.3	238	NYHA Ⅰ - Ⅱ	An unintentional non-oedematous weight loss of > 5 % over at least 6 months	10.5
Carson MA (2022)[13] UK	Heart failure	74.4	200	NYHA Ⅲ - Ⅳ	Evans	15
Castillo-Martínez L (2012)[10] Mexico	Heart failure	62.5	519	NYHA Ⅲ - Ⅳ	The gender-specific RXc graph was divided into four sectors. Patients with vectors out of the 95% tolerance ellipse of the reference population at the lower right quadrant were classified as cachectic.	37.8
Tepsuwan T (2009)[14] Thailand	Post cardiac valve operation	47.6 - 48.3	353	NYHA Ⅰ - Ⅳ	< 80% of ideal body weight estimated by the Devine equation	13.6

Age is expressed as mean or median.
NYHA, New York Heart Association; AWGC, Asian Working Group for Cachexia

Table 3 Prevalence of cachexia in patients with COPD

First author, year, and country	Age, years	Sample size	Severity	Diagnostic criteria	Prevalence of cachexia, %
McDonald MN (2019)[17] Multinational	64	1483	GOLD Ⅱ - Ⅳ	Evans	4.7
Gjerde B (2012)[15] Norway	40-49: 18 (4.3%); 50-59: 99 (23.5%); 60-69: 220(52.1%); >69: 85 (20.1%)	422	GOLD Ⅱ - Ⅳ	Women: FFMI < 14kg/m^2, Men: FFMI < 17kg/m^2	29.1
Kwan HY (2019)[16] UK	70	1755	GOLD Ⅰ - Ⅳ	Unintentional weight loss > 5% over the preceding 6 months and with a FFMI < 17kg/m^2 for men and < 15kg/m^2 for women	4.6

Age is expressed as mean or median.
COPD, chronic obstructive pulmonary disease; GOLD, Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease; FFMI, fat-free mass index

Table 4 Prevalence of cachexia in patients with CKD

First author, year, and country	Age, years	Sample size	Severity	Diagnostic criteria	Prevalence of cachexia, %
Hyun YY (2017)[19] Korea	53.6	1303	Stage G1 - G5	ISRNM	5.5
Hyun YY (2017)[18] Korea	53.9	1834	Stage G1 - G5	ISRNM	9
Namuyimbwa L (2018)[20] Uganda	39	93	Stage G1 - G5	ISRNM	47.3
Pérez-Torres A (2017)[21] Spain	67	128	Stage G1 - G5	ISRNM	27.3

Age is expressed as mean or median.
CKD, chronic kidney disease; ISRNM, International Society of Renal Nutrition and Metabolism

utilized.

Characteristics of cachexia

1. Heart disease

Cachexia is a strong predictor of all-cause mortality in patients with heart disease[9]. The underlying pathogenesis involves multiple factors, including inflammation, hemodynamics, and anemia. Cachectic states promote systemic inflammation and neuro-hormonal activation. Furthermore, inflammatory cytokines enhance cardiac remodeling, leading to poor prognosis[55].

Table 5 Prevalence of cachexia in patients undergoing HD

First author, year, and country	Age, years	Sample size	HD vintage, years	Diagnostic criteria	Prevalence of cachexia, %
Saitoh M (2016)[42] Japan	63	75	7.4	ISRNM	10.7
Tsai MT (2021)[46] Taiwan	64.5	240	4.1	ISRNM	20
Yajima T (2023)[50] Japan	63.4	193	1.2	ISRNM	32.6
Kanazawa Y (2017)[32] Japan	66.0	210	7.3	ISRNM	14.8 - 38.0
Yasui S (2016)[52] Japan	66.0	59	12	ISRNM	15
Luce M (2022)[34] France	64.1	231	2.2	Evans	30.3
Bi X (2019)[23] China	55.8 - 60.6	100	Not listed	ISRNM	56
Chiu TT (2015)[25] Taiwan	60.0	188	5.1	ISRNM	8.5
Gharib MS (2023)[27] Egypt	54.0	60	5.4	ISRNM	80
Kojima S (2024)[33] Japan	75.0	274	3.6	ISRNM	42
Hu C (2022)[30] China	56.3 - 60.7	93	3.4 - 3.6	ISRNM	51.6
Chávez-Mendoza CA (2022)[24] Mexico	54.0	191	3.7	ISRNM	22
Tan RS (2019)[45] China	58.0	173	> 5 years, 79.7%	ISRNM	34.1
Da J (2021)[26] China	55.0	774	3.5	ISRNM	17.2
Nassar MK (2022)[39] Egypt	Men: 50.2, Women: 50.0	78	Men: 3.4, Women: 2.3	ISRNM	23.1
Gracia-Iguacel C (2019)[28] Spain	64.0	108	4.9	ISRNM	41
Ng HM (2022)[40] Malaysia	55.1	379	5.0	ISRNM	23
Inoue A (2020)[31] Japan	66.2	60	12.3	ISRNM	17
Takahashi H (2017)[44] Japan	64.0	409	8	ISRNM	17.1
Souweine JS (2018)[43] France	68.8	123	2.9	ISRNM	43
Yurtdaş G (2020)[54] Turkey	50.6	80	7	ISRNM	37.5
Gracia-Iguacel C (2013)[29] Spain	63.6	122	2.2	ISRNM	37.7
Tsai MT (2021)[47] Taiwan	64.0	230	3.8 - 4.5	ISRNM	19.6
Moraes C (2014)[38] Brazil	Not listed	52	Not listed	ISRNM	23.7
Arias-Guillén M (2018)[22] Spain	60.0	91	3.6	ISRNM	19.7
Valente A (2019)[48] Portugal	69.7	2021	6.0	ISRNM	10.0
Valente A (2019)[48] Portugal	70.4	3401	6.2	ISRNM	3.2
Martin-Alemañy G (2016)[36] Mexico	34.0	36	Not listed	ISRNM	55.5
Sahathevan S (2020)[41] Malaysia	55.2	351	6.8	ISRNM	23.1
Ma X (2025)[35] China	65.0	210	3.1 - 3.3	ISRNM	58.1
Yoshikoshi S (2024)[53] Japan	67	367	4.4	Evans, AWGC	Evans: 21.3, AWGC: 35.2
McKeaveney (2021)[37] UK	67.6	106	4.9	Evans	16
Yang Z (2022)[51] China	54.6	299	Not listed	Fearon	19.4
Wang X (2025)[49] China	50.5 - 54.0	127	1.2 - 1.3	ISRNM	57.5

Age is expressed as mean or median.
HD, hemodialysis; ISRNM, International Society of Renal Nutrition and Metabolism; AWGC, Asian Working Group for Cachexia

2. COPD

Cachexia associated with COPD is attributed to a complex interplay of factors, including energy imbalance because of metabolic hyperactivity, endocrine hormone abnormalities, and systemic inflammation. Furthermore, resting energy expenditure increases because of obstructive ventilatory impairment, pulmonary hyperinflation, and increased oxygen consumption of weakened respiratory muscles[56]. In addition, cachexia is strongly associated with poor prognosis in patients with COPD[16].

3. CKD

In patients with CKD, cachexia is driven by various factors, including reduced dietary intake (often because of anorexia associated with uremia), chronic inflam-

mation, acidosis, multiple hormonal abnormalities, comorbidities, and physical inactivity[6].

4. HD

The prevalence of cachexia is higher in patients undergoing HD than in those with heart disease, COPD, and non-dialysis CKD, suggesting higher vulnerability to nutritional disorders. In patients undergoing HD, the etiology of cachexia is highly complex and involves reduced anabolic activity and increased catabolic processes driven by factors such as nutrient loss and dialysis-related inflammation. These mechanism may further increase the risk of cachexia in addition to the underlying pathophysiological factors associated with CKD[57]. Furthermore, patients undergoing HD exhibit lower levels of physical activity compared to those with other chronic conditions, consequently increasing their susceptibility to cachexia[58]. In terms of prognosis, cachexia has been reported to increase mortality and hospitalization rates, similar to the findings observed in heart disease and COPD[32]. Additionally, the reported prevalence varied substantially. Although this variation may be partially attributable to the large number of studies included, intercountry or interregional differences in body composition, as well as variation in socioeconomic conditions, may also have influenced the findings.

Yoshikoshi et al[53]. reported that the prevalence of cachexia was 21.3% based on the Evans criteria and 35.2% based on the AWGC criteria. The adoption of the AWGC criteria, which are tailored to Asian populations, suggests that patients with cachexia who were previously underestimated by the Evans criteria may now be identified. However, because the current body of literature is limited, further studies using the AWGC criteria are needed.

Limitation

One limitation of this review is that the exclusion of studies addressing sarcopenia may have reduced the number of eligible publications identified. In particular, the number of studies on COPD was smaller than that on other diseases. Cachexia frequently involves muscle wasting, and its clinical manifestations overlaps with those of sarcopenia. Therefore, to avoid conceptual ambiguity and to specifically examine cachexia-related findings, studies addressing sarcopenia were excluded from this review. However, this exclusion may have limited the number of studies ultimately included, and this limitation should be taken into account when interpreting the results.

Conclusion

The reported prevalence of cachexia significantly varies across different diseases, ranging from 10.5% to 37.8% in heart disease, 4.6% to 29.1% in COPD, 5.5% to 47.3% in CKD, and 3.2% to 80% in patients undergoing HD. Cachexia is driven by systemic inflammation, upon which disease-specific symptoms are superimposed. Therefore, understanding the characteristics of cachexia specific to each disease is crucial for implementing appropriate countermeasures.

Ethical approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1) Evans WJ, Morley JE, Argiles J, Bales C, Baracos V, Guttridge D, et al: Cachexia: A new definition. Clin Nutr. 2008: 27: 793-799.
2) Farkas J, von Haehling S, Kalantar-Zadeh K, Morley JE, Anker SD, Lainscak M: Cachexia as a major public health problem: Frequent, costly, and deadly. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2013: 4: 173-178.
3) Arthur ST, Noone JM, Van Doren BA, Roy D, Blanchette CM: One-year prevalence, comorbidities and cost of cachexia-related inpatient admissions in the USA. Drugs Context. 2014: 3: 212265.
4) Fearon K, Strasser F, Anker SD, Bosaeus I, Bruera E, Fainsinger RL, et al: Definition and classification of cancer cachexia: An international consensus. Lancet Oncol. 2011: 12: 489-495.
5) Fouque D, Kalantar-Zadeh K, Kopple J, Cano N,

Chauveau P, Cuppari L, et al: A proposed nomenclature and diagnostic criteria for protein-energy wasting in acute and chronic kidney disease. Kidney Int. 2008: 73: 391-398.
6) Carrero JJ, Stenvinkel P, Cuppari L, Ikizler TA, Kalantar-Zadeh K, Kaysen G, et al: Etiology of the protein-energy wasting syndrome in chronic kidney disease: A consensus statement from the international society of renal nutrition and metabolism (ISRNM). J Ren Nutr. 2013: 23: 77-90.
7) Koppe L, Fouque D, Kalantar-Zadeh K: Kidney cachexia or protein-energy wasting in chronic kidney disease: Facts and numbers. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2019: 10: 479-484.
8) Arai H, Maeda K, Wakabayashi H, Naito T, Konishi M, Assantachai P, et al: Diagnosis and outcomes of cachexia in asia: Working consensus report from the asian working group for cachexia. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2023: 14: 1949-1958.
9) Morishita T, Uzui H, Sato Y, Mitsuke Y, H Tada: Associations between cachexia and metalloproteinases, haemodynamics and mortality in heart failure. Eur J Clin Invest. 2021: 51: e13426.
10) Castillo-Martínez L, Colín-Ramírez E, Orea-Tejeda A, González Islas DG, Rodríguez García WD, Santillán Díaz C, et al: Cachexia assessed by bioimpedance vector analysis as a prognostic indicator in chronic stable heart failure patients. Nutrition. 2012: 28: 886-891.
11) Christensen HM, Kistorp C, Schou M, Keller N, Zerahn B, Frystyk J, et al: Prevalence of cachexia in chronic heart failure and characteristics of body composition and metabolic status. Endocrine. 2013: 43: 626-634.
12) Kato M, Ono S, Seko H, Kito K, Omote T, Omote M, et al: Relationship between cachexia and short physical performance battery scores in patients with heart failure attending comprehensive outpatient cardiac rehabilitation. Heart Vessels. 2024: 39: 778-784.
13) Carson MA, Reid J, Hill L, Dixon L, Donnelly P, Slater P, et al: Exploring the prevalence, impact and experience of cardiac cachexia in patients with advanced heart failure and their caregivers: A sequential phased study. Palliat Med. 2022: 36: 1118-1128.
14) Tepsuwan T, Schuarattanapong S, Woragidpoonpol S, Kulthawong S, Chaiyasri A, Nawarawong W: Incidence and impact of cardiac cachexia in valvular surgery. Asian Cardiovasc Thorac Ann. 2009: 17: 617-621.
15) Gjerde B, Bakke PS, Ueland T, Hardie JA, Eagan TM: The prevalence of undiagnosed renal failure in a cohort of COPD patients in western norway. Respir Med. 2012: 106: 361-366.
16) Kwan HY, Maddocks M, Nolan CM, Jones SE, Patel S, Barker RE, et al: The prognostic significance of weight loss in chronic obstructive pulmonary disease-related cachexia: A prospective cohort study. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2019: 10: 1330-1338.
17) McDonald MN, Wouters EFM, Rutten E, Casaburi R, Rennard SI, Lomas DA, et al: It's more than low BMI: Prevalence of cachexia and associated mortality in copd. Respir Res. 2019: 20: 100.
18) Hyun YY, Lee KB, Han SH, Kim YH, Kim YS, Lee SW, et al: Nutritional status in adults with predialysis chronic kidney disease: Know-ckd study. J Korean Med Sci. 2017: 32: 257-263.
19) Hyun YY, Lee KB, Oh KH, Ahn C, Park SK, Chae DW, et al: Serum adiponectin and protein-energy wasting in predialysis chronic kidney disease. Nutrition. 2017: 33: 254-260.
20) Namuyimbwa L, Atuheire C, Okullo J, Kalyesubula R: Prevalence and associated factors of protein- energy wasting among patients with chronic kidney disease at mulago hospital, kampala-uganda: A cross-sectional study. BMC Nephrol. 2018: 19: 139.
21) Pérez-Torres A, González Garcia E, Garcia-Llana H, Del Peso G, López-Sobaler AM, Selgas R: Improvement in nutritional status in patients with chronic kidney disease-4 by a nutrition education program with no impact on renal function and determined by male sex. J Ren Nutr. 2017: 27: 303-310.
22) Arias-Guillén M, Perez E, Herrera P, Romano B, Ojeda R, Vera M, et al: Bioimpedance spectroscopy as a practical tool for the early detection

and prevention of protein-energy wasting in hemodialysis patients. J Ren Nutr. 2018: 28: 324-332.
23) Bi X, Chu M, Ai H, Hu C, Ding W: Association of serum il-18 with protein-energy wasting in end-stage renal disease patients on haemodialysis. Int Urol Nephrol. 2019: 51: 1271-1278.
24) Chávez-Mendoza CA, Martínez-Rueda AJ, Ortega-Vargas JL, Becerra-Laparra IK, Ardavín-Ituarte JM, Correa-Rotter R, et al: Anemia, overhydration, and lower muscle strength in hemodialysis patients with protein-energy wasting. Hemodial Int. 2022: 26: 415-423.
25) Chiu TT, Liao SC, Lee WC, Lee PS, Ng HY, Chien YS, et al: Gelsolin and adipokines are associated with protein-energy wasting in hemodialysis patients. Artif Organs. 2015: 39: 150-155.
26) Da J, Long Y, Li Q, Yang X, Yuan J, Zha Y: Resting metabolic rate and its adjustments as predictors of risk protein-energy wasting in hemodialysis patients. Biosci Rep. 2021: 41: BSR20210010.
27) Gharib MS, Nazeih MS, Said TWEl: Effect of intradialytic oral nutritional supplementation on nutritional markers in malnourished chronic hemodialysis patients: Prospective randomized trial. BMC Nephrol. 2023: 24: 125.
28) Gracia-Iguacel C, González-Parra E, Mahillo I, Ortiz A: Criteria for classification of protein-energy wasting in dialysis patients: Impact on prevalence. Br J Nutr. 2019: 121: 1271-1278.
29) Gracia-Iguacel C, González-Parra E, Pérez-Gómez MV, Mahíllo I, Egido J, Ortiz A, et al: Prevalence of protein-energy wasting syndrome and its association with mortality in haemodialysis patients in a centre in Spain. Nefrologia. 2013: 33: 495-505.
30) Hu C, Zhang Y, Bi X, Yao L, Zhou Y, Ding W: Correlation between serum trimethylamine-n-oxide concentration and protein energy wasting in patients on maintenance hemodialysis. Ren Fail. 2022: 44: 1669-1676.
31) Inoue A, Ishikawa E, Shirai Y, Murata T, Miki C, Hamada Y: Effects of protein-energy wasting (PEW) and hyperphosphatemia on the prognosis in japanese maintenance hemodialysis patients: A five-year follow-up observational study. Clin Nutr ESPEN. 2020: 36: 134-138.
32) Kanazawa Y, Nakao T, Murai S, Okada T, Matsumoto H: Diagnosis and prevalence of protein-energy wasting and its association with mortality in japanese haemodialysis patients. Nephrology (Carlton). 2017: 22: 541-547.
33) Kojima S, Usui N, Uehata A, Inatsu A, Tsubaki A: Associations between bioelectrical impedance analysis-derived phase angle, protein-energy wasting and all-cause mortality in older patients undergoing haemodialysis. Nephrology (Carlton). 2024: 29: 655-662.
34) Luce M, Bres E, Yi D, Pastural M, Granjon S, Szelag JC, et al: Natriuretic peptides as predictors of protein-energy wasting in hemodialysis population. J Ren Nutr. 2022: 32: 234-242.
35) Ma X, Yan D, Zhou C, Shi Y, Wang Y, Li J, et al: The correlation between protein energy wasting and the incidence of main adverse cardiovascular events in adult maintenance hemodialysis patients: A single-center retrospective cohort study. Ren Fail. 2025: 47: 2441399.
36) Martin-Alemañy G, Valdez-Ortiz R, Olvera-Soto G, Gomez-Guerrero I, Aguire-Esquivel G, Cantu-Quintanilla G, et al: The effects of resistance exercise and oral nutritional supplementation during hemodialysis on indicators of nutritional status and quality of life. Nephrol Dial Transplant. 2016: 31: 1712-1720.
37) McKeaveney C, Slee A, Adamson G, Davenport A, Farrington K, Fouque D, et al: Using a generic definition of cachexia in patients with kidney disease receiving haemodialysis: A longitudinal (pilot) study. Nephrol Dial Transplant. 2021: 36: 1919-1926.
38) Moraes C, Marinho SM, da Nobrega AC, de Oliveira Bessa B, Jacobson LV, Stockler-Pinto MB, et al: Resistance exercise: A strategy to attenuate inflammation and protein-energy wasting in hemodialysis patients? Int Urol Nephrol. 2014: 46: 1655-1662.
39) Nassar MK, Kannishy GEl, Nagy E, Shemies RS, Mansour M, Mofreh M, et al: The relation

of serum dehydroepiandrosterone sulfate level to protein energy wasting in hemodialysis patients. Saudi J Kidney Dis Transpl. 2022: 33: 639-649.
40) Ng HM, Khor BH, Sahathevan S, Sualeheen A, Chinna K, Gafor AHA, et al: Is malnutrition a determining factor of health-related quality of life in hemodialysis patients? A cross-sectional design examining relationships with a comprehensive assessment of nutritional status. Qual Life Res. 2022: 31: 1441-1459.
41) Sahathevan S, Khor BH, Singh BKS, Sabatino A, Fiaccadori E, Daud ZAM, et al: Association of ultrasound-derived metrics of the quadriceps muscle with protein energy wasting in hemodialysis patients: A multicenter cross-sectional study. Nutrients. 2020: 12: 3597.
42) Saitoh M, Ogawa M, Dos Santos MR, Kondo H, Suga K, Itoh H, et al: Effects of intradialytic resistance exercise on protein energy wasting, physical performance and physical activity in ambulatory patients on dialysis: A single-center preliminary study in a japanese dialysis facility. Ther Apher Dial. 2016: 20: 632-638.
43) Souweine JS, Kuster N, Chenine L, Rodriguez A, Patrier L, Morena M, et al: Physical inactivity and protein energy wasting play independent roles in muscle weakness in maintenance haemodialysis patients. PLoS One. 2018: 13: e0200061.
44) Takahashi H, Inoue K, Shimizu K, Hiraga K, Takahashi E, Otaki K, et al: Comparison of nutritional risk scores for predicting mortality in japanese chronic hemodialysis patients. J Ren Nutr. 2017: 27: 201-206.
45) Tan RS, Liang DH, Liu Y, Zhong XS, Zhang DS, Ma J: Bioelectrical impedance analysis-derived phase angle predicts protein-energy wasting in maintenance hemodialysis patients. J Ren Nutr. 2019: 29: 295-301.
46) Tsai MT, Ou SM, Chen HY, Tseng WC, Lee KH, Yang CY, et al: Relationship between circulating galectin-3, systemic inflammation, and protein-energy wasting in chronic hemodialysis patients. Nutrients. 2021: 13: 2803.
47) Tsai MT, Tseng WC, Ou SM, Lee KH, Yang CY, Tarng DC: Comparison of simplified creatinine index and systemic inflammatory markers for nutritional evaluation of hemodialysis patients. Nutrients. 2021: 13: 1870.
48) Valente A, Caetano C, Oliveira T, Garagarza C: Evaluating haemodialysis patient's nutritional status: Body mass index or body cell mass index? Nephrology (Carlton). 2019: 24: 967-974.
49) Wang X, Peng X, Liu J, Tang S, Yang X, Wang J: The association of plasma tmao and body composition with the occurrence of pew in maintenance hemodialysis patients. Ren Fail. 2025: 47: 2481202.
50) Yajima T, Yajima K: Association of extracellular water/total body water ratio with protein-energy wasting and mortality in patients on hemodialysis. Sci Rep. 2023: 13: 14257.
51) Yang Z, Luo Y, Lu H, Zou B, Wang H, Chen G, et al: Validation of the functional assessment of anorexia/cachexia therapy instrument to assess quality of life in maintenance hemodialysis patients with cachexia. Semin Dial. 2022: 35: 330-336.
52) Yasui S, Shirai Y, Tanimura M, Matsuura S, Saito Y, Miyata K, et al: Prevalence of protein-energy wasting (pew) and evaluation of diagnostic criteria in japanese maintenance hemodialysis patients. Asia Pac J Clin Nutr. 2016: 25: 292-299.
53) Yoshikoshi S, Imamura K, Yamamoto S, Suzuki Y, Harada M, Osada S, et al: Prevalence and relevance of cachexia as diagnosed by two different definitions in patients undergoing hemodialysis: A retrospective and exploratory study. Arch Gerontol Geriatr. 2024: 124: 105447.
54) Yurtdaş G, Karabudak E, Mandıroğlu F: Relationship of dietary and serum zinc and leptin levels with protein energy wasting in haemodialysis patients. Int Urol Nephrol. 2020: 52: 1969-1977.
55) Morishita T, Uzui H, Mitsuke Y, Amaya N, Kaseno K, Ishida K, et al: Association between matrix metalloproteinase-9 and worsening heart failure events in patients with chronic heart failure. ESC Heart Fail. 2017: 4: 321-330.
56) Huertas A, Palange P: Copd: A multifactorial systemic disease. Ther Adv Respir Dis. 2011: 5:

217-224.
57） Kim JC, Kalantar-Zadeh K, Kopple JD: Frailty and protein-energy wasting in elderly patients with end stage kidney disease. J Am Soc Nephrol. 2013: 24: 337-351.
58） Johansen KL, Chertow GM, Ng AV, Mulligan K, Carey S, Schoenfeld PY, et al: Physical activity levels in patients on hemodialysis and healthy sedentary controls. Kidney Int. 2000: 57: 2564-2570.

Review

Current status of visual-motor illusion research in healthy individuals and stroke patients: A narrative review

Hiroki Sugita, Tsuyoshi Tatemoto, Yuji Fujino

Graduate School of Health Sciences, Juntendo University

Abstract

Visual-motor illusion (VMI) is a type of intervention that induces motor illusions without actual movement by having patients observe first-person prerecorded footage of their nonparetic limb's movements. This approach is applicable even to patients with severe paralysis. Recent studies suggest that combining VMI with neuromuscular electrical stimulation or using modified VMI techniques can improve treatment efficacy. However, no standardized length of time for video observation or conditions for recording nonparetic limb movement has yet been established. We believe that developing and standardizing methods for the application of VMI is an important issue to consider in stroke rehabilitation.

Key Words: rehabilitation, illusions, stroke, paresis, muscle spasticity

Juntendo Health Science Journal 7(1): 36-42, 2026（Received Mar. 4. 2026；Accepted Apr. 28. 2026）

Introduction

Studies have reported a high incidence of motor paralysis immediately after stroke onset, which can range from 50% to 90%[1]. Estimates show that approximately 40% of cases develop spasticity, which has been associated with abnormal muscle tone and postural abnormalities[2]. Furthermore, motor paralysis and spasticity are considered aggravating factors that reduce activity and participation by affecting secondary impairments, such as contractures and pain, as well as independence in ADL and walking[2-5]. Therefore, reducing these functional impairments remains important regardless of the disease stage.

In recent years, visual-motor illusion (VMI) has garnered interest as an intervention for neurological symptoms occurring after a stroke. VMI is an intervention technique that involves creating an illusion of one's own body moving, even though the body is not actually moving, by having the subject observe footage of physical movements from a first-person perspective. VMI uses a left–right reversed video (i.e., horizontally flipped) of prerecorded movements of the nonparetic limb. Therefore, this approach does not require voluntary movement of the paretic limb[6, 7]. VMI has been shown to promote not only functional recovery, such as improving motor paralysis and reduction of spasticity, but also changes in body awareness[6, 7].

VMI induces motor illusions through visual information, similar to the treatment concept of the widely employed mirror therapy[8]. Both VMI and mirror therapy are motor illusion methods that use voluntary movements of the nonparetic limb. However, mirror therapy is limited to cases where repetitive movements are difficult or where fatigue is severe. Furthermore, mirror therapy requires movement of the nonparetic limb during observation, which reportedly activates the motor cortex of the non-lesion side, potentially reducing excitability in the paralyzed hemisphere through interhemispheric inhibition[9, 10]. In contrast, VMI can induce motor illusions without requiring motor execution, which carries distinct clinical significance from mirror therapy in terms of promoting plastic changes in the brains of stroke patients.

Corresponding author: Yuji Fujino
Graduate School of Health Sciences, Juntendo University
3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033
E-mail: y.fujino.pb@juntendo.ac.jp

However, no consensus has yet been reached regarding the methods or timing of VMI. Therefore, the current review aims to systematically organize the indications, intervention methods, and primary outcomes of VMI for stroke rehabilitation, as well as clarify current challenges and future perspectives.

Application of VMI

Participants

The applications of VMI have been studied in both healthy individuals and stroke patients. Research in healthy subjects has investigated the neurophysiological effects of VMI[11-13]. For stroke patients, the efficacy of VMI has been examined mainly in the subacute and chronic phases, with a key advantage being its potential effectiveness regardless of time since stroke onset[6, 7]. Furthermore, VMI, which does not require motor output from the paretic side, has been positioned as a safe intervention that can be introduced early during the disease course, even in cases of severe motor paralysis where voluntary movement is restricted[6, 7].

Target body parts for VMI

Several studies on the application of VMI to the upper limb have targeted finger movements[14]. In contrast, VMI studies targeting the lower limb have predominantly focused on ankle plantarflexion and dorsiflexion[15].

Effects of VMI

Evidence suggests that VMI improves joint range of motion and increases active motion angles in paretic limbs[14]. Furthermore, it has been shown to improve movement performance during the sit-to-stand (STS) movement by enhancing ankle angular velocity and reducing the time required for movement[15]. Studies have also found it effective in improving walking speed[16].

For spasticity, VMI has been suggested to modulate spinal inhibitory circuits[12]. It is thought to attenuate exaggerated stretch reflexes by enhancing spinal inhibitory mechanisms, such as reciprocal Ia inhibition and presynaptic inhibition, thereby inducing a clinically significant reduction in spasticity.

Furthermore, VMI may facilitate the reintegration of the paretic limb into one's own body schema through visual input. By eliciting the sense of ownership (SoO)—the feeling that the observed body part belongs to oneself—and the sense of agency (SoA)—the feeling of controlling the movement—VMI may help alleviate post-stroke distortions in body representation[10]. This process is thought to increase the congruence between visual input and internal motor/somatosensory representations, consequently promoting the activation of sensorimotor-related regions, such as the premotor cortex, supplementary motor area, and parietal association cortex. Such activation may ultimately enhance corticospinal excitability via the primary motor cortex[11]. Moreover, by facilitating motor imagery of the paretic limb and promoting motor learning, VMI may effectively contribute to motor recovery[17].

VMI protocols: procedures, setup, and variability

First-person perspective motor observation

One of the most critical elements of VMI is the presentation of visual stimuli from a first-person perspective. The videos should be designed to match the viewpoint a participant would have when visually observing their own body, thereby facilitating the perception that the observed limb belongs to them[11, 18]. This perspective is thought to promote the SoO and is considered essential for eliciting motor illusions.

Environmental setup

Many studies use a monitor or tablet mounted on a monitor arm or tablet stand and positioned directly above the participant's hand/fingers or foot for visual presentation[15]. This arrangement aligns the location of the limb shown on the screen with the actual limb, thereby enhancing visuospatial congruence and promoting the impression of continuity between the viewed and real limb.

Observing the video at rest

During VMI, participants are typically instructed to remain relaxed and refrain from moving the actual limb while watching the video[15]. This instruction helps ensure that the motor illusion is elicited primarily

through visual input, which is a defining feature of VMI (Figure 1).

Use of left–right reversed video

The protocol for VMI targeting finger and ankle movements typically involves recording movements of the dominant hand or foot in healthy individuals or the nonparetic limb in stroke patients and then presenting the footage as a left–right reversed video[17, 18]. This approach creates the illusion that the contralateral limb is moving despite being stationary. Given that left–right reversed videos can be readily applied even in individuals with marked lateral differences in motor function, VMI can be considered a highly versatile approach.

Lack of standardization

Although previous studies have defined the core elements of the VMI protocol, specific intervention parameters have yet to be standardized. For example, the duration of video viewing can vary widely, ranging from 2 to 20 min[19, 20]. Moreover, key details of video preparation are often insufficiently reported, including whether the footage was recorded continuously to match the intended intervention duration or delivered using looped playback, as well as how the videos were edited and compiled. Some studies also use videos of another person's limb as the intervention stimulus, whereas others prescribe movement tempos different from 1 Hz (e.g., cycles of 3 or 8 s)[12, 14]. Such methodological heterogeneity likely reflects differences in study aims, with some focusing on functional outcomes and others prioritizing the investigation of neurophysiological mechanisms. Therefore, VMI protocols cannot yet be regarded as fully standardized.

Main outcomes of VMI

Subjective assessment

The visual analog scale (VAS) has been used for the subjective evaluation of VMI outcomes. The VAS is an evaluation method wherein marks the position on a 100-mm straight line that most closely matches their sensation for each question item, with the left end (0 mm) representing "no sensation at all" and the right end (100 mm) representing "high sensation." This method allows for the clinicians to quantify the intensity of the kinesthetic illusion[11, 15].

Additionally, the SoO, which refers to the perception that the observed body part is "my body," and the SoA, which refers to the perception that "one is controlling the movement," can also be assessed using the VAS[15].

However, although the VAS is well-suited for evaluating positive aspects, such as sensory enhancement or positive changes, grading negative experiences, such as "hardly feel it," "it feels off" or "it's unpleasant" can be difficult[21]. In particular, subjective responses to VMI vary greatly among individuals, and not all participants necessarily experience a movement illusion or changes in body awareness. Therefore, appropriate evaluation of negative or neutral responses is essential.

Against this background, recent reports have adopted subjective evaluations using a 7-point Likert scale[20]. The Likert scale allows for a graded evaluation ranging from "I do not agree" to "I agree" given its ability to capture multifaceted assessments, including negative aspects. To more precisely examine the effects of VMI, a broader spectrum of subjective experiences needs to be captured by combining the VAS with other measures (e.g., a Likert scale) while taking advantage of the strengths of each instrument.

Neurophysiological evaluation

Hemodynamic evaluation

Hemodynamic evaluation during VMI can be achieved through functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) to assess brain activity during the induction of kinesthetic illusions, changes in brain activity after the illusion, and functional connectivity between brain regions. fNIRS is a noninvasive technique that emits near-infrared light into the scalp and estimates changes in the concentration of oxyhemoglobin (oxy-Hb) and deoxyhemoglobin (deoxy-Hb) based on the modified Beer–Lambert law.

Using fNIRS, Sakai et al. reported that VMI involving both the upper and lower limbs increased oxy-Hb in the premotor cortex (PMC) and altered resting-state functional connectivity within the fronto-parietal network involved in SoO and kinesthetic

illusions[7]. Using fMRI, Kaneko et al. demonstrated that VMI activated motor-related networks, including the premotor and parietal association cortices, without actual movement[17].

Motor evoked potentials by transcranial magnetic stimulation (TMS)

TMS has generally been used to evaluate the excitability of the corticospinal tract during VMI using motor evoked potentials (MEP) obtained from peripheral muscles when stimulating the primary motor cortex (M1). Given that MEP reflects the excitability of the corticospinal tract from the motor cortex to the corresponding muscle, its amplitude increases when the excitability of that muscle increases[22]. VMI-induced kinesthetic illusions have been known to increase the excitability of the corticospinal tract, which selectively facilitates the agonist muscles involved in the movement targeted by the illusion.

Performance evaluation

Among healthy individuals, those who received VMI to finger movements showed significantly better performance on a dexterity task (ball-rotation task) than did the simple action observation group after the intervention, suggesting that VMI may efficiently promote the formation and updating of motor imagery during the early stages of motor learning[19]. Furthermore, studies involving patients with severe poststroke upper-limb paresis have demonstrated immediate improvements in physical function, particularly in upper-limb motor function, spasticity, and joint range of motion, after VMI. These effects have been confirmed even in cases with significantly restricted voluntary movement[14, 23].

Healthy individuals who underwent ankle VMI demonstrated significantly reduced reaction times and improved motor imagery processing speed in a mental rotation task that involved distinguishing between images of the left and right foot after ankle VMI[18]. Moreover, stroke patients who underwent ankle dorsiflexion VMI reported significant improvements in reciprocal Ia inhibition and presynaptic inhibition of the antagonist soleus muscle[12], which contributed to the suppression of spasticity[15, 24], as well as significant improvements in the voluntary dorsiflexion angle and walking speed[24].

As described earlier, VMI results have been categorized into three aspects: (1) subjective assessment, (2) neurophysiological evaluation, and (3) performance evaluation. Among these evaluations, neurophysiological measures are more likely to differ between basic research using healthy subjects and clinical research.

Owing to considerations such as measurement environment, safety, and reproducibility of analysis, neurophysiological techniques have predominantly been used in basic research involving healthy subjects. However, studies involving stroke patients primarily adopt performance evaluation as the main outcome measure.

Application of VMI

VMI combined with electrical stimulation

Another approach to the application of VMI involves combining VMI with neuromuscular electrical stimulation (NMES)[10, 14], which is called kinesthetic illusion induced by visual stimulation (KINVIS) therapy. This approach has been reported to promote functional improvements, such as enhanced voluntary movement of paretic fingers and reduced spasticity[10, 14]. KINVIS therapy induces the kinesthetic illusion that the paretic fingers are moving by filming the movements of the nonparetic fingers, presenting the footage as a left–right reversed video and having the patient observe it as if it were the paretic fingers moving[10, 14]. When synchronous NMES is delivered to the agonist muscles of the paretic fingers, this method integrates neural information related to vision, somatosensation, and motor intention, simultaneously facilitating motor output at both central and peripheral levels.

KINVIS therapy has been shown to immediately improve motor imagery ability in stroke patients with severe motor paralysis[25] as evidenced by an increase in beta-band event-related desynchronization recorded from the sensorimotor cortex region of the lesioned hemisphere. The visually induced kinesthetic illusion and peripheral input from NMES have been reported to promote cortical activity involved in motor imagery[25].

Taken together, synchronizing the visual illusion with electrical stimulation during the reconstruction of motor imagery may facilitate postinjury neural circuits, with such plastic changes potentially contributing to the recovery of voluntary movement[25].

Power-VMI using TheraBand resistance

Power-VMI (P-VMI), an application of VMI that uses videos of maximal effort exercise with resistance, has garnered attention as a technique that could potentially enhance lower limb function and neural activity more strongly than Standard-VMI (S-VMI) using standard movement videos[15, 19, 26]. P-VMI induces high-intensity motor illusions by presenting first-person-view footage of ankle dorsiflexion with Thera-Band resistance, visually highlighting strong tibialis anterior contraction and prominent activity in the toe extensor muscles[15, 19, 26]. This visually enhanced movement intensity may compensate for the insufficient illusion strength of conventional S-VMI, potentially accelerating lower limb functional recovery and raising expectations for its clinical application.

Studies in healthy adults showed that although S-VMI did not produce significant changes in integrated electromyography (iEMG) of the tibialis anterior, the forward tilt angular velocity of the trunk and the dorsiflexion angular velocity during STS movements, or the time required in the initial phase of the movement before and after intervention[19], P-VMI did promote improvements in these parameters[19]. Based on this finding, P-VMI is thought to induce stronger motor illusions and muscle activity facilitation than does S-VMI. Furthermore, in patients with stroke hemiplegia, P-VMI has been reported to improve paretic ankle joint function and STS movement performance[27].

Furthermore, fNIRS studies have confirmed that P-VMI induces greater increases in oxy-Hb than does S-VMI in areas involved in motor control and body awareness, such as PMC, SMA, SPL, and supramarginal gyrus[13]. Specifically, SPL activity was positively correlated with the strength of motor illusion, indicating that P-VMI more strongly evokes illusions and body awareness[13].

Based on these findings, P-VMI can be considered as a technique that not only presents high-intensity movement footage but also comprehensively improves motor illusion, body awareness, and excitability of the corticospinal tract, thereby improving lower-limb motor function.

Challenges and future perspectives

Interventions utilizing VMI appear to improve neural activity and motor function, which is difficult to achieve with conventional VMI, while also presenting several challenges. KINVIS therapy may be contraindicated or require careful application in cases involving implanted electronic devices (e.g., pacemakers), severe sensory or skin disorders, or painful conditions[27]. Furthermore, KINVIS therapy requires the purchase of a dedicated system, which limits its versatility in practice. P-VMI has been proven effective in improving lower limb function and movement performance in patients with mild spasticity. However, in patients with moderate to severe spasticity, concerns have been raised regarding the possibility of further increasing muscle tone while viewing movement footage involving strong contractions, potentially exacerbating spasticity[28]. In other words, P-VMI is not necessarily beneficial for all patients, and its application must be considered based on the individual's baseline muscle tone and clinical condition.

KINVIS therapy is a technique that adds electrical stimulation, whereas P-VMI is intended to enhance therapeutic effects by modulating the strength of the illusion and motor imagery. This suggests that VMI could aid in the development of effective techniques by combining different approaches or systematically manipulating motor illusions. Given that VMI involves both motor output and visual input, considering both aspects may expand the efficacy and applicability of the treatment. Based on these findings, the development of generalizable, VMI-based techniques can be a promising strategy for improving functional impairments in stroke patients.

Conclusion

VMI has proven effective for ameliorating motor paralysis and spasticity following stroke and has been

associated with improvements in motor performance and body awareness. Furthermore, VMI does not require motor output from the paretic limb and can safely and noninvasively induce kinesthetic illusions, making it potentially applicable to a wide range of patients, including those with severe motor paralysis. However, questions remain regarding the reproducibility of the intervention and its clinical implementation, given the lack of standardization in VMI protocols and the reliance on subjective measures to assess body awareness.

Ethics approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals.

Competing interests

The authors declare that they have no conflicts of interest to declare.

References

1) Lawrence ES, Coshall C, Dundas R, Stewart J, Rudd AG, Howard R, et al: Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population. Stroke. 2001: 32: 1279-1284.
2) Sommerfeld DK, Eek EU-B, Svensson A-K, Holmqvist LW, Von Arbin MH: Spasticity after stroke: its occurrence and association with motor impairments and activity limitations. Stroke. 2004: 35: 134-139.
3) Wissel J, Schelosky LD, Scott J, Christe W, Faiss JH, Mueller J: Early development of spasticity following stroke: a prospective, observational trial. J Neurol. 2010: 257: 1067-1072.
4) Ada L, O'Dwyer N, O'Neill E: Relation between spasticity, weakness and contracture of the elbow flexors and upper limb activity after stroke: an observational study. Disabil Rehabil. 2006: 28: 891-897.
5) Shim J: Prediction of independent ambulation in subacute stroke patients: a retrospective observational study using lower limb motor and balance assessments. J Rehabil Med. 2025: 57: jrm44054.
6) Kaneko F, Shibata E, Hayami T, Nagahata K, Aoyama T: The association of motor imagery and kinesthetic illusion prolongs the effect of transcranial direct current stimulation on corticospinal tract excitability. J Neuroeng Rehabil. 2016: 13: 36.
7) Sakai K, Goto K, Tanabe J, Amimoto K, Kumai K, Kamio H, et al: Effects of visual-motor illusion on functional connectivity during motor imagery. Exp Brain Res. 2021: 239: 2261-2271.
8) Thieme H, Morkisch N, Mehrholz J, Pohl M, Behrens J, Borgetto B, et al: Mirror therapy for improving motor function after stroke. Cochrane Database Syst Rev. 2018: 7: CD008449.
9) Diers M, Kamping S, Kirsch P, Rance M, Bekrater-Bodmann R, Foell J, et al: Illusion-related brain activations: a new virtual reality mirror box system for use during functional magnetic resonance imaging. Brain Res. 2015: 1594: 173-182.
10) Kaneko F, Inada T: Acute Effect of visually induced kinesthetic illusion in patients with stroke: a preliminary report. Int J Neurorehabil. 2016: 3: 212.
11) Aoyama T, Kaneko F, Hayami T, Shibata E: The effects of kinesthetic illusory sensation induced by a visual stimulus on the corticomotor excitability of the leg muscles. Neurosci Lett. 2012: 514: 106-109.
12) Okada K, Okawada M, Yoneta M, Kuwahara W, Unai K, Kawakami M, et al: Cognitive effect of passively induced kinesthetic perception associated with virtual body augmentation modulates spinal reflex. J Neurophysiol. 2025: 133: 69-77.
13) Tanabe J, Amimoto K, Sakai K: Brain activity in visual-motor illusions with enhanced joint motion intensity. Cureus. 2024: 16: e65786.
14) Kaneko F, Shindo K, Yoneta M, Okawada M, Akaboshi K, Liu M: A case series clinical trial of a novel approach using augmented reality that inspires self-body cognition in patients with stroke: effects on motor function and resting-state brain functional connectivity. Front Syst Neurosci. 2019: 13: 76.
15) Tanabe J, Amimoto K, Sakai K, Osaki S, Yoshihiro N, Kataoka T: Effects and adaptation of visual-motor illusion using different visual stimuli on

improving ankle joint paralysis of stroke survivors–a randomized crossover controlled trial. Brain Sci. 2022: 12: 1249.
16) Sakai K, Ikeda Y, Amimoto K: Effect of kinesthetic illusion induced by visual stimulation on ankle dorsiflexion dysfunction in a stroke patient: ABAB single-case design. Neurocase. 2018: 24: 245-249.
17) Kaneko F, Blanchard C, Lebar N, Nazarian B, Kavounoudias A, Romaiguère P: Brain regions associated to a kinesthetic illusion evoked by watching a video of one's own moving hand. PLoS One. 2015: 10: e0131970.
18) Sakai K, Kawasaki T, Ikeda Y: The effect of kinesthetic illusion induced by visual stimulation of ankle joint on motor imagery. J Jpn Health Sci. 2019: 21: 208-214. (In Japanese)
19) Tanabe J, Amimoto K, Sakai K, Morishita M: Effects of visual-motor illusion via image videos showing increased exercise intensity on the tibial anterior during sit-to-stand movement: a study of healthy participants. Neurol Int. 2023: 15: 1290-1302.
20) Sakai K, Kawasaki T, Ikeda Y, Tanabe J, Matsumoto A, Amimoto K: Differences in the early stages of motor learning between visual-motor illusion and action observation. Sci Rep. 2023: 13: 20054.
21) Åström M, Thet Lwin ZM, Teni FS, Burström K, Berg J: Use of the visual analogue scale for health state valuation: a scoping review. Qual Life Res. 2023: 32: 2719-2729.
22) Kaneko F, Yasojima T, Kizuka T: Kinesthetic illusory feeling induced by a finger movement movie effects on corticomotor excitability. Neuroscience. 2007: 149: 976-984.
23) Aoyama T, Kanazawa A, Kohno Y, Watanabe S, Tomita K, Kaneko F: Influence of visual stimulation-induced passive reproduction of motor images in the brain on motor paralysis after stroke. Front Hum Neurosci. 2021: 15: 674139.
24) Sakai K, Ikeda Y, Yamanaka S, Noguchi R: Immediate effect of kinesthetic illusion induced by visual stimulation on ankle dorsiflexion dysfunction of stroke patients. Rigakuryoho Kagaku. 2018: 33: 277-280. (in Japanese)
25) Okawada M, Kaneko F, Shindo K, Yoneta M, Sakai K, Okuyama K, et al: Kinesthetic illusion induced by visual stimulation influences sensorimotor event-related desynchronization in stroke patients with severe upper-limb paralysis: A pilot study. Restor Neurol Neurosci. 2020: 38: 455-465.
26) Tanabe J, Amimoto K, Sakai K: Brain activity during electrical stimulation of visual-motor illusion with enhanced joint motion intensity. J Mot Behav. 2025: 57: 756-767.
27) Takahashi R, Koiwa M, Ide W, Okawada M, Akaboshi K, Kaneko F: Visually induced kinaesthetic illusion combined with therapeutic exercise for patients with chronic stroke: a pilot study. J Rehabil Med. 2022: 54: jrm00276.
28) Vinti M, Couillandre A, Hausselle J, Bayle N, Primerano A, Merlo A, et al: Influence of effort intensity and gastrocnemius stretch on co-contraction and torque production in the healthy and paretic ankle. Clin Neurophysiol. 2013: 124: 528-535.

論　説

前十字靭帯再建術後の再損傷に関連する動作の特徴

池永　真[1, 2)]、相澤純也[2, 3)]

[1)] 川口工業総合病院リハビリテーション科
[2)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科
[3)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

本稿では、前十字靭帯再建術後の再損傷に関連する動作の特徴を先行研究から整理する。前十字靭帯再建術後の競技復帰時には、競技復帰基準を満たすことが推奨されている。しかし、推奨される競技復帰基準には動作評価が含まれていないことが問題とされている。前十字靭帯再建術後の運動学的・運動力学的特徴として、両脚スクワット、両脚着地、片脚着地での術側下肢の膝屈曲角度、内部膝伸展モーメント、垂直床反力の減少が挙げられるが、これらの特徴は再損傷との関連を直接示してはいない。再損傷に関連する運動学的・運動力学的特徴としては、①非対称的な着地、② stretch-shortening cycle 能力の低下、③膝屈曲角度の少ない着地といった報告がある。しかし、再損傷に関連する動作評価を行った先行研究は少なく、議論を要する。

キーワード：前十字靭帯再建術、再損傷、バイオメカニクス、リスク要因、動作評価

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，43-47頁，2026年（受付　2024.12.6.；受理　2025.6.27.）

1. はじめに

前十字靭帯（Anterior Cruciate Ligament: ACL）損傷は代表的なスポーツ外傷であり、治療として ACL 再建術（Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: ACLR）が選択されることが多い。ACLR 後の再損傷率は再建靭帯損傷7%、対側 ACL 損傷8%と報告されている[1)]。再損傷により、リハビリテーションやパフォーマンス向上に1 ～ 2年以上の期間が必要となる。そのため、ACLR 後の再損傷の予防は重要な課題である。

ACLR 後の安全なスポーツ復帰のためには、スポーツ復帰基準を満たすことが推奨されている。スポーツ復帰基準としては、8 ヶ月以上の術後経過期間、大腿四頭筋とハムストリングスの筋力テスト、片脚ホップテストなどを含めた2つ以上の身体機能テスト、心理的準備スコアが推奨される[2)]。しかし、この中の身体機能テストは動作の量のみを評価しており、ACL 再損傷につながる動作の質の評価が不足している[3)]。そこで、本稿では ACLR 後の再損傷に関連する動作の特徴を先行研究から整理する。

2. ACLR 後の運動学および運動力学と再損傷との関連

ACLR 後は特徴的な着地動作を認めることが示されている。特徴としては、非術側下肢や健常者と比較して、膝屈曲角度、内部膝伸展モーメント、垂直床反力が小さいことが示されている[4)]。しかし、このような動作と再損傷との直接的な関連は示されていない。以下では、ACLR 後の再損傷と運動学および運動力学との関連を示す前向き研究に関して整理する（**表1**）。

1）再損傷と着地課題の非対称性の関連

Paterno らの前向き研究では、再損傷と両脚ドロップ垂直ジャンプでの非対称性との関連が示されている[5)]。この研究では、ACLR 後の56名の若年アスリートを対象として、両脚ドロップ垂直ジャンプを解析し、その後の再損傷との関連を調査した。その結果、再損傷の要因は､着地中の術側の前額面の膝外反変化量の増大、着地中の非術側の股関節水平内旋モーメントの力積の増大、初期接地時の非術側の矢状面の内部膝伸展モーメントの減少であったと報告している。初回 ACL 損傷のリスクである膝外反に加え[6, 7)]、股関節や膝のモーメントの非対称性が再損傷要因となり得ることが示されている。ただし、この研究では、術側損傷と非術側損傷を合わせて解析しており、どちらの要因となるかは明らかでない。

責任著者：相澤純也
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12
E-mail: j.aizawa.ue@juntendo.ac.jp

表 1　動作解析を用いた ACLR 後の再損傷因子の前向き研究

著者（発行年）	人数（名）（男 / 女）	年齢（歳）	術後測定時期	解析した再損傷側	動作解析のテスト内容（解析手法）	主な結果（再損傷に関連する因子）
Paterno MV, et al（2010）	56（21/35）	全体 16.41 ± 2.97	明確な記載はなし	術側と非術側を合わせ解析	両脚ドロップ垂直ジャンプ（3 次元動作解析）	①着地時の術側の膝関節の外反変化量増大 ②着地時の非術側の水平面内旋モーメント力積増大 ③初期接地時の矢状面膝モーメントの非対称性増大
King E, et al（2021）	88（88/0）	再損傷群 21.7 ± 4.9 非損傷群 22.9 ± 4.1	再損傷群 9.1 ± 3.1 ヶ月 非損傷群 9.3 ± 1.2 ヶ月	術側	両脚ドロップ垂直ジャンプ 片脚ドロップ垂直ジャンプ 90° カッティング （予測、非予測） （3 次元動作解析）	①両脚ドロップ垂直ジャンプでの膝屈曲角度の増大、接地時間の延長 ②非予測的なカッティング動作での前額面上の身体重心－膝関節・足関節距離の増大、体幹のカッティング脚側への側屈の増大、カッティング脚と逆側への骨盤側方傾斜角度の増大
King E, et al（2021）	115（115/0）	再損傷群 21.3 ± 4.2 非損傷群 21.9 ± 4.0	再損傷群 9.0 ± 3.1 ヶ月 非損傷群 9.4 ± 1.2 ヶ月	非術側	両脚ドロップ垂直ジャンプ 片脚ドロップ垂直ジャンプ 90° カッティング （予測、非予測） （3 次元動作解析）	両脚ドロップ垂直ジャンプの膝屈曲角度および股関節屈曲角度の増大、接地時間の延長、Reactive Strength Index（RSI）の低下 ※カッティング動作課題では有意差なし
van Melick N, et al（2022）	175（123/52）	全体 24.7 ± 6.2	全体 11.8 ± 2.9 ヶ月	術側と非術側を合わせ解析	Hop-and-Hold Test LESS （視覚的評価、iPad 動画）	Hop-and-Hold Test の基準合格で再損傷率低下 （相対リスク　10.17（1.28-81.10）） ※ LESS では有意差なし
Poston GR, et al（2021）	49（17/32）	再損傷群 16.2 ± 0.9 非損傷群 16.6 ± 3.2	再損傷群 6.5 ± 1.4 ヶ月 非損傷群 7.7 ± 2.3 ヶ月	術側	片脚ドロップ着地 （2 次元動作解析）	再損傷群は、膝外反＋体幹傾斜の合計角度および膝外反＋骨盤対側傾斜＋体幹傾斜の合計角度が減少
Mausehund L, et al（2024）	756（0/756）	全体 20.8 ± 4.0	3.6 ± 2.5 年	術側と非術側を個別で解析	全力での 30° カッティング動作 （3 次元動作解析）	膝外反角度、屈曲 / 内転 / 内旋モーメントなどいずれも有意差なし

2）再損傷と stretch-shortening cycle 能力との関連

King ら[8, 9] は、ACLR 後の男性アスリート1045名のケースコントロール研究から再損傷の要因を報告している。これらの研究では、両脚着地後に素早く高くジャンプする stretch-shortening cycle（SSC）能力の低下が再損傷と関連することが示唆されている。

測定項目として、一般的なスポーツ復帰基準（主観的スコア、膝伸展および屈曲筋力、片脚ホップテストなど）に加えて、3つの課題（両脚ドロップ垂直ジャンプ、片脚ドロップ垂直ジャンプ、非予測と予測条件の90° カッティング動作）の三次元動作解析を行った。

術側損傷については、再損傷31名および対照群57名を対象として解析している。その結果、術側損傷群では、両脚ドロップ垂直ジャンプにおいて、矢状面での膝屈曲角度の増大および接地時間の延長が認められた。カッティング動作では、非予測的な課題において、前額面上の身体重心－膝関節・足関節距離の増大、体幹のカッティング脚側への側屈の増大、カッティング脚と逆側への骨盤側方傾斜角度の増大が認められた[8]。

次に、非術側損傷については、再損傷55名および対照群60名を対象として解析している。その結果、非術側損傷群では非術側膝伸展筋力の体重比の低値、両脚ドロップ垂直ジャンプでの接地時間の延長、膝屈曲角度および股関節屈曲角度の増大、Reactive Strength Index（RSI）（ジャンプ高÷接地時間）の低下などが認められた。カッティング動作課題での差は有意ではなかった[9]。

これら2つの研究から、両脚着地後に素早く高くジャンプする SSC 能力が、術側損傷および非術側損傷と関連すると考えられる。そのため、スポーツ復帰を判断する際には、両脚ドロップ垂直ジャンプでの接地時間や RSI といった SSC 能力を評価する必要があるであろう。

3）再損傷と膝屈曲の大きな着地課題との関連

van Melick らは、膝屈曲角度を大きくした着地が

ACLR 後の再損傷と関連することを報告している[10]。この研究では、ACLR 後患者のスポーツ復帰前の動作評価として、Single Leg Hop and Hold Test（Hop-and-Hold Test）と両脚カウンタームーブメントジャンプでの Landing Error Scoring System（LESS）を用いた。

Hop-and-Hold Test は、一般的に行われる Single Leg Hop Test で計測した距離の90%の距離を片脚ジャンプし、膝屈曲90° で3秒間止まれるかを確認するテストである。非術側、術側の順にそれぞれ3回ずつ跳躍し、各脚において3回中1回以上成功すれば基準合格、0回であれば基準不合格と判定する。LESS は、両脚着地動作および両脚ジャンプ動作を17項目19点でスコア付けする[11]。この研究では、まず最大垂直ジャンプを行い、着地後に再度最大垂直ジャンプする課題を用いている。2回目のジャンプを LESS を用いて評価し、6点以下を基準合格としている。

結果は、Hop-and-Hold Test では、基準合格者の再損傷率は2%、基準不合格者の再損傷率は17%であり、相対リスクは10.17（95%CI：1.28－81.10）であった。LESS では基準合格者と基準不合格者の再損傷率は有意ではなかった。これらの結果より、膝を深く曲げた着地動作ができているかを確認することが、再損傷の予防において重要であることが示唆される。ただし、この研究では、Hop-and-Hold Test は術側と非術側のどちらの脚を判定したか明確に記載されていない。また、術側損傷と非術側損傷を合わせて解析しており、どちらの要因となるかは明らかでない。

4）再損傷と膝外反角度およびモーメントとの関連

膝外反の角度やモーメントの増大が ACLR 後の再損傷の主なリスク要因となるかは明らかでない。前述した研究では、再損傷群で術側下肢の膝外反変化量[5]および非予測的なカッティング動作での身体重心と膝および足関節距離の増大、体幹のカッティング脚側への側屈の増大[8] が認められている。それに対し、再損傷と膝外反の角度やモーメントの関連を示さない報告もある。

Poston らは、パイロットスタディではあるが、前向き研究として ACLR 後の若年者の着地動作と再損傷の関連を報告している[12]。この研究では、二次元動作解析により片脚ドロップ着地課題における最大膝屈曲時の膝外反、骨盤傾斜、体幹側屈の角度を計測している。その結果、術側再損傷群は非再損傷群と比べて、片脚着地での前額面の体幹傾斜と膝外反の角度の合計が少なかった。また、Mausehund ら[13] は、前向きコホート研究として、756名のエリート女性アスリートのカッティング動作の三次元動作解析を行った。その結果、被験者のうち14名に ACL 再損傷が発生したが、再損傷群と非再損傷群との間で、膝外反の角度やモーメントの差は有意ではなかった。膝外反角増大、前額面での体幹傾斜増大は初回 ACL 損傷のリスク要因とされているが[6, 7]、これらの研究では異なる結果となっている。

以上のように、膝外反の角度やモーメントの増大と ACLR 後再損傷との関連は明らかでない。動作分析を用いた前向き研究自体が少ないため議論はあるが、再損傷につながる動作は、初回 ACL 損傷と異なり、動作中の膝外反以外の変数を含めて損傷リスクを検討する必要がある。

3. まとめ

ACLR 後の再損傷に関連する動作として、①両脚着地での非対称性、② SSC 能力の低下、③着地動作での膝屈曲角度の減少が挙げられる。しかし、スポーツ復帰基準として動作解析を行い、実際に再損傷を調査した研究は少ない。加えて、術側および非術側の再損傷を区別せずに解析している研究もあり、術側と非術側のそれぞれのリスク要因は明らかではない。今後は、術側と非術側の再損傷を区別して解析し、それぞれの運動学的・運動力学的特徴を明らかにする必要がある。

謝　辞

本論説の執筆にあたり、ご指導頂いた相澤純也教授、論説執筆にご協力頂いた相澤研究室の森香奈先生、川口工業総合病院リハビリテーション科の濱本俊先生、研究にあたり日頃の業務をサポート頂いている同科スタッフの皆様に感謝の意を表したい。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Wiggins AJ, Grandhi RK, Schneider DK, Stanfield D, Webster KE, Myer GD: Risk of Secondary Injury in Younger Athletes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis. Am J Sports Med. 2016: 44: 1861-1876.

2） Turk R, Shah S, Chilton M, Thomas TL, Anene C,

Mousad A, et al: Return to Sport After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Requires Evaluation of >2 Functional Tests, Psychological Readiness, Quadriceps/Hamstring Strength, and Time After Surgery of 8 Months. Arthroscopy. 2023: 39: 790-801 e796.

3) Gokeler A, Dingenen B, Hewett TE: Rehabilitation and Return to Sport Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Where Are We in 2022? Arthrosc Sports Med Rehabil. 2022: 4: e77-e82.

4) Lepley AS, Kuenze CM: Hip and Knee Kinematics and Kinetics During Landing Tasks After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. J Athl Train. 2018: 53: 144-159.

5) Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, et al: Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. Am J Sports Med. 2010: 38: 1968-1978.

6) Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt RS, Jr., Colosimo AJ, McLean SG, et al: Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. Am J Sports Med. 2005: 33: 492-501.

7) Koga H, Nakamae A, Shima Y, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, et al: Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. Am J Sports Med. 2010: 38: 2218-2225.

8) King E, Richter C, Daniels KAJ, Franklyn-Miller A, Falvey E, Myer GD, et al: Biomechanical but Not Strength or Performance Measures Differentiate Male Athletes Who Experience ACL Reinjury on Return to Level 1 Sports. Am J Sports Med. 2021: 49: 918-927.

9) King E, Richter C, Daniels KAJ, Franklyn-Miller A, Falvey E, Myer GD, et al: Can Biomechanical Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Identify Athletes at Risk for Subsequent ACL Injury to the Contralateral Uninjured Limb? Am J Sports Med. 2021: 49: 609-619.

10) van Melick N, Pronk Y, Nijhuis-van der Sanden M, Rutten S, van Tienen T, Hoogeboom T: Meeting movement quantity or quality return to sport criteria is associated with reduced second ACL injury rate. J Orthop Res. 2022: 40: 117-128.

11) Padua DA, DiStefano LJ, Beutler AI, de la Motte SJ, DiStefano MJ, Marshall SW: The Landing Error Scoring System as a Screening Tool for an Anterior Cruciate Ligament Injury-Prevention Program in Elite-Youth Soccer Athletes. J Athl Train. 2015: 50: 589-595.

12) Poston GR, Schmitt LC, Ithurburn MP, Hugentobler JA, Thomas S, Paterno MV: Reduced 2-D Frontal Plane Motion During Single-Limb Landing Is Associated With Risk of Future Anterior Cruciate Ligament Graft Rupture After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport: A Pilot Study. J Orthop Sports Phys Ther. 2021: 51: 82-87.

13) Mausehund L, Krosshaug T: Knee Biomechanics During Cutting Maneuvers and Secondary ACL Injury Risk: A Prospective Cohort Study of Knee Biomechanics in 756 Female Elite Handball and Soccer Players. Am J Sports Med. 2024: 52: 1209-1219.

Abstract

Movement characteristics related to reinjury after anterior cruciate ligament reconstruction

Makoto Ikenaga[1, 2], Junya Aizawa[2, 3]

[1] Department of Rehabilitation, Kawaguchi Kogyo General Hospital
[2] Graduate School of Health Science, Juntendo University
[3] Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

This paper reviews the findings from past studies on movement characteristics associated with reinjury following anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR). Athletes are recommended to meet certain return-to-sport (RTS) criteria before returning to sports after ACLR. RTS criteria have been criticized for not including movement assessment. Kinematic and kinetic characteristics following ACLR include reduced knee flexion angle, internal knee extension moment, and vertical ground reaction force in the operated limb during bilateral squat, bilateral landing, and single leg landing. However, these characteristics don't directly indicate an association with reinjury risk. Movement characteristics reported to be associated with reinjury risk include (1) asymmetric landing, (2) decreased stretch-shortening cycle ability, and (3) landing with a reduced knee flexion angle. However, few studies have conducted movement assessments related to reinjury risk, therefore further discussion is required.

Key Words: anterior cruciate ligament reconstruction, reinjury, biomechanics, risk factors, movement assessment

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 43-47, 2026]

論　説

AI の意思決定解釈のための可視化技術の概要

赤沼優文、臼井桂介

順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻

要　旨

人工知能（AI：artificial intelligence）システムの急速な発展に伴い、AI の判定理由や思考プロセスを解釈可能にすることの重要性が高まっている。特に、医療や工学などの分野では、AI の意思決定が人命や安全性、経済的影響に直結するため、その判断過程を明確にすることが求められる。AI による意思決定の可視化を向上させることは、単にモデルの信頼性を向上させるだけでなく、誤判定の原因分析やモデルの改善にも役立つ。しかし、深層学習モデルは「ブラックボックス」としての性質を持つため、どの特徴に基づいて判断を下したのかを直接理解することが難しい。この課題を解決するために、AI の意思決定を可視化する技術が研究されており、モデルの解釈性を向上させる取り組みが進められている。本稿では、AI を用いた画像分類において、モデルの判断根拠を視覚的に示す技術に着目し、gradient-weighted class activation mapping、local interpretable model-agnostic explanations、オクルージョン感度、t-distributed stochastic neighbor embedding といった主要な可視化手法について、基本的な仕組みや特徴、応用例を紹介する。これらの技術を活用することで、AI の意思決定の可視化を向上させ、より信頼性の高いシステムの構築が可能となる。今後、AI の可視化技術がさらに発展し、幅広い分野での実用化が進むことで、利用者が AI の判断を直感的に理解し、安心して活用できる環境が整うことが期待される。

キーワード：画像分類、convolutional neural network、深層学習、説明可能 AI

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，48-54頁，2026年（受付　2025.1.24.；受理　2025.6.6.）

緒　　言

畳み込みニューラルネットワーク（CNN：convolutional neural network）はプーリングや畳み込みなどの様々な層で構成されており、画像分類、異常検出、セグメンテーション、信号処理などを行うことができる深層学習ネットワークである[1, 2]。今日までに GoogLeNet[3] や VGG-16[4] など、多層構造をもつ CNN が開発され、ネットワークの改善が図られてきた。現在では CNN の新たな開発や改善に加え、転移学習を活用した研究が行われており、医用画像解析などの分野での利用が広がっている[5]。このように、一からモデルを作成するのではなく、CNN を基盤とした技術の転用により、計算コストを抑えつつ、高精度なモデルの提供が可能となった。しかし、CNN で作成したモデルには「ブラックボックス」の性質[6]があるため、使用者がモデルの判断過程を理解することが難しい。この性質のため、結果のみが出力されるモデルでは、どのようにして判定や予測を行ったのかが直感的に理解しにくく、誤った出力が発生した際にどのように修正すべきかの判断も困難となる[7]。このような問題を解決し、モデルの信頼性を向上させるために、Ribeiro らは、「予測を信頼すること」と「モデルを信頼すること」という二つの異なる信頼の定義が重要であると述べている[6]。予測を信頼するとは、特定の予測結果が正しいかどうかを信頼することを指し、モデルを信頼するとは、モデルの構造や訓練されたデータなどが、予測結果を出すために信頼できるものであるかどうかを指す。モデルの挙動を理解するためには、単に予測を信頼するだけでなく、どの特徴が予測に寄与しているのかを明確にする可視化手法によって、モデルを信頼することにつなげる必要性がある。

現在、CNN で作成した学習モデルの評価には、混合行列や area under the curve などの指標が広く使用されている。しかし、これらの評価指標では、モデルの意思決定の過程を把握することはできない。そのため、モデルの信頼性を高める手段として、畳み込み層の勾配情報を利用する手法や、モデルに依存せず入力データの影響を解析する手法が提案され、深層学習の可視化が進められている[6, 8]。Selvaraju らは、CNN における視覚的説明の質を評価するために、「クラス識別性」と「高解像度での表現」が重要であると述べている[8]。

責任著者：臼井桂介
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-0033　東京都文京区湯島 1-5-32
E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

クラス識別性とは、可視化手法が出力するヒートマップや特徴マップが、対象のクラスに関連する領域を明確に示しているかどうかを指す。さらに、高解像度での表現が可能であれば、細かな特徴の影響を詳細に分析できるため、モデルの判断根拠をより理解できる。Ribeiro らも同様に、モデルの可視化において重要なのは、可視化技術を通して出力した視覚的説明により、モデルがなぜその判定（分類や推論）を明示したのかを、ユーザーが理解できることであると述べている[6]。これらの可視化手法を活用することで、モデルの判定理由を明確にし、予測の信頼性を評価できるようになる。さらに、説明可能な手法を用いることで、信頼できないモデルの改善や、信頼性の低い予測の要因分析が可能となり、「ブラックボックス」の性質を解消することができる。

本稿では、画像認識において広く使用されている AI の可視化手法を中心に紹介する。これらの手法は、モデルが入力データのどの部分に注目しているか、データの分布はどのようになっているのかを視覚化し、モデルの挙動をより明確に理解することを可能にする。代表的な可視化手法として、gradient-weighted class activation mapping（Grad-CAM）、local interpretable model-agnostic explanations（LIME）、オクルージョン感度、t-distributed stochastic neighbor embedding（t-SNE）を概説する。また、それぞれの手法の特徴と応用について説明し、今後の展望について考察する。

1. Grad-CAM

Grad-CAM は、畳み込み層の特徴マップとその勾配を利用して、ニューラルネットワークの判断根拠を可視化する手法である[8]。はじめに、入力画像を CNN に通すことで、特定の畳み込み層から k 番目のフィルタによる特徴マップ A^k を取得する。その後、分類クラス c に対して CNN が算出した分類スコア y^c について、特徴マップ A^k に関する勾配を計算する。この勾配を、特徴マップのチャンネルごとに平均化処理を行うグローバル平均プーリングを行うことで、ニューロンの重要度 α_k^c を求めることができる。ニューロンの重要度 α_k^c を式 (1) に示す。

$$\alpha_k^c = \frac{1}{Z}\sum_i\sum_j \frac{\partial y^c}{\partial A_{ij}^k} \tag{1}$$

Z ：特徴マップの大きさ
i, j：グローバル平均プーリングする高さ方向と幅方向のインデックス
y^c ：クラス c に対するスコア
A_{ij}^k：k 番目の特徴マップにおける、位置 (i, j) の値

次に、順方向に特徴マップ A^k を重み付けして結合し、ReLU 関数を適用することで、Grad-CAM マップを生成する。Grad-CAM マップ $L_{Grad\text{-}CAM}^c$ を式 (2) に示す。

$$L_{Grad-CAM}^c = ReLU\left(\sum_k \alpha_k^c A^k\right) \tag{2}$$

ReLU 関数を適用することで、クラス c に対して正の影響を与える部分のみを強調する。このようにして、クラス c を説明するためにモデルが注目した領域を特定することができる。また、式 (1) で定義したニューロンの重要度 α_k^c の勾配部分を負の勾配に変更すると、予測を変更する原因となる領域を強調することも可能である。Grad-CAM は任意の畳み込み層で可視化を行うことができるが、初期の畳み込み層になるにつれて、特徴が乏しくなるため、性能が悪化する。

次に、Grad-CAM が使用されている先行研究を紹介する。Zhang らは、MRI 画像を用いて多発性硬化症の分類モデルに Grad-CAM を使用し、その可視化を行った[9]。多発性硬化症は中枢神経系における炎症性脱髄疾患であり、様々な機能障害を引き起こす病気である。そこで、深層学習を用いて多発性硬化症と健康な対照群を識別し、そのサブタイプを分類した。彼らは、最適な CNN と CAM 技術の組み合わせを検討するとともに、Grad-CAM を3D ボリュームレンダリングと定量的解析を統合することで、モデルの解釈性を向上させ、患者の治療精度向上に寄与する可能性を示した。次に、Panwar らは、胸部 X 線画像と CT 画像を用いて COVID-19の検出を行うため、深層学習と Grad-CAM を使用した可視化を行った[10]。COVID-19は急速に拡大した感染症であり、発展途上国では検出速度が遅いことが問題であった。そこで、感染の検出を加速するために深層学習を使用した分類モデルを提案した。提案されたモデルは、従来の reverse transcription polymerase chain reaction 検査に比べて迅速に COVID-19を検出し、高い精度を達成することを示した。また、Grad-CAM を用いてモデルの解釈性を向上させており、診断過程を可視化することに成功した。また、Talaat らは乳がん診断に使用されるマンモグラフィー画像を用いて、乳がんの良悪性を分類するために、深層学習と Grad-CAM による可視化を行った[11]。乳がんは生検による診断が最も正確であるが、侵襲性が高いため最終決定手段として使用される。そこで、非侵襲的で客観的な診断を可能にするため、深層学習を使用した分類モデルを提案した。提案されたモデルでは、

Grad-CAM を活用して良性腫瘍と悪性腫瘍の鑑別に重要な領域を強調し、放射線科医に実用的な精度を提供した。この方法により、異なる放射線科医間での経験のばらつきによる診断の主観性を軽減し、反復的な生検を最小限に抑える可能性があることが示された。

2. LIME

LIME は、モデル全体の挙動を可視化するのではなく、ある特定の予測についてモデルがどのような挙動を示すのかを可視化する手法である[6]。G を線形モデルなどの解釈可能なモデル群、d' を次元数、g を定義域 $\{0,1\}(d')$ の説明モデルとした場合、文字や視覚的表現を用いて解釈可能なモデルを $g \in G$ と定義することができる。この時、LIME は式 (3) で定義され、$L(f, g, \pi_x)$ は式 (4) で定義される。

$$\xi(x) = argmin_{g \in G}\, L(f, g, \pi_x) + \Omega(g) \tag{3}$$

$$L(f, g, \pi_x) = \sum_{z, z' \in Z} \pi_x(z)(f(z) - g(z'))^2 \tag{4}$$

x ：元の複雑な特徴を持つデータ
G ：解釈可能なモデルの集合
g ：説明モデル
π_x ：近接度関数
f ：説明したいモデル
L ：忠実度関数
$\Omega(g)$ ：モデル g の複雑さの指標
z ：x の周囲でサンプリングされたデータ
z' ：モデル g の予測に用いるデータ

LIME は、説明したいモデル f と説明モデル g の差を最小にしつつ、$\Omega(g)$ を人が解釈可能な範囲に抑えることを目標にしている。この手法は、対象となるモデル f に特定の仮定を設けないため、さまざまな機械学習モデルに適用可能である。モデルの局所的な挙動を解釈するために、式 (4) で示した $L(f, g, \pi_x)$ を最適化する。この際、π_x は入力データ x の局所性を表す関数であり、x の周辺にあるデータ点を取得し、それらに対するモデル f の予測を取得することで、説明モデル g を学習する。この近接度関数 π_x を適切に設定することで、画像データやテキストデータなど、異なる種類の入力にも適用することができる。具体的に、入力データ x を、人が解釈しやすい特徴表現に変換した二値ベクトル x' を用いる。ここで x' は、元の入力 x に含まれる特徴が「存在する」または「存在しない」という情報を表している。x' の中で、どの特徴が重要であるのか不明なため、有効な特徴をランダムに選択し、その特徴を欠損させた新しいサンプル z' を取得する。次に、z' をもとの特徴空間 $\mathbb{R}(d')$ に復元し、新たなデータ z を得る。そして、z を元のモデル f に入力して予測値 $f(z)$ を取得する。このようにして得られた $(z', f(z))$ を集合 Z として収集し、局所的な予測挙動を捉えるための説明モデル g の学習に用いる。$L(f, g, \pi_x)$ を最適化することで、入力 x に対する説明 $\xi(x)$ を得ることができ、元のモデル f が複雑な場合でも、局所的な判断根拠を人が理解しやすい形で提示することが可能となる。しかし、局所的にも複雑なモデルであった場合には説明が十分にできない可能性がある。この場合には、説明の正確性を推定する方向で LIME を使用し、説明の信頼度をユーザーに提供することが可能である。この方法は、複数の解釈可能なモデルの中から適切な説明を選ぶ際にも利用でき、与えられたデータセットや分類器に適応することが可能である。一方で、LIME は局所的な説明に特化した手法であるため、モデル全体が適切かどうかの判断をすることはできない。モデルを評価するには、特徴の重要度を考慮する必要があり、異なる例を多く説明する特徴を求める必要がある。

次に、LIME が使用されている先行研究を紹介する。Magesh らは DaTscan 画像を用いてパーキンソン病の早期検出に LIME を活用し、その可視化を行った[12]。パーキンソン病は神経変性疾患の一つであり、震えや運動の遅延などを引き起こし、早期の診断が重要であるとされている。そこで、深層学習を用いてパーキンソン病患者と非パーキンソン病患者を識別し、病気の早期兆候を捉える分類モデルを提案した。LIME を使用することで、被殻および尾状核の領域を強調していることがわかり、診断結果の信頼性が向上することを実証した。次に、Sorayaie らは深層学習を用いてサル痘の分類モデルを開発し、LIME と Grad-CAM による可視化を行った[13]。サル痘はウイルス性の感染症であり、発疹が発生する。初期では、他の発疹症との鑑別が困難なことから、深層学習を用いてサル痘の診断精度を向上させることが提案された。提案モデルは、可視化技術により患部を特定し、他の関連疾患と区別するための補助ツールとして役立つことが示されている。また、Palatnik らはリンパ節転移の有無を深層学習による分類モデルで識別し、LIME を使用して可視化を行った[14]。リンパ節転移の診断では、病理医間で20% 以上の症例で意見が一致しないことが報告されており、これが人為的なエラーの原因となっている。そこで、深層学習を使用してリンパ節転移の有無を識別し、その判断根拠を可視化することで、病理医の負

担を軽減し、正確で一貫性のある診断結果を提供できることが提案された。LIME による可視化を通して、医用アノテーションで定義された領域を強調していることが確認され、AI モデルが人間の診断に沿った判断を行っていることが実証された。

3. オクルージョン感度

オクルージョン感度は、入力画像の特定の領域を隠蔽し、その領域がモデルの予測に与える影響を調べる手法である[7, 15]。はじめに、サイズ $u \times v$ の原画像 X に対して、i を横方向の隠蔽領域のインデックス、j を縦方向の隠蔽領域のインデックスとし、任意のサイズの隠蔽領域を0に置き換えて、処理された画像 $X_{i,j}$ を取得する。マスクのサイズやストライド、置き換える値は任意で設定することができる。次に、$X_{i,j}$ を用いてモデルの予測を行い、その出力を $f(X_{i,j})$ とする。この予測結果を、オクルージョンしていない画像の予測 $f(X)$ と比較し、感度を測定する。ここで、差分比較のみを使用すると画像間でスケールが異なるため、出力に活性化関数を使用する。Gallo らはロジスティックシグモイドを使用した[14]。あるマスクの組合せにおけるオクルージョン感度を式 (5) に示す。

$$O_{i,j} = \sigma\left(f(X) - f(X_{i,j})\right) \tag{5}$$

i, j ：隠蔽を行う高さ方向と幅方向のインデックス
$O_{i,j}$ ：処理された画像 $X_{i,j}$ に対するオクルージョン感度
σ ：活性化関数
$f(X)$ ：オクルージョンしていない予測結果
$f(X_{i,j})$ ：オクルージョンした予測結果

最後に、各オクルージョン感度の平均を取ることで、全体のオクルージョン感度を取得することができる。最終的な原画像 X に対するオクルージョン感度を式 (6) に示す。

$$OS_{u,v} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} O_{i,j} \tag{6}$$

i, j ：隠蔽を行う高さと幅のインデックス
$OS_{u,v}$ ：原画像 u × v におけるオクルージョン感度
n ：マスク数
O$O_{i,j}$ ：処理された画像 $X_{i,j}$ に対するオクルージョン感度

次に、オクルージョン感度が使用されている先行研究を紹介する。Gallo らは Whole Slide Imaging を用いて前立腺癌の検出モデルにオクルージョン感度を使用し、その可視化を行った[15]。前立腺癌は男性に好発する癌であり、早期発見が治療効果に大きな影響を与えるため、高い精度の診断が求められている。深層学習を活用することで､診断や予後の支援が可能となり、病理医の日常業務の負担軽減にも貢献する。提案されたモデルによる可視化は、中程度の光学分解能での病理医のアプローチに類似していることが示され、病理診断や予後、予測に関連するこれまで認識されていなかった形態的特徴を特定する可能性があると述べられている。次に、内山らはビデオ認識ネットワークの可視化手法としてオクルージョン感度を拡張し、動画データにおけるモデルの判断過程を視覚的に説明する手法を提案した[16]。ビデオ認識では、複雑な時間的変化や動きを捉える必要があり、深層学習を用いた動画解析はさまざまな応用が期待されている。従来のオクルージョン感度は単一の画像分類に使用されるが、動きなどを考慮した手法に拡張することで、動画においてもモデルの判断過程を視覚的に説明できることが示された。さらに、提案された手法は従来の方法と比較して理解しやすく、明確な説明を提供できることが確認された。

4. t-SNE

t-SNE は、高次元データを2次元や3次元などの低次元データに次元削減することで、視覚的にモデルを評価するための手法の一つである[17]。この手法は SNE の変法であり、$x_i, x_j \in \mathbb{R}^n$ となる点 x_i と点 x_j の類似性はユークリッド距離を用いて条件付き確率 $p_{j|i}$ として定義される。式 (7) にデータ x_i に対する x_j のガウス分布に基づく条件付き確率 $p_{j|i}$ を定義する。

$$p_{j|i} = \frac{\exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma_i^2}\right)}{\sum_{k \neq i}\exp\left(-\frac{\|x_i - x_k\|^2}{2\sigma_i^2}\right)}, \qquad p_{i|i} = 0 \tag{7}$$

次に、式 (8) に x_i, x_j 間の近接度を、n をデータ点の総数として定義する[18]。

$$p_{ij} = \frac{p_{j|i} + p_{i|j}}{2n} \tag{8}$$

σ_i はデータの密度に依存するため、点 i の有効な近傍の個数の尺度を指定する必要がある。このパラメーターをパープレキシティといい、シャノンエントロピー $H(p_i)$ をもとに表される。式 (9) にパープレキシティの式を示す。

$$Perp(p_i) = 2^{H(p_i)}, \qquad H(p_i) = -\sum_j p_{j|i}\log_2 p_{j|i} \tag{9}$$

次に、低次元空間での y_i と y_j の類似性は、Student-t 分布を用いて条件付き確率 q_{ij} として式（10）のように表される。

$$q_{ij} = \frac{\left(1 + \|y_i - y_j\|^2\right)^{-1}}{\sum_{k \neq l}\left(1 + \|y_k - y_l\|^2\right)^{-1}} \quad (10)$$

ここで、q_{ij} で Student-t 分布を用いるのは、$p_{j|i}$ と同様にガウス分布を適用するとデータ間の距離が縮まり、適切な可視化ができなくなる「クラウディング問題」が発生するためである。q_{ij} にガウス分布を適用していたのが SNE であり、t-SNE はクラウディング問題を改善した手法である。次に、p_{ij} と q_{ij} の差をできる限り小さくする必要がある。そこで、結合確率分布 P と Q の Kullback-Leibler Divergence という損失関数を使用する。式（11）に損失関数 C を示す。

$$C = KL(P\|Q) = \sum_i \sum_j p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}} \quad (11)$$

損失関数の最小化には勾配降下法を用いる。勾配は式（12）で計算され、式（13）を用いて最適な値になるように更新が行われる。

$$\frac{\partial C}{\partial y_i} = 4 \sum_j (p_{ij} - q_{ij})(y_i - y_j) \quad (12)$$

$$Y^{(t)} = Y^{(t-1)} + \eta \frac{\partial C}{\partial Y} + \alpha^{(t)}\left(Y^{(t-1)} - Y^{(t-2)}\right) \quad (13)$$

$Y^{(t)}$：反復 t における全ての解
η　：学習率
$\alpha^{(t)}$：モーメンタム係数

最後に、この更新した解をプロットすることで、プロットした解の時点での分類の挙動を可視化することができる。

次に、t-SNE が使用されている先行研究を紹介する。森崎らは、胸部 CT 画像を用いたびまん性肺疾患の陰影識別に深層学習を使用し、識別性能を評価した[19]。びまん性肺疾患は肺の広範囲にわたる病変が特徴であり、早期発見と正確な診断が求められる。森崎らは supervised contrastive learning を適用したびまん性肺疾患の陰影識別モデルを提案し、t-SNE を用いて特徴ベクトルの分布を可視化することで、CNN よりも識別に有用な特徴を抽出できることを示した。次に、Gang らは、深層学習を用いた肺がん患者の胸部 X 線画像の解析において、肺のセグメンテーション、骨影の除去、t-SNE による次元削減の効率性を実証した[20]。放射線科医は胸部 X 線画像を用いてがんの徴候を検出するが、専門医の不足や手順の複雑さが迅速な診断を妨げている。しかし、深層学習を使用することで、胸部 X 線画像から多くの肺疾患を自動的に検出し、認定医を超えるレベルの精度で診断することが可能になった。提案手法では、3種類の次元削減を組み合わせることで、学習速度が最も速く、精度も高い結果が得られた。前処理技術を活用した次元削減は、深層学習を用いた胸部 X 線画像解析の効率化と精度向上に寄与する可能性を示した。

考　察

深層学習の発展に伴い、様々な分野で CNN を活用した研究が広がっている。特に、AI の意思決定を解釈するための可視化手法が求められており、本稿で紹介した Grad-CAM、LIME、オクルージョン感度、t-SNE などの手法が開発されてきた。これらの手法により、モデルの判断根拠を直感的に理解することが可能となり、誤分類の要因分析やモデルの改良につながる。しかし、それぞれの手法には利点と欠点が存在する。Grad-CAM はモデル内でクラス識別性を視覚化するヒートマップを生成するが、解像度が低く、細部の情報が失われる可能性がある。LIME はモデルに依存しない手法であるため、局所的な特徴の重要度を評価できるが、計算コストが高く、限定された範囲での評価となる。オクルージョン感度はシンプルな手法であるが、出力結果が平滑化されやすく、計算コストが高い。t-SNE は高次元データの分布を可視化する手法であるが、パラメーターの設定の難しさなどがある。このように手法によって特徴があるため、評価する AI モデルの特徴に合わせて可視化手法を適切に選択し、また組み合わせて活用することで、モデルの信頼性を向上することができると考える。

今後の課題として、より高解像度な可視化技術やリアルタイムでの可視化技術の発展が求められる。特に、リアルタイムでの可視化が可能になれば、自動運転や防犯カメラなど多岐にわたる分野での応用が期待できる。さらに、人間の直感や経験を考慮した可視化技術を開発することができれば、AI が提供する結果の解釈性がさらに広がると考えられる。一方で、可視化技術によって得られた結果は、ユーザーの信頼を得ることにつながる一方で、解釈の仕方によっては人が誤った判断をする恐れがある。そのため、可視化技術の向上だけでなく、可視化結果を評価するための基準の確立も重要であると考える。

ま と め

深層学習を用いた分類モデルは、多くの分野で利用

されているが、「ブラックボックス」の性質が問題視されていた。そのため、モデルの予測過程を解釈可能な形にする技術が発展してきた。可視化手法を使用することで、深層学習がどのように予測結果を得たのか、どの部分に注目しているのかを示すことができるため、モデルの信頼性が向上する。深層学習における可視化手法として様々なものが存在するが、本稿では、Grad-CAM、LIME、オクルージョン感度、t-SNE を紹介した。これらの手法はそれぞれ異なるアプローチを取っており、必要に応じて使い分ける必要がある。Grad-CAM は、ニューラルネットワークの最終畳み込み層の勾配情報を利用して、入力画像のどの部分が予測に寄与したかをヒートマップとして可視化する手法である。LIME は、入力データの局所的な摂動を用いて特徴の重要度を推定し、予測結果を説明する手法である。オクルージョン感度は、入力画像の一部をマスクしながら推論結果の変化を観察し、どの領域が予測に影響を与えているかを分析する手法である。t-SNE は高次元データの分布を低次元空間に削減する手法であり、モデル全体の挙動や特徴の分布を理解することに適している。このように、可視化手法を適切に使用することでユーザーに予測理由を提供することができ、人は信頼してモデルを使用することができる。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Zhao X, Wang L, Zhang Y, Han X, Deveci M, Parmar M: A review of convolutional neural networks in computer vision. Artif Intell Rev. 2024: 57: 99.

2） Kaji S, Kida S: Overview of image-to-image translation by use of deep neural networks: denoising, super-resolution, modality conversion, and reconstruction in medical imaging. Radiol Phys Technol. 2019: 12: 235-248.

3） Szegedy C, Liu W, Jia Y, Sermanet P, Reed S, Anguelov D et al: Going deeper with convolutions. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2015: 1-9.

4） Simonyan K, Zisserman A: Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015). 2015: 1-14.

5） Chan HP, Samala RK, Hadjiiski LM, Zhou C: Deep Learning in Medical Image Analysis. Adv Exp Med Biol. 2020: 1213: 3-21.

6） Ribeiro MT, Singh S, Guestrin C: Why should I trust you?: explaining the predictions of any classifier. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016: 1135-1144.

7） Zeiler MD, Fergus R: Visualizing and understanding convolutional networks. In Computer Vision–ECCV 2014 13th European Conference. Zurich, Switzerland. Part I. Springer International Publishing. 2014: 818-833.

8） Selvaraju RR, Cogswell M, Das A, Vedantam R, Parikh D, Batra D: Grad-CAM:visual explanations from deep networks via gradient-based localization. Int J Comput Vis. 2020: 128: 336-359.

9） Zhang Y, Hong D, McClement DG, Oladosu O, Pridham G, Slaney G: Grad-CAM helps interpret the deep learning models trained to classify multiple sclerosis types using clinical brain magnetic resonance imaging. J Neurosci Methods. 2021: 353: 109098.

10） Panwar H, Gupta PK, Siddiqui MK, Morales-Menéndez R, Bhardwaj P, Singh V: A deep learning and Grad-CAM based color visualization approach for fast detection of COVID-19 cases using chest X-ray and CT-Scan images. Chaos Solitons Fractals. 2020: 140: 110190.

11） Talaat FM, Gamel SA, El-Balka RM, Shehata M, ZainEldin H: Grad-CAM enabled breast cancer classification with a 3D Inception-ResNet V2: empowering radiologists with explainable insights. Cancers (Basel). 2024: 16: 3668.

12） Magesh PR, Myloth RD, Tom RJ: An explainable machine learning model for early detection of parkinson's disease using LIME on DaTSCAN imagery. Comput Biol Med. 2020: 126: 104041.

13） Sorayaie AA, Naemi A, Babaei RS, Bagherzadeh MJ, Pirnejad H, Wiil UK: Monkeypox detection using deep neural networks. BMC Infect Dis. 2023: 23: 438.

14） Sousa IP, Vellasco MBR, Silva EC: Local interpretable model-agnostic explanations for classification of lymph node metastases. Sensors (Basel). 2019: 19: 2969.

15） Gallo M, Krajňanský V, Nenutil R, Holub P, Brázdil T:

Shedding light on the black box of a neural network used to detect prostate cancer in whole slide images by occlusion-based explainability. N Biotechnol. 2023: 78: 52-67.
16）Uchiyama T, Sogi N, Niinuma K, Fukui K: Visually explaining 3D-CNN predictions for video classification with an adaptive occlusion sensitivity analysis. In Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. 2023: 1513-1522.
17）Maaten LV, Hinton GE: Visualizing data using t-SNE. J Mach Learn Res. 2008: 9: 2579-2605.
18）山西健司，竹村彰通，大西立顕，渡辺努，山西健司，林克彦，他：データサイエンスの数理．数理科学 2019年6月号 No.672．東京．株式会社サイエンス社．2019: 34〜35.
19）森崎幹也，間普真吾，木戸尚治：Supervised contrastive learning を用いた胸部 CT 画像におけるびまん性肺疾患の陰影識別．Medical Imaging Technology. 2022: 40: 233〜240.
20）Gang P, Zhen W, Zeng W, Gordienko Y, Kochura Y, Alienin O, et al: Dimensionality reduction in deep learning for chest X-ray analysis of lung cancer. In 2018 tenth international conference on advanced computational intelligence (ICACI). 2018: 878-883.

Abstract

Overview of visualization techniques for interpreting AI decision-making

Masafumi Akanuma, Keisuke Usui

Department of Radiological Technology, Graduate school of Health Science, Juntendo University

With the rapid development of artificial intelligence (AI) systems, the importance of making AI's decision-making process and reasoning interpretable has increased. In particular, in fields such as healthcare and engineering, AI decisions directly affect human life, safety, and economic consequences, making it essential to clarify the decision-making process. Improving the visualization of AI decision-making not only enhances the reliability of the models but also aids in analyzing the causes of misjudgments and improving the models. On the other hand, deep learning models are characterized as "black boxes," making it difficult to directly understand which features influenced their decisions. To address this challenge, techniques to visualize AI decision-making have been developed, and efforts to improve model interpretability are underway. This paper focuses on techniques that visually show the rationale behind model decisions in image classification using AI, such as gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM), local interpretable model-agnostic explanations (LIME), occlusion sensitivity, and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE), and introduces their basic mechanisms, features, and application examples. By utilizing these techniques, the visualization of AI decision-making can be enhanced, leading to the construction of more reliable systems. In the future, as AI visualization technologies continue to develop and their practical applications expand across various fields, it is expected that users will be able to intuitively understand AI's decisions and use them in a safe and confident manner.

Key Words: image classification, convolutional neural network, deep learning, explainable AI

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 48-54, 2026]

論　説

偏平足を有する者における足部への内側縦アーチサポートが動的膝外反に及ぼす影響

森　香奈[1)]、池永　真[1, 2)]、相澤純也[1, 3)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科
[2)] 川口工業総合病院リハビリテーション科
[3)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

偏平足は足部の構造的特徴として内側縦アーチの低下を伴い、足部の疼痛だけでなく、膝蓋大腿疼痛症候群や前十字靭帯損傷などの膝疾患のリスク因子となる可能性が指摘されている。本論説の目的は、偏平足を有する者において、内側縦アーチサポートが歩行およびランニング時の動的膝外反に及ぼす影響を整理し、その臨床的意義を検討することとした。本論説では、偏平足を有する者に対して内側縦アーチサポートを使用し、歩行およびランニング時の動的膝外反への影響を調査した、2020年から2024年に発表された研究をレビューした。その結果、内側縦アーチサポートの使用により歩行およびランニング時に動的膝外反が制動される可能性が示唆されたが、影響の有無には研究間でばらつきが見られた。今後はより質の高い研究の蓄積を通じ、個別の足部アライメントに応じた内側縦アーチサポートの使用や殿筋や足部のトレーニングとの併用を提案する。

キーワード：偏平足、内側縦アーチ、インソール、動的膝外反、バイオメカニクス

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，55-59頁，2026年（受付　2025.2.13.；受理　2025.12.4.）

1. 緒　　言

偏平足とは内側縦アーチの低下、後足部の外反と前足部の外転が特徴的な足部である[1, 2)]。整形外科的、神経学的に問題のない日本人女性大学生と日本人男性大学生（平均年齢19.9歳）を対象とした調査では、女性では33.3%、男性では22% が偏平足を有していた[3)]。偏平足は足底腱膜やアキレス腱の痛みなど、足部の障害の原因となる[4)]。さらに、運動連鎖による内側縦アーチの低下は下腿内旋を誘導し、動的膝外反を引き起こすため、膝蓋大腿疼痛症候群などの膝疾患のリスクになることが報告されている[4)]。

偏平足の非侵襲的な治療には、内側縦アーチをサポートするインソールや運動療法が用いられる[5)]。特に内側縦アーチサポートの使用は簡便であるため、ドイツでは人口の約8% が医療目的で偏平足に対する内側縦アーチサポートを使用している[5)]。一方で、偏平足を改善するために内側縦アーチサポートを使用する根拠は十分ではないのが現状である[4)]。

いくつかのシステマティックレビューでは、内側縦アーチサポートが偏平足を有する者の足関節および足部のバイオメカニクスに及ぼす影響が示されている[4, 5)]。それらによると、内側縦アーチサポートの使用によって、歩行中の足底圧の分散[6)]、足関節背屈角の増加[7, 8)]、足関節回内の減少[9)] が認められた。しかし、動的膝外反への影響に関するシステマティックレビューはない。そのため、偏平足がリスク因子である膝疾患が、内側縦アーチサポートによって予防できる可能性があるかは不明である。本論説では、内側縦アーチサポートが歩行中とランニング中の動的膝外反に及ぼす影響を整理し、その臨床的意義を検討した。

2. 方　　法

PubMed 上で MeSH 検索を参考に、偏平足、内側縦アーチサポート、動的膝外反を意味する言葉を用いて検索式を作成した（**表1**）。2020年から2024年までに発表されている論文を対象とした。

採用基準は以下の通りとした。1）英語論文、2）査読付きジャーナルに掲載、3）被験者が偏平足を有していること、4）介入に内側縦アーチサポートを使用していること、5）被験者が行う課題が歩行またはランニングであること、6）前額面上での膝の運動学的・運動力学的指標をアウトカムとしていること。

除外基準は以下の通りとした。1）レビュー論文、2）

責任著者：相澤純也
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12
E-mail: j.aizawa.ue@juntendo.ac.jp

表 1　検索式

((((((((((((((((((((Talipes Valgus) OR (Valgus, Talipes)) OR (Flat Foot)) OR (Foot, Flat)) OR (Pes Planus)) OR (Flat Feet)) OR (Feet, Flat)) OR (Flatfeet)) OR (Vertical Talus)) OR (Talus, Vertical)) OR (Rigid Flatfoot)) OR (Flatfoot, Rigid)) OR (Convex Foot)) OR (Foot, Convex)) OR (Convex Pes Valgus)) OR (Pes Valgus, Convex)) OR (Vertical Talus, Congenital)) OR (Flexible Flatfoot)) OR (Flatfoot, Flexible)) OR (Acquired Adult Flatfoot Deformity)) AND ((((((((((((((((((((((((Orthoses, Foot) OR (Foot Orthosis)) OR (Orthosis, Foot)) OR (Foot Orthotic Devices)) OR (Device, Foot Orthotic)) OR (Devices, Foot Orthotic)) OR (Foot Orthotic Device)) OR (Orthotic Device, Foot)) OR (Orthotic Devices, Foot)) OR (Foot Arch Supports)) OR (Arch Support, Foot)) OR (Arch Supports, Foot)) OR (Foot Arch Support)) OR (Support, Foot Arch)) OR (Supports, Foot Arch)) OR (Orthotic Shoe Inserts)) OR (Insert, Orthotic Shoe)) OR (Inserts, Orthotic Shoe)) OR (Orthotic Shoe Insert)) OR (Shoe Insert, Orthotic)) OR (Shoe Inserts, Orthotic)) OR (Orthotic Insoles)) OR (Insole, Orthotic)) OR (Insoles, Orthotic)) OR (Orthotic Insole)) OR (insoles))) AND ((((dynamic knee valgus) OR (knee valgus)) OR (knee abduction)) OR (biomechanics))

関節リウマチや脳性麻痺など二次的に偏平足を有する者を被験者としていること。

3. 結　　果

検索の結果、123件の文献が抽出され、採用基準に該当した論文は4編であった（表2）。

1）内側縦アーチサポートの歩行中の動的膝外反への影響

偏平足を有する者に対する内側縦アーチサポートの歩行中の動的膝外反への影響について検討した論文は3編であった。すべての論文において、歩行動作は三次元動作解析装置を用いて測定されていた。Desmyttere らの論文[10] では、control 群、剛性の低い内側縦アーチを使用する flexible foot orthoses（FOs）群、剛性の高い内側縦アーチを使用する rigid Fos 群、剛性の低い内側縦アーチに Thomas heel を加える posting 群の4群における歩行動作が比較された。Control 群と flexible FOs 群、control 群と rigid FOs 群の間に有意な差は見られなかった。Posting 群と control 群、posting 群と flexible FOs 群の間で膝外反モーメントが有意に増大したが、Thomas heel の追加によって内側荷重になったことが理由であると考察されており、内側縦アーチサポート単独の影響ではなかった。Hsu らの論文[11] では、内側縦アーチサポートを使用した群は、Control 群と比較して膝内外反に有意な差はなかったが、膝内反モーメントが増加する傾向にあった。Peng Y らの論文[12] では、内側縦アーチサポートを使用した群は、Control 群と比較して膝内反モーメントが増大した。これらの論文により、議論の余地はあるものの、内側縦アーチサポートは歩行中における動的膝外反に対して一定の影響を及ぼす可能性が示唆される。

表 2　偏平足を有する者に対する内側縦アーチサポートの動的膝外反への影響を検討した研究の一覧

筆者と出版年	被験者数	介　　入	課　題	評価指標	下肢前額面上への影響
Desmyttere G, et al. (2021)	19	ランニングシューズ（control）vs. 柔らかい内側縦アーチサポート（flexible FOs[a]）vs. 柔らかい内側縦アーチサポート＋後足部への Thomas heel（posting）vs. 硬い内側縦アーチサポート（rigid FOs）	1 か月間着用後 5 分間のトレッドミル歩行	三次元動作解析によるトレッドミル歩行中の下肢の運動学的・運動力学的指標の測定	歩行立脚期 30%、歩行立脚期 60-80% での膝外反モーメント増加（posting vs. control） 歩行立脚期 60-80% での膝外反モーメント増加（posting vs. flexible FOs）
Hsu CY, et al. (2022)	10	靴（shoe condition）vs. 靴＋自動スキャンで制作した内側縦アーチサポート（scan condition）vs. 靴＋全面接地のインソール（total condition）vs. 靴＋内側楔状板（wedge condition）	歩行	三次元動作解析とフォースプレートによる下肢の運動学的・運動力学的指標の測定	膝外反モーメントについては各条件間で有意差なし
Peng Y, et al. (2020)	15	ランニングシューズ＋内側縦アーチサポート（WSFO[b]）vs. ランニングシューズ（WS[c]）	10m 歩行	三次元動作解析とフォースプレートによる体幹、下肢の運動学的・運動力学的指標の測定	膝内反モーメント増加（WSFO vs. WS）
Ataabadi PA, et al. (2022)	20	ランニングシューズ（SHOD[d]）vs. ランニングシューズ＋カスタム内側縦アーチサポート（FO_SHOD[e]）vs. ランニングシューズ＋ low-dye taping（LDT_SHOD[f]）	ランニング	三次元動作解析とフォースプレートによる足部の運動学的・運動力学的指標の測定	膝内反角度増加（FO_SHOD vs. SHOD, LDT_SHOD） 内的膝外反モーメント増加（FO_SHOD vs. SHOD）

a, FOs: foot orthoses. b, WSFO: walking with shoes and foot orthoses. c, WS: walking with shoes. d, SHOD: running with shoes. e, FO_SHOD: running with shoes and foot orthoses. f, LDT_SHOD: running with shoes and low-Dye Tape.

2）内側縦アーチサポートのランニング中の動的膝外反への影響

偏平足を有する者に対する内側縦アーチサポートのランニング中の動的膝外反への影響について検討した論文は1編であった。Ataabadi らの論文[13] では、ランニング時に内側縦アーチサポートを装着した群は、テーピング群および Control 群と比較して、ランニング中の立脚期50%−80% で膝内反角が増大した。また、ランニング中の立脚期30%−70% で内的膝外反モーメントが増大した。内的膝外反モーメントの増大は外的膝内反モーメントの増大を示しているため[14]、内側縦アーチサポートの使用によって膝外反が制動されたと考えられる。そのため、内側縦アーチサポートによってランニング中における動的膝外反を制動できる可能性が示唆される。

3. 考　　察

以上の先行研究から、偏平足を有する者に対する内側縦アーチサポートの使用は、歩行中およびランニング中の動的膝外反に影響を及ぼす可能性が示唆された。一方で、すべての研究で一貫した結果が得られているわけではない。そこで、内側縦アーチサポートの使用に関する今後の展望を述べる。

1）偏平足の分類を考慮した内側縦アーチサポートの選択

偏平足の重症度を評価する指標として、Foot Posture Index（FPI-6）がある。FPI-6は、足部アライメントを3次元的に捉える指標であり、信頼性も高い[1]。偏平足を6項目と多角的に評価することから[15]、偏平足の足部アライメントには複数のパターンがあることがわかる。そのため、偏平足を有する者達に同一の内側縦アーチサポートを使用するべきではないと考える。近年、足部のスキャンや3D プリンターの技術が向上している[16]。今後は、個人の足部アライメントに合わせた、3D プリンターを用いた内側縦アーチサポートの作成や効果検証をする必要があると考える。

2）内側縦アーチサポートと併用すべき偏平足への介入法

偏平足への介入としては、内側縦アーチサポートによる受動的な介入のほかに、ショートフットエクササイズのような能動的な介入によって舟状骨落下テストの値が減少したとの報告もある[17]。エクササイズの効果が現れるまで時間を要することから、受動的な改善方法として内側縦アーチサポートを併用するなど、理学療法計画に応じて介入法を選択することが重要である。

3）内側縦アーチサポートの利用に関する学術的な課題

偏平足に対する内側縦アーチサポートを用いた治療のシステマティックレビューでは、偏平足の評価法や内側縦アーチサポートの処方法について統一した見解は得られていない[4]。また、無作為化比較試験を行った研究が少なく、現在までにガイドラインは作成されていない。今後は無作為化比較試験を行う必要があるが、重症度の異なる被験者へ標準化された介入を行えないことが課題点である。

また、偏平足への介入による歩行時の足底圧やバイオメカニクスを検討している研究はあるが、内側縦アーチサポートの有無による障害発生率を前向きに調査した研究はない。そのため、内側縦アーチサポートの使用が実際に障害発生に影響するかは不明である。偏平足に対する介入がエビデンスに基づいて行われるために、質の高い研究を積み重ねることが必要である。

4. 結　　論

偏平足成人に対する内側縦アーチサポートの使用は、課題条件や個々の足部特性に依存するものの、歩行中およびランニング中の動的膝外反の抑制に寄与し得る。FPI-6などの評価に基づく適合と、股関節筋群強化やショートフットエクササイズ等の併用が臨床効果を高める可能性がある。

謝　　辞

本論説執筆にあたり、ご指導いただいた相澤純也教授、論説執筆にご協力いただいた相澤研究室の池永真先生、ならびに日頃サポートいただいている皆様に感謝の意を表します。

倫理的配慮

本論説は人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1）Jafarnezhadgero A, Esmaeili A, Hamed Mousavi S, Granacher U: Effects of foot orthoses application during walking on lower limb joint angles and moments in adults with flat feet: A systematic review with meta-

analysis. J Biomech. 2024: 176: 112345.
2） Soltani N, Fatahi A: Flatfoot Deformity; Exercise to Therapeutic Interventions: A Systematic Review. Iran J Public Health. 2024: 53: 305-312.
3） 深澤雄希，金承革，石黒友康：健常大学生における外反母趾および扁平足の実態調査とスポーツ歴との関係．健康科学大学紀要．2008: 4: 195〜201.
4） Herchenröder M, Wilfling D, Steinhäuser J: Evidence for foot orthoses for adults with flatfoot: a systematic review. J Foot Ankle Res. 2021: 14: 57.
5） Chen H, Sun D, Fang Y, Gao S, Zhang Q, Bíró I, et al: Effect of orthopedic insoles on lower limb motion kinematics and kinetics in adults with flat foot: a systematic review. Front Bioeng Biotechnol. 2024: 12: 1435554.
6） Aminian G, Safaeepour Z, Farhoodi M, Pezeshk AF, Saeedi H, Majddoleslam B: The effect of prefabricated and proprioceptive foot orthoses on plantar pressure distribution in patients with flexible flatfoot during walking. Prosthet Orthot Int. 2013: 37: 227-232.
7） Alsaafin N SN, Mohammad Zadeh SA, Hegazy FA: Effect of Different Foot Orthosis Inverted Angles on Walking Kinematics in Females with Flexible Flatfeet. J Multidiscip Healthc. 2023: 16: 2613-2623.
8） Chen YC, Lou SZ, Huang CY, Su FC: Effects of foot orthoses on gait patterns of flat feet patients. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2010: 25: 265-270.
9） Chinpeerasathian C, Sin Oo P, Siriphorn A, Pensri P: Effect of foot orthoses on balance among individuals with flatfoot: A systematic review and meta-analysis. PLoS One. 2024: 19: e0299446.
10） Desmyttere G, Hajizadeh M, Bleau J, Leteneur S, Begon M: Anti-pronator components are essential to effectively alter lower-limb kinematics and kinetics in individuals with flexible flatfeet. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2021: 86: 105390.
11） Hsu CY, Wang CS, Lin KW, Chien MJ, Wei SH, Chen CS: Biomechanical Analysis of the FlatFoot with Different 3D-Printed Insoles on the Lower Extremities. Bioengineering (Basel). 2022: 9: 563.
12） Peng Y, Wong DW, Wang Y, Chen TL, Tan Q, Chen Z, et al: Immediate Effects of Medially Posted Insoles on Lower Limb Joint Contact Forces in Adult Acquired Flatfoot: A Pilot Study. Int J Environ Res Public Health. 2020: 17: 2226.
13） Ataabadi PA, Abbassi A, Letafatkar A, Vanwanseele B: The effects of foot orthosis and low-dye tape on lower limb joint angles and moments during running in individuals with pes planus. Gait Posture. 2022: 96: 154-159.
14） Walter JP, D'Lima DD, Colwell Jr CW, Fregly BJ: Decreased knee adduction moment does not guarantee decreased medial contact force during gait. Journal of Orthopaedic Research. 2010: 28: 1348-1354.
15） Redmond AC, Crosbie J, Ouvrier RA: Development and validation of a novel rating system for scoring standing foot posture: the Foot Posture Index. Clin Biomech (Bristol). 2006: 21: 89-98.
16） Jandova S, Mendricky R: Benefits of 3D Printed and Customized Anatomical Footwear Insoles for Plantar Pressure Distribution. 3D Print Addit Manuf. 2022: 9: 547-556.
17） Elsayed W, Alotaibi S, Shaheen A, Farouk M, Farrag A: The combined effect of short foot exercises and orthosis in symptomatic flexible flatfoot: a randomized controlled trial. Eur J Phys Rehabil Med. 2023: 59: 396-405.

Abstract

The influence of medial longitudinal arch supports to dynamic knee valgus in individuals with flatfoot

Kana Mori[1)], Makoto Ikenaga[1, 2)], Junya Aizawa[2, 3)]

[1)] Graduate school of Health Science, Juntendo University
[2)] Department of Rehabilitation, Kawaguchi Kogyo General Hospital
[3)] Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Flat foot is a structural disorder that shows reduced medial longitudinal arch height and has been said to be a potential risk factor not only for foot pain but also for knee disorders such as patellofemoral pain syndrome and anterior cruciate ligament injuries. This essay aimed to organize the effects of medial longitudinal arch supports on dynamic knee valgus while walking and running in people with flat feet and to discuss their clinical significance. This essay reviewed the articles published between 2020 and 2024 investigating the use of medial longitudinal arch supports for people with flat foot and their effects on dynamic knee valgus during walking and running. The results suggested that the use of medial longitudinal arch supports might control dynamic knee valgus during walking and running, but there was variation in the effects between studies. Through the accumulation of higher-quality studies in the future, suggestions could be made for optimizing the medial longitudinal arch supports according to individual foot alignment and in combination with other intervention methods.

Key Words: flat foot, medial longitudinal arch, insole, dynamic knee valgus, biomechanics

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 55-59, 2026]

論　説

腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションの開始時期と介入内容の現状：ナラティブレビュー

桐山魁生、飛山義憲

順天堂大学大学院保健医療学研究科

要　旨

腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションは、疼痛軽減や機能障害の改善に有効とされているが、その介入開始時期や介入内容に関する明確なコンセンサスは得られていない。本ナラティブレビューでは、腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などの腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションの介入開始時期および介入内容の傾向を整理することを目的とし、最新の文献を調査した。文献検索と選定の結果、最終的に11件の文献を対象とした。介入開始時期は、術後当日から数日以内に開始されるものから、術後2週や8週から開始されるものまであった。対象文献のうち9件の文献（81.8%）では、術後入院中からリハビリテーション介入が開始されていた。介入内容に関しては、運動療法（脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、有酸素運動）に加え、心理・教育的介入（患者教育、認知行動療法）が実施されていた。今後は、統一したプロトコルの確立に向け、介入プロトコルの開発とその有効性および安全性の検証を進める必要がある。

キーワード：腰椎変性疾患、腰椎椎間板ヘルニア、腰部脊柱管狭窄症、腰椎手術、術後リハビリテーション

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，60-64頁，2026年（受付　2025.4.25.；受理　2025.7.11.）

緒言（背景と目的）

腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症といった腰椎変性疾患は、腰痛や下肢症状を引き起こし、生活の質を低下させる[1)]。保存療法で症状の改善が認められない場合は手術療法が適応される。近年、手術件数は増加しており[2, 3)]、日本においても2003年から2017年の間に脊椎手術件数が2.4倍に増加したことが報告されている[4)]。

腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションは、疼痛軽減や機能障害の改善に有効であることが示されており[5-7)]、理学療法士による介入が推奨されている[8)]。しかし、理学療法士へのアンケート調査では、約30%の施設が術後入院中の患者に対して定型的なリハビリテーションを提供しておらず[9)]、術後の介入開始時期や介入内容についての統一したプロトコルは確立されていない。例えば、介入開始時期については、術後早期から実施する施設もあれば、術後12週経過してから実施する施設もあり、意見が分かれている[9)]。また、介入内容に関しても、脊椎安定化エクササイズや関節可動域運動、起居動作練習、歩行練習など多岐に渡り、プロトコルに基づく介入をしているのは半数以下であった[9)]。このように術後リハビリテーションの有効性が認識されているにもかかわらず、介入開始時期や介入内容に関するコンセンサスは確立されていない[7-11)]。

そこで、本ナラティブレビューでは、腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションの介入開始時期や介入内容の傾向を整理し、今後の統一したプロトコル確立に向けた基盤を提供することを目的とした。

方　法

2025年1月31日までに英語または日本語で公開された、腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションに関連するランダム化比較試験（randomized controlled trial: RCT）を含む介入研究または観察研究を対象とした。レビューの質向上のため、ナラティブレビューの質評価スケールである Scale for the Assessment of Narrative Review Articles を用いて、6項目（明確な目的、文献選定の説明、適切な参照、科学的根拠の提示、一貫性のある論理構成、適切な結論）に基づいて構成と内容の妥当性を確認した[12)]。

1. 文献検索

英語文献の検索に PubMed、日本語文献の検索に医

責任著者：飛山義憲
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-8421　東京都文京区本郷2丁目1-1
E-mail: y.hiyama.cj@juntendo.ac.jp

中誌を使用した。英語文献の検索式は（“Lumbar degenerative disease” OR “Lumbar Disc Herniation” OR “Lumbar Spinal Stenosis”）AND（“Spinal Fusion” OR “Spine Fusion” OR “Laminectomy” OR “Lumbar Vertebrae / surgery”）AND（“Early Ambulation” OR “Exercise” OR “Exercise Therapy” OR “Rehabilitation” OR “Physical Therapy” OR “Physiotherapy”）AND（“Postoperative”）とした。また、日本語文献の検索式は、（“腰椎変性疾患 /AL” OR “腰椎椎間板ヘルニア /AL” OR “腰部脊柱管狭窄症 /AL”）AND（“固定術 /AL” OR “除圧術 /AL” OR “脊椎手術 /AL”）AND（“運動療法 /AL” OR “リハビリテーション /AL”）AND（“術後 /AL”）とした。

2. 文献のスクリーニングと抽出

検索で得られた文献のタイトルと概要から一次スクリーニングを行い、適格と判断されたものに対して本文精読による二次スクリーニングを実施した。

一次スクリーニングにおける除外基準は、①腰椎変性疾患以外を対象としているもの、②手術部位に腰椎、仙骨以外を含むもの、③リハビリテーション関連でないもの（手術療法や薬物療法など）、④動物研究または基礎研究、⑤プロトコル論文とした。二次スクリーニングにおいては、上記に加え、⑥術後リハビリテーションの介入開始時期や介入内容が明記されていないもの、⑦全文にアクセスできないものとした。

結　果

文献検索により英語文献127件、日本語文献46件が該当した。一次スクリーニング後、二次スクリーニングでは全ての文献にアクセスでき、最終的に11件の文献が対象となった（**図1**）。対象文献の内訳は、腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などが混在している文献が5件、腰椎椎間板ヘルニアに対する文献が5件、腰部脊柱管狭窄症に対する文献が1件であった（**表1**）。

1. 腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などが混在している文献

介入開始時期は、術後当日[13, 14]、術後翌日[15, 16]、8週[17]であった。介入内容は、運動療法として脊椎安定化エクササイズ[15-17]や運動制御トレーニング[16]、腹式呼吸[14]、有酸素運動[13, 15]、体幹下肢筋力増強エクササイズ[13-15]、関節可動域運動[14, 15]、歩行練習[14, 16]、理学療法士が個別に処方した運動[17]が実施されていた。また、心理・教育的介入として、患者教育[13]や認知行動療法[15]が用いられていた。

2. 腰椎椎間板ヘルニアに対する文献

介入開始時期は、術後当日[18]、術後翌日[19-21]、2週[22]であった。介入内容は、運動療法として脊椎安定化エクササイズ[21, 22]、体幹下肢筋力増強エクササイズ[18, 19, 21]、関節可動域運動[18, 19, 21]、ウィリアムス体操やマッケンジー体操[20]、神経筋促通エクササイズ[22]、関節モビライゼーション[20]、有酸素運動[20]、歩行練習[18]が実施されていた。また、心理・教育的介入として、患者教育[19, 21]が用いられていた。

3. 腰部脊柱管狭窄症に対する文献

介入開始時期の具体的な日数の記載はないが、術後可能な限り早期に離床させていた[23]。介入内容は、運動療法として脊椎安定化エクササイズ、腹式呼吸、体幹下肢筋力増強エクササイズが実施されていた。また、日常生活動作練習として起居動作練習が行われていた。さらに、心理・教育的介入として、姿勢指導が用いられていた[23]。

考　察

本ナラティブレビューでは、腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などの腰椎変性疾患に対する術後リ

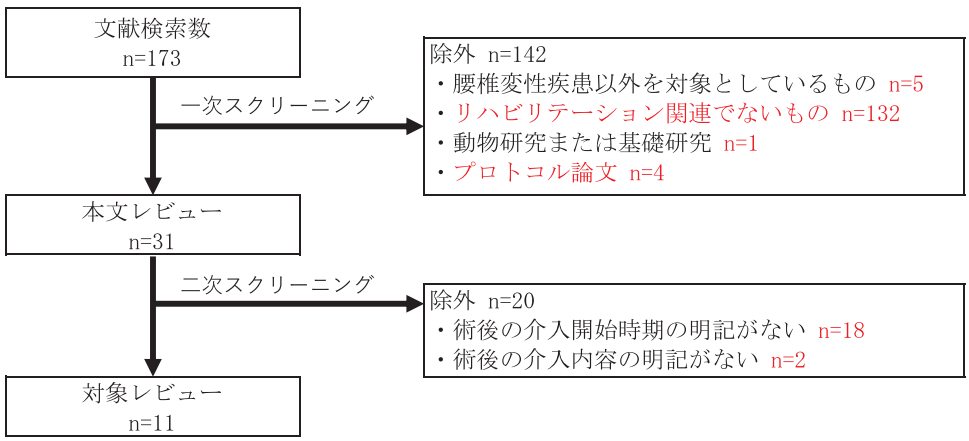


図 1　文献抽出フロー

表 1　文献概要

著者	対象	介入開始時期	介入内容
Nielsen PR, et al.（2010）[13]	腰椎変性疾患に対する固定術または除圧術	術後当日	体幹下肢筋力増強エクササイズ、有酸素運動、患者教育
He W, et al.（2021）[14]	腰椎変性疾患に対する固定術	術後当日	術後当日から腹式呼吸、関節可動域運動、体幹下肢筋力増強エクササイズ 術後翌日から立位、歩行練習を追加
Abbott AD, et al.（2010）[15]	腰椎変性疾患に対する固定術	術後翌日	術後翌日から脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、有酸素運動、日常生活動作練習、認知行動療法
Nie C, et al.（2025）[16]	腰椎変性疾患に対する固定術	術後翌日	術後 1 週までは仰臥位で運動制御トレーニング 術後 2 週から四つ這いで運動制御トレーニング 術後 3 週から座位で運動制御トレーニング 術後 4 週から立位で運動制御トレーニング、歩行練習 術後 5 週から脊椎安定化エクササイズ
Mannion AF, et al.（2007）[17]	腰椎変性疾患に対する除圧術	術後 8 週	脊椎安定化エクササイズ、理学療法士が個別に処方
Zhang R, et al.（2018）[18]	腰椎椎間板ヘルニアに対する内視鏡下椎間板切除術	術後当日	術後当日から関節可動域運動 術後 1 週から仰臥位で体幹下肢筋力増強エクササイズ 術後 2 週から腹臥位で体幹筋力増強エクササイズ 術後 5 週から歩行練習
Kjellby-Wendt G, et al.（2002）[19]	腰椎椎間板ヘルニアに対する椎間板切除術	術後翌日	体幹筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、患者教育
Gencay-Can A, et al.（2010）[20]	腰椎椎間板ヘルニアに対する内視鏡下ヘルニア摘出術	術後翌日	術後翌日から下肢挙上運動、ウィリアムス体操、マッケンジー体操 術後 1 ヶ月から有酸素運動、関節モビライゼーション
Johansson AC, et al.（2009）[21]	腰椎椎間板ヘルニアに対する椎間板切除術	術後翌日	脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、患者教育
Millisdotter M, et al.（2007）[22]	腰椎椎間板ヘルニアに対する開窓術または内視鏡手術	術後 2 週	脊椎安定化エクササイズ、神経筋促通エクササイズ
Chen CY, et al.（2015）[23]	腰部脊柱管狭窄症に対する固定術または除圧術	可能な限り早期に離床	脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、腹式呼吸、日常生活動作練習、姿勢指導

ハビリテーションに関する文献を調査した。

術後リハビリテーションの介入開始時期に関しては、術後当日（3件）、術後翌日（5件）、術後可能な限り早期（1件）、2週（1件）、8週（1件）が設定されており、11件のうち9件の文献（81.8%）で術後入院中からリハビリテーションが開始されていることがわかった。術後早期（4週経過前）にリハビリテーションを開始することは、疼痛軽減や機能障害の改善に有効であるとする報告がある[6]。一方で、近年腰椎椎間板ヘルニアにおいて術後早期に歩行を開始することは再発リスクを高めること[24]、術後2週間の活動制限を設けることで症状の増悪や再発リスクを低下させること[24, 25]が報告されている。今後は、症状の増悪や再発リスクを最小限に抑えつつ、疼痛軽減や機能障害の改善に最も有効な介入開始時期を明らかにすることが求められる。

術後リハビリテーションの介入内容に関しては、多くの文献で脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、有酸素運動が用いられていることがわかった。また、患者教育や認知行動療法などの心理・教育的介入が併用されていた。心理・教育的介入を併用することは運動療法単体と比べて有効であることが、RCT やシステマティックレビューで報告されている[7, 15]。あるシステマティックレビュー[26]では、腰椎固定術後の介入内容として、有酸素運動、軟部組織モビライゼーション、神経モビライゼーション、運動制御トレーニング、関節モビライゼーション、患者教育を推奨している。しかし、このレビューでは、腰椎椎間板ヘルニアや腰部脊柱管狭窄症などの異なる疾患が混在しており、疾患ごとに適した介入内容は明確でない。

今後、疾患ごとの介入プロトコルの開発とその有効性および安全性の検証を進めることで、統一したプロトコルの確立につながる。さらに、心理・教育的介入を取り入れた包括的リハビリテーションの構築とその効果の検証を進めることが、術後患者の疼痛軽減や機能障害、生活の質の改善に寄与するものと考えられる。

結　論

本ナラティブレビューから、腰椎変性疾患に対する術後リハビリテーションの多くは術後入院中から介入が開始され、脊椎安定化エクササイズ、体幹下肢筋力増強エクササイズ、関節可動域運動、有酸素運動に加え、患者教育や認知行動療法などの心理・教育的介入が用いられていることがわかった。今後は、統一したプロトコルの確立に向け、介入プロトコルの開発および検証をしていく必要がある。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Katz JN, Harris MB: Clinical practice. Lumbar spinal stenosis. N Engl J Med. 2008: 358: 818-825.

2) Best MJ, Buller LT, Eismont FJ: National Trends in Ambulatory Surgery for Intervertebral Disc Disorders and Spinal Stenosis: A 12-Year Analysis of the National Surveys of Ambulatory Surgery. Spine (Phila Pa 1976). 2015: 40: 1703-1711.

3) Sastry RA, Chen JS, Shao B, Weil RJ, Chang KE, Maynard K, et al: Patterns in Decompression and Fusion Procedures for Patients With Lumbar Stenosis After Major Clinical Trial Results, 2016 to 2019. JAMA Netw Open. 2023: 6: e2326357.

4) Kobayashi K, Sato K, Kato F, Kanemura T, Yoshihara H, Sakai Y, et al: Trends in the numbers of spine surgeries and spine surgeons over the past 15 years. Nagoya J Med Sci. 2022: 84: 155-162.

5) Mombell K, Perry N, Wade SM, Fredericks D, Glassman D, Morrissey P: Physical Therapy After Lumbar Spinal Fusion is Necessary to Optimize Patient Outcomes. Clin Spine Surg. 2019: 32: 223-225.

6) Snowdon M, Peiris CL: Physiotherapy Commenced Within the First Four Weeks Post-Spinal Surgery Is Safe and Effective: A Systematic Review and Meta-Analysis. Arch Phys Med Rehabil. 2016: 97: 292-301.

7) Bogaert L, Thys T, Depreitere B, Dankaerts W, Amerijckx C, Van Wambeke P, et al: Rehabilitation to improve outcomes of lumbar fusion surgery: a systematic review with meta-analysis. Eur Spine J. 2022: 31: 1525-1545.

8) van Erp RMA, Jelsma J, Huijnen IPJ, Lundberg M, Willems PC, Smeets RJEM: Spinal Surgeons' Opinions on Pre- and Postoperative Rehabilitation in Patients Undergoing Lumbar Spinal Fusion Surgery: A Survey-Based Study in the Netherlands and Sweden. Spine (Phila Pa 1976). 2018: 43: 713-719.

9) Rushton A, Wright C, Heap A, White L, Eveleigh G, Heneghan N: Survey of current physiotherapy practice for patients undergoing lumbar spinal fusion in the United Kingdom. Spine (Phila Pa 1976). 2014: 39: E1380-1387.

10) Barbosa TP, Raposo AR, Cunha PD, Cruz Oliveira N, Lobarinhas A, Varanda P, et al: Rehabilitation after cervical and lumbar spine surgery. EFORT Open Rev. 2023: 8: 626-638.

11) Gilmore SJ, McClelland JA, Davidson M: Physiotherapeutic interventions before and after surgery for degenerative lumbar conditions: a systematic review. Physiotherapy. 2015: 101: 111-118.

12) Baethge C, Goldbeck-Wood S, Mertens S: SANRA-a scale for the quality assessment of narrative review articles. Res Integr Peer Rev. 2019: 4: 5.

13) Nielsen PR, Jørgensen LD, Dahl B, Pedersen T, Tønnesen H: Prehabilitation and early rehabilitation after spinal surgery: randomized clinical trial. Clin Rehabil. 2010: 24: 137-148.

14) He W, Wang Q, Hu J, Lin S, Zhang K, Wang F, et al: A randomized trial on the application of a nurse-led early rehabilitation program after minimally invasive lumbar internal fixation. Ann Palliat Med. 2021: 10: 9820-9829.

15) Abbott AD, Tyni-Lenné R, Hedlund R: Early rehabilitation targeting cognition, behavior, and motor function after lumbar fusion: a randomized controlled trial. Spine (Phila Pa 1976). 2010: 35: 848-857.

16) Nie C, Chen K, Huang M, Zhu Y, Jiang J, Xia X, et al: Postoperative early initiation of sequential exercise program in preventing persistent spinal pain syndrome type-2 after modified transforaminal lumbar interbody fusion: a prospective randomized controlled trial. Eur Spine J. 2025: 34: 191-203.

17) Mannion AF, Denzler R, Dvorak J, Müntener M, Grob D: A randomised controlled trial of post-operative rehabilitation after surgical decompression of the lumbar spine. Eur Spine J. 2007: 16: 1101-1117.

18) Zhang R, Zhang SJ, Wang XJ: Postoperative functional

exercise for patients who underwent percutaneous transforaminal endoscopic discectomy for lumbar disc herniation. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2018: 22: 15-22.
19) Kjellby-Wendt G, Carlsson SG, Styf J: Results of early active rehabilitation 5-7 years after surgical treatment for lumbar disc herniation. J Spinal Disord Tech. 2002: 15: 404-409.
20) Gencay-Can A, Gunendi Z, Suleyman Can S, Sepici V, Çeviker N: The effects of early aerobic exercise after single-level lumbar microdiscectomy: a prospective, controlled trial. Eur J Phys Rehabil Med. 2010: 46: 489-496.
21) Johansson AC, Linton SJ, Bergkvist L, Nilsson O, Cornefjord M: Clinic-based training in comparison to home-based training after first-time lumbar disc surgery: a randomised controlled trial. Eur Spine J. 2009: 18: 398-409.
22) Millisdotter M, Strömqvist B: Early neuromuscular customized training after surgery for lumbar disc herniation: a prospective controlled study. Eur Spine J. 2007: 16: 19-26.
23) Chen CY, Chang CW, Lee ST, Chen YC, Tang SF, Cheng CH, et al: Is rehabilitation intervention during hospitalization enough for functional improvements in patients undergoing lumbar decompression surgery? A prospective randomized controlled study. Clin Neurol Neurosurg. 2015: 129 Suppl 1: S41-46.
24) Qin F, Zhang Z, Zhang C, Feng Y, Zhang S: Effect of time to first ambulation on recurrence after PELD. J Orthop Surg Res. 2020: 15: 83.
25) Liang X, Wang Y, Yue Y, Li Y, Meng C: Whether Out-of-Bed Activity Restriction in the Early Postoperative Period of PELD Is Beneficial to Therapeutic Efficacy or Reduce Recurrence. Front Surg. 2022: 9: 860140.
26) Madera M, Brady J, Deily S, McGinty T, Moroz L, Singh D, et al: The role of physical therapy and rehabilitation after lumbar fusion surgery for degenerative disease: a systematic review. J Neurosurg Spine. 2017: 26: 694-704.

Abstract

Current status of postoperative rehabilitation initiation and intervention content for lumbar degenerative disease: a narrative review

Kaisei Kiriyama, Yoshinori Hiyama

Juntendo University Graduate school of Health Science

Postoperative rehabilitation for lumbar degenerative diseases has been shown to be effective in reducing pain and improving disability. However, no clear consensus has been established regarding the optimal timing and specific content of such interventions. This narrative review aimed to summarize the current trends in the initiation timing and content of postoperative rehabilitation for lumbar degenerative diseases, including lumbar disc herniation and lumbar spinal stenosis. A total of 11 studies were included. Regarding the timing of intervention, rehabilitation was initiated on the day of surgery or within a few days in several studies, while others reported initiation at 2 or 8 weeks postoperatively. Among the 11 studies, 9 (81.8%) initiated rehabilitation during the postoperative hospital stay. Commonly reported intervention components included spinal stabilization exercises, trunk and lower extremity strengthening exercises, joint range of motion exercises, and aerobic exercises. Additionally, psychological and educational components such as patient education and cognitive behavioral therapy were incorporated. Future research should focus on developing and validating standardized rehabilitation protocols tailored to specific conditions to ensure both efficacy and safety.

Key Words: lumbar degenerative disease, lumbar disc herniation, lumbar spinal stenosis, lumbar surgery, postoperative rehabilitation

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 60-64, 2026]

論　説

頭部定位放射線治療における体表面画像誘導放射線治療装置の役割と、オープンシェルの導入について

武江　響[1)]、黒河千恵[2)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
[2)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

近年、転移性脳腫瘍の治療における照射位置の照合方法として、体表面の情報を用いた画像誘導放射線治療（surface-guided radiotherapy: SGRT）が注目されている。SGRT は可視光などの非電離放射線を用いているため、放射線による被ばくがなく、また、治療中の患者の体表面の様子をリアルタイムで監視（モニタリング）できる技術である。

SGRT を行うことができる装置の一つとして、Catalyst（C-RAD Positioning AB, Sweden）がある。Catalyst は120度間隔で3台のカメラユニットが治療室の天井に設置されており、360度の方向から患者の様子を監視できるようになっている。カメラユニットの構成は光源と受光カメラであり、光源から出た可視青色光を患者に投影し、反射した光を受光カメラで取得することで患者の3次元表面画像を検出し、Reference 画像からの患者の位置ずれを6軸方向において算出している。

近年、頭部の定位放射線治療において、Catalyst を用いたポジショニングやモニタリングが行われている。このとき、患者体表面の情報が必要となるため、従来用いられてきたフルフェイス型マスクではなく、目、鼻等が露出されたオープン型マスクを用いる。オープン型マスクはフルフェイス型マスクと比較して固定される領域が少ないため、固定精度の低下が危惧されている。本稿では、放射線治療における SGRT の役割や SGRT を実現できる装置である Catalyst の特徴、また、Catalyst とともに使用するオープン型マスクの頭部固定精度についての先行研究を紹介する。

キーワード：転移性脳腫瘍、体表面画像誘導放射線治療（SGRT）、Catalyst、熱可塑性マスク、オープン型マスク

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，65-79頁，2026年（受付　2025.6.4.；受理　2026.5.26.）

1. SGRT 装置について

原発性および転移性脳腫瘍の治療には放射線治療が有用である[1)]。従来、全脳照射（whole brain radiotherapy）が複数（4個以上）の脳腫瘍を有する患者に推奨される標準治療であったが、長期的な有害事象（認知機能低下など）や脱毛、生活の質の低下を引き起こす可能性があり、重篤な副作用を伴うことが危惧される[2-4)]。脳腫瘍の数が限られている（1 ～ 3）場合では、定位放射線手術（stereotactic radiosurgery: SRS）または定位放射線治療（stereotactic radiotherapy: SRT）が広く行われている[4, 5)]。SRS、SRT は、急峻な線量勾配を持つため、標的のみに高線量を照射しつつ、周囲の正常脳への被ばくの影響を抑制可能であり、局所制御率は90％にも達する特徴がある[6-9)]。以上のような特徴から、近年では、SRS や SRT を複数（4個以上）の脳腫瘍がある患者に対しても適用することが注目されている[4)]。転移性脳腫瘍の治療に SRS や SRT を使用する上で、正常脳組織の放射線壊死などの合併症を避けるために、可能な限り標的のみに高線量が投与されることが重要である[5)]。したがって、標的に対する計画標的体積（planning target volume: PTV）のマージンを小さくし、正常脳への照射範囲を可能な限り少なくすることが求められる[10)]。このような理想的な治療を行うためには、患者を治療計画通りの正確な位置に高い再現性でポジショニングする必要がある[11)]。

そこで近年、転移性脳腫瘍の治療における照射位置の照合方法として、体表面の情報を用いた画像誘導放射線治療（surface-guided radiotherapy: SGRT）が注目されている。SGRT は、可視光などの非電離放射線を用いているため、放射線による被ばくがなく、毎日治療前の患者のセットアップ、および照射中の患者の動きの監視（モニタリング）が可能な技術である[12-14)]。また、SGRT は従来のレーザーや皮膚マーカーではなく、光学イメージングの技術を使用して、患者の3次元体表面画像を取得することにより患者の位置合わせを行っている[11, 14)]。さらに、X 線を用いた従来のイメージングシステムと比較して、広い有効視野（field of

責任著者：黒河千恵
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: ckuroka@juntendo.ac.jp

view: FOV）でリアルタイムモニタリングができる[13]。これらの特徴から、従来のレーザーによる位置合わせと比較して、セットアップ精度の向上と、セットアップに要する時間の短縮が可能となった[5, 15-17]。治療期間中の皮膚への外部マーカーは、患者にとって非常に不快であるため、患者の心理的な負担を考慮すると、近い将来、以上のような利点を持つSGRTベースのマーカーレスワークフローに、完全に置き換わることが期待されている[5]。

SGRT装置の利用に関するガイドラインは、米国の医学物理学会であるThe American Association of Physics in Medicine（AAPM）が発行したタスクグループ302（TG-302）で紹介されている[14]。AAPM TG-302の発行目的は、SGRT装置の臨床利用が広がる中で、安全かつ有効的な活用を促進し、具体的な技術的ガイドラインの提示と品質管理（quality control: QC）・品質保証（quality assurance: QA）プログラムの確立を図ることである[14]。AAPM TG-302は、① 一般的な患者のポジショニング、② 乳がんの深吸気息止め（deep inspiration breath hold: DIBH）照射、③ フレームレスSRS、の3つを主要なSGRTの臨床的用途として取り上げている[14]。さらに、装置精度の維持に必要なコミッショニングやQA・QCのテスト項目・頻度について説明されている[14]。また、CTシミュレーションから治療計画、照射に至るまでの各ステップにおいて、SGRTをどのように統合するかについて解説されている[14]。加えて、SGRT導入時に想定される課題や注意点についても指摘されている[14]。例えば、患者の皮膚の色や光の反射率、体表面の変形、カメラの障害物など、精度に影響を与える要因が挙げられている[14]。さらに、体幹部定位放射線治療（stereotactic body radiation therapy: SBRT）や陽子線治療など、SGRTの新たな臨床応用についても議論されている[14]。このように、AAPM TG-302は、SGRT装置を安全に運用し、最適な治療を提供するために不可欠な情報源であり、実際にSGRT装置を利用する際には本ガイドラインを参照することが推奨されている[14]。

SGRTを臨床で使用する際には、患者の体表面のみを画像化して位置合わせに利用するため、標的が患者の体表面にある（乳房など）、または体表面に近い場合や、体表面と体内の標的の相対的な位置関係が変わらない場合に有用である[13, 14]。そのため、SGRTは脳や乳房の治療に多く採用されている[14]。一方、標的が体内の深部にあり、体表面との相関関係がない場合には、SGRTによるセットアップやモニタリングは適さないとされている[13]。また、体表面情報から位置合わせを行うためには患者の皮膚を露出させる必要があるため、患者のプライバシーや快適さだけでなく、体表面をなるべく覆わない固定装置が必要となることが課題として挙げられる[13]。

上述のように、頭部のSRSやSRTのセットアップやモニタリングへのSGRTの適用が広がっているが、特筆すべきメリットとして、ノンコプラナー照射への対応が挙げられる。コプラナー照射とは、寝台を回転させずに、患者の体軸に対してガントリを同一平面上で回転させて照射する方法である。これに対して、ノンコプラナー照射とは、寝台を回転させ、さらにガントリも回転させることで、3次元的にあらゆる方向から照射が可能となる方法である。コプラナー照射を行う際は、治療前の患者のセットアップとして、コーンビームCT（cone beam computed tomography: CBCT）を用いる画像誘導放射線治療（image-guided radiotherapy: IGRT）を行うが、ノンコプラナー照射を行う際は、非同一平面上に寝台が移動しており、CBCTを用いて患者の位置を確認することが困難となる[5]。近年、4式のflat panel detectorとX線管を搭載することで、ガントリとカウチの回転の有無にかかわらず、同時に2方向から治療開始前、治療中、治療終了後に透視・撮影を行うことが可能な2次元kVイメージングシステムが開発されている。しかし、放射線の被ばくが伴い、安易に使用できないことが欠点として挙げられる。一方、SGRTはノンコプラナー照射時においても、放射線の被ばくを心配することなく、常時モニタリングし、位置ずれの確認が可能であることが評価されている[18-20]。

SGRT装置には、1台のカメラユニットで患者を監視するシングルカメラ装置と、複数のカメラユニットで患者を監視するマルチカメラ装置がある。マルチカメラ装置と比較して、シングルカメラ装置はFOVが小さく、患者による自己遮蔽（例：乳房の照射時の腕上げによる遮蔽で生じる死角）の影響を受けやすい特徴がある[14]。一方、マルチカメラ装置では360度の角度から患者の様子をモニタリングすることで、患者の自己遮蔽の影響を減らすことができる[14]。装置ごとの特性の詳細については、次のセクションで記載する。

SGRT装置では、治療中にリアルタイムで取得するMonitoring画像と、治療前のセットアップ時に取得したReference画像を比較することで、照射最中の患者の位置ずれを算出可能である[5, 11, 14, 21]。患者の位置ずれがあった場合は、Reference画像とMonitoring画像が一致するように、6軸（並進と回転シフトにそれぞれ3軸）で患者位置の修正が可能である[5, 14, 21]。

ここで、Reference画像とMonitoring画像との位置

合わせを行う際には、画像レジストレーションと呼ばれる画像処理技術を用いる。画像レジストレーションでは、2つの異なる画像間で、被移動画像を目標画像に一致させるように、移動、回転または変形させて位置合わせを行う[22, 23]。SGRT 装置の画像レジストレーションアルゴリズムには、Rigid レジストレーションと Deformable レジストレーションが用いられている[14]。Rigid レジストレーションは、対象物を剛体と考え、被移動画像を変形なしに平行移動と回転のみの要素を含む変換関数を用いて位置合わせを行い、目標画像に一致させる技術である[22, 23]（図1）。Rigid レジストレーションの変換関数は、以下の行列によって回転と平行移動を表すことができる[24]。ここで、$Rot(u, \theta)$ は u 軸周りの θ 回転、$Trans(p, q, r)$ は平行移動 (p, q, r) を表す行列とする[24]。

$$Rot(x,\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Rot(y,\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Rot(z,\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Trans(p,q,r) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & p \\ 0 & 1 & 0 & q \\ 0 & 0 & 1 & r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Rigid レジストレーションは小さな位置ずれが全体のずれとして影響するため、どの領域を関心領域（region of interest: ROI）として位置合わせするかが位置合わせの精度に大きく影響する[14]。臨床においては、ROI を決める際に、標的部位が分かるように ROI 内には解剖学的構造を含める必要がある[14]。例えば、体表面が平坦または対称的な部位（腹部など）の場合、ROI のサイズが小さいと並進または回転方向が正確に認識できず、適切に位置合わせを行うことができなくなる[14]。しかし、ROI の面積の増加に伴って、時間分解能が低下してしまうため、必要最小限の大きさにするよう注意が必要である[25]。また、標的の位置から十分に遠く動きやすい部位は、標的部位に動きが影響しないよう、ROI から取り除くのが適切とされている[14]。

一方、Deformable レジストレーションは、移動画像（被変形画像）の各画素を、目標画像の対応する画素位置に移動させる変形ベクトル（拡大縮小、せん断、局所非線形変形など）を作成し、目標画像に一致するように変形させる技術である[22, 23]（図2）。画像レジストレーションは、2つの対象物間で互いに似ている部位が最も一致するように変換関数 T を決定する処理であり、変形ベクトルはこの変換関数 T の一種である移動ベクトルとして表現される[22, 23]。画像レジストレーションは、画像類似度に基づく目的関数 $C(\mu, T_\mu, I_f, I_m)$ の最適化問題として以下のように示される[22, 23]。

$$最適パラメータベクトル = arg\ min_\mu C(\mu, T_\mu, I_f, I_m)$$

T_μ: 変換関数
$(I_m$の各点をI_fの各点に割り当てるために用いる$)$

I_f: 目標画像

I_m: 移動画像

C: 画像類似度に基づく目的関数

T_μ は画像内の点 x の移動後の座標 x' を与えるものとして考えられ、非剛体レジストレーションの場合、この変換には拡大縮小、せん断、局所非線形変形などの

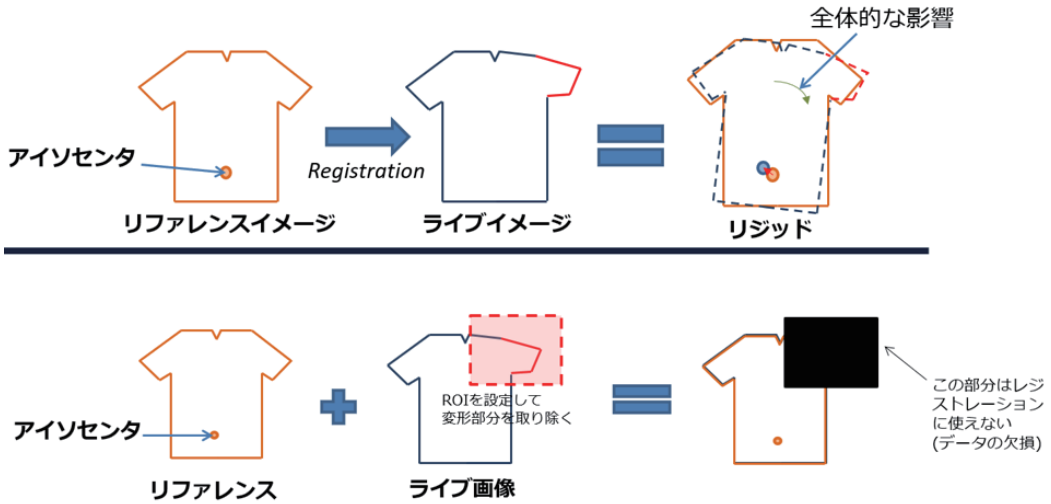


図 1　Rigid レジストレーション（エレクタ株式会社提供）

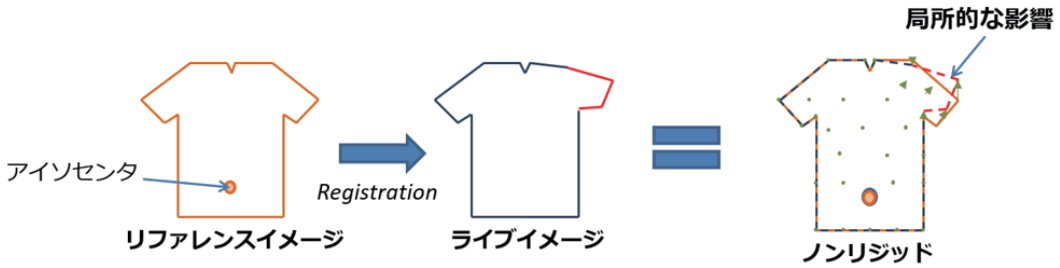


図 2　Deformable レジストレーション（エレクタ株式会社提供）

変形要素が含まれる[22, 23]。また、Deformable レジストレーションは、照射部位から離れた遠方の組織の動きの影響を受けにくいように最適化されている。そのため、アイソセンタ（isocenter: IC）から遠い部位における局所的な位置ずれは、IC 自体の位置ずれとしては反映されず、IC 近傍の位置ずれのみが位置合わせに寄与する[14]。このことから、Rigid レジストレーションのように ROI を必要最小限の大きさに制限する必要はなく、IC から離れた領域の動きは考慮されないため、ROI の設定方法による影響は小さいと考えられる[26]。

2. 臨床で使用されている SGRT 装置の紹介

SGRT 装置の利用に関するガイドライン（AAPM task group report 302: Surface-guided radiotherapy[14]）で紹介されている2019年10月時点で海外ベンダーから販売されている SGRT 装置（AlignRT（Vision RT）、IDENTIFY（Varian）、および Catalyst（C-RAD））と、日本国内のみで販売されている SGRT 装置（VOXELAN（ERD）、ExacTrac Dynamic（BrainLab））の特徴を**表1**に示す。

2.1. AlignRT（Vision RT）

AlignRT（Vision RT）は、1 ～ 3台のカメラユニット（約90度間隔）で構成されている[14]。各カメラユニット内の高解像度画像センサーが、投影された光を認識し、3次元座標のマップに変換する[27]。この情報から、患者の体表面の3次元モデルがリアルタイムで再構築される[27]。再構築されたリアルタイムの体表面画像は、治療計画 CT 画像または以前に登録された体表面画像と比較され、位置合わせされる[27]。このプロセスには、独自の反復最小二乗法に基づいたアルゴリズムが用いられる[27]。位置合わせの結果は、real-time deltas（RTDs）と呼ばれる、Lateral, Longitudinal, Vertical の3つの並進方向と、Pitch, Roll, Rotation（Yaw）の3つの回転を含む6軸のシフト値として示され、事前に設定されたしきい値に応じて緑色または赤色で表示される[14, 27, 28]。また、integrated gate controller（IGC）というシステムにより、治療寝台および放射線治療システムと連携し、患者の動きが事前に設定されたしきい値を超えた場合に、自動的に治療ビームを停止させることが可能である[27]。レジストレーションアルゴリズムには、Rigid レジストレーションを採用しており[14, 27]、基準体表面とライブ体表面の対応する点同士が最も近くなるように反復して計算を行う Iterative closest point match（反復最近傍点）アルゴリズムという手法が用いられてい

表 1　SGRT 装置[14, 28, 31, 36, 39, 42]

	AlignRT（Vision RT）[14, 28]	Catalyst（C-RAD）[14, 36]	IDENTIFY（Varian）[14, 31]	VOXELAN（ERD）[36, 39]	ExacTrac Dynamic（BrainLab）[36, 42]
Camera hardware	1 to 3 cameras（90° apart）	1 to 3 cameras（120° apart）	3 cameras（90° apart）	1 camera	1 camera
Frame rate	4-24 fps	8-24 fps	10 fps	2 fps	5 fps
Patient positioning corrections	6 軸	6 軸	6 軸	6 軸	6 軸
Camera resolution	2048×2048 px（4MP）	Conventional: 320×240 px SRS: 640×480 px	1280×1024 px（1.3MP）	1280×1024 px	—
Positioning accuracy	< 1.0 mm < 1.0°	< 1.0 mm < 1.0°	< 1.0 mm < 1.0°	< 1.0 mm < 1.0°	< 1.0 mm < 1.0°
Registration algorithm	Rigid	Conventional: Deformable SRS: Semi-rigid	Rigid	Rigid	—

る[28]。フレームレートは4〜24 fps であり[14, 27]、体表面のレンダリングと位置合わせを繰り返し、リアルタイムでの追跡を可能とする[27]。カメラの解像度は、2048×2048 px（4MP）である[14]。AlignRT の位置精度は < 1.0 mm、< 1.0° とされている[14]。

Zagar らは、左側乳がんに対する放射線治療において、AlignRT による DIBH が早期の心臓灌流欠損を防ぐのに有用であるかを前向き研究により評価している[29]。対象は、DIBH による放射線治療を予定している18歳以上の20人の左側乳がん患者とした[29]。この際、心臓灌流欠損がある患者、活動性の心疾患、不整脈、心筋梗塞、うっ血性心不全、その他の心臓疾患の既往歴がある患者、または以前に縦隔の放射線治療を受けたことがある患者は除外した[29]。全ての患者は、接線照射で左乳房または胸壁の治療をし、心臓に主放射線ビームが照射されないようにした[29]。初回照射時、照射直前に AlignRT で体表面情報を取得し、治療計画時の情報と一致することを確認した[29]。以降は毎回、初回の Reference 画像と比較して体表面情報の一致を確認し、高い再現性で照射を行った[29]。照射中も AlignRT で位置ずれを常時監視した[29]。放射線治療前後（6か月後）に SPECT を実施し、心臓の灌流や壁運動の変化を評価した結果、20例すべてで異常は認められなかった[29]。また、治療中および6か月後に心臓症状を訴えた患者もいなかった[29]。このことから、AlignRT による DIBH と心臓ブロックを併用した放射線治療は、左側乳がん接線照射における早期の放射線性心障害の回避に有効であると示された[29]。

Wolken は、SRS および SRT における、AlignRT と IGRT システムである ExacTrac の治療中の位置精度と合致度を評価している[30]。43名の臨床患者データを用いて後ろ向き研究を行い、頬の厚さ、AlignRT の ROI の面積、鼻の突出、年齢、性別、皮膚の色調、治療時間などを記録し、システム間の合致度や精度の相関関係を調査した[30]。その結果、AlignRT と ExacTrac の合致度はサブミリメートル（平均不合致度：0.66 mm、最大不合致度：2.4 mm）であったことを報告している[30]。また、カメラの熱による測定値への影響を排除するためには、プロジェクタを初期のアライメント中および CBCT の間にオンのままにしておくと良いことを提案している[30]。

2.2. IDENTIFY（Varian）

IDENTIFY（Varian）は、3台のカメラユニット（約90度間隔）で構成されており[14, 31]、サブミリメートルの精度で患者の体表面情報をリアルタイムで表示できる[26, 31]。カメラユニット内の time-of-flight（ToF）カメラにより、カメラユニットから投影され、時間変調された赤外線光信号が、患者の体表面から反射して戻ってくるまでの時間を測定することで、深度情報を取得し、3次元情報を計算可能である[27]。ToF カメラは頭頂からつま先までの FOV により、患者の初期セットアップ（10-20 mm の許容範囲）に使用される[27]。カメラユニット内のステレオビジョンカメラは、患者の体表面に青色 LED ライト光を投影し、反射された光を認識することで3次元データを計算する[27]。ステレオビジョンカメラは狭い FOV（約50×50×50 cm）により、サブミリメートルの精度（≤ 0.5 mm）で患者の最終的なセットアップ、治療中の動きのリアルタイムモニタリングが可能である[27]。IDENTIFY は、Lateral, Longitudinal, Vertical の3つの並進方向と、Pitch, Roll, Rotation（Yaw）の3つの回転を含む6軸の位置補正が可能であり[14, 27]、カメラの解像度は、1280×1024 px（1.3MP）、フレームレートは、10 fps である[14]。IDENTIFY の位置精度は <1.0 mm、<1.0° とされている[14]。レジストレーションアルゴリズムには、Rigid レジストレーションを採用している[14]。

また、乳癌治療の DIBH においては、これまでの IGRT による IGRT 照合と、IDENTIFY による SGRT 照合が十分に一致することが報告されている[31]。さらに、DIBH 治療中の IGRT（EPID 撮影）と SGRT の照合精度が0.12 mm、1.2度未満で一致しており、IDENTIFY による SGRT は IGRT に代替される技術であると報告されている[31]。

2.3. Catalyst（C-RAD）

Catalyst（C-RAD Positioning AB, Sweden）は、120度間隔で3台のカメラユニットが治療室の天井に設置されており、360度の方向から患者の様子をモニタリングできるようなシステムとなっている[11, 12, 32, 33]（図3）。カメラユニットの構成は光源と受光カメラであり、光源から出た波長405 nm の可視青色光を患者に投影し、反射した光を受光カメラで取得している[4, 12]（図4）。その結果から、三角測量原理を応用して距離情報を計測し，実空間座標に変換することで、体表面情報を再構成し、患者の3次元表面画像を取得可能である[34]。患者の位置ずれは、治療前のセットアップ時に取得した Reference 画像と治療中にリアルタイムで取得する Monitoring 画像の位置照合結果を比較し、体表面の位置ずれを並進方向（Lateral, Longitudinal, Vertical）と回転方向（Pitch, Roll, Rotation（Yaw））の IC 位置の位置ずれとして変換することで、以下の式により計算して



図３　カメラユニットの配置

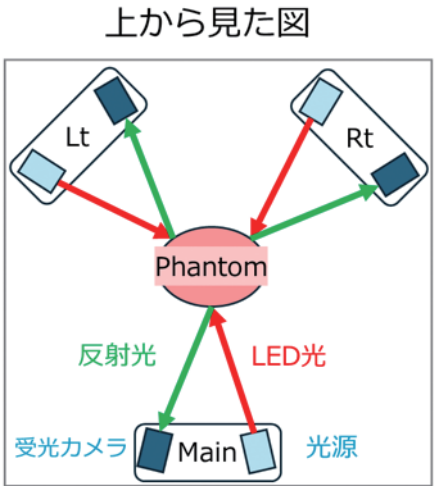


図４　カメラユニットの構成

いる[11, 14, 19, 33]（図5, 6）。

$$\text{患者（IC）の位置ずれ} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$：$Lateral, Longitdinal, Vertical$方向の位置ずれ

Reference 画像と Monitoring 画像との比較の際に、iterative closest point（ICP）アルゴリズムと呼ばれる、体表面を構成する対象三次元点群間の距離を最小化する最適化を実行している[34]。ICP アルゴリズムは、IC に近いポイントにより大きな重み付けを与えることで、体表面を変形させる[14, 32]。これは、SGRT が乳房や頭部の照射といった治療に採用されている背景と関連しており、これらの治療では、体表面がターゲット（病巣）の位置の正確な代替として使用されるため、重み付けを IC 近傍に集中させることで、治療のターゲット領域周辺における体表面の整合性を高め、結果として治療中の位置誤差検出精度を向上させることを目的としている[14, 32]。Catalyst の画像レジストレーションに用いられるアルゴリズムは、適用する部位によって Conventional モードと SRS モードの2つに分類される。Conventional モードは Deformable レジストレーションを用いており、non-rigid（非剛体）レジストレーションとも呼ばれ、non-rigid（非剛体）な ICP アルゴリズムによって、IC 変位を計算する[12]。SRS モードは Semi-rigid レジストレーションを用いており、semi-non-rigid（半非剛体）レジストレーションとも呼ばれ、non-rigid（非剛体）レジストレーションと比べて、特に変形が少なく、頭部や顔面などの小面積の剛体部位の治療向けに開発されたアルゴリズムであり、semi-non-rigid（半非剛体）な ICP アルゴリズムによって、IC 変位を計算する[12]。Conventional モードは非剛体治療部位に有益な Deformable レジストレーションを組み込んでいるため、乳房や四肢の領域などの動きやすい部位の治療に適している[11]。一方、SRS モードの表面解像度は、**表1**に記載されているように、Conventional モードと比較すると約4倍であり[12]、さらにフレームレートが8-24 fps であることから[14]、高解像度でのイ

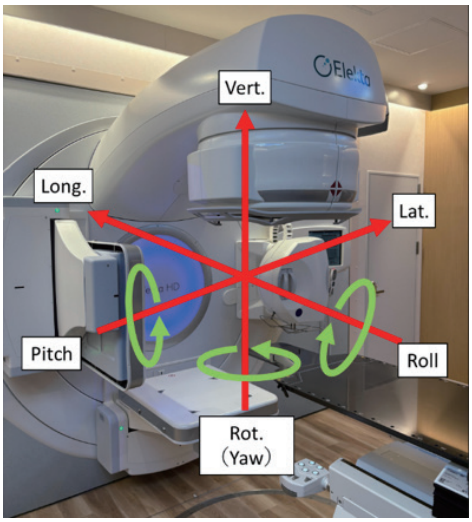


図５　座標軸の定義

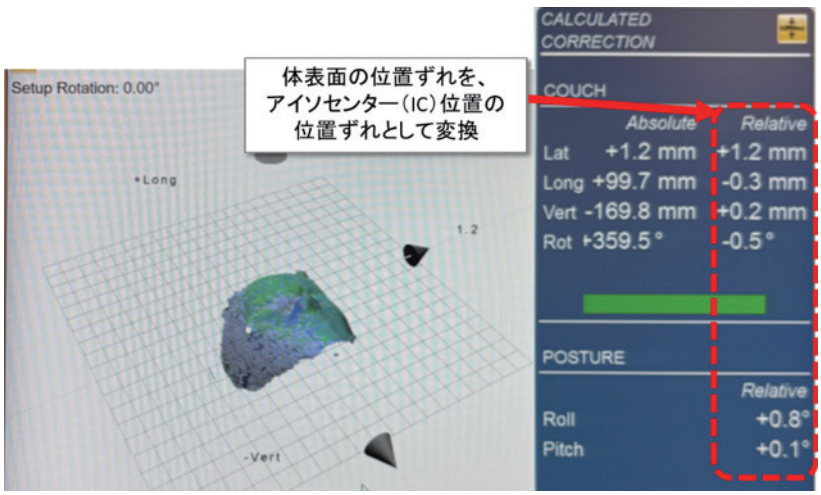


図６　位置ずれの変換方法

メージングやモニタリングが可能となり、わずかなICの位置ずれを評価できる[11, 12, 14]。このため、頭部のように変形が少ない部位に対して、眼球運動に伴う瞼の動きなどの微小な変形が与える影響を評価するのに最適化されたアルゴリズムといえる。以上より、SRSモードは、わずかなICの位置ずれが線量に大きな影響を及ぼし得る、頭部の定位照射に適したモードと考えられる[11, 12, 14]。

Catalystの位置精度は<1.0 mm、<1.0°であるが[14]、3つのカメラユニットを備えているCatalystでのSRSモードにおける位置精度は≤0.5 mm、全方向に≤1.0°と、より高い精度を実現可能であると報告されている[32]。

Catalystの機能にはcPosition、cMotion、cRespirationの3つがある[32, 33]（図7）。CBCT前の患者の初期セットアップ時にcPositionを使用し、治療計画CTで取得した基準画像を用いて位置決めを行う[32]。その後、cMotionにより新たにCatalystでReference画像を取得し、治療中の患者の位置をリアルタイムでモニタリングする[32]。cRespirationは患者の呼吸波形、呼吸位相を取得するときに用いる。

Catalystを使用する際、カメラの熱のドリフトの考慮が重要であることが最近の研究により指摘されている[33]。カメラの熱のドリフトとは、稼働に伴いカメラユニットの内部温度が上昇することで、ICの位置認識精度に影響を与える現象を指す[33]。具体的には、実際には患者の動きによる位置ずれが存在しない場合でも、カメラの内部温度が一定に達するまでの間、Monitoringの測定値に誤差を生じ、ICの位置ずれとして認識されることがある。熱のドリフトは患者のセットアップと治療中のモニタリングに不確実性を生じさせ[5, 35]、治療の所要時間と装置のウォームアップ時間に依存する[33]。Lehmannらの研究では、最大1 mmの熱ドリフトが観察され、装置のウォームアップ時間を延長することで、熱ドリフトを効果的に軽減できることが示されている[33]。さらに、治療室内の周囲光は熱ドリフトに影響を与えず、患者や治療スタッフのニーズに合った照明レベルを自由に選択できることも明らかにされている[33]。

また、Catalystの機能の一つであるcRespirationには、照射中、ICの合計偏差が許容値から外れた場合、ビームをオフにし、照射を停止できるビームゲーティング機能がある[5, 13, 14, 32]。SRTの照射中、患者の位置ずれは1 mmを超えないようにすることが推奨されているため[36]、ビームゲーティング機能を有効的に用いて位置ずれを抑制することが求められる。しかしながら、実際の臨床においてゲーティング機能を利用する際、照射方法によっては問題が生じることが最近指摘されている。具体的には、強度変調回転照射（volumetric modulated arc therapy: VMAT）を用いたSRTでは、ガントリが回転することにより、ガントリヘッドやkVイメージングアーム、フラットパネルがCatalystのカメラを遮蔽する状況が生じる[14, 19]（図8）。この影響により、本来3台のカメラで患者をモニタリングできるところ、2台または1台でモニタリングする場合が発生する。Tonkinらの研究では、ガントリ角度が275〜355度の間にある場合は左側のカメラユニット、5〜85度の間にある場合は右側のカメラユニットがガントリによって遮蔽されると、ノイズが発生し、その大きさが場合によっては1.5 mmを超えることが指摘されている[32]。この現象は、ビーム照射中にかなりの頻度で生じることが懸念されており[32]、その度にビームゲーティング機能は無効となる可能性がある。そのため、今後、ガントリの回転によるカメラの遮蔽中に生じるノイズの対処方法について調査する必要があると考える。

2.4. VOXELAN（ERD）

VOXELANは、サードパーティーのSGRTベンダーとして、Elekta社リニアック、Varian社リニアック、

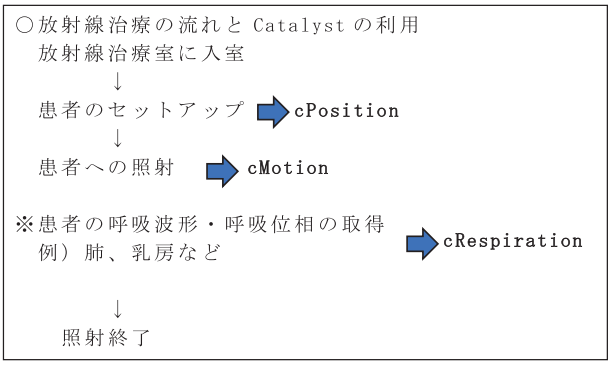


図7　放射線治療の流れとCatalystの各機能の利用場面

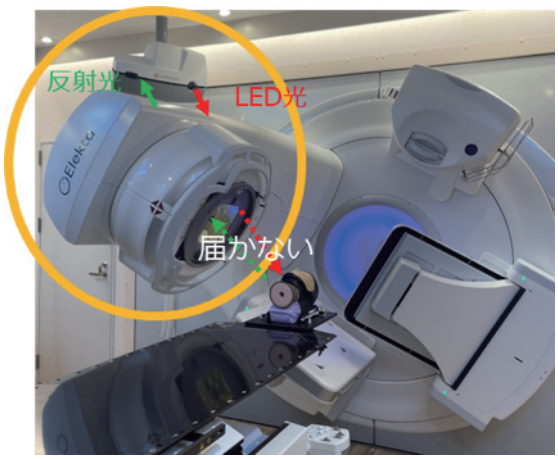


図8　ガントリの回転でカメラが遮蔽される場合

Accuray 社リニアックと同室の取り付けが可能であり、汎用性は高い[37]。ただし、装置との連携（ビーム同期、寝台移動）には対応していない[37]。VOXELAN のカメラ（検出ヘッド）は天井吊り下げ式の1カメラ方式で、検出ヘッドから照射される2つの赤色のスリットレーザー光を患者体表面に走査し、CCD カメラで撮影し画像化する[37]。投光角度画像、最大輝度画像および最小輝度画像の3つの画像を作成し、コンピュータで三角測量の原理に基づいて三次元立体形状を作成している[37]。

VOXELAN 専用の位置決め支援ソフトウェア（ERDPS／Align）のユーザーインターフェースでは、2種類のモードが使用可能である[37]。1つは位置決めモードであり、通常の患者セットアップに使用されるモードである[37]。位置決めモードのフレームレートは2fpsであり、FOV は横450 mm ×縦600 mm ×高さ600 mmである[37]。特徴としては、検出ヘッドで撮影したリアルタイム体表面画像と基準体表面の6軸補正量がバー表示可能であり、施設ごとに許容値のしきい値を設定することが可能である[37]。また、ROI は矩形として設定可能である[37]。さらに、断面表示が可能であり、セットアップ時には参考にしやすい仕様となっている[37]。

ERDPS／Align のもう1つのモードとして呼吸管理モードがある。呼吸管理モードの FOV は横150 mm ×縦600 mm ×高さ600 mm であり、フレームレートは12fps である[37]。特徴としては、呼吸を認識する点として任意の5点が設置可能であり、それぞれの呼吸波形に対してしきい値が設定可能で、平均呼吸波形も作成することができる[37]。また、コーチング機能として、ゴーグルを用いた視覚ガイドや音声ガイドも使用することができる[37]。

照射中の監視は、多くの場合、頭部であれば位置決めモード、体幹部であれば呼吸管理モードで実施する[37]。また、体幹部においては、左乳癌の深吸気息止め（DIBH）照射の場合、吸気量の確認に使用している[37]。

Komori らは、頭頸部がん放射線治療における VOXELAN の位置決め精度への影響を評価した[38]。頭頸部がん患者20名を VOXELAN 使用群と非使用群に分け、両群とも皮膚マーカーと固定具を用いた初期セットアップ後に CBCT を実施した[38]。VOXELAN 群では、さらに VOXELAN によるプレポジショニングを追加した[38]。結果として、VOXELAN 群は非使用群に比べて体幹のねじれや回転の位置ずれが少なく、初期セットアップの再現性が向上した[38]。また、VOXELAN は術者が身体のねじれを視覚的に把握・修正できるため、観察者間変動の低減にも有効であることが示唆された[38]。

2.5. ExacTrac Dynamic（BrainLab）

ExacTrac Dynamic は、従来の ExacTrac system に4D thermal camera を兼ね備え、X 線照合機能に体表面追跡機能を併せ持ったモダリティである[39]。この体表面追跡機能により、従来の ExacTrac の主たる機能であった X 線照合機能を用いなくとも、体表面情報のみを活用して治療精度の向上に用いることが可能である[39]。

4D thermal camera は、高精細構造化ライトプロジェクターと低遅延の立体画像カメラレンズからなる3D camera と内蔵型 thermal camera がセットになった一基のユニットであり、4D camera によって SGRT を実現することが可能となっている[39]。ExacTrac Dynamic では、一基のユニットによる単一視野となることで、ガントリヘッドや kV イメージングアームなどによる認識阻害を回避している[39]。

一方で、一基のユニットによる三次元構造の認識精度の低下が危惧される[39]。Naidoo らの研究によると、IGRT を基準とした場合に、乳房温存術後照射における SGRT の残余誤差について、systematic error と random error の平均はほとんどの施設で2 mm、1度未満であったとされている[40]。金子らによると、ExacTrac Dynamic を使用した場合、乳房温存術後照射20症例に対して検証した結果、全患者の平均で systematic error は1.0 mm、1.0度未満であり、random error はわずかに2.0 mm を超えたものの、2.2 mm、1度未満となり、1台のカメラで単一視野であっても SGRT システムとして他の装置と遜色のない結果が得られた[39]。

3. オープン型シェルについて

標的へ処方通りの高線量を照射しつつ、周囲の正常組織への線量を最小限に抑えるためには、固定装置を用いて、照射中の患者の動きを制御することは非常に重要である[41]。頭部に対する SRT の場合、熱可塑性マスク（シェル）による固定は標準的に用いられている[42]。シェルは治療計画 CT を取得する直前に患者一人一人に合わせて作成され、治療期間中、患者を毎回正しい位置に高い再現性で固定し、頭の動きが最小限に抑えられるようにするために使用される[42]。

従来から用いられているシェルとしてフルフェイス型シェルがある（**図9**）。以下にフルフェイス型シェルの有用性を示した3つの研究を紹介する（**表2**）。

Leitzen らの研究は、55名の患者データを対象とした後ろ向き研究である[43]。照射前のセットアップ時の

位置合わせのために、トモセラピー装置に搭載されているメガボルト CT（megavoltage computed tomography: MVCT）で撮影された画像と治療計画 CT の画像レジストレーションにより、inter-fraction variability（治療回ごとの位置ずれ）を測定した[43]。その結果、inter-fraction variability は1.5 ± 0.8 mm であった[43]。

Tryggestad らの研究は、後ろ向き研究であり、20名および7名の患者データを用いて、それぞれ inter-fraction variability と intra-fraction variability（照射中の位置ずれ）を評価した[44]。評価は、毎回の照射前後に CBCT の撮影することで行われた[44]。その結果、inter-fraction variability は2.3 ± 1.4 mm、intra-fraction variability は、1.1 ± 1.2 mm であった[44]。

Lightstone らの研究は、34名を対象とした前向きコホート研究である[45]。毎回、照射前後に CBCT を撮影し、inter-fraction variability と intra-fraction variability を測定した[45]。その結果、inter-fraction variability は0.53 mm、intra-fraction variability は0.86 mm であった[45]。

これらの研究より、フルフェイス型シェルの固定に関しては精度の高さが保証されているが、一方で顔全体を覆うため、患者を不快に感じさせ、特に閉所恐怖症の患者には適しておらず、身体的ストレスが大きくなることが懸念点として挙げられる[1, 6, 46-48]。また、フルフェイス型シェルを用いた場合、一般的には照射前後の X 線画像に基づいて患者の頭部の位置ずれを確認する[49, 50]。さらに必要に応じて、CBCT や2次元kV イメージングシステムにより、照射中の患者の様子を撮影することは可能である。しかし、この場合、放射線による被ばくの問題がある。一方、SGRT 装置を用いることができれば、被ばくなく、患者のポジショニングやモニタリングが可能であるが、フルフェイス型では患者体表面の情報を光学カメラで検出することができない。

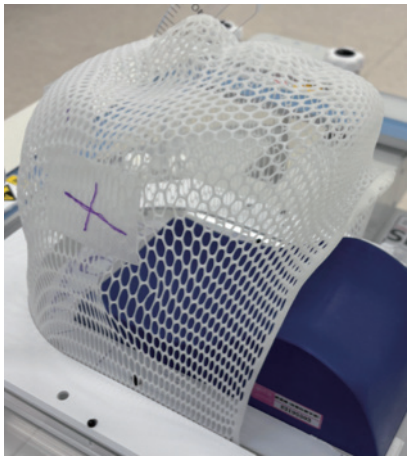


図９　フルフェイス型シェル

そこで、頭部の SRT において SGRT 装置を有効的に利用すべく、額、目、鼻が露出しており、SGRT 装置によって患者の体表面情報を認識可能なオープン型シェルが導入された[14, 16, 42]。オープン型シェルは、顔の前面が開いていることで患者の快適性が向上し、不快感が軽減され、閉所恐怖症の患者にとっても苦痛が少ないシェルとして近年評価されている[1, 42, 47]。一方、オープン型シェルはフルフェイス型シェルと比較し、固定される領域が少ないため、その固定精度について懸念されている。

以下に、オープン型シェルの有用性を示した3つの研究を紹介する（**表3**）。

Keane らの研究は、単一施設での無作為化自己対照臨床試験であり、無作為化された30名（うち29名が放射線治療を完了、1名がインフォームドコンセントを撤回）に対して、各患者にオープン型シェルとフルフェイス型シェルの両方を作成し、治療期間の途中でシェルを交換するクロスオーバー方式を採用した[1]。患者はシェルを装着した際の不快感、不安、痛みを VAS（Visual Analogue Scale）と呼ばれる0 ～ 10（10は極度の不快感、不安、痛みを表す）のスケールで点数化し、治療終了後にどちらのシェルを好むかを評価した[1]。また、それぞれのシェルの固定精度の定量的な評価のため、inter-fraction variability と intra-fraction variability を kV イメージングシステムと SGRT 装置を使用して測定した[1]。その結果、患者の不快感、不安、痛みの

表２　フルフェイス型シェルに関する先行研究の比較[43-45]

	Leitzen et al.（2014）[43]	Tryggestad et al.（2011）[44]	Lightstone et al.（2012）[45]
研究デザイン	後ろ向き研究	後ろ向き研究	前向きコホート研究
対象患者数	55 人	Inter-fraction variability: 20 人 Intra-fraction variability: 7 人	34 人
Inter-fraction variability	1.5 ± 0.8 mm	2.3 ± 1.4 mm	0.53 mm
Intra-fraction variability	測定なし	1.1 ± 1.2 mm	0.86 mm

表３　オープン型シェルに関する先行研究の比較[1, 45, 54)]

	Keane et al.（2024）[1)]	Ohira et al.（2022）[54)]	Reitz et al.（2022）[45)]
研究デザイン	無作為化自己対照臨床試験	後ろ向き研究	前向き研究
対象患者数	30 人（うち 29 人が放射線治療を完了）	76 人	40 人
シェルの種類	オープン型シェル フルフェイス型シェル	オープン型シェル フルフェイス型シェル	2 種類のオープン型シェル
Inter-fraction variability	約 2 mm 未満 1 度未満	測定なし	測定なし
Intra-fraction variability	1 mm 未満 0.5 度未満	1 mm 未満 1 度未満	0.6 mm 未満 0.6 度未満
備考	27/29 人がオープン型シェルを好む		

平均 VAS スコアでは、オープン型シェルで有意に低い結果となり、27名の患者がオープン型シェルを、わずか2名の患者がフルフェイス型シェルを好んだ[1)]。また、inter-fraction variability は Longitudinal 方向と Roll および Yaw 回転の位置ずれがオープン型シェルで有意に大きかったが、Lateral 方向の位置ずれはフルフェイス型シェルで有意に大きかった[1)]。Intra-fraction variability は2つのシェルで有意差はみられなかった（1 mm 未満、0.5度未満）[1)]。以上の研究結果より、2つのシェルの固定精度に有意差はなく、患者の大多数がオープン型シェルを好むことから、オープン型シェルを用いることが推奨されると結論づけられている[1)]。

Ohira らの研究は、76名の患者（オープン型シェル38名、フルフェイス型シェル38名）を対象とした後ろ向き研究である[51)]。この研究では、治療前後に CBCT を撮影し、CBCT の画像間の患者位置の差を intra-fractional motion error: IME として算出した[51)]。得られた患者位置の差から、Mann-Whitney U 検定を用いて統計的有意差を評価し、van Herk の式（$M = 2.5\Sigma + 0.7\sigma$）を用いて、IME を補正するためのマージンを計算した[51)]。その結果、オープン型シェルとフルフェイス型シェルの IME の平均値はどちらも1 mm 未満、1 度未満であり、有意な差はなかった[51)]。

Reitz らの研究は、40名の患者を対象とした前向き研究である[42)]。2種類のオープン型シェルにおける intra-fraction variability を X 線画像と DRR（デジタル再構成 X 線画像）を用いて算出した[42)]。結果として、2つのオープン型シェルの intra-fraction variability は0.6 mm 未満、0.6度未満であり、オープン型シェルの有用性が示された[42)]。

これらの研究より、オープン型シェルの照射中の位置ずれはフルフェイス型シェルと同等程度であり、フルフェイス型シェルの装着時の不快感などの患者満足度を考慮すると、オープン型シェルの有用性が示された[1, 42, 51)]。

オープン型シェルのうち、臨床で用いられるシェルとして、エスフォーム社のオープンシェル（図10）とマウスピース付きオープンシェル（図11）がある。オープンシェル（図10）は前額と下顎が固定されており、マウスピース付きオープンシェル（図11）は前額と下顎に加えて、マウスピースを噛むことで固定したシェルである。

以下に、Kojima らによるオープンシェルの有無や種類がどのように影響するかを比較した研究を紹介する[12)]。図12の上段（図12a, b, c）は、Kojima らの研究で使用した頭部ファントムとオープンシェルを示している[12)]。図12a はオープンシェル未装着の頭部ファントム、図12b は白色のオープンシェルを装着した頭部ファントム、図12c は黒色のオープンシェルを装着した頭部ファントムである[12)]。図12の下段（図12A, B, C）は、それぞれ図12a, b, c の頭部ファントムを Catalyst でスキャンして得られた図である[12)]。図12下段（図12A, B, C）の黄色のボックスはスキャンボリュームを表しており、これは Catalyst が表面データを取得する範囲となる。ピンク色の領域は治療計画 CT から作成した Reference データを表しており、位置合わせや動きのモニタリングの基準となるデータである[12)]。図12b, B より、Catalyst のカメラでは白色のオープンシェルを頭部の一部として認識してしまい、シェル本体と皮膚表面との間にずれが生じ、IC の位置ずれの計算にエラーが生じる可能性があることが指摘されている[12)]。これは Deformable レジストレーションを用いているからであり、IC のわずかな位置ずれを敏感に感知することが関係していると考えられる[12)]。

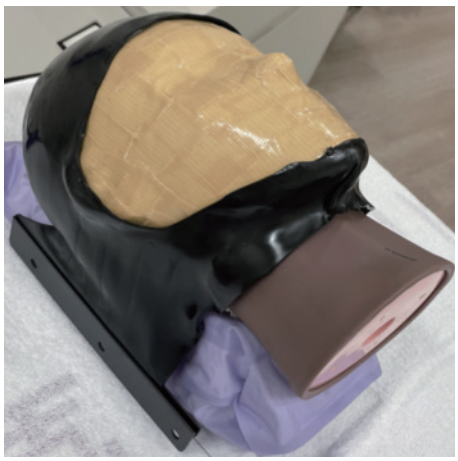


図 10　オープンシェル



図 11　マウスピース付きオープンシェル

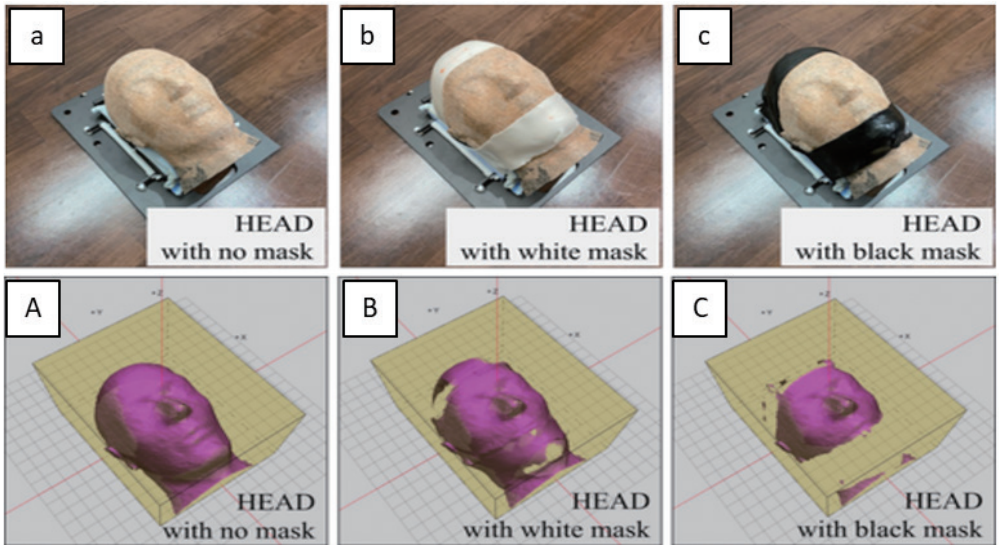


図 12　シェルの色の違いによる SGRT 装置の認識の違い（著者の許諾を得て文献 12 より転載）
a,b,c は測定に用いた頭部ファントムとシェルの画像、A,B,C は a,b,c を Catalyst にてスキャンして得られたデータである。A,B,C 中の黄色のボックスはスキャンボリュームを表しており、これは Catalyst が表面データを取得する範囲となる。ピンク色の領域は、治療計画 CT から作成した Reference データを表しており、位置合わせや動きのモニタリングの基準となるデータである。

頭部 SRT で一般的に用いられているフルフェイス型シェルの白色のシェル（図9）も同様に、Catalyst を用いる場合､シェルを頭部の一部として認識するため、適していないと指摘されている[12]。図12c, C より、黒色のオープンシェルは Catalyst 上では認識していないため、シェルで覆われている皮膚表面のみのデータを取得可能である[12]。これらのことから、SRS モードを用いた頭部の治療を行う場合、Catalyst では検出不可能な黒色のシェルを着用するのが適切である[12]（図12C）。さらに、ファントムを用いて実験を行う場合、臨床を想定して、頭部ファントムの表面を人間の肌の色に視覚的に似た色の不透明なテープで覆うことが推奨される[12, 14]。

また、マウスピース付きオープンシェルの有用性は明らかとなっているが[18, 20]、オープンシェルとマウスピース付きオープンシェルの固定精度の比較をした先行研究はまだない。オープンシェルに比べて、マウスピース付きオープンシェルはマウスピースにより顔が固定されるため、動きが生じにくいと想定される。一方で、マウスピース付きオープンシェルはマウスピースを照射時間中､咥える必要があり､口腔内の不快感、息苦しさが生じるため、これがシェルの固定精度を低下させる要因の一つになると考えられる。以上のことから、今後、Catalyst を用いて2種類のシェル（図10, 11）の固定精度の評価を行う必要があると考える。ただし、Catalyst を用いて2種類のシェルの固定精度を比較する際、注意すべき点として視認面積（Catalyst が検出可能な皮膚表面積）が異なることが挙げられる。したがって、2種類のシェルの固定精度の研究においては、事前に、視認面積の違いが Catalyst の検出精度

へ与える影響を評価する必要があると考えられる。

4. まとめ

転移性脳腫瘍の治療における照射位置の照合方法として、放射線の被ばくが生じることなく、治療中の患者の様子をリアルタイムでモニタリング可能な SGRT が近年注目を集めている。SGRT を実現可能な装置の一つである Catalyst は、3つのカメラを用いることで360度の方向から患者の様子をモニタリング可能であり、6軸で患者の位置情報を認識できる装置である。Catalyst の特徴として、頭部の SRT において、高解像度でのイメージングおよびモニタリングが可能な SRS モードがある。SRS モードでは、わずかな IC の位置ずれを検出できるレジストレーションアルゴリズムが搭載されている。しかしながら、照射中にガントリが回転すると、ガントリヘッドや kV イメージングアーム、フラットパネルが Catalyst のカメラを遮蔽する状況が生じ、これがモニタリング中の位置検出精度に影響を与えることで、ビームゲーティング機能を有効的に使用することができない場合がある。

また、頭部の SRT の固定具として用いられる従来のフルフェイス型熱可塑性マスクでは、Catalyst を用いてポジショニングやモニタリングを行う場合、患者体表面の情報を得ることができない。そこで、患者の体表面情報を認識できるよう、顔の前面が開いているオープン型シェルが開発された。さらに、最近では、オープン型シェルにマウスピースを付加したマウスピース付きオープンシェルも販売されているが、マウスピースの有無が固定精度に与える影響についての先行研究はなく、まだ明らかとなっていない。

このような Catalyst の機械的性質の課題や2種類のオープン型シェルの固定精度について研究することで、どのような照射の状況においても正確に患者の位置を確認し、かつ、患者一人一人に最適なシェルを選択できることが期待される。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Keane M, Weitkamp N, Madani I, Day J, Dal Bello R, Zamburlini M, et al: Randomized self-controlled study comparing open-face vs. closed immobilization masks in fractionated cranial radiotherapy. Radiother Oncol. 2024: 196: 110314.

2） Pinkham MB, Sanghera P, Wall GK, Dawson BD, Whitfield GA: Neurocognitive effects following cranial irradiation for brain metastases. Clin Oncol (R Coll Radiol). 2015: 27: 630-639.

3） Mulvenna P, Nankivell M, Barton R, Faivre-Finn C, Wilson P, McColl E, et al: Dexamethasone and supportive care with or without whole brain radiotherapy in treating patients with non-small cell lung cancer with brain metastases unsuitable for resection or stereotactic radiotherapy (QUARTZ): results from a phase 3, non-inferiority, randomised trial. Lancet. 2016: 388: 2004-2014.

4） Zindler JD, Bruynzeel AME, Eekers DBP, Hurkmans CW, Swinnen A, Lambin P: Whole brain radiotherapy versus stereotactic radiosurgery for 4-10 brain metastases: a phase III randomised multicentre trial. BMC Cancer. 2017: 17: 500.

5） Freislederer P, Kügele M, Öllers M, Swinnen A, Sauer TO, Bert C, et al: Recent advances in Surface Guided Radiation Therapy. Radiat Oncol. 2020: 15: 187.

6） Kraft J, Zindler J, Minniti G, Guckenberger M, Andratschke N: Stereotactic radiosurgery for multiple brain metastases. Curr Treat Options Neurol. 2019: 21: 6.

7） Chen JC, Bugoci DM, Girvigian MR, Miller MJ, Arellano A, Rahimian J: Control of brain metastases using frameless image-guided radiosurgery. Neurosurg Focus. 2009: 27: E6.

8） Alongi F, Fiorentino A, Mancosu P, Navarria P, Giaj Levra N, Mazzola R, et al: Stereotactic radiosurgery for intracranial metastases: linac-based and gamma-dedicated unit approach. Expert Rev Anticancer Ther. 2016: 16: 731-740.

9） Bilger A, Frenzel F, Oehlke O, Wiehle R, Milanovic D, Prokic V, et al: Local control and overall survival after frameless radiosurgery: A single center experience. Clin Transl Radiat Oncol. 2017: 7:55-61.

10） Kirkpatrick JP, Wang Z, Sampson JH, McSherry F, Herndon JE 2nd, Allen KJ, et al: Defining the optimal planning target volume in image-guided stereotactic radiosurgery of brain metastases: results of a randomized trial. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2015: 91: 100-108.

11） Bry V, Licon AL, McCulloch J, Kirby N, Myers P,

Saenz D, et al: Quantifying false positional corrections due to facial motion using SGRT with open-face Masks. J Appl Clin Med Phys. 2021: 22: 172-183.
12）Kojima H, Takemura A, Kurokawa S, Ueda S, Noto K, Yokoyama H, et al: Evaluation of technical performance of optical surface imaging system using conventional and novel stereotactic radiosurgery algorithms. J Appl Clin Med Phys. 2021: 22: 58-68.
13）Freislederer P, Batista V, Öllers M, Buschmann M, Steiner E, Kügele M, et al: ESTRO-ACROP guideline on surface guided radiation therapy. Radiother Oncol. 2022: 173: 188-196.
14）Al-Hallaq HA, Cerviño L, Gutierrez AN, Havnen-Smith A, Higgins SA, Kügele M, et al: AAPM task group report 302: Surface-guided radiotherapy. Med Phys. 2022: 49: e82-e112.
15）Lee SK, Huang S, Zhang L, Ballangrud AM, Aristophanous M, Cervino Arriba LI, et al: Accuracy of surface-guided patient setup for conventional radiotherapy of brain and nasopharynx cancer. J Appl Clin Med Phys. 2021: 22: 48-57.
16）Stanley DN, McConnell KA, Kirby N, Gutiérrez AN, Papanikolaou N, Rasmussen K: Comparison of initial patient setup accuracy between surface imaging and three point localization: A retrospective analysis. J Appl Clin Med Phys. 2017: 18: 58-61.
17）Wiant DB, Wentworth S, Maurer JM, Vanderstraeten CL, Terrell JA, Sintay BJ: Surface imaging-based analysis of intrafraction motion for breast radiotherapy patients. J Appl Clin Med Phys. 2014: 15: 4957.
18）Chen X, Liu L, Wang Y, Huang X, Cai W, Rong X, et al: Surface guided radiation therapy with an innovative open face mask and mouth bite: patient motion management in brain stereotactic radiotherapy. Clin Transl Oncol. 2024: 26: 424-433.
19）Swinnen ACC, Öllers MC, Loon Ong C, Verhaegen F: The potential of an optical surface tracking system in non-coplanar single isocenter treatments of multiple brain metastases. J Appl Clin Med Phys. 2020: 21: 63-72.
20）Han C, Amini A, Wong JYC, Liang J, Qing K, Watkins WT, et al: Comparison of intrafractional motion with two frameless immobilization systems in surface-guided intracranial stereotactic radiosurgery. J Appl Clin Med Phys. 2022: 23: e13613.
21）Sauer TO, Ott OJ, Lahmer G, Fietkau R, Bert C: Region of interest optimization for surface guided radiation therapy of breast cancer. J Appl Clin Med Phys. 2021: 22: 152-160.
22）有村秀孝：放射線治療における Deformable Image Registration の基礎．Jpn J Med Phys. 2019: 39: 2〜6.
23）藤本昂也：8. 非剛体画像レジストレーション技術と臨床での活用．日本放射線技術学会雑誌．2023: 79: 78〜83.
24）日本医用画像工学会:医用画像工学ハンドブック．東京．日本医用画像工学会．2012: 439〜444.
25）van Herk M, Remeijer P, Rasch C, Lebesque JV: The probability of correct target dosage: dose-population histograms for deriving treatment margins in radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2000: 47: 1121-1135.
26）Mihailidis DN, Li T: Image guidance in radiation therapy: techniques, accuracy, and limitations. Med Phys. 2021: 48: e40-e41.
27）Hoisak JDP, Paxton AB, Waghorn B, Pawlicki T: Surface Guided Radiation Therapy. Boca Raton. CRC Press. 2020: 51-116.
28）山内遼平，富田史紘，秋山忍，石倉聡：AlignRT. 臨床放射線．2024: 69: 633〜643.
29）Zagar TM, Kaidar-Person O, Tang X, Jones EE, Matney J, Das SK, et al: Utility of Deep Inspiration Breath Hold for Left-Sided Breast Radiation Therapy in Preventing Early Cardiac Perfusion Defects: A Prospective Study. Int J Radiation Oncol Biol Phys. 2017: 97: 903-909.
30）Wolken TM: Comparing the Accuracy of AlignRT and ExacTrac at Intrafractional Time Points During Cranial Stereotactic Radiosurgery and Stereotactic Radiotherapy Treatments. Oregon Health & Science University. 2018.
31）上島佑介，坂本昌隆，鈴木健之，大村優奈，矢田隆一，小西憲太，他：IDETIFY．臨床放射線．2024: 69: 625〜631.
32）Tonkin K, Goodall SK: Accuracy of the catalyst surface guidance system for patient monitoring during cranial SRS treatments. Phys Eng Sci Med. 2023: 46: 633-643.
33）Lehmann J, Standen TS, Kaur G, Wolf J, Wilfert A, Simpson J: Methodology of thermal drift measurements for surface guided radiation therapy systems and clinical impact assessment illustrated on the C-Rad Catalyst+ HD system. Tech Innov Patient Support Radiat Oncol. 2022: 21: 58-63.

34）白石憲史郎，熊谷仁，上原隆三：Catalyst．臨床放射線．2024: 69: 645〜655.
35）Freislederer P, Kügele M, Öllers M, Swinnen A, Sauer TO, Bert C, et al: Correction to: Recent advances in Surface Guided Radiation Therapy. Radiation Oncology. 2020: 15: 244.
36）Wiant D, Liu H, Hayes TL, Shang Q, Mutic S, Sintay B: Direct comparison between surface imaging and orthogonal radiographic imaging for SRS localization in phantom. J Appl Clin Med Phys. 2019: 20: 137-144.
37）齋藤正英，上田幸治，鈴木秀和，根本光，戸塚凌太，大西良史子，他：VOXELAN の基礎的特徴と臨床利用．臨床放射線．2024: 69: 657〜662.
38）Komori R, Hayashi N, Saito T, Amma H, Muraki Y, Nozue M: Improvement of patient localization repeatability using a light-section based optical surface guidance system in a pre-positioning procedure. Cancer/Radiothérapie. 2022: 26: 547-556.
39）金子真洋，宮内春樹，伊藤康，吉岡靖生：ExacTrac Dynamic® Surface. 臨床放射線．2024: 69: 663〜669.
40）Naidoo W, Leech M: Feasibility of surface guided radiotherapy for patient positioning in breast radiotherapy versus conventional tattoo-based setups- a systematic review. Tech Innov Patient Support Radiat Oncol. 2022: 22: 39-49.
41）Lastrucci A, Morelli I, Votta C, Maran I, Iosca N, Monaco IP, et al: Open-face masks in radiotherapy: enhancing therapeutic strategies for head and neck and brain cancer patients−a comprehensive scoping review. Cancers. 2024: 16: 2899.
42）Reitz D, Muecke J, da Silva Mendes V, Landry G, Reiner M, Niyazi M, et al: Intrafractional monitoring of patients using four different immobilization mask systems for cranial radiotherapy. Phys Imaging Radiat Oncol. 2022: 23: 134-139.
43）Leitzen C, Wilhelm-Buchstab T, Garbe S, Lütter C, Müdder T, Simon B, et al: Quality of patient positioning during cerebral tomotherapy irradiation using different mask systems. Strahlenther Onkol. 2014: 190: 382-385.
44）Tryggestad E, Christian M, Ford E, Kut C, Le Y, Sanguineti G, et al: Inter- and intrafraction patient positioning uncertainties for intracranial radiotherapy: a study of four frameless, thermoplastic mask-based immobilization strategies using daily cone-beam CT. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2011: 80: 281-290.
45）Lightstone AW, Tsao M, Basran PS, Chan G, Pang G, Ma L, et al: Cone beam CT (CBCT) evaluation of inter- and intra-fraction motion for patients undergoing brain radiotherapy immobilized using a commercial thermoplastic mask on a robotic couch. Technology in Cancer Research & Treatment. 2012: 11: 203-209.
46）Nixon JL, Brown B, Pigott AE, Turner J, Brown E, Bernard A, et al: A prospective examination of mask anxiety during radiotherapy for head and neck cancer and patient perceptions of management strategies. J Med Radiat Sci. 2019: 66:184-190.
47）Li G, Lovelock DM, Mechalakos J, Rao S, Della-Biancia C, Amols H, et al: Migration from full-head mask to “open-face” mask for immobilization of patients with head and neck cancer. J Appl Clin Med Phys. 2013: 14: 243-254.
48）Clover K, Oultram S, Adams C, Cross L, Findlay N, Ponman L: Disruption to radiation therapy sessions due to anxiety among patients receiving radiation therapy to the head and neck area can be predicted using patient self-report measures. Psycho-Oncology. 2011: 20: 1334-1341.
49）Ohtakara K, Hayashi S, Tanaka H, Hoshi H, Kitahara M, Matsuyama K, et al: Clinical comparison of positional accuracy and stability between dedicated versus conventional masks for immobilization in cranial stereotactic radiotherapy using 6-degree-of-freedom image guidance system-integrated platform. Radiother Oncol. 2012: 102: 198-205.
50）Verhey LJ, Goitein M, McNulty P, Munzenrider JE, Suit HD: Precise positioning of patients for radiation therapy. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. 1982: 8: 289-294.
51）Ohira S, Komiyama R, Kanayama N, Ueda Y, Inui S, Miyazaki M, et al: Intra-fractional motion error during HyperArc stereotactic radiosurgery on patients with brain metastases: Comparison of open and full-face clamshell-style immobilization devices. J Appl Clin Med Phys. 2022: 23: e13536.

Abstract

The role of surface-guided radiotherapy system in stereotactic radiotherapy for the head and the introduction of open-shell masks

Hibiki Takee

Department of Radiological Sciences, Graduate School of Health Sciences, Juntendo University

In recent years, surface-guided radiotherapy (SGRT) has gained attention as a method for patient positioning in the treatment of metastatic brain tumors using surface information. SGRT employs non-ionizing radiation such as visible light, eliminating radiation exposure while enabling real-time monitoring of the patient's body surface during treatment. One device capable of performing SGRT is the Catalyst (C-RAD Positioning AB, Sweden). This report introduces the role of SGRT in radiotherapy, the features of the Catalyst system, and previous studies on the fixation device, open-face masks.

Key Words: metastatic brain tumor, surface guided radiation therapy, structuring, Catalyst, open-face mask

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 65-79, 2026]

論　説

頸動脈プラークの画像診断

高 玉 湧 斗、後 藤 政 実

順天堂大学保健医療学研究科診療放射線学専攻

要　旨

本稿は、頸動脈プラークの画像診断に関する知見を整理し、検査技術とその臨床的意義を論じたものである。頸動脈プラークは脂質、線維性組織、カルシウムから構成される病変であり、動脈硬化の進行に伴い脳梗塞や一過性脳虚血発作（TIA）の主な原因となる。頸動脈プラークの組成、分類、形成過程について整理し、超音波検査および magnetic resonance imaging（MRI）検査を中心に、各検査法の特徴、利点、課題を検討した。超音波検査は非侵襲的で迅速なスクリーニング手法として、IMT（内中膜厚）やプラーク性状の評価に優れる。一方、MRI 検査は高い空間分解能とコントラスト分解能を有し、sampling perfection with application optimized contrasts using different flip angle evolutions（SPACE）法や black-blood MR angiography（MRA）法、magnetization prepared rapid gradient echo（MP-RAGE）法、periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction（PROPELLER）法などの撮像シーケンスを使用し、プラーク内の詳細な構造を描出できる。

頸動脈プラークの画像診断は、脳梗塞のリスク評価と早期発見において重要な役割を果たす。本稿では、超音波検査と MRI 検査が補間し合うことで、プラークの評価精度を向上させる可能性を示した。これにより、脳卒中の予防やより良い治療法の選択に寄与することが期待される。また、撮像技術や解析手法の改善により、プラーク評価精度の向上や脳梗塞発症リスク予測の応用への期待が増す分野であると言える。

キーワード：頸動脈プラーク、超音波検査、MRI

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，80-84頁，2026年（受付　2025.6.12.；受理　2025.10.1.）

1. はじめに

頸動脈プラークは動脈硬化の一形態であり、不安定プラークの破裂は脳梗塞や一過性脳虚血発作（TIA）などの脳血管障害を引き起こす主な原因となる。そのため、プラークの早期発見と性状評価は、脳卒中の予防において極めて重要である。

本稿では、超音波検査と MRI 検査を中心に、頸動脈プラークの画像診断に関する特徴や意義を検討する。

2. 頸動脈プラークの概要

1）プラークの組成

頸動脈プラークは動脈壁内に脂質、カルシウム、線維性組織が蓄積したものである。中心部の脂質コアと表面を覆う線維性皮膜、隆起の両端の部分から構成される。主に頸動脈分岐部に形成されることが多く、冠動脈プラークと比較し、出血の頻度が多いことが特徴である。半田らが行った ARIC study では、一般住民の検診の結果、分岐部（頸動脈洞）に20%、総頚動脈に5.4%、内頚動脈に8.5〜9.8% の頻度でプラークを認めた[1)]。

2）プラークの分類

プラークは安定プラークと不安定プラークの2つに大きく分類される。安定プラークは皮膜が厚く破裂しにくい特徴を持つ。不安定プラークは脂質コアが大きく、肩の部分にマクロファージや T リンパ球などの炎症細胞が多い粥種である[2)]。様々な刺激に対して破れやすく、不安定プラークの破裂は脳梗塞や塞栓性疾患の原因になる。

3）プラークの形成

プラークは血中の余分なコレステロールがたまることによって形成される。血管内皮の損傷が起き、悪玉である低比重リポたんぱく質（LDL）が上昇し蓄積するとともに、善玉である高比重たんぱく質（HDL）の低下が生じる。炎症反応によるマクロファージの活性化、線維性キャップと脂質コアの成熟によってプラークが形成される。粥状硬化が十分に進展すると、単なる狭窄だけでなく、石灰沈着、粥種の破綻による潰瘍化、血栓の形成、粥種またはプラーク内出血などを伴い、複合病変と呼ばれる臨床的に重要な病変となる。このような複合病変により、血管壁が弾性を失って血

責任著者：後藤政実
順天堂大学保健医療学研究科診療放射線学専攻
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: m.goto.ql@juntendo.ac.jp

管内腔が狭くなり、虚血性心疾患や脳卒中などを引き起こす。また、粥種が中膜を侵食することにより動脈壁が薄くなり、脆弱化すると内腔が拡張し、動脈瘤が発生する[2]。生活習慣病などの動脈硬化危険因子（糖尿病、脂質異常症、高血圧症、喫煙、肥満など）の存在は、粥状硬化の発生に促進的に作用する[3]。プラークの発生頻度は脳血管障害群で59%、それ以外では41% との報告がある[1]。そのため、プラークの組成および形態を知ることは、治療方針を決めるうえで重要である。

3. 検査の概要

頸動脈プラークの検査には超音波や MRI、computed tomography（CT）などが用いられる。超音波検査は非侵襲的で手軽に行えるため、初期検査として用いられることが多い。また、臨床症状が出現する早期の段階から繰り返し検査を行える。

MRI 検査は高い組織コントラストを得られるため、詳細な構造評価や組成の同定に優れる。プラークの構成成分である線維性組織や出血、lipid-rich コアおよび石灰化を判別するのに有用である[4]。

CT 検査は緊急性に優れており、高い空間分解能を利用した平面画像の再構成により、潰瘍形成や狭窄率、狭窄長などの形態評価に有利であり、石灰化病変の描出にも適している。プラーク量を mm^3単位で算出する定量的評価に加え、プラークを hounsfield unit（HU）によって脆弱プラークや石灰化プラークなどに分類する定性的評価も可能である[5]。しかし、造影剤使用による腎毒性や放射線被ばく（頚部の computed tomography angiography（CTA）による被ばくは10〜12mGy）が欠点として挙げられる。

本稿では、初期検査の超音波検査、精密検査の MRI 検査について詳細を以下に記す。

4. 超音波検査

1）検査方法

超音波検査には、カラードプラ法や B-flow イメージ、造影剤を使用した頚部血管エコー contrast enhanced ultrasonography（CEUS）、造影剤を使用せずに新生血管を描出可能な superb micro-vascular imaging（SMI）がある[6, 7]。血管形態や走行深度から、視野幅が3〜5cm の高周波のリニア型プローブを使用する。CEUS では、従来の頭頸部エコーで評価が困難であったプラーク内新生血管の評価が可能である[6]。しかし、日本では使用する超音波造影剤のソナゾイドが保険適応外であるため、造影剤を用いずに新生血管を描出できる SMI を用いた新生血管の描出が試みられている[7]。断層画像では血管径や血管の走行、血管壁に当たる内膜中膜複合体の厚みと性状、プラークの厚みを含めた大きさと性状など、主に血管内腔の状態が観察される。一方、ドプラ検査では各部の血流速度および血流波形解析、カラードプラ、パワードプラでは実際の血流の有無、血管壁と血流の相互関係などが評価可能である[1]。超音波検査は簡便かつ低コストで短時間に検査が可能なことに加え、mobile plaque の診断などの動態評価が可能であることが利点である。一方、術者の技量に診断能が左右されること、高度石灰化病変や日本人に多く見られる高位病変では評価不能であること[8]、MRI と比較してコントラスト分解能が劣ることなどが欠点である。

2）評価項目

（1）内中膜厚（IMT）

頸動脈の内膜と中膜が一層に見え、この厚さを IMT と呼んでおり、一般に最大厚（max-IMT）を用いて評価される。健常者での max-IMT は加齢とともに肥厚する傾向があり、一般的な目安としてその増厚の値は10年間で0.08〜0.10mm と言われている[9]。そのため、max-IMT を評価する際は、加齢による肥厚を考慮して基準値と比較する必要がある[3]。

（2）プラーク

1.1mm 以上の限局した隆起性病変をプラークと総称し、臨床的意義から考慮される評価対象は最大厚が1.5mm を超えるプラークとされている[3]。評価項目には最大の厚み、部位やサイズ、表面の形態、内部の性状、可動性などがあり、中でも最大厚が重要視される。以下に主要な評価項目について述べる。部位の評価においては、形態や性状も記載することで、経過観察する際に標的プラークの確実な位置の同定が可能になる。プラークのサイズ評価では、血管長軸方向へのプラークの進展範囲や面積、短軸断面でのプラークの占有率が重要となる。プラークの最大厚の計測ポイントは、IMT と同様に外膜との境界から隆起部の頂点までとされる[9]。表面の形態評価では、プラークの表面において平滑、不整、明らかな陥没を伴う腫瘍形成などが評価される。平滑とは、表面がほぼスムーズであることで、隆起の形態は判断基準には含めない。不整とは、表面に不規則な凹凸を認めるが、潰瘍形成を伴わないものとされる。潰瘍とは、明らかな陥凹の形成を認めるものである。陥凹はカラードプラ法での観察も含め、短軸像および長軸像において明らかな陥凹の

形成を認めた場合とされるが、複数プラークによる連続形態との鑑別に注意する必要がある[3]。内部の性状評価では、プラーク周囲非病変部の内中膜複合体（IMC）と同一断面でのプラーク内部エコー輝度を比較し、著しく低輝度、等輝度、高輝度（石灰化）を評価する。低輝度プラークでは粥種やプラーク内出血が疑われ、等輝度プラークでは線維性病変が疑われ、音響陰影を伴う高輝度プラークでは石灰化病変が疑われる[3, 9]。可動性プラークは、プラーク表面全体もしくは一部が動脈拍動とともに変形するもの、プラーク内に可動性の構造物を認めるもの、プラーク全体もしくは表面に付着した構造物が血流により可動するものなどに分類される。これらの可動性プラークは、プラークの破綻やプラーク内出血を起こしているとされるため、プローブ走査の際に注意が必要である。

5. MRI 検査

高い組織コントラストを得ることができる MRI 検査は、プラークの性状評価を正確かつ再現性よく行えると期待されている。また、MRI を使用した血管壁イメージングは、プラークの構成成分である線維性組織、出血または lipid-rich コアおよび石灰化を判断するうえで重要である[4]。一般的に T1強調画像、プロトン密度強調画像、T2強調画像などが用いられる。

1）SPACE 法（sampling perfection with application optimized contrasts using different flip angle evolutions 法）

Turbo spin echo（TSE）法系の3D 撮像シーケンスである。従来の TSE 法のような一定角度の flip angle（FA）を使用せず、時間の経過に伴い FA を変化させる variable flip angle（vFA）を使用している[10]。最適化された vFA を使用することで、撮像中に組織の信号減衰を一定の状態に保ち、エコートレインの最後まで信号強度を維持することが可能である。そのため、3D-TSE 法と比べ、高いターボファクタを用いてもブラーリングの影響を抑えられ、高いコントラストを得ることができる。また、SPACE 法は vFA による FA の変調により血液の位相分散が大きくなるため、強い flow void 効果が得られる特徴がある[11]。しかし、頸動脈の形状、血流速度および狭窄などによって血管腔内の信号抑制不良があるとの報告がある[10]。

2）Black-blood MR angiography（MRA）法

二重反転回復法（DIR）などのパルスシーケンスを用いることで、血管内の血流信号を選択的に抑制し、血流を低信号で描出する。非選択的 IR パルスと選択的 IR パルスの2つの IR パルスからなる DIR パルス（BB パルス）をプリパルスとして使用し、血液の null point で励起パルスを印加し、心電図同期を併用することで、血流を低信号として捉えつつ、周囲の組織からは信号を得ることができる。長所として、血液を高信号に描出する blight-blood MRA 法ほどは血管狭窄を過大評価しない点、血管屈曲部が狭窄に見えることがない点、フローによるアーチファクトが少なく、壁の造影効果が観察しやすい点などがある。短所として、石灰化プラーク（低信号）により狭窄の程度を過小評価する可能性、空気や骨皮質、石灰化などの低信号構造を血流と区別できない可能性[12]、2D 画像であるため3D 画像に比較して広がり評価に向いていないこと[13] などが挙げられる。また、心電図同期を併用することで、被験者の心拍数に撮像時間が左右される。血流を無信号化する方法として spin echo（SE）法のフローボイドの利用、presaturation pulse の併用などもあるが、2つの IR パルスを用いた DIR 法が広く用いられている[14]。

3）MP-RAGE 法（magnetization prepared rapid gradient echo 法）

Gradient echo（GRE）系の3D 撮像シーケンスであり、反転パルス（IR）のプリパレーションを使用する turbo fast low angle shot（turbo FLASH）法の3D 拡張法である。α° radio frequency（RF）パルスの前に180° パルスが加えられる。この方法は、反転回復（inversion recovery: IR）法に似ており、より T1強調を強めながら inversion time（TI）に応じて組織の信号を抑制することができる[12]。短い repetition time（TR）、echo time（TE）を組み合わせることによって撮像時間の短縮が可能になり、適切な TI 設定により血液信号が抑制され、プラークや血管壁が鮮明に描出される。また、部分容積効果を減らすことができ、多断面再構成が可能である。しかし、脂質成分や壊死成分の信号がしばしば抑制され、線維成分より低信号になることがある。特に3T 装置では、1.5T に比べて T1値延長が起こるため、TI の設定に注意が必要である[12]。

4）PROPELLER 法（periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction 法）

Radial scan の一種であり、TSE 法を使用して RF パルスから収集されたブレードと呼ばれる長方形データ補填領域を k 空間上で回転させ、データ収集を行う。k 空間中心部のデータを何度も加算し、被写体の動きに対して補正が可能であり、モーションアーチファク

トを軽減できる。また、k 空間の中心部を何度もスキャンするため信号雑音比も向上する[12]。さらに、心電図同期併用の DIR 法と比較すると任意の固定 TR を設定でき、一定の条件下で撮像が行えるため撮像時間は短縮する。一方で、体動補正無の高速 SE 法と比較すると撮像時間は延長する。Cartesian 法と比較した実験によると[15, 16]、PROPELLER 法を用いることで体動による影響は抑制可能である。また、PROPELLER 法は Cartesian 法とは k 空間充填法が異なり、k 空間上のサンプリングが回転を伴うため、明確な周波数方向を定めることができない。そのため、通常の Cartesian 法で周波数方向に出現するケミカルシフトアーチファクトが、k 空間のサンプリング特性を反映した特有のパターンで出現する可能性があり、注意が必要である。これらの特性から、PROPELLER 法は嚥下や体動などのモーションアーチファクトを抑制できることに加え、任意の固定 TR を設定できるため、従来の DIR 法と比較して病変コントラストの向上が得られたとの報告もある[15]。

6. まとめ

頸動脈プラークの組成を知ることは、治療法を選択していくうえで非常に重要になる。超音波や MRI、CT、血管造影、PET など様々な検査方法がある中で、初期検査で超音波検査を行い、精密検査で MRI を行うことが頸動脈プラークに対しては有用である。特に MRI に関しては、現在も撮像シーケンスの検討が重ねられているため、今後、頸動脈プラークの評価および診断の発展により重要となり、脳梗塞のリスク予測精度向上にも寄与すると期待される。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1) 半田伸夫，岡崎裕，伊藤泰司，湯浅義人，杉谷義憲：頸動脈超音波検査による頸動脈プラークの組織性状診断と脳梗塞発症との関係．Neurosonology. 2000: 13: 170〜174.
2) 渡辺照男：カラーで学べる病理学．第5版．東京．NOUVELLE HIROKAWA．2019: 197〜200.
3) 日本超音波医学会　用語・判断基準委員会：超音波による頸動脈病変の標準的評価法2017. https://www.jsum.or.jp/committee/diagnostic/diagnostic, 2025年4月25日.
4) Watanabe Y, Nagayama M, Suga T, Yoshida K, Yamagata S, Okumura A, et al: Characterization of Atherosclerotic Plaque of Carotid Arteries with Histopathological Correlation. Journal of Magnetic Resonance Imaging. 2008: 28: 478-485.
5) Misaki K, Uchiyama N, Mohri M, Nakada M: Carotid Artery Plaque Diagnosis Using CT. Journal of Neuroendovascular Therapy. 2018: 12: 592-596.
6) 松本典子，木村和美，宇野昌明，西村広健：頚部血管エコーによる頸動脈プラークの評価−超音波造影剤の有用性−．Neurosonology. 2013: 26: 1〜3.
7) 石川まゆ，菅洋美，久門良明，木村菜里，伊賀瀬圭二，松原一郎，他：B-flow を用いた頸動脈プラーク内血流の観察と臨床的意義の検討．Neurosonology. 2020: 33: 3〜8.
8) 吉田和道，宮本享：MRI による頸動脈プラークの画像診断．脳卒中の外科．2020: 48: 414〜419.
9) 尾崎俊也：頸動脈エコーの実際．日本血栓止血学会誌．2008: 19: 35〜38.
10) 浦田哲弥，山本英孝，生田尚明，打越将人：頸動脈プラーク MRI における3D-TSE 法（SPACE 法）の有用性．日本放射線技術学会雑誌．2012: 68: 871〜879.
11) Mihai G, Chung YC, Merchant A, Simonetti OP, Rajagopalan S: T1-Weighted-SPACE Dark Blood Whole Body Magnetic Resonance Angiography (DB-WBMRA): Initial Experience. Journal of Magnetic Resonance Imaging. 2010: 31: 502-509.
12) Hashemi RH, Lisanti CJ, Bradly WG Jr, 荒木力（訳），MRI の基本パワーテキスト 基礎理論から最新撮像法まで．第4版．東京．株式会社メディカル・サイエンス・インターナショナル．2022: 276〜278，353〜354.
13) 真壁武司，守山亮，中村麻奈美，丹羽潤：頸動脈プラーク評価のための MRI 検査方法について．函館医学誌．2006: 30: 59〜63.
14) 百島裕貴，藤原広和：頚部頸動脈の MRA．日本脈管学会．2004: 44: 721〜726.
15) 中村麻奈美，真壁武司，丹羽潤，古明地孝弘，對馬州一：BRADE 法を使用した頸動脈プラーク評価．函館医学誌．2011: 35: 17〜21.
16) 中村麻奈美，真壁武司，手塚秀臣，三浦喬弘，梅村琢磨，杉森博行，他：頸動脈プラーク性状評価

における k-space 充填法（Radial Scan）撮像条件の検討．日本放射線技術学会雑誌．2013: 69: 407〜412.

Abstract

Imaging diagnosis of carotid artery plaque

Yuto Takatama, Masami Goto

Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Science, Juntendo University

The paper reviews current knowledge on radiological imaging-based assessment of carotid plaques, focusing on both diagnostic techniques and their clinical significance. Carotid plaques are atherosclerotic lesions composed of lipids, fibrous tissue, and calcium. As atherosclerosis progresses, these plaques become major contributors to ischemic stroke and transient ischemic attacks (TIA). The paper outlines the composition, classification, and formation processes of carotid plaques, with a focus on ultrasound sonography (US) and magnetic resonance imaging (MRI) as key imaging modalities. US is a non-invasive and rapid screening method that is particularly effective in evaluating intima media thickness (IMT) and identifying plaque morphology. However, it has limitations in distinguishing internal components. In contrast, MRI provides excellent spatial and contrast resolution, enabling detailed visualization of plaque structure. Techniques such as sampling perfection with application optimized contrasts using different flip angle evolutions (SPACE), black-blood, magnetization prepared rapid gradient echo (MP-RAGE), and periodically rotated overlapping parallel lines with enhanced reconstruction (PROPELLER) sequences are used to assess features like intraplaque hemorrhage and lipid-rich necrotic cores. The combined use of US and MRI can enhance diagnostic accuracy and improve risk stratification in cerebrovascular disease. This complementary approach is expected to contribute to early detection and the prevention of cerebral infarction, as well as support more informed treatment decisions. In addition, advancements of MR imaging technique and analysis method increase accuracy in plaque diagnosis and provide useful tools for predicting the risk of cerebral infarction.

Key Words: carotid artery plaque, ultrasound sonography, MRI

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 80-84, 2026]

論　説

小線源治療における線源位置誤差が線量分布に与える影響

櫻井大斗[1)]、黒河千恵[2)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
[2)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

本論では、子宮頸癌に対する小線源治療において、線源位置誤差が線量分布に与える影響について概説した。小線源治療は、線源からの距離に応じて線量が急激に減衰するという特性を有しており、わずか1 mm 程度の微小な位置ずれでも、臨床標的体積（clinical target volume: CTV）への線量低下（D_{90}の減少）や、リスク臓器（organ at risk: OAR）への過剰線量（D_{2cc}の上昇）といった重大な影響を生じうる。線源位置誤差は、線源駆動装置の不具合、アプリケータ装着精度のばらつき、さらに臓器変動や体動など、機械的・患者関連の複合的要因によって発生する。特に、線源が標的に接近し、かつ照射時間が短い条件では、処方線量に対して6 〜 8% に及ぶ線量偏差が生じることが報告されており、治療成績や有害事象の発生に影響を与える可能性がある。また、こうした誤差に対する対策として、品質保証体制や画像誘導技術、さらには inverse planning（逆計画法）による最適化手法についても紹介した。近年では、わずかな位置ずれが生じても線量分布の変動を抑えられる「堅牢性」や、停留位置や停留時間のパターンに基づく「複雑性」の概念が注目されており、今後、これらの指標の確立が求められている。

キーワード：子宮頸癌、小線源治療、線源位置誤差、堅牢性、複雑性

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，85-91頁，2026年（受付　2025.6.26.；受理　2026.5.13.）

1. 子宮頸癌の病期別アプローチと放射線治療の役割

子宮頸癌は、子宮頸部に発生する悪性腫瘍であり、ヒトパピローマウイルス感染が発症の主要因とされている[1)]。2022年には、子宮頸癌は女性における発症頻度第4位のがんであり、約66万例の新規発症と約35万例の死亡が報告されている[2)]。

子宮頸癌に対する放射線治療は、病期に応じて外科的治療と並ぶ主要な治療選択肢であり、特に中等度〜進行期においては根治的治療として中核的な役割を果たしている。腫瘍の形状や位置に応じて照射範囲と線量を柔軟に設計することで、腫瘍に対する高い局所制御率が得られる一方、正常組織への影響を抑えられるという利点がある。さらに、化学療法との併用により治療効果の相乗効果が期待され、進行例においては予後改善にもつながることが知られている[3)]。

子宮頸癌の治療方針は、腫瘍の進行度（病期）に応じて決定される。その分類方法として広く用いられているのが、国際婦人科連合（International Federation of Gynecology and Obstetrics: FIGO）分類である。これは、腫瘍の広がり（原発巣の大きさや近接臓器への浸潤）に基づいて、0期から IV 期までの病期に分けるもので、放射線治療の適応判断においても重要な基準となっている。FIGO 分類の0期や I 期では、外科的切除（円錐切除や子宮全摘術）が適応となる場合が多い。一方、IB2期以上や II 期では、外部照射（external beam radiation therapy: EBRT）と高線量率小線源治療（high-dose-rate brachytherapy: HDR-BT）を併用した放射線治療が標準治療とされている[4)]。さらに、III 期や IV 期に進行した場合や、TNM 分類において所属リンパ節転移（N1）が認められる場合には、放射線治療に化学療法を併用した同時化学放射線療法が推奨される[3)]。このように、病期分類は治療適応と設計の指針として極めて重要な役割を担っている。

2. 小線源治療の物理的特徴

小線源治療（brachytherapy: BT）は、密封された放射性同位元素を用いた線源を、腫瘍またはその近傍に直接挿入して照射を行う放射線治療法である。この線源は放射性物質を金属製カプセルに封入した密封小線源で、体内に一時的、または永久的に留置して使用さ

責任著者：黒河千恵
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: ckuroka@juntendo.ac.jp

れる。特に、一時的に線源を留置する高線量率（high-dose-rate（HDR）：>12 Gy/h）の BT では、^{192}Ir が主に用いられている。BT の最大の特徴として、線源からの距離の2乗に反比例して線量が急減衰する物理法則（逆二乗則）に基づいており、**図1**に示すように、線源からの距離（横軸）が増加するにつれて、相対線量（縦軸）は急激に低下する。この特性により、腫瘍に高線量を集中させつつ、正常組織への線量を急速に低減できる。さらに、腫瘍局所には生物学的等価線量（equivalent dose in 2 Gy fractions: EQD2）換算で60〜90 Gy の線量が付与される。これは、EBRT による標準的な照射量に相当する高線量であり、腫瘍の制御に必要な線量水準として臨床的に妥当とされている。なかでも、高リスク臨床標的体積（high-risk clinical target volume: CTV_HR）は、画像診断をもとに腫瘍の残存部や再発のリスクが高い領域として定義される。この CTV_HR に対しては、90％以上の体積が目標線量に到達していることを示す指標である D_{90}が、治療効果の評価において重要とされている。臨床的には、EQD2 換算で60 Gy 以上の D_{90}を確保することが、局所制御率の向上に寄与することが報告されている[5]。

HDR-BT が導入される以前は、子宮頸癌を含む婦人科領域の小線源治療において、低線量率（low-dose-rate（LDR）：0.4–2.0 Gy/h）の線源を長時間体内に留置し、1回あたり10時間以上かけて照射を行う方式が一般的であった。これに対し、現在では HDR の線源を用い、1回数分間の照射を複数回に分けて実施する分割照射法が標準的となっている[6]。その理由として、1回あたりの治療時間が短縮されるため、患者の身体的拘束時間や感染リスクを低減できるほか、治療の中断や再計画が容易で、全体の安全性と柔軟性が向上することが挙げられる[5]。また、HDR-BT では、各停留位置に対して線源の停留時間を個別に設定できる最適化技術が導入されており、腫瘍の形状や周囲臓器の位置に合わせた線量分布を実現できるようになっている[7]。従来は、標準化された照射パターンを用いたマンチェスター法などの経験的手法が主流であり、患者ごとに異なる腫瘍の大きさや位置に柔軟に対応することが難しかった。こうした課題を解決する手法として、現在では三次元画像誘導小線源治療（3D image-guided brachytherapy）が広く普及している。これは、磁気共鳴画像法（magnetic resonance imaging: MRI）やコンピュータ断層撮影（computed tomography: CT）により得られた三次元画像情報をもとに肉眼的腫瘍体積（gross tumor volume）、CTV_HR、リスク臓器（organ at risk: OAR）の位置と形状を可視化し、各患者に合わせて線源配置や照射条件を調整するものである[7]。この治療法の標準化と品質保証のため、GEC-ESTRO（Groupe Européen de Curie-thérapie – European Society for Radiotherapy and Oncology）は欧州放射線腫瘍学会の小線源治療部門として、国際的な治療計画ガイドラインを提示している。その中では、先述した D_{90}を確保しつつ、OAR 内での2 cm^3領域における最大線量である D_{2cc} を臓器ごとの許容値以下に抑えることが推奨されている[7,8]。これらの基準を満たせない場合、局所制御率の低下や膀胱障害・直腸出血などの有害事象の増加につながることが報告されており、線量評価指標の遵守は極めて重要である[7]。このように、現在の小線源治療は、画像情報を活用した治療計画と線源配置の最適化により、患者ごとの腫瘍特性に応じた効果的な照射が可能となり、治療効果と安全性の両立が図られている。

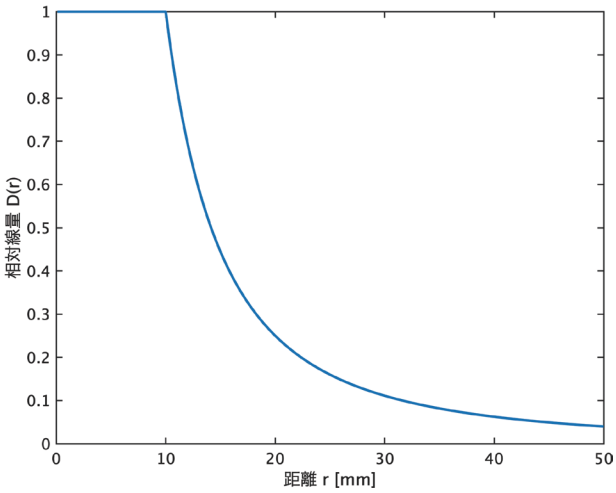


図 1　線源からの距離に対する線量の変化（距離の逆二乗則（10 mm 基準で相対線量 D(r)=1））
縦軸：相対線量、横軸：線源からの距離（mm）

3. 線源位置誤差：発生要因・影響・対策

3.1　発生要因

小線源治療には、線源の挿入方法に応じて腔内照射と組織内照射の2つの形式がある。前者は体腔内（子宮腔や膣腔など）に治療器具を挿入して線源を配置する方法であり、後者は針やカテーテルを通じて腫瘍組織内に直接線源を留置する方法である。いずれの方法においても、放射性物質を密閉した線源を使用し、体内に一時的または恒久的に留置して照射を行うため、密封小線源治療と呼ばれる。子宮頸癌における標準的な小線源治療は前者であり、この際に用いられる治療器具をアプリケータと呼ぶ。アプリケータは線源を体内の所定位置へ導く役割を持ち、代表的なものとしてタンデム（子宮腔用）やオボイド / リング（膣腔用）が挙げられる。

小線源治療において、線源の位置とは、アプリケータ内で線源が一時的に静止する停留位置を指す。各位置での停留時間と合わせて、治療計画に基づいて1 mm単位で設定され、線量分布を構成する中核的な要素となる。このため、線源位置の精度は、治療効果の最大化に加え、CTV および OAR に対して計画どおりの線量分布を実現するためにも、極めて重要である。特にHDR-BT では、線源からの距離に応じた急峻な線量勾配が存在するため、わずかな位置のずれ（線源位置誤差）でも線量分布に顕著な影響を及ぼす[9]。これに対し、LDR-BT では照射時間が長く、位置の変動が平均化されるため、線源位置誤差による局所的な線量変動の影響は HDR-BT よりも小さいとされている[10]。

線源位置誤差の発生要因は大きく「機械的要因」と「患者関連要因」に分類される。前者の代表例は、HDR-BT で広く使用されているリモート・アフターローディング・システム（remote after loading system: RALS）の不具合である。RALS とは、線源を格納した本体（鉛により遮蔽）から、細長いチューブ（transfer tube）を通じて、アプリケータ内部の各位置へ線源を順番に搬送する自動制御装置である。治療装置で指定した停留位置に線源を一時的に送り出して停止させ、設定された時間（停留時間）だけ照射した後、次の停留位置へと移動させる。これにより、1つの線源で複数の停留位置に対応し、治療計画に基づいて腫瘍や臓器の形状に合わせた線量分布を実現している。この搬送動作は、モーター駆動によるケーブル制御によって行われているが、経年劣化に伴うケーブルの伸縮精度の低下や、チューブ内の摩擦抵抗の変化により、線源が計画どおりの位置に正確に到達しないリスクがある[11]。このような機械的要因による線源位置誤差が患者治療中に生じることを防ぐため、線源位置精度に関する品質保証（quality assurance: QA）として、長さや形状が既知の transfer tube を用いた線源搬送試験が実施されている。国際的には±1 mm 以内の精度が求められており、使用頻度に関わらず定期的な QA 実施が推奨されている[12]。

一方、後者の代表例は、アプリケータの装着方法のばらつきである。アプリケータは治療時に医師の手技で挿入・固定されるが、子宮の形状や位置、骨盤内の解剖構造や膣の形状の個人差により、挿入角度や深さが微妙に変化することがある。そのため、同じ患者であっても、毎回完全に同一の位置関係を再現することは難しく、計画と実際の照射位置にずれが生じる可能性がある[9]。通常、アプリケータ装着ごとに CT や MRI で画像を取得し、治療計画を作成するが、治療中の体動や膀胱・直腸内容量の変化によって、アプリケータや周囲臓器の位置関係が変動することがある[13]。また、MRI を用いた治療計画や複数分割照射においては、画像取得から照射までに数時間から半日以上のタイムラグが生じることもあり、この間に臓器が移動することで、線源配置に差が生じるリスクがある[14]。

このように、線源位置誤差は機械的・患者関連要因の複合的な影響により生じる。これらの誤差を考慮した上で、想定される誤差内の位置ずれが生じても、D_{90}や D_{2cc} といった線量評価指標が大きく変動しないように設計された治療計画、すなわち堅牢性を備えた計画を構築することが、安全かつ高精度な治療を実現するうえで不可欠である。

3.2　線量分布に及ぼす影響

3.1で述べたように、小線源治療ではわずかな線源位置誤差であっても、治療の精度や安全性に顕著な影響を及ぼす可能性がある。こうした誤差の影響を評価するために、米国医学物理学会（American Association of Physicists in Medicine: AAPM）の Task Group 43 Update 1（TG-43U1）モデルが、小線源治療の線量分布計算に従来より用いられている[9]。TG-43U1モデルでは、密封小線源からの放射線照射における三次元的な線量分布を、線源の物理特性と空間的な位置（距離と角度）をもとに計算する。このとき、線源からの距離 r および角度 θ における線量率 $\dot{D}(r,\theta)$ は、基準幾何学因子 $G(r_0,\theta_0)$ により正規化され、以下の式(1)により定義される。

$$\dot{D}(r,\theta) = S_k \cdot \Lambda \cdot \frac{G_L(r,\theta)}{G_L(r_0,\theta_0)} \cdot g_L(r) \cdot F(r,\theta) \quad (1)$$

ここで、S_k は空気カーマ強度（線源強度）、Λ は線量率定数で空気カーマ強度から水中線量に変換する係数である。$G_L(r,\theta)$ は距離・角度による距離減衰を表す幾何学因子、$g_L(r)$ は散乱・吸収の影響を補正する放射状線量関数、$F(r,\theta)$ は方向による非等方性を補正する関数である。

TG-43U1モデルでは、このモデルに基づく計算は、理想的にはすべての線源が計画どおりに配置されることを前提としており、距離と角度に応じた補正関数を用いて理想的な線量分布を算出する。しかし、前述したように、実臨床ではわずかな位置ずれが避けられない。特に HDR-BT では、線量が距離の逆二乗則に従い急減衰するため、1 mm の位置ずれでも標的線量が10%以上変化しうることが報告されている[15]。このため、線源の位置ずれにより CTV_HR への線量が不足する

ことで D_{90} が低下し、OAR に線源が接近することで D_{2cc} が上昇するなど、治療効果や有害事象リスクなど臨床的に無視できない影響を及ぼす恐れがある[10, 16]。

こういった線源位置のずれが線量分布へ与える影響について、岡本らは腔内・組織内併用照射において、停留時間誤差（ΔT: 最大32 ms）および停留位置誤差（ΔP: 最大0.12 mm）を含めた実測データをもとに検討を行った[17]。これらの誤差は RALS の動作精度に起因する機械的なばらつきとされ、発生頻度は各標準偏差（ΔT および ΔP）を用いたガウス分布（正規分布）に従うものと仮定された。解析には、TG-43U1モデルに基づく線量計算を組み込んだ簡易的な線源配置モデルが用いられ、線量分布への影響が解析的に評価された。

図2は、停留時間（図2a の横軸）および線源からの距離（図2b の横軸）と、線量偏差（縦軸）の関係を示している。特に、停留時間が2秒以下かつ線源からの距離が3 mm 未満の条件においては、最大で6%以上の線量偏差が生じており、inverse planning（逆計画法：あらかじめ定められた目標線量に基づき、線源の停留位置および停留時間を自動的に最適化する手法）を用いた HDR-BT において、臨床的にも十分に起こり得る状況である[18]。この6% 以上の線量偏差は、D_{90} や D_{2cc} といった評価指標において、治療計画の許容誤差（±5% 以内）[18, 19] を超えるレベルであり、治療成績や副作用に影響を及ぼす可能性がある。

図3は、停留時間（縦軸）と線源からの距離を変化させたときの線量偏差の等高線マップを示しており、0.2〜1秒の短時間照射、1〜3 mm の距離という条件下で、6〜8% の高偏差が観察されている。これらの条件は、臨床上 OAR が CTV 近傍に存在するケースなどでしばしばみられ、わずかな位置や時間の誤差でも、正常組織への副作用リスクが増大し得る。したがって、HDR-BT においては、高線量勾配領域での停留位置および停留時間の精度管理が治療の有効性と安全性を両立するうえで不可欠であることが、先行研究により示されている[17]。

3.3　評価手法と対策

線源位置誤差を適切に検出・評価し、それに対応した治療計画を構築することは、小線源治療における投与線量の精度と安全性を担保するうえで不可欠である。機械的要因への対応としては、RALS に対する定期的な QA の実施が求められる。具体的には、既知のチューブ長に線源を搬送し、専用の定規装置を用いて物理的に測定する方法や、放射線感応フィルムを用いて照射位置を視覚的に記録し解析する方法により、治療計画で設定された停止位置との誤差を評価することで、搬

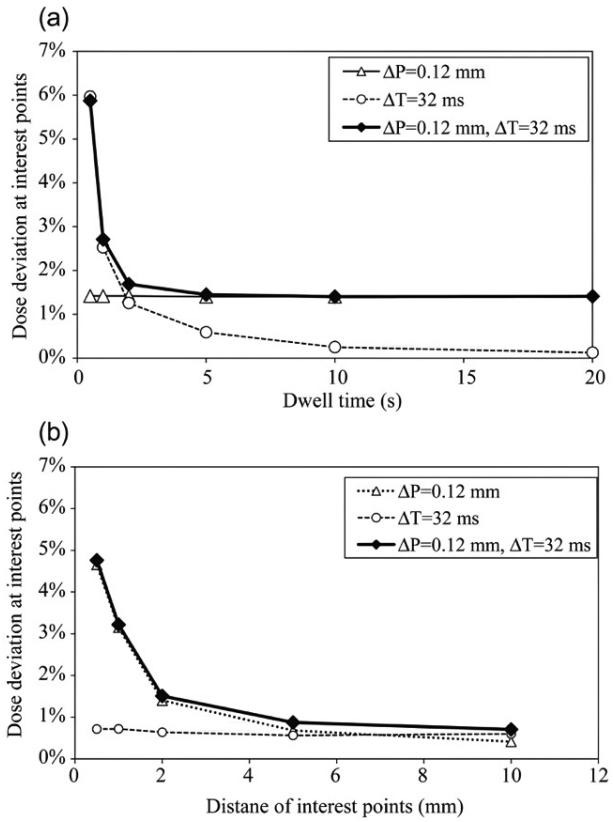


図 2　停留時間および線源位置誤差が線量偏差に与える影響（停留位置誤差 ΔP = 0.12 mm、停留時間誤差 ΔT = 32 ms を仮定）（著者の許諾の下、転載）[17]
(a) 横軸：停留時間（s）、縦軸：線量偏差（%）
(b) 横軸：線源からの距離（mm）、縦軸：線量偏差（%）

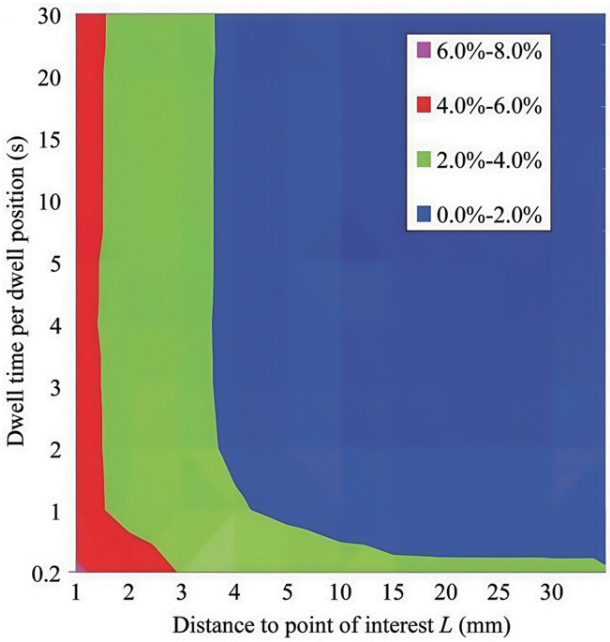


図 3　停留時間および距離に基づく線量偏差の等高線マップ（停留位置誤差 ΔP = 0.12 mm、停留時間誤差 ΔT = 32 ms を仮定）（著者の許諾の下、転載）[17]
横軸：関心点までの距離（mm）、縦軸：各停留位置での停留時間（s）、色分け：線量偏差（%）

送精度を確認することができる[20]。HDR-BT では、±1 mm 以内の線源位置の精度が推奨されており[21]、逸脱が確認された場合は機器の調整や交換が求められる。一方、患者関連の位置変動に対しては、治療前後の CT や MRI によるアプリケータ位置の再確認が有効である[22]。さらに、近年では MRI ガイド下のリアルタイム照射が可能な MR-linac が導入されている施設もあり、動体変化に即応した高精度な位置管理が小線源治療にも応用されつつある[23]。

線源位置誤差への対策としては、物理的な精度管理に加えて、誤差に強い治療設計、すなわち堅牢性を備えた計画設計が重要である。この観点から、近年では inverse planning に基づく最適化アルゴリズムが、従来の graphical optimization に代わり、標準的手法として臨床に広く導入されている。Graphical optimization は、計画者が等線量線を視覚的に操作して線量分布を調整するため、意図を反映しやすいという利点がある。一方で、計画者の経験や判断に依存しやすく、再現性に課題があると指摘されてきた。これに対し、inverse planning は、線量目標や制約条件をもとにアルゴリズムが自動で最適な計画を導出するため、再現性と堅牢性に優れていると考えられる。なかでも、inverse planning simulated annealing や hybrid inverse planning optimization などの手法により、D_{90}（CTV_HR）を確保しつつ、D_{2cc}（OAR）を抑制するという相反する要件を両立できるようになっている[24]。これらのアルゴリズムは、線源位置ずれなどの誤差が生じた場合でも、線量指標の変動を最小限に抑える柔軟な計画構造を実現し、堅牢性の向上に寄与すると考えられている。

さらに、治療計画の複雑性や堅牢性を定量的に評価する指標の確立は、今後の品質保証と標準化の観点から重要な課題である。ここでいう複雑性とは、線源の停留位置の数や配置、停留時間の変動、アプリケータ構造などに起因する線量分布設計の構造的多様性を指す。外部照射分野では、modulation complexity score などが導入されており、治療計画の複雑性が線量分布の再現性や誤差耐性に与える影響について、定量的な研究が進められている[25]。これに対し、小線源治療においては、線源位置誤差に対する堅牢性を客観的に評価できる指標はまだ確立途上にあり、その開発と臨床応用が、今後の高度な品質保証体制の構築に貢献すると期待される。

4. まとめ

本論では、子宮頸癌に対する小線源治療における線源位置誤差が線量分布に及ぼす影響を整理し、これまでの評価手法と対策、さらには今後の課題と展望について論じた。

小線源治療は、線源からの距離の2乗に反比例して線量が急減衰するという物理的特性（逆二乗則）を有するため、わずかな線源位置誤差でも CTV への線量低下（D_{90}の減少）や OAR への過剰線量（D_{2cc} の上昇）につながる可能性がある。これに対して、RALS に対する品質保証（QA）、画像誘導に基づく位置決めの再現性向上、inverse planning による線量最適化などの対策が講じられてきた。しかし、臓器変動やアプリケータ装着時のばらつきなど、患者要因に起因する位置誤差の完全な抑制は困難であり、治療精度に一定の不確実性が残されている。

今後は、こうした位置誤差への対応をより包括的に行うため、リアルタイム線源位置追跡技術の導入、誤差を考慮した堅牢性の高い治療計画設計の標準化が重要となる。さらに、AI を活用した線源配置の自動最適化も、将来的な発展が期待される分野である。また、治療計画の質を客観的に評価するためには、複雑性や堅牢性といった特性を定量化する指標の整備が求められており、これらは小線源治療における品質保証体制の重要な構成要素となることが期待される。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） WHO: Cervical cancer. WHO Fact Sheet. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervical-cancer, 2025年6月8日.

2） Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, et al: Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN estimates. CA Cancer J Clin. 2021: 71: 209-249.

3） Chemoradiotherapy for cervical cancer meta-analysis collaboration: Reducing uncertainties about the effects of chemoradiotherapy for cervical cancer: individual patient data meta-analysis. Cochrane Database Syst Rev. 2010: 1: CD008285.

4） Haie-Meder C, Pötter R, Van Limbergen E, Briot E, De Brabandere M, Dimopoulos J, et al: Recommendations from GEC-ESTRO Working Group. Radiother Oncol.

2005: 74: 235-245.
5） Viswanathan AN, Thomadsen B, Yamada Y, Keisch M, Ng T, Cohen G, et al: American Brachytherapy Society consensus guidelines for locally advanced carcinoma of the cervix. Part II: High-dose-rate brachytherapy. Brachytherapy. 2012: 11: 47-52.
6） Sharma DN: Manchester System for Gynecological Applications. In: AAPM Summer School 2005. American Association of Physicists in Medicine.
7） Haie-Meder C, Pötter R, Van Limbergen E, Briot E, De Brabandere M, Dimopoulos J, et al: Recommendations from Gynaecological GEC-ESTRO Working Group: Concepts and terms in 3D image-based treatment planning in cervix cancer brachytherapy. Radiother Oncol. 2005: 74: 235-245.
8） Tanderup K, Nesvacil N, Pötter R, Lindegaard JC, Kirisits C, Georg D, et al: Image guided adaptive brachytherapy in cervix cancer: a new paradigm changing clinical practice. Radiother Oncol. 2014: 110: 365-369.
9） Nath R, Anderson LL, Luxton G, Weaver KA, Williamson JF, Meigooni AS, et al: Dosimetry of interstitial brachytherapy sources: Recommendations of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 43. Med Phys. 1995: 22: 209-234.
10） Aldelaijan S, Awan SB, Ma CM, Chu JC, McCullough RW, Khan RF, et al: Radiochromic film dosimetry of HDR 192Ir source radiation fields. Med Phys. 2011: 38: 6074-6083.
11） Rivard MJ, Coursey BM, DeWerd LA, Hanson WF, Huq MS, Ibbott GS, et al: Update of AAPM Task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations. Med Phys. 2004: 31: 633-674.
12） Rivard MJ, Beaulieu L, Daskalov GM, Melhus CS, Williamson JF, Thomadsen BR, et al: Supplement to the 2004 update of the AAPM Task Group No. 43 Report. Med Phys. 2007: 34: 2187-2205.
13） Venselaar J, Perez-Calatayud J: A practical guide to quality control of brachytherapy equipment. ESTRO Booklet No. 8. The European Society for Therapeutic Radiology and Oncology. 2004.
14） 坂田修，森川淳一，他：Standard Measurement of Absorbed Dose in Brachytherapy．東京．通商産業研究社．2000: 61〜63.
15） Williamson JF, Nath R, Nag S, Thomadsen BR, Meigooni AS, Rivard MJ, et al: Quality assurance for high dose rate brachytherapy. In: Nag S, ed. High Dose Rate Brachytherapy, A Textbook. Armonk, NY. Futura Publishing Company. 1994: 147-212.
16） Evans MDC, Haughey M, Weidlich GA, Sharma SC, Shukla KM, Gifford KA, et al: High dose-rate brachytherapy source position quality assurance using radiochromic film. Med Dosim. 2007: 32: 13-15.
17） Okamoto H, Okazaki R, Ueda Y, Tanaka M, Yoshida T, Shibuya H, et al: Dose error from deviation of dwell time and source position for high dose-rate 192Ir in remote afterloading system. J Radiat Res. 2014: 55: 780-787.
18） Nath R, Anderson LL, Meli JA, Olch AJ, Stitt JA, Williamson JF, et al: Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. Med Phys. 1997: 24: 1557-1598.
19） International Commission on Radiation Units and Measurements: ICRU Report 38: Dose and volume specification for intracavitary therapy in gynecology. ICRU. 1985.
20） Lessard E, Pouliot J: Inverse planning anatomy-based dose optimization for HDR-brachytherapy of the prostate using fast simulated annealing algorithm and dedicated objective function. Med Phys. 2001: 28: 773-779.
21） Richardson SL, Pino R: Dosimetric effects of an air cavity for the SAVI™ partial breast irradiation applicator. Med Phys. 2010: 37: 3919-3926.
22） Chandola RM, Chauhan PS, Prasad R, Kumar R, Tripathi RP, Kumar M, et al: Effect of inhomogeneities and source position on dose distribution of nucletron high dose rate Ir-192 brachytherapy source by Monte Carlo simulation. J Cancer Res Ther. 2010: 6: 54-57.
23） 日本放射線腫瘍学会（JASTRO）：MR リニアックの現状と展望．JASTRO NEWSLETTER．2022.
24） Rivard MJ, Beaulieu L, Devlin PM, Beddar S, Carlson DJ, Hoskin PJ, et al: Inverse planning for intracavitary HDR brachytherapy: A review. Brachytherapy. 2009: 8: 196-206.
25） Hernandez V, Hansen CR, Widesott L, Boggula R, Bäumer C, Canters R, et al: Evaluation of the Modulation Complexity Score for radiotherapy plans. Phys Imaging Radiat Oncol. 2018: 5: 37-43.

Abstract

The impact of source position errors on dose distribution in brachytherapy

Daito Sakurai[1)], Chie Kurokawa[2)]

[1)] Department of Radiological Sciences, Graduate School of Health Sciences, Juntendo University
[2)] Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Juntendo University

This paper provides an overview of the impact of source position errors on dose distribution in brachytherapy for cervical cancer. Brachytherapy is characterized by a steep dose fall-off with increasing distance from the source, and even a slight positional deviation of approximately 1 mm can cause significant effects, such as a reduction in the dose to the clinical target volume (CTV), indicated by a decrease in D_{90}, or an excessive dose to organs at risk (OAR), reflected by an increase in D_{2cc}. Such errors may arise from a combination of mechanical and patient-related factors, including malfunctions in the source drive unit, variations in applicator placement accuracy, and changes due to organ motion or patient movement. In particular, when the source is located close to the target and the dwell time is short, dose deviations of up to 6–8% relative to the prescribed dose have been reported, potentially affecting treatment outcomes and the risk of adverse events. Countermeasures include the implementation of quality assurance systems, the use of image-guided techniques, and optimization strategies based on inverse planning. In recent years, growing attention has been paid to the concepts of robustness, which refers to the ability of a treatment plan to suppress fluctuations in dose distribution even in the presence of minor positional deviations, and complexity, which aims to quantify the structural patterns of dwell positions and times. The establishment of quantitative indicators for these concepts is expected to play a crucial role in the future standardization of treatment planning and quality assurance in brachytherapy.

Key Words: cervical cancer, brachytherapy, source position error, robustness, complexity

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 85-91, 2026]

論　説

前十字靭帯再建後の膝伸展 Rate of Force Development

成政貴弘[1, 2)]、相澤純也[2)]

[1)] 明和病院アスレティックリハビリテーションセンター
[2)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科

要　旨

前十字靭帯（anterior cruciate ligament: ACL）再建後に患者のスポーツ復帰を許可・推奨、延期を判断するための基準として、大腿四頭筋の最大トルクの回復が指標とされてきた。しかし、基準を達成した後でも損傷前と同じレベルでのスポーツ復帰が困難であったり、再損傷したりする患者がいる。こうした背景から、近年は筋力発揮開始から初期段階に発揮される力の上昇率を示す変数である膝伸展 Rate of Force Development（RFD）が注目されている。本論説では、ACL 再建後の膝伸展 RFD に関する文献をレビューし、測定方法、低下の実態、臨床的意義、改善のためのリハビリテーションについて概説する。発揮初期（0–100ms）の RFD は、最大トルクのみでは評価しきれない神経筋機能を反映する。膝伸展 RFD は、スポーツにおける多くの動作で必要とされる速い力発揮を示す重要な変数であり、最大トルクを補完する役割がある。再建後のスポーツ理学療法において膝伸展 RFD を評価し、その改善に特化したアプローチを採用することは、アスリートのより安全かつ確実なスポーツ復帰に寄与すると考えられる。

キーワード：前十字靭帯、Rate of Force Development、Rate of Torque Development、スポーツ復帰、リハビリテーション

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，92-95頁，2026年（受付　2025.8.20.；受理　2025.8.29.）

1. 緒　　言

前十字靭帯（anterior cruciate ligament: ACL）損傷は、特にスポーツ活動中に発生しやすい膝外傷であり、スポーツ復帰に向けた治療として ACL 再建が選択されている[1)]。再建後のスポーツ理学療法の主な目的は、安全で早いスポーツ復帰を支援することにある。ACL 損傷前に高い活動レベルのスポーツに参加していたアスリートにおいて、損傷前と同じレベルでスポーツに復帰できた者は17%にとどまる[2)]。

ACL 再建後に患者のスポーツ復帰の許可・推奨、延期を判断するための基準として、術側の大腿四頭筋の最大トルクが非術側の90% 以上に回復しているかを示す Limb Symmetry Index がある[3, 4)]。しかし、現在の基準で再損傷リスクを予測するには限界があることが指摘されている[5, 6)]。最大筋力の発揮には、筋力発揮開始から250〜300ms を要するとされる[7)]。一方で、スポーツ活動では、最大筋力に到達するよりも短時間での力発揮が求められる場面が多く存在する[8)]。そこで注目されているのが、Rate of Force or Torque Development（RFD/RTD）である[7, 8)]。RFD/RTD は、筋力発揮開始から初期段階に発揮される力（トルク）の上昇率と定義される[7)]。本論説では、再建後の膝伸展 RFD に関する科学的知見をレビューし、測定方法、低下の実態、臨床的意義、改善のためのリハビリテーションについて述べる。

2. 方　　法

本論説の作成にあたり、データベースとして PubMed および Google Scholar を用い、2025年6月までに公表された文献を検索した。検索式には（“Anterior Cruciate Ligament” OR “ACL”）AND（(“Rate of Force Development” OR “RFD”）OR（“Rate of Torque Development” OR “RTD”)）を使用した。選択基準は、ACL 再建後の膝伸展 RFD/RTD の測定方法、低下の実態、臨床的意義、改善のためのリハビリテーションに関する論文とした。除外基準は、学会抄録および英語以外の文献とした。

3. 結　　果

1）膝伸展 RFD の測定方法

膝伸展 RFD は、等尺性収縮で測定されることが一般的である[9)]。対象者にはできるだけ速く、最大限の膝伸展運動を行うように指示する[7)]。力発揮後から特定の時間（0〜30ms、0〜50ms、0〜100ms、0〜200ms）

責任著者：相澤純也
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12
E-mail: j.aizawa.ue@juntendo.ac.jp

の平均 RFD が変数として広く採用されている[7]（図1）。0-100ms といった早期の膝伸展 RFD は神経筋機能を反映し、それ以降の膝伸展 RFD は最大筋力との関連が強いとされる[10]。

2）ACL 再建後の膝伸展 RFD 低下の実態

ACL 再建後における術側の膝伸展 RFD が長期にわたり低下することは、システマティックレビューとメタアナリシスによって報告されている[11]。再建後6ヶ月の男子プロサッカー選手において、RFD は ACL 損傷前の63〜80%まで回復した。一方、最大筋力は97%まで回復していた[12]。これらの結果は、RFD が最大筋力とは異なる回復経過をたどることを示唆する。

3）ACL 再建後の膝伸展 RFD の臨床的意義

ACL 再建後では、膝伸展 RFD とジャンプパフォーマンスとの間に関連があることが報告されている[13]。スポーツの多くの場面では、速く力を発揮し、身体を制御する能力が不可欠である。そのため、短時間で力を発揮する必要がある状況においては、最大筋力よりも膝伸展 RFD がパフォーマンスに与える影響が大きい可能性がある[14, 15]。したがって、再建後のスポーツ復帰を判断する際には、最大トルクだけでなく、RFD の評価も含めることが推奨されている[16]。

4）膝伸展 RFD 改善のためのリハビリテーション

ACL 再建後早期に、膝伸展 RFD を改善させる方法は報告されていない。しかし、再建後早期のリハビリテーションでは、関節原性筋抑制を速やかに改善し、大腿四頭筋の随意的な活性化を促すことが重要とされる[17]。その改善の有効な手段として、神経筋電気刺激がある[18]。関節の機能的安定性が向上した後は、特異性の原則に基づき RFD を向上させるためのトレーニングへと移行する[19]。これには、プライオメトリックストレーニング[20]、フライホイールトレーニング[21] がある。

4. 考　　察

今後の課題は、ACL 再建後のスポーツ復帰や再損傷リスクに膝伸展 RFD がどのように関与するかを明らかにすることである。近年、スポーツ復帰に向けた心理的準備状況と膝伸展 RTD の関連が注目されており[22, 23]、これらの知見が RFD とスポーツ復帰の関係をより深く理解する手がかりとなることが期待される。膝伸展 RFD の評価と改善への取り組みは、再建後に対するスポーツ理学療法の質を高め、より安全かつ確実なスポーツ復帰の実現に寄与する可能性がある。

5. 結　　論

本論説では、ACL 再建後の膝伸展 RFD について、測定方法、低下の実態、臨床的意義、改善のためのリハビリテーションに関する最新の知見を概説した。膝伸展 RFD は、再建後長期にわたり低下が持続しており、従来の最大トルク回復を基準とした評価では十分に捉えられない側面を示す。神経筋機能に対してより鋭敏な評価指標である膝伸展 RFD は、再建後のスポーツ復帰を支援する理学療法において、重要な役割を果たす可能性がある。

謝　　辞

研究にあたり、日頃サポートいただいている明和病院アスレティックリハビリテーションセンターと相澤研究室の皆様に感謝の意を表したい。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された

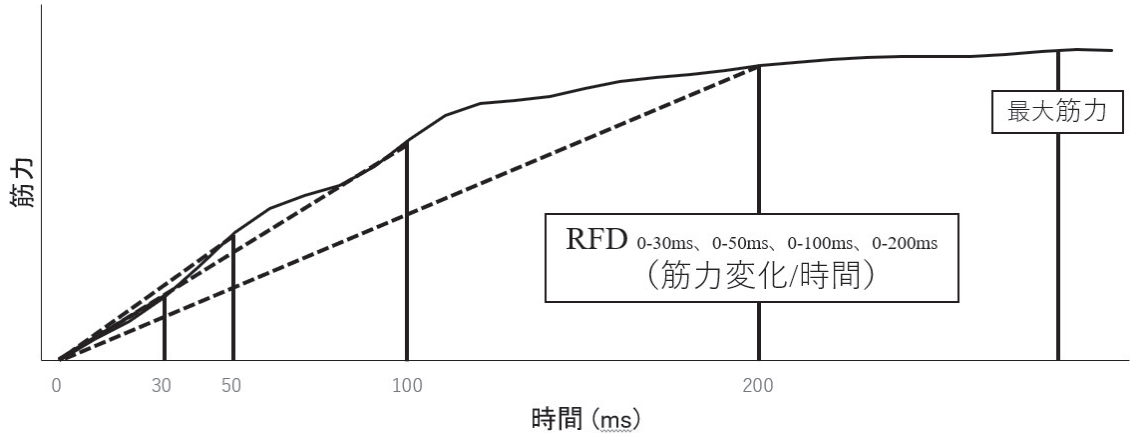


図１　力ー時間曲線による RFD 値の算出方法
得られた力と時間曲線の平均勾配は、筋力発揮開始を基準として特定の時間で算出する。

研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） van Haren I, van der Worp MP, van Rijn R, Stubbe JH, van Cingel REH, Verbeek ALM, et al: Return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction - prognostic factors and prognostic models: A systematic review. Ann Phys Rehabil Med. 2025: 68: 101921.

2） Kooy C, Bache-Mathiesen L, Jakobsen RB, Engebretsen L, Persson A, Myklebust G, et al: Rehabilitation, Decision Making, and Return to Pivoting Sports in Athletes 1-3 Years After ACL Reconstruction: A Nationwide Study. JOSPT Open. 2025: 3: 45-58.

3） Smith AH, Capin JJ, Zarzycki R, Snyder-Mackler L: Athletes With Bone-Patellar Tendon-Bone Autograft for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Were Slower to Meet Rehabilitation Milestones and Return-to-Sport Criteria Than Athletes With Hamstring Tendon Autograft or Soft Tissue Allograft : Secondary Analysis From the ACL-SPORTS Trial. J Orthop Sports Phys Ther. 2020: 50: 259-266.

4） Toole AR, Ithurburn MP, Rauh MJ, Hewett TE, Paterno MV, Schmitt LC: Young Athletes Cleared for Sports Participation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: How Many Actually Meet Recommended Return-to-Sport Criterion Cutoffs? J Orthop Sports Phys Ther. 2017: 47: 825-833.

5） Paterno MV, Rauh MJ, Thomas S, Hewett TE, Schmitt LC: Return-to-Sport Criteria After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Fail to Identify the Risk of Second Anterior Cruciate Ligament Injury. J Athl Train. 2022: 57: 937-945.

6） Simonsson R, Sundberg A, Piussi R, Högberg J, Senorski C, Thomeé R, et al: Questioning the rules of engagement: a critical analysis of the use of limb symmetry index for safe return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction. Br J Sports Med. 2025: 59: 376-384.

7） Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P: Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. J Appl Physiol (1985). 2002: 93: 1318-1326.

8） Buckthorpe M, Roi GS: The time has come to incorporate a greater focus on rate of force development training in the sports injury rehabilitation process. Muscles Ligaments Tendons J. 2017: 7: 435-441.

9） Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J: Rate of force development: physiological and methodological considerations. Eur J Appl Physiol. 2016: 116: 1091-1116.

10） Rodríguez-Rosell D, Pareja-Blanco F, Aagaard P, González-Badillo JJ: Physiological and methodological aspects of rate of force development assessment in human skeletal muscle. Clinical Physiology and Functional Imaging. 2018: 38: 743-762.

11） Turpeinen JT, Freitas TT, Rubio-Arias J, Jordan MJ, Aagaard P: Contractile rate of force development after anterior cruciate ligament reconstruction-a comprehensive review and meta-analysis. Scand J Med Sci Sports. 2020: 30: 1572-1585.

12） Angelozzi M, Madama M, Corsica C, Calvisi V, Properzi G, McCaw ST, et al: Rate of force development as an adjunctive outcome measure for return-to-sport decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. J Orthop Sports Phys Ther. 2012: 42: 772-780.

13） Graham MC, Reeves KA, Janatova T, Noehren B: The Relationship of Open- and Closed-Kinetic-Chain Rate of Force Development With Jump Performance Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Int J Sports Physiol Perform. 2024: 19: 585-592.

14） Folland JP, Buckthorpe MW, Hannah R: Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants. Scand J Med Sci Sports. 2014: 24: 894-906.

15） Knurr KA, Cobian DG, Kliethermes SA, Stiffler-Joachim MR, Heiderscheit BC: The Influence of Quadriceps Strength and Rate of Torque Development on the Recovery of Knee Biomechanics During Running After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Am J Sports Med. 2023: 51: 3171-3178.

16） Davies GJ, McCarty E, Provencher M, Manske RC: ACL Return to Sport Guidelines and Criteria. Curr Rev Musculoskelet Med. 2017: 10: 307-314.

17） Larson D, Vu V, Ness BM, Wellsandt E, Morrison S: A Multi-Systems Approach to Human Movement after ACL Reconstruction: The Musculoskeletal System. Int J Sports Phys Ther. 2022: 17: 27-46.

18） Li Z, Jin L, Chen Z, Shang Z, Geng Y, Tian S, et al: Effects of Neuromuscular Electrical Stimulation on

Quadriceps Femoris Muscle Strength and Knee Joint Function in Patients After ACL Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. Orthop J Sports Med. 2025: 13: 23259671241275071.

19) Del Vecchio A, Casolo A, Dideriksen JL, Aagaard P, Felici F, Falla D, et al: Lack of increased rate of force development after strength training is explained by specific neural, not muscular, motor unit adaptations. J Appl Physiol (1985). 2022: 132: 84-94.

20) Buckthorpe M, Della Villa F: Recommendations for Plyometric Training after ACL Reconstruction - A Clinical Commentary. Int J Sports Phys Ther. 2021: 16: 879-895.

21) Henderson FJ, Konishi Y, Shima N, Shimokochi Y: Effects of 8-Week Exhausting Deep Knee Flexion Flywheel Training on Persistent Quadriceps Weakness in Well-Trained Athletes Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Int J Environ Res Public Health. 2022: 19: 13209.

22) Borawski J, Brindle RA, Florkiewicz E, Mason JS, Pitt W, Cameron KL, et al: Psychological Factors Are Related to Neuromuscular Asymmetries After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Sports Health. 2025: 17: 262-271.

23) Lee OT, Williams MA, Shaw CD, Delextrat A: The Role of Strength-Related Factors on Psychological Readiness for Return to Sport Following Anterior Cruciate Ligament (ACL) Reconstruction. Healthcare (Basel). 2023: 11: 2787.

Abstract

Knee extension Rate of Force Development after anterior cruciate ligament reconstruction

Takahiro Narimasa[1, 2)], Junya Aizawa[2)]

[1)] Athletic Rehabilitation Center, Meiwa Hospital
[2)] Graduate School of Health Sciences, Juntendo University

The recovery of quadriceps maximal torque has traditionally served as a key criterion for determining return to sport following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. However, even after meeting these criteria, some patients are unable to return to their pre-injury level of sports performance or experience re-injury. In response, there has been growing interest in knee extension Rate of Force Development (RFD), a variable indicating the rate of early-phase force generation. This paper reviews the literature on knee extension RFD after ACL reconstruction, focusing on its measurement, the extent of reduction, clinical significance, and rehabilitation strategies for improvement. Early-phase RFD (0–100 ms) reflects neuromuscular function that cannot be fully assessed by maximal torque alone. Knee extension RFD is a critical variable reflecting the rapid force production required for many athletic movements, thus complementing traditional maximal torque assessments. Incorporating RFD assessment and targeted rehabilitation into post-reconstruction sports physical therapy may help athletes return to sport more safely and reliably.

Key Words: anterior cruciate ligament, Rate of Force Development, Rate of Torque Development, return to sport, rehabilitation

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 92-95, 2026]

論　説

放射線治療における呼吸性移動を伴う腫瘍の画像化技術の進展と課題

比内聖紀[1)]、臼井桂介[1, 2)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
[2)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

近年、強度変調放射線治療や体幹部定位放射線治療といった高精度放射線治療の発展に伴い、腫瘍および臓器の呼吸性移動を正確に把握することが治療精度向上の鍵となっている。呼吸により腫瘍位置は三次元的に変動し、治療計画や照射時の腫瘍位置の把握には、可視化・定量化技術が不可欠である。主要な画像化技術には、治療計画時に動態を評価する四次元コンピュータ断層撮影、治療中の位置確認に有用な四次元コーンビームコンピュータ断層撮影、リアルタイム観察が可能なX線透視画像、軟部組織描出能に優れる磁気共鳴画像、放射線被ばくを伴わずに動態を評価可能な超音波画像、体表面を用いた体表面画像誘導放射線治療がある。これらの技術は、呼吸位相に合わせて照射する呼吸同期照射、腫瘍を追尾する追跡照射、治療中の変化に対応する適応放射線治療へ応用されている。今後は、人工知能による動態予測やマルチモダリティ融合、リアルタイム画像化技術の発展により、より高精度で個別化された治療が期待される。呼吸性移動管理の標準化と臨床的検証が、今後の放射線治療の質向上に重要である。

キーワード：放射線治療、呼吸性移動、画像化技術、照射技術

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，96-103頁，2026年（受付　2025.11.15.；受理　2026.1.23.）

緒　　言

理工学系技術の進歩による強度変調放射線治療（intensity modulated radiation therapy: IMRT）や体幹部定位放射線治療（stereotactic body radiation therapy: SBRT）といった高精度な治療技術により、病変部に高い線量を集中させ、周囲の正常組織への影響を軽減することが可能となった[1)]。放射線治療の高精度化が進展する中で、腫瘍および周囲正常組織の動態を正確に把握することの重要性が増している。

従来､呼吸性移動の対策には大きな不確実性が伴い、広いマージンの設定や患者固定によって対処されてきたが、これらは正常組織への不要な線量増加を引き起こす可能性がある[2)]。画像誘導放射線治療（image guided radiation therapy: IGRT）は、照射直前または照射中に画像を用いることにより、マージンの縮小を可能にする技術の総称であり、様々な画像情報を用いて治療計画と患者の解剖学的構造の一致を確認する手法である[3)]。これにより、放射線治療の照射精度を向上させることが可能となった[4)]。

胸部および腹部領域の腫瘍に対しては、腫瘍の動きが照射精度や線量分布に大きな影響を与えることが知られており、この可動性を適切に補正・管理することが高精度放射線治療の成否を左右する要因となっている[5, 6)]。肺癌、肝臓癌および膵臓癌などの病変では、動きの最大の原因が呼吸性移動である[7)]。特に、肺癌に対する放射線治療において、腫瘍の呼吸性移動は最大の不確実性要因の一つと考えられている[8)]。腫瘍位置および正常組織の時間的変動を考慮した画像化技術の進展は、治療計画の最適化および照射時の位置精度の担保に直結する重要な課題である。

こうした課題を克服するために、腫瘍や臓器の動態を可視化・定量化する画像化技術が近年急速に進展しており、四次元コンピュータ断層撮影（four-dimensional computed tomography: 4D-CT）、四次元コーンビームコンピュータ断層撮影（four-dimensional cone beam computed tomography: 4D-CBCT）、X線透視画像（fluoroscopy）、磁気共鳴画像（magnetic resonance imaging: MRI）、超音波画像（ultrasound: US）および体表面画像誘導放射線治療（surface guided radiation therapy: SGRT）など、多様なモダリティや技術が利用されている[1, 5, 9)]。これらを照射技術に応用することで、特定の呼吸位相に限定して照射を行う呼吸同期照射（gating）や、治療中に腫瘍位置をリアルタイムに監視

責任著者：臼井桂介
順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻／順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-0034　東京都文京区湯島1-5-32
E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

しながら照射を行う追跡照射（tracking）が実現している[1, 2, 4]。さらに近年では、腫瘍の大きさや位置の変化に即応可能な適応放射線治療（adaptive radiation therapy: ART）へと発展しており、個別化医療の実現に向けた重要な基盤となりつつある[1, 4]。

本稿では、放射線治療における呼吸性移動を伴う腫瘍の画像化技術と照射法について、各モダリティの特徴、臨床応用の現状、利点および限界を概説するとともに、今後の展望と技術的課題について紹介する。

1. 呼吸性移動の特徴と対策

腫瘍の呼吸性移動は、主に横隔膜および胸郭の運動に起因する。呼吸は、横隔膜、外肋間筋、腹筋群などの呼吸筋の収縮・弛緩によって生じ、これにより縦隔や肺実質、腹腔内臓器が頭尾方向を中心に可動する。吸気時には横隔膜の収縮により下方に移動し、胸腔の垂直方向の厚さが増大することで肺拡張が生じる[10]。呼吸性移動とは、この呼吸運動に伴って肺や横隔膜、胸壁、腹部臓器が周期的に位置を変えることによって、腫瘍や周囲組織の位置が変化する現象である。特に、横隔膜の動きは肺腫瘍や肝臓の位置変動に直結し[11]、肺癌、肝臓癌、膵臓癌などの胸腹部に位置する腫瘍において、放射線治療計画や照射精度に大きく影響する。

腫瘍と臓器の呼吸運動に伴う移動量は、腫瘍または臓器の位置、肺容量、呼吸様式（腹式・胸式）、患者の体位などによって異なる。肺腫瘍の呼吸性移動を評価した報告によると、一般的に自由呼吸下で頭尾・前後・左右のそれぞれの方向に、5 ～ 20 mm・8 ～ 15 mm・5 ～ 10 mm 程度移動するといわれている[10]。また、肝腫瘍では、頭尾・前後・左右のそれぞれの方向に、2 ～ 19 mm・2 ～ 12 mm・1 ～ 12 mm 程度移動すると報告されている[12]。したがって、頭尾方向のみならず、前後方向や左右方向への移動も存在するため、三次元的な動きを伴うものとして治療計画を行う必要がある[5]。

呼吸性移動は周期的かつ予測可能である一方で、患者毎に呼吸パターンのばらつきがあり、治療中の変動、日内・日間変動などの不確実性も伴う[13]。これにより、呼吸性移動を考慮しない治療計画では、照射野から腫瘍が外れるリスクや、過剰な照射野の拡大により正常組織への不要な線量増加が生じる可能性がある[2, 14]。したがって、治療計画では腫瘍および周囲臓器の正確な呼吸性移動の把握が重要であり、治療中には患者の呼吸パターンの変動に適応することが大きな課題である。これらの対応として、呼吸性移動を正確に評価・可視化し、計画時と照射時の差異を最小限に抑える技術が不可欠である。さらに近年では、各種画像化技術を活用した呼吸モニタリングや動態画像取得が治療計画や治療中のガイドとして導入されている[1, 5, 15-17]。

2. 呼吸性移動の画像化技術

1）四次元コンピュータ断層撮影（four-dimensional computed tomography: 4D-CT）

4D-CT は、主に治療計画時に用いられる技術であり、呼吸運動に伴う腫瘍や臓器の動態を時系列的に捉えることを目的とした撮影手法である[1)]。通常の三次元 CT に時間軸を加え、呼吸位相ごとに再構成を行うことで、腫瘍位置や形状の時間変化を画像化できる点が大きな特徴である。特に、肺腫瘍や肝腫瘍など呼吸性移動の大きい部位において、放射線治療計画時の照射範囲を正確に定めるために広く利用されている[10)]。加えて、放射線治療における呼吸性移動対策の基盤技術として確立されており、内的標的体積（internal target volume: ITV）ベースの治療計画や呼吸同期照射（gating）、追跡照射（tracking）の基準画像として利用されている[1, 2, 9)]。

4D-CT は、自由呼吸下で取得可能であり、患者の能動的な協力は比較的少なくて済む一方、撮影時間が長いため、不規則な呼吸や呼吸位相および振幅の変動によるアーチファクトが発生しやすい[18)]。これを解決するために、いくつかの撮影法や対策が検討されている[19, 20)]。また、通常の三次元 CT よりも被ばく線量が高いことが報告されている[21)]。このため、被ばく低減の観点から、撮影線量や投影数を制限せざるを得ない。しかし、撮影線量が少ないデータや投影数が少ないスパースデータから再構成した場合、アーチファクトやノイズが増加し、腫瘍の形状が正確に表現されない問題がある[22, 23)]。これを解決するために、人工知能（artificial intelligence: AI）技術を利用してスパース投影に条件付き敵対生成ネットワーク（conditional generative adversarial network: CGAN）を用いた新たな手法が提案されており[24, 25)]、低線量撮影やスパース投影における画質改善が期待される。特に、低線量・高速撮影が必須となる呼吸同期照射（gating）や追跡照射（tracking）における腫瘍可視化において有用であると考えられる。

2）四次元コーンビームコンピュータ断層撮影（four-dimensional cone beam computed tomography: 4D-CBCT）

4D-CBCT は、放射線治療装置に搭載された X 線装置を用いて、呼吸運動を考慮した三次元断層画像を取得する技術である。投影データを呼吸位相ごとに分類し、各位相で再構成を行うことで、呼吸サイクル全体に対応する時系列の4D 画像を得ることができる。

4D-CBCT は、治療直前あるいは治療中に使用され、患者の当日の呼吸パターンや臓器位置の変動を反映した画像を、照射の直前に取得することで、位置合わせや腫瘍追跡の精度を高める役割を担っている[1, 5]。4D-CBCT を用いた IGRT は、呼吸性移動を考慮した高精度治療の実現に不可欠な技術であり、特に肺腫瘍や肝腫瘍に有用である[26]。

一方で、肝臓や膵臓などの軟部組織腫瘍では、周囲組織との X 線吸収差が小さいため、腫瘍コントラストが低下し、病変の直接的な視認が困難となる場合がある。この傾向は、腫瘍サイズが小さい場合において顕著である。4D-CBCT は、4D-CT と同様に自由呼吸下で取得可能であるが、撮影時間が長く、散乱線や投影数不足に起因するストリークアーチファクトやノイズが顕著になりやすい[26]。これに対して、近年はハードウエアの改良による短時間撮影の有効性の検証や逐次再構成法・AI 技術により、低線量化やアーチファクト低減が試みられている[25, 27, 28]。

3）X 線透視画像（fluoroscopy）

Fluoroscopy は、比較的低線量で連続的な二次元画像を取得できるため、呼吸性移動の観察や腫瘍の近傍に留置したマーカーの動態追跡に広く用いられてきた[1, 16]。特に、金マーカーやコイルを腫瘍近傍に留置した場合、透視下でその動きをリアルタイムに確認することで、呼吸同期照射（gating）、追跡照射（tracking）に応用可能である[11]。

Fluoroscopy は、高い時間分解能を有し、治療中の腫瘍位置をリアルタイムにモニタリングできる[16]。一方で、二次元的な断面の解剖学的情報が得られず、視覚化には埋め込みマーカーや肺内の軟部組織などの高コントラストに依存すること、また長時間透視では被ばくが増加するという制約がある[11]。近年では、fluoroscopy と CT で構築されたモーションモデルを統合し、三次元的な腫瘍位置推定を行う研究も進められている[29]。

4）磁気共鳴画像（magnetic resonance imaging: MRI）

MRI は非侵襲的かつ放射線被ばくを伴わず、軟部組織コントラストに優れた画像を取得できるため、腫瘍や臓器の呼吸性移動の画像化に有力なモダリティである。特に、肝臓や膵臓などの軟部組織の腫瘍は、CT や CBCT ではコントラストが低く、可視化が困難な場合があるが、MRI は組織コントラストが高い画像を提供できる。MR 画像誘導放射線治療システムでは、その優れた軟部組織描出能から、X 線を用いた IGRT と比較して、より正確な画像照合・照射が可能となる[30]。また、連続撮像による動態 MRI（cine-MRI / 4D-MRI）を用いることにより、リアルタイムに近い腫瘍追跡も可能となる。一方で、空間分解能の制限、装置の普及度、治療室内での運用の難しさが課題である。加えて、撮像時間の長さや閉所環境への耐性が必要であり、閉所恐怖症や認知機能低下を有する患者では適応が制限される。

従来の IGRT は、治療直前の位置確認に留まるため、照射中の動きや解剖学変化には対応できない。MR-Linac の普及により、MRI の高い組織コントラストと Linac による放射線照射を統合したシステムで、リアルタイムに腫瘍位置を確認しながら照射を行う MRI ガイド下放射線治療が臨床応用されており、呼吸性移動対策の新たな基盤技術となる可能性がある[17]。臨床現場では、MRI は4 Hz の周波数で動作することが多く、MRI ガイド下放射線治療に約300 ms のシステム遅延が生じるため[31]、近年 AI ベースの呼吸運動予測を用いて、この問題に対処する解決策が研究されている[15]。

5）超音波画像（ultrasound: US）

US は放射線被ばくを伴わず、リアルタイムに腫瘍や臓器の動きを追跡できる点で優れている[1]。US は放射線治療において多様な応用が進められている。例えば、治療直前の患者位置決めに用いることでセットアップ誤差を低減し、IGRT の一環として機能している[3]。また、照射中に腫瘍や標的臓器の動きをモニタリングすることにより、モーションマネジメントに活用されている。近年、時間軸を加えた4D-US 技術も開発されており[17]、特に前立腺や肝臓の治療では、経会陰プローブや体表プローブを用いて、治療中の位置ずれや呼吸性移動を動的に評価することができる[32, 33]。

US はコスト面や装置設置の簡便さから臨床導入が進んでいる。一方で、画像化可能な範囲が限定的であり、腫瘍部位や患者体格によって描出能に差が生じることが制約となる。今後、非侵襲的かつ被ばくのない手法として、呼吸性移動に基づく適応的照射制御や他モダリティと組み合わせたハイブリット型モーションマネジメントへの応用拡大が期待されている[17]。

6）体表面画像誘導放射線治療（surface guided radiation therapy: SGRT）

SGRT は、赤外線カメラシステムを用いて体表面の三次元形状をリアルタイムに計測し、腫瘍の呼吸性移動を間接的に評価する手法である[17]。利点は、非侵襲

で放射線被ばくを伴わないことに加え、患者セットアップから治療中のモニタリングまで一貫して利用できる点である[34]。特に、左乳癌照射における深吸気息止め法（deep inspiration breath hold: DIBH）の管理に広く使用されており、心臓被ばくの低減に寄与している[35]。また、体表面の動きと腫瘍内部の呼吸性移動との相関モデルを構築することで、内部腫瘍位置の推定にも応用されている[7, 36]。課題としては、DIBH は患者の理解度や呼吸保持能力に強く依存し、高齢者や呼吸器疾患を有する患者では再現性が低下する場合がある。また、表面変位と内部腫瘍位置が必ずしも一致しないため、臓器や腫瘍部位によって精度に限界がある。今後は、SGRT と4D-CT/CBCT や MRI を組み合わせることで、より高精度な呼吸性移動管理が可能となると考えられる。また、位置精度向上と安全性確保に加えて、個別化治療やワークフロー効率化への寄与も期待されており、今後の発展が注目されている。

3. 画像化技術を応用した照射法と適応放射線治療

1）呼吸同期照射（gating）

呼吸同期照射は、腫瘍の呼吸性移動を考慮し、特定の呼吸位相に合わせて照射を行う手法である[1, 2, 4]。4D-CT によって得られる呼吸位相ごとの画像データは、腫瘍および周囲臓器の動態を把握し、適切な照射ゲートを設定する上で不可欠である。さらに、4D-CBCT や体表面センサーとの併用により、治療中の呼吸位相をリアルタイムで同定することが可能となり、治療の再現性と精度向上に寄与している。呼吸同期照射の代表的手法として位相 gating、振幅 gating、DIBH がある[2, 4]。

臨床的には、肺癌や肝臓癌の SBRT で呼吸同期照射が効果を示す報告が多く[4, 9, 10]、ターゲットに高い線量を集中させ、かつ周囲正常組織線量の低減に貢献する。一方で、照射効率の低下（治療時間延長）や不規則呼吸への弱さ、外部信号と内部標的の乖離といった課題があるため、個々の患者の呼吸特性に応じた運用が重要である[2]。

2）追跡照射（tracking）

追跡照射は、照射中にリアルタイムで腫瘍位置を検出し、ビーム方向やコリメータを動的に補正してビームを追従させる照射法である[1, 2, 4]。Fluoroscopy や金マーカーを用いた画像追跡に加え、近年では MRI や US による非侵襲的かつマーカーレスな追跡技術が臨床応用されており、リアルタイム画像化技術は、腫瘍の動態を逐次追跡しながら照射を行う追跡照射の基盤を支えている。ほかに、侵襲的マーカーや電磁トランスポンダ、表面計測と内部モデルの組み合わせなど、多様な手段がある[2, 11]。CyberKnife のような実装は fluoroscopy で高い追跡精度を示し[37]、MR-Linac は軟部組織を非侵襲で直接可視化できる点が利点である[15]。

追跡照射の強みは、照射中の実際の変位を直接補正できるため、マージンの縮小が可能であり、局所制御の向上と正常組織の被ばく低減に寄与する点である[37]。しかし、高コスト、マーカー挿入に伴う侵襲性、追加画像被ばく、制御ループの遅延やアーチファクトなどの技術的制約が運用上の障壁となる。これらを改善するために、低遅延画像取得・制御系の最適化や AI を用いた予測手法の導入が研究されている[15]。

3）適応放射線治療（adaptive radiation therapy: ART）

従来の放射線治療では、治療計画は初回の CT 画像に基づいて作成され、その後の患者の解剖学的変化には対応できなかった。ART は治療期間中の解剖学的変化（腫瘍縮小、体重変化、臓器移動など）を反映して治療計画を更新するプロセスであり、オフライン（後日計画更新）とオンライン（その日の画像に基づく当日再計画）の二方式がある[1, 4, 38]。これにより、腫瘍の位置や形状の変化、臓器の動きに即応し、治療精度を向上させることができる。

近年、CBCT ベースのオンライン ART や高軟部組織描出能を持つ MR-Linac を用いたオンテーブル再計画が臨床で普及しつつある[1, 39]。また、AI を活用して迅速な再計画を可能にし、肺癌や膵臓癌などでの適応が報告されている[39]。オンライン ART はデイリーの解剖学変化に即応して、高い目標線量保証と正常組織の被ばく低減を実現する可能性がある反面、再計画にかかる時間、ワークフローの複雑化、人的リソース負荷、品質保証（quality assurance: QA）や規制面での整備が必要である[38]。

4. 今後の展望と課題

呼吸性移動を伴う腫瘍の画像化技術は、これまでに4D-CT をはじめとする多様なモダリティによって進展を遂げてきた（**表1**）。しかし、いまだいくつかの技術的・臨床的課題が残されている。第一に、呼吸パターンの不安定性や日内・日間での変動によって、動態情報の再現性や精度にばらつきが生じる点である。これにより、1回の撮影で得られる情報が治療期間全体を通して正確に適用できるとは限らない。また、現行の画像化技術の多くは、X 線被ばくや時間的・空間

表 1　呼吸性移動画像化技術の比較

モダリティ	利点	欠点	主な臨床応用
4D-CT	・三次元＋時間情報を取得可能 ・標的の輪郭抽出に有用 ・臨床で標準的に利用	・被ばく線量が高い ・不規則呼吸ではアーチファクトが発生	治療計画時の呼吸性移動評価および ITV 抽出
4D-CBCT	・治療直前の呼吸性移動を反映 ・ART に有効	・被ばく線量が高い ・ノイズやアーチファクト	治療中の位置確認およびモーションマネジメント
Fluoroscopy	・高時間分解能 ・マーカー追跡に有効	・断面の解剖学的情報がない ・長時間透視で被ばく増大	マーカーやコイルを用いた呼吸同期照射・追跡照射
MRI	・高い軟部組織コントラスト ・放射線被ばくを伴わない ・リアルタイム取得可能	・撮像時間が長い場合あり ・専用装置が必要	腫瘍・臓器動態の可視化、MR-Linac でのリアルタイム追跡
US	・非侵襲 ・放射線被ばくを伴わない ・高時間分解能	・画像取得者の熟練度に依存 ・空気、骨で制限あり	前立腺・肝腫瘍のリアルタイムモニタリング
SGRT	・非侵襲 ・放射線被ばくを伴わない ・体表面をリアルタイム追跡 ・セットアップにも有用	・体表変位と内部腫瘍位置が一致しない場合あり	DIBH 乳癌治療、体表モニタリング、内部位置推定補助

的分解能に限界を有している。例えば、4D-CT では長時間の撮影や画像再構成によるアーチファクトが問題となり、MRI や SGRT による補完技術も、機器の導入コストや運用の煩雑さといった障壁がある。

これらの課題に対しては、単一モダリティに依存した動態評価から脱却し、照射中あるいは照射直前における腫瘍・臓器動態を連続的に把握可能な手法の確立が重要である。その一つの解決策として、撮影条件や再構成法を最適化した低線量4D-CT の活用が挙げられる。低線量4D-CT は、従来の4D-CT と同様に動態情報を取得可能でありながら、X 線被ばくを抑制しつつ、治療期間中の呼吸性移動の変動を再評価する手段として有用である可能性がある。さらに、低線量4D-CT で得られる動態情報を、US や SGRT などの被ばくを伴わないモダリティと補完的に活用することで、撮影頻度の最適化や追加被ばくの抑制が期待される。また、AI を用いたノイズ低減や動態予測技術を組み合わせることで、低線量条件下における動態情報の信頼性向上も今後の重要な研究課題である。

今後は、リアルタイムな動態把握技術の発展や、AI を活用した動態予測、マルチモダリティによる補完的活用、患者ごとの個別化治療の確立が期待されている[4, 15]。加えて、臨床現場における技術の標準化や検証のためには、多施設共同研究や大規模データの集積・解析も今後の重要な課題である。呼吸性移動を伴う腫瘍の画像化技術は、放射線治療の高精度化・個別化を支える鍵となる分野であり、基礎技術と臨床応用の橋渡しを継続的に進めていくことが求められる。

結　　語

放射線治療における腫瘍の呼吸性移動は、治療精度および正常組織への線量影響に直結する重要な要因である。これに対応するため、様々な画像化技術が開発・臨床応用されてきた。これらの技術は腫瘍や臓器の動態を画像化し、より適切な照射計画の立案や治療中の位置管理を可能にするものであり、放射線治療の高精度化・個別化に大きく寄与している。呼吸性移動の管理は、今後の高精度放射線治療の質を左右する重要な要素であり、その基盤を支える画像化技術のさらなる進化が期待される。技術の臨床的有用性を検証しつつ、安全で効率的な呼吸管理の実現を目指した取り組みが、今後ますます重要となる。

謝　　辞

本論文を執筆するにあたり、協力してくださった皆様に感謝いたします。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1）　Brandner ED, Chetty IJ, Giaddui TG, Xiao Y, Huq MS: Motion management strategies and technical issues associated with stereotactic body radiotherapy

of thoracic and upper abdominal tumors: A review from NRG oncology. Med Phys. 2017: 44: 2595-2612.
2) Keall P, Mageras G, Balter J, Emery R, Forster K, Jiang S, et al: The Management of Respiratory Motion in Radiation Oncology Report of AAPM Task Group 76. Med Phys. 2006: 33: 3874-900.
3) 日本医学放射線学会，日本医学物理学会，日本医学物理士会，日本診療放射線技師会，日本放射線技術学会，日本放射線腫瘍学会：画像誘導放射線治療の臨床施行のためのガイドライン2022. https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/guideline/20221126.pdf, 2025年9月6日.
4) Molitoris JK, Diwanji T, Snider JW 3rd, Mossahebi S, Samanta S, Badiyan SN, et al: Advances in the use of motion management and image guidance in radiation therapy treatment for lung cancer. J Thorac Dis. 2018: 10: S2437-S2450.
5) 日本医学物理学会，日本高精度放射線外部照射研究会，日本放射線技術学会，日本放射線腫瘍学会：呼吸性移動対策を伴う放射線治療に関するガイドライン2019. https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/guideline/kokyu2019.pdf, 2025年9月6日.
6) Jiang SB: Technical aspects of image-guided respiration-gated radiation therapy. Med Dosim. 2006: 31: 141-151.
7) Fassi A, Schaerer J, Fernandes M, Riboldi M, Sarrut D, Baroni G: Tumor tracking method based on a deformable 4D CT breathing motion model driven by an external surface surrogate. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2014: 88: 182-188.
8) Shirato H, Onimaru R, Ishikawa M, Kaneko J, Takeshima T, Mochizuki K, et al: Real-time 4-D radiotherapy for lung cancer. Cancer Sci. 2012: 103: 1-6.
9) Ghani MNHA, Ng WL: Management of respiratory motion for lung radiotherapy: a review. J Xiangya Med. 2018: 3: 27.
10) Shirato H, Seppenwoolde Y, Kitamura K, Onimura R, Shimizu S: Intrafractional tumor motion: lung and liver. Semin Radiat Oncol. 2004: 14: 10-18.
11) Seppenwoolde Y, Shirato H, Kitamura K, Shimizu S, van Herk M, Lebesque J, et al: Precise and real-time measurement of 3D tumor motion in lung due to breathing and heartbeat, measured during radiotherapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2002: 53: 822-834.
12) Kitamura K, Shirato H, Seppenwoolde Y, Shimizu T, Kodama Y, Endo H, et al: Tumor location, cirrhosis, and surgical history contribute to tumor movement in the liver, as measured during stereotactic irradiation using a real-time tumor-tracking radiotherapy system. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2003: 56: 221-228.
13) Bissonnette JP, Purdie TG, Higgins JA, Li W, Bezjak A: Cone-Beam Computed Tomographic Image Guidance for Lung Cancer Radiation Therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2009: 73: 927-934.
14) Munshi A, Khataniar N, Ganesh T: Tumor motion in lung cancers: An overview of four-dimensional radiotherapy treatment of lung cancers. Asian Journal of Oncology. 2017: 03: 128-132.
15) Zhang X, Yan D, Xiao H, Zhong R: Modeling of artificial intelligence-based respiratory motion prediction in MRI-guided radiotherapy: a review. Radiat Oncol. 2024: 19: 140.
16) McNair HA, Kavanagh A, Powell C, Symonds-Tayler JRN, Brada M, Evans PM: Fluoroscopy as a surrogate for lung tumour motion. British Journal of Radiology. 2012: 85: 168-175.
17) Bertholet J, Knopf A, Eiben B, McClelland J, Grimwood A, Harris E, et al: Real-time intrafraction motion monitoring in external beam radiotherapy. Phys Med Biol. 2019: 64: 15TR01.
18) Castillo SJ, Castillo R, Castillo E, Pan T, Ibbott G, Balter P, et al: Evaluation of 4D CT acquisition methods designed to reduce artifacts. J Appl Clin Med Phys. 2015: 16: 23-32.
19) Ko Y, Song S, Je H: Practical usefulness of partial-range 4-dimensional computed tomography in the simulation process of lung stereotactic body radiation therapy. Radiation Physics and Chemistry. 2022: 201: 110437.
20) Baba F, Tanaka S, Nonogaki Y, Hasegawa S, Nishihashi M, Ayakawa S, et al: Effects of audio coaching and visual feedback on the stability of respiration during radiotherapy. Jpn J Radiol. 2016: 34: 572-578.
21) Yang C, Liu R, Ming X, Liu N, Guan Y, Feng Y: Thoracic Organ Doses and Cancer Risk from Low Pitch Helical 4-Dimensional Computed Tomography Scans. Biomed Res Int. 2018: 2018: 8927290.
22) Pan T, Lee TY, Rietzel E, Chen GTY: 4D-CT imaging of a volume influenced by respiratory motion on multi-slice CT. Med Phys. 2004: 31: 333-340.
23) Riblett M, Christensen G, Weiss E, Hugo GD: Data-driven respiratory motion compensation for four-dimensional cone-beam computed tomography (4D-

CBCT) using groupwise deformable registration. Med Phys. 2018: 45: 4471-4482.
24) Usui K, Kamiyama S, Arita A, Ogawa K, Sakamoto H, Sakano Y, et al: Reducing image artifacts in sparse projection CT using conditional generative adversarial networks. Sci Rep. 2024: 14: 3917.
25) Kamiyama S, Usui K, Suga K, Adachi H, Arita A, Sakamoto H, et al: Image Quality and Tumor Shape Correction in Sparse Projection Cone-Beam CT Using Conditional Generative Adversarial Networks. J Med Biol Eng. 2025: 45: 138-146.
26) Zhang Y, Jiang Z, Zhang Y, Ren L: A review on 4D cone-beam CT (4D-CBCT) in radiation therapy: Technical advances and clinical applications. Med Phys. 2024: 51: 5164-5180.
27) Martin R, Ahmad M, Hugo G, Pan T: Iterative volume of interest based 4D cone-beam CT. Med Phys. 2017: 44: 6515-6528.
28) Blake SJ, Dillon O, Byrne HL, O'Brien RT: Thoracic motion-compensated cone-beam computed tomography in under 20 seconds on a fast-rotating linac: A simulation study. J Appl Clin Med Phys. 2023: 24: e13909.
29) Ranjbar M, Sabouri P, Mossahebi S, Sawant A, Mohindra P, Lasio G, et al: Validation of a CT-based motion model with in-situ fluoroscopy for lung surface deformation estimation. Phys Med Biol. 2021: 66: 045035.
30) 日本磁気共鳴学会，日本医学物理学会，日本医学放射線学会，日本放射線技術学会 , 日本放射線腫瘍学会：MR 画像誘導即時適応放射線治療ガイドライン．https://www.jsmp.org/wp-content/uploads/guideline_mrgart_v1rev.pdf, 2025年9月6日.
31) Uijtewaal P, Borman PTS, Woodhead PL, Kontaxis C, Hackett SL, Verhoeff J, et al: First experimental demonstration of VMAT combined with MLC tracking for single and multi fraction lung SBRT on an MR-linac. Radiotherapy and Oncology. 2022: 174: 149-157.
32) Takai K, Watanabe R, Hyogo KI, Ito Y, Minagawa N, Sato Y, et al: Treatment outcome of localized prostate cancer using transperineal ultrasound image-guided radiotherapy. Radiat Oncol. 2024: 19: 100.
33) Zhang Y, Dai X, Tian Z, Lei Y, Wynne JF, Patel P, et al: Landmark tracking in liver US images using cascade convolutional neural networks with long short-term memory. Meas Sci Technol. 2023: 34: 054002.
34) Freislederer P, Kügele M, Öllers M, Swinnen A, Sauer TO, Bert C, et al: Recent advanced in Surface Guided Radiation Therapy. Radiat Oncol. 2020: 15: 244.
35) Khan L, Khan M, Shakeel F, Ali T, Hina M, Arif A, et al: Effect of DIBH Coaching on Dosimetric Parameters of Heart and Lung Doses in Patients Undergoing Adjuvant Breast Radiotherapy. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention. 2025: 26: 1809-1813.
36) Wang G, Song X, Li G, Duan L, Li Z, Dai G, et al: Correlation of Optical Surface Respiratory Motion Signal and Internal Lung and Liver Tumor Motion: A Retrospective Single-Center Observational Study. Technol Cancer Res Treat. 2022: 21: 15330338221112280.
37) Ryuno Y, Abe T, Iino M, Saito S, Aoshika T, Oota T, et al: High-dose stereotactic body radiotherapy using CyberKnife® for stage I peripheral lung cancer: a single-center retrospective study. Radiat Oncol. 2022: 17: 128.
38) Glide-Hurst CK, Lee P, Yock AD, Olsen JR, Cao M, Siddiqui F, et al: Adaptive Radiation Therapy (ART) Strategies and Technical Considerations: A State of the ART Review From NRG Oncology. Int J Radiat Oncol Biol Phys.Elsevier Inc. 2021: 109: 1054-1075.
39) Lu L, Zhang Z, Qi P: A Review of Online Adaptive Radiation Therapy. Appl Radiat Oncol. 2024: 13: 17-25.

Abstract

Advances and challenges in imaging techniques for tumors with respiratory motion in radiation therapy

Satoki Hinai[1)], Keisuke Usui[1, 2)]

[1)] Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Science, Juntendo University
[2)] Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

In recent years, with the advancement of high-precision radiation therapies such as intensity modulated radiation therapy (IMRT) and stereotactic body radiation therapy (SBRT), accurately visualizing respiratory motion of tumors and organs has become essential for improving treatment precision. Tumor position fluctuates three-dimensionally due to respiration, which can cause misalignment between treatment planning and irradiation; therefore, visualization and quantification technologies are indispensable. Key imaging techniques include four-dimensional (4D) computed tomography (4D-CT) for evaluating motion during treatment planning, 4D cone-beam CT (4D-CBCT) for verifying tumor position during treatment, fluoroscopic imaging for real-time observation of motion, magnetic resonance imaging (MRI) for superior soft-tissue visualization, ultrasound imaging for motion assessment without radiation exposure, and surface guided radiation therapy (SGRT) using body surface markers. These technologies are applied to various motion management strategies, including respiratory-gated irradiation (delivering radiation synchronized with respiratory phases), tumor tracking irradiation (continuously following the moving target), and adaptive radiotherapy (responding to anatomical changes during treatment). Future advancements in motion prediction using artificial intelligence, multimodality fusion, and real-time imaging are expected to enable more precise and individualized treatment. Standardization of respiratory motion management and further clinical validation will be essential to improve the overall quality of radiotherapy.

Key Words: radiation therapy, respiratory motion management, imaging technique, irradiation technique

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 96-103, 2026]

論　説

転移性脳腫瘍における放射線治療の役割と課題

樋川陽向、臼井桂介

順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻

要　旨

転移性脳腫瘍はがん患者に高頻度に認められ、神経学的症状や認知機能低下を通じて患者の生活の質および予後に大きな影響を及ぼす。従来、多発脳転移腫瘍に対しては全脳照射が標準治療として用いられてきたが、認知機能障害など晩期有害事象が問題となり、その位置づけは変化してきた。近年では、定位放射線治療（SRT）をはじめとする高精度放射線治療技術の進歩により、正常脳組織への線量を低減しつつ、高い局所制御率を達成する治療戦略が可能となっている。Gamma Knife や CyberKnife に加え、IMRT、VMAT、さらに単一アイソセンタによる多発病変同時照射を可能とする HyperArc など、治療効率と線量集中性を両立した技術が臨床導入されている。一方で、SRT における処方線量や線量評価指標はモダリティや施設間で統一されておらず、治療成績の比較や標準化が困難であるという課題が残されている。本論説では、多発転移性脳腫瘍に対する放射線治療の変遷と各照射技術の特徴を概説するとともに、処方線量および線量評価の観点から現状の課題と今後の展望について考察した。

キーワード：転移性脳腫瘍、高精度放射線治療技術、処方線量、線量評価

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，104-112頁，2026年（受付　2026.2.25.；受理　2026.5.19.）

1. 緒　　言

転移性脳腫瘍は固形がん患者の8〜10％に発生し、頭蓋内転移の頻度は約20％に達すると報告されている[1, 2]。さらに、がん患者の20〜40％が生涯のいずれかの時点で転移性脳腫瘍を発症するとされており[3]、その多くが多発病変として認められる。転移性脳腫瘍は精神障害や言語障害などの神経学的症状を引き起こし、生活の質（quality of life: QOL）と生存期間に重大な影響を及ぼす[4]。近年、磁気共鳴画像（magnetic resonance imaging: MRI）をはじめとする画像診断技術や放射線治療法の進歩・普及により、外科的摘出術との比較や治療による認知機能への影響評価など、多角的なアプローチが検討されている。また、治療方針の決定には、転移病巣の数や大きさ、原発巣の生物学的特性、患者の全身状態や治療歴、さらに治療環境など複数の要因を総合的に考慮する必要がある。そのため、画一的な治療法は存在せず、患者特性に応じた個別化治療の選択が求められる。多発転移性脳腫瘍は、特に肺がんや乳がんなどの進行例において高頻度に認められ[5]、頭蓋内圧亢進や認知機能低下などの症状を呈することが多い。コンピューター断層撮影装置（computed tomography: CT）と比較して高い描出能を有する MRI の普及により、より多くの小病変が検出されるようになった。一方で、多発転移性脳腫瘍の予後は依然として不良であり、中央生存期間は約5か月にとどまる[6-9]。

本論説では、多発転移性脳腫瘍に対する治療方法の変遷と、放射線治療技術の進歩およびその役割を概説する。さらに、特に多発病変に対する高精度放射線治療技術に焦点を当て、処方線量や線量評価指標の観点から、現状の課題と今後の展望について考察する。

2. 多発転移性脳腫瘍の治療法

多発転移性脳腫瘍および腫瘍周囲浮腫は、神経障害を介して QOL と日常生活に直接的な影響を及ぼす。現在の治療選択肢には、開頭手術、薬物療法（化学療法、分子標的薬、免疫チェックポイント阻害薬など）、放射線治療、そして適切な支持療法が挙げられ、これらを組み合わせた集学的治療が行われている[8, 10-13]。

1）開頭手術

転移性脳腫瘍に対する開頭手術は、診断と治療の両面で重要な役割を担う。外科的に摘出した腫瘍組織は組織学的診断を確定させる唯一の手段であり、正確な病理診断と個別化治療の方針決定に不可欠である。孤立性または少数病変で、全身状態や原発巣制御が良好

責任著者：臼井桂介
順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

な症例では、手術により症状緩和と局所制御および生存期間の延長が期待される。直径3 cm を超える大型病変や出血性病変、小脳病変による閉塞性水頭症が懸念される症例などでは、開頭腫瘍摘出術が第一選択となる場合が多い[11, 12]。一方で、開頭手術は侵襲的手技であり、出血・感染・神経学的後遺症などのリスクを伴う。また、多発病変ではすべての病変を外科的に切除することは現実的に不可能となる場合が多く、手術単独での根治は困難である。したがって、手術適応は病変数や位置、全身状態、予後予測などを含めた総合的判断に基づき慎重に決定され、術後には放射線療法や薬物療法を組み合わせた集学的戦略が重要となる[10-13]。

2）放射線療法

放射線療法はX 線や電子線などの高エネルギー放射線を用いて腫瘍の DNA（deoxyribonucleic acid）への損傷を誘導し、細胞分裂を阻害することで腫瘍増殖の制御を図る治療法である[14]。身体的侵襲が比較的小さく、高齢者や全身状態不良例にも適用可能であることから、転移性脳腫瘍に対する標準的治療法の一つとして広く実施されている。従来は全脳照射（Whole brain radiotherapy: WBRT）が多発転移性脳腫瘍の主要な照射法として用いられてきたが、近年は定位手術的照射（Stereotactic Radiosurgery: SRS）や分割定位放射線治療（fractionated SRT: fSRT）、さらに強度変調放射線治療法（Intensity Modulated Radiation Therapy: IMRT）や強度変調回転照射法（Volumetric Modulated Arc Therapy: VMAT）といった高精度放射線治療法が普及しつつあり、病変数や腫瘍体積、患者背景に応じて適切な照射技術が選択されている。放射線療法は、根治および緩和治療の双方に用いられ、全身療法や手術療法と併用されることも多い。特に多発症例では、全病変に対する一括照射や、症候性病変への重点照射により、症状緩和と脳内制御を図る役割を担う。一方、治療期間の長期化や通院継続の困難さ、治療中の腫瘍形態や病変数の変化など、実臨床における運用上の課題も存在する。

3. 多発転移性脳腫瘍に対する放射線治療技術

臨床で用いられている放射線療法には多くの種類を要し、各部位に適応した放射線治療機器が選択される[14]。転移性脳腫瘍に対する照射技術には、WBRT と SRT の2つに大別される。本項では、両者の特徴や治療成績を概説する。

1）全脳照射（WBRT）

WBRT は、多発転移性脳腫瘍に対する最も歴史の長い治療法であり、脳全体を照射範囲とすることにより、画像上検出されない微小病変を含めた広範囲の腫瘍制御を目的とする[15, 16]。年間数十万人規模の患者がWBRT を受けてきたとされるが、生存期間の延長に伴い、神経認知機能障害などの晩期有害事象が大きな問題となった[15-18]。典型的な投与線量としては30 Gy/10回や37.5 Gy/15回などの中等線量多分割照射が用いられ、短期的な症状改善や頭蓋内制御に寄与する。一方、エピソード記憶や実行機能、処理速度の低下、さらに脳萎縮などが報告されている[15, 17, 19]。

これらの副作用軽減を目的とした新たなアプローチが近年検討されている。1つ目は、神経保護薬メマンチンという受容体拮抗薬である。本薬剤は記憶障害や学習能力低下の進行を遅らせる効果が報告されている。2つ目に、海馬回避全脳照射（Hippocampal Avoidance WBRT: HA-WBRT）である。海馬の神経幹細胞領域への照射を避けることで、認知機能を温存することを目的としており、臨床試験で有望な結果が示されている[15, 19, 20]。海馬は特に放射線感受性が高く、照射により神経新生が抑制されることが、認知機能障害の一因と考えられている[17]。

全脳照射が従来の標準治療から補助的アプローチへと位置づけられるに至った背景には、多数の臨床試験で認知機能障害などの有害事象が顕著であることが明らかになったためである。WBRT はかつて多発脳転移に対する標準治療として広く用いられてきたが、認知機能障害などの晩期有害事象が明らかとなり、現在では補助的役割へと位置づけが変化している。こうした背景から、患者の QOL を維持しつつ、局所制御を高める新たな治療法として、SRT が臨床現場で注目されるようになった。

2）定位放射線治療（Stereotactic Radiotherapy: SRT）

従来主流であった WBRT に代わり、患者の QOL の維持・向上を重視した新たな照射法への転換が進んでいる。放射線治療技術の進歩と高精度な照射の実現により、限局した病変に対して優れた局所制御効果が得られるようになり、多発性脳転移に対する治療選択肢も拡大した。SRT は､頭蓋内の標的部位に焦点を当て、高い照射精度と線量集中度で大線量を照射する治療法である。正常組織への線量を最小限に抑え、病変部位に最大限の治療効果をもたらすことで、根治治療を実現する照射法である。SRT は、単回で照射する SRS と小分割で照射する SRT に大別される[21-23]。

SRS は、頭蓋内の悪性・良性腫瘍や機能的・血管性疾患を対象とし、通常は単回数で照射が行われる。転移性脳腫瘍では、頭蓋内転移や脳幹転移などに適用される[21, 24-26]。また SRT は、頭蓋内の悪性・良性腫瘍や機能的・血管性疾患を対象とし、数回に分けて照射する。SRS と同様に脳幹転移などに適用されるが。視神経や下垂体腺腫など、特にリスク臓器と近接した病床においては、分割照射により正常組織の障害低減を目指し、SRT で治療される[21, 25, 27]。また、SRS や SRT の実施には、高精度な画像診断と画像誘導技術が不可欠である。治療計画時では、高分解能 CT や MRI を用いて、病変と周囲の正常組織を正確に区別し、治療すべき標的容積を決める[22, 23, 28, 29]。特に転移性脳腫瘍では、MRI の画像特有の歪みの補正や造影剤による増強効果が重要となる。

SRT は非侵襲性であり[22]、従来の治療では困難であった病変に対しても高い局所制御率が期待できるが、遅発性の合併症リスクを伴う。放射線壊死は、脳転移の治療後には7〜24% の発生率があり、特に65歳未満の若年患者や頭頂葉・前頭葉の病変でリスクが高まる可能性がある。脳幹転移では1.5〜3.4% の報告がある[24, 25]。これらの合併症リスクを最小限に抑えるためには、高精度な治療計画と装置の品質管理、そして長期的な治療装置の品質保証が非常に重要である[21-23]。このように、SRT は多発転移性脳腫瘍に対する新たな治療選択肢として臨床的意義が拡大しており、以下では代表的な装置ごとまたは照射技術ごとの技術的特徴と治療効果について詳述する。

（1）Gamma Knife

Gamma Knife は、頭蓋内の腫瘍に対して最も優れた固定精度を有する照射技術とされている。1950年代に導入された SRS の初期の定位システムの一つであり、脳および頭頸部腫瘍の治療のために設計された専用の頭蓋内定位放射線手術装置である[30, 31]。本照射方法は、コバルト60線源を使用するため治療時間が他の治療法と比べて長く、複数脳転移の治療においては数時間かかることもある[32]。使用するビームを選択し、腫瘍領域に集中させることで、ターゲットへの高線量照射と周囲の正常組織への線量低減を可能にしている[33]。Gamma Knife における SRS において、頭部の動きを最小限とするための患者固定が重要である。定位チタン合金フレームを患者の頭蓋骨に打ち込むことで、患者の動きを最小限に抑えることが可能となるが、侵襲的であり、患者に不快感を与えるため、分割治療には適していない[33]。近年では、熱可塑性マスクを用い、CBCT イメージングとリアルタイムモーション追跡デバイスを搭載した Gamma Knife Icon システムが臨床稼働しており、フレームレスでの SRS が可能となった。本システムでは、鼻尖に反射マーカーを設置し、赤外線で照射中も追跡しながら患者位置を継続的に監視する仕組みがあり、許容閾値を超えた動きが検出されると治療が一時停止され、患者の位置が自動修正される[33]。このように、Gamma Knife は転移性脳腫瘍の治療において有効性と臨床的実用性が証明されている照射装置である[30]。また、Gamma Knife 実施時の MRI から、新たな転移病巣が発見されるリスクは、多発性脳転移の症例で高く、転移腫瘍サイズが小さいほど転移が多く生じることが明らかになっている。そのサイズ変化は、1日あたり2% 増加することが示されている[34]。

以上のように、Gamma Knife は高精度かつ非侵襲的な治療を実現し、脳転移患者に対する有効性が確立されている。一方で、治療時間や固定方法に伴う課題も残されている。

（2）CyberKnife

CyberKnife は、多段コリメータにより先鋭化されたビームと、ロボットアームによる多様な照射角度を有することにより、放射線治療装置の中で特に線量集中性に優れた治療装置である。全身病変に対して利用することができ、再発腫瘍や術後残存腫瘍に対する治療にも適しているため、予後や全身状態が悪い患者に対しても治療が可能となる[35]。一方で、多発病変では長い照射時間を要するため、長時間の拘束が患者の負担にもなる[36]。また、呼吸や体動による腫瘍位置変動をリアルタイムで追跡・補正し、空間的・時間的なターゲット追跡技術を有することで、治療精度向上と正常組織温存が可能となる[37]。

CyberKnife を用いた WBRT 後の再発転移性脳腫瘍に対する SRS において、腫瘍の Conformity Index を95％として、1年局所制御率が87％と高い制御効果が報告されている。また、再発後生存期間の中央値は13.3か月であり、これは開頭腫瘍切除手術後の中央値の9.7か月と比較して遜色ない結果であり、局所に照射することで生存期間が長くなることを示した[38]。また、1 cm^3未満の小さな転移性脳腫瘍に対して高い制御率を示すが、大きな病変に対しても効果が報告されている。直径約3 cm の術後再発症例に対して治療後3か月以内に腫瘍が消失するなど、1 cm^3を超える大きな転移性脳腫瘍においても、高い局所制御率を示している[39]。さらに、10個以上の病変を有する多発性脳転移において、CyberKnife による30 Gy/5分割の SRT に

よって、良好に制御されたと報告されている[40]。CyberKnife は小病変から多発性病変、大きな腫瘍に至るまで幅広く対応可能であり、臨床的有効性と柔軟性が証明されている。

（3）強度変調放射線治療法

近年、線量分布の最適化を目的として臨床導入が進んでいるのが IMRT である。IMRT は、放射線治療における高精度照射技術の代表であり、放射線ビームの形状と強度を継続的に調整し、ターゲットごとに最適な線量分布を正確に照射することが可能な技術である[41-43]。腫瘍に必要な高線量を集中させながら、周囲の正常組織への線量を最小限に抑えることで治療効果を高め、副作用のリスクを低減することを達成する[22]。そのため、不規則な形状の腫瘍が正常組織に近接している場合に特に有効である。また、IMRT は全脳照射と比べて高線量を局所的に集中できることから、放射線に対して耐性のある放射線抵抗性腫瘍の制御にも有効である可能性が示唆されている[23]。

VMAT は、強度変調放射線治療法の一つであり、ガントリ回転、MLC 駆動および線量率を連続的に変化させることで、極めて強度変調した放射線照射を可能にする治療技術である[44]。これにより、治療の精度と効率が飛躍的に向上し、転移性脳腫瘍に対する SRS や SRT において広く用いられている[45]。特に、不規則な形状や大きな腫瘍に対しても、高い線量の適合性と急峻な線量減衰を実現し、正常組織への照射線量を最小限に抑えることが可能である[46]。単一のアイソセンタを設定した多発脳転移に対する VMAT は、治療効率を大幅に向上させることが報告されている。複数のアイソセンタを設定した VMAT と比較し、治療時間を約20分に短縮可能である[47, 48]。

以上のように、VMAT は高精度かつ効率的な照射を可能とし、臨床現場で広く普及している。しかし、治療計画や品質保証の複雑さ、施設間での標準化の課題も残されている。これらの問題の解決を目指し、さらなる治療計画の効率性と自動化を追求した照射技術が、次に述べる HyperArc である。

（4）HyperArc

HyperArc は、多発脳転移への放射線治療を目的とした単一アイソセンタの VMAT 技術であり、治療計画時間の短縮、線量分布の改善および照射プロセスの効率化が達成できる照射技術である[26]。2017年に世界で初めて臨床使用が開始され[27]、あらかじめ設定された最大5つの照射アークを選択し、規定されたカウチ角度（0°、±45°、±90）を組み合わせて照射する[26]。さらに、Collimator Angle Optimization 機能により、病変間に生じる高線量域の発生を最小限に抑えるための、最適なコリメータの角度を自動的に設定することができる。また、SRS-NTO 機能により、複数の同心円状のリング構造を定義することなく、正常組織への線量を効果的に低減し、腫瘍中心への線量を急峻にすることができる[26]。HyperArc は、VMAT 計画と比較して有意に高い Conformity Index と良好な Gradient Index を達成でき、1 cm を超える腫瘍において優れた線量集中特性を示す。その結果、低線量領域の拡大が抑えられ、正常脳の V_{12Gy} の有意な減少につながる[32]。さらに、総治療時間は20分以内で完了することが可能であり、Gamma Knife と比較して照射時間が著しく短いことを示し[26, 32]、MU 値と総治療時間を大幅に短縮することができる[26, 32]。HyperArc は、複数の脳転移の治療において、高い線量集中度、効率性、および優れたリスク臓器の保護を提供する最先端な技術である。その自動化された治療計画と短い治療時間は、患者と医療従事者双方に大きな利点をもたらしている。

4. 考　　察

転移性脳腫瘍に対する放射線治療は、近年の技術革新により治療法の選択肢が多様化し、複数病変に対する根治的照射も可能となった。従来標準治療であった WBRT は、神経認知機能障害などの晩期有害事象が問題とされてきた。このため、現在では、補助的治療としての位置づけや、海馬回避照射などの選択的照射法が主流となりつつある。SRT は、限局性病変に対して高い局所制御率を達成しつつ QOL を維持できる点で有効な治療法であり、Gamma Knife や CyberKnife の進化により、非侵襲的かつ高精度な治療を実現している。一方で、治療時間の長さや治療計画の複雑さなど、運用上の課題が依然として残されている。さらに、IMRT や VMAT の導入により、リニアックを用いた放射線治療においても線量分布の最適化と正常脳組織の保護を両立することが可能となり、多発脳転移に対する適応拡大に寄与してきた。その一方で、治療計画の高度化に伴う計画作業の複雑化や、品質保証・品質管理に要する負担の増大が、臨床効率の低下を招いている。HyperArc は、単一アイソセンタによる多病変同時照射、自動最適化アルゴリズムおよび治療時間短縮を実現し、従来技術の課題への改善を示している。また、計画自動化により治療品質の均一化と効率性が両立し、高精度放射線治療の新たな方向性を示している。今後は、さらなる自動化・標準化、患者特異的な線量

最適化アルゴリズムの開発が求められる。臨床的には、予後改善のみならず、神経認知機能とQOLの長期維持を目標とした戦略構築が重要である。高精度照射技術の進化は脳転移治療の概念を変革し、より安全かつ効率的な個別化治療の確立が期待される。

転移性脳腫瘍に対する放射線治療は技術革新によって多様なモダリティが臨床に導入され、治療選択肢は大きく拡大してきた。治療計画時の処方線量の決定は腫瘍制御と正常脳組織保護のバランスを決定する重要な概念であるが、特にSRTにおいてはモダリティごとの線量処方や線量分布の評価方法が異なり、臨床試験や多施設共同研究における直接的な比較が難しい。WBRTでは通常30 Gy/10回や37.5 Gy/15回などの分割照射が標準的に用いられ、処方線量は脳全体を対象とした均一分布を前提としている[49, 50]。WBRTでは従来、isocenter doseやreference point doseに基づく点線量処方が採用されており、均一な線量分布を作成することを前提としているため、基準点の線量が照射全体を代表するという特徴を有する。近年ではhippocampal avoidance-WBRTへIMRT/VMAT技術が応用され、PTV D95%やD98%といったDVH指標を用いた処方線量の定義も導入されつつあり、WBRTにおいても処方概念は徐々に体積ベースへ移行している[51-53]。

一方、SRTでは1回照射で18〜24 Gy、あるいは3〜5回分割で30〜35 Gyといった高線量少分割照射が行われ、処方点や処方線量の正規化法が施設ごとに異なる[52]。Gamma Knifeに代表されるSRSでは、最大線量に対する処方線量を用いた処方（prescription isodose line: P-IDL）が一般的である。この場合、腫瘍辺縁に20 Gyを投与しつつ、腫瘍中心には40 Gyの線量集中領域を形成することを目的としており、腫瘍内の線量に強度をつけることを治療戦略として利用している。さらに、P-IDLでの処方線量定義は正常脳組織への総線量を減らし、急峻な線量勾配の作成を可能にしている[53]。

CyberKnifeにおいても、特定の等線量曲線を腫瘍辺縁に一致させる処方方法が一般的に用いられてきた。しかし、inverse planningによる線量最適化法や多方向からのロボットアーム照射を有するため、Gamma Knifeと比較して処方等線量曲線の設定自由度が高い。その結果、処方線量の定義には最大線量の60〜85%程度まで施設差が存在し、腫瘍内の線量カバーや線量勾配、正常脳組織への線量および治療時間とのバランスを考慮して最適化が行われている[54]。また、腫瘍体積の95%を線量で覆う「$D_{95\%}$」を処方線量に正規化する方法や、50%等線量曲線を標的辺縁に一致させる正規化法などがあり、国際的な統一は不十分である。IMRTではICRU 83の導入以降、処方線量は単一点ではなくDVH指標によって定義されるようになり、特にPTV D95%が代表的な指標として広く用いられている。これはinverse planningによって高度に強度変調を有する線量分布が形成されるため、単一基準点では腫瘍内の線量定義を正しく評価できないことに起因する。また、ICRU 83ではD50%を“typical dose（代表的線量）”として扱う概念も導入されており、D95%、D98%、D50%など複数の指標を組み合わせて評価する必要がある[55]。

さらにHyperArcは、linac-based SRS/SRTとしてIMRT/VMAT技術を利用し、Gamma Knifeに近い高線量集中性を実現することを目的としている。そのため、処方自体はPTV D95%やD99%などDVHベースで定義される一方、腫瘍内に線量集中領域を積極的に作成する特徴を有しており、IMRTにおける体積基準の線量評価と、SRSに特徴的な高線量照射の両者を併せ持つハイブリッド型治療概念と考えられる[56]。転移性脳腫瘍における放射線治療法の課題として、SRTの処方線量定義を統一し、施設間での治療成績を直接比較できるようにすることが必要と考える。処方点や線量基準が施設ごとに異なるため、臨床結果の整合性が損なわれている点を整理する必要がある[49, 50]。このような背景から、単一の処方線量基準をすべてのモダリティに適用することには限界がある。処方線量定義の統一が困難である理由は、単なる施設間差やガイドライン未整備だけではなく、各モダリティの線量分布特性および治療計画時の最適化法の違いに起因している。WBRTでは均一線量分布を前提とした点線量概念が成立する一方、SRS/SRTでは高線量領域を作成そのものが治療戦略の一部であり、IMRTでは体積処方による評価が重視される。このため、「20 Gy」や「30 Gy」といった数値のみを用いた単純比較では、本質的に異なる線量概念を比較している可能性がある。また、国際放射線防護委員会が提唱する「処方線量・記録線量・報告線量」の3つを脳転移治療に適用し、線量設定や報告方法を標準化することが求められる[49, 50]。さらに、国際的学会から提唱されている転移性脳腫瘍に特化したガイドラインを整備し、異なる治療モダリティ間で一貫した処方線量の基準を策定することが挙げられる[52, 57]。したがって今後は、単一の普遍的な処方線量を定義することよりも、各モダリティの特性を踏まえた処方線量の定義を整備することが重要と考えられる。特に、処方指標、標的への線量カバー、線量不均一性、線量勾配および正常組織保護を含めた統一的評

価指標を導入することで、異なる照射法間における治療成績の比較が可能性になることが期待される。

以上より、転移性脳腫瘍に対する放射線治療の処方線量はモダリティごとに異なる定義を持ち、臨床的慣習や技術的特性に依存しているため、標準化された定義と報告指標を整備し、臨床的妥当性を高めることが今後の重要な課題である。

5. ま と め

本論説では、転移性脳腫瘍に対する放射線治療法について、歴史的経緯を踏まえながら治療技術の進歩とその役割を概説し、臨床現場にもたらしてきた影響や課題に関するこれまでの研究動向を紹介した。特に、VMAT や IMRT といった、MLC を動かしながら照射を行う新たな放射線治療法は、従来の手法と比較して良好な治療成績を示しており、現在では臨床現場において広く用いられている。これらの治療法は、リスク臓器への不要な線量の低減、治療期間の短縮、治療効果の向上、さらには患者の QOL の改善に寄与することが示されている。一方で、技術の進歩に伴い、治療計画時間の増大や計画手順の複雑化、治療計画における品質保証・品質管理の負担増大など、治療に携わる医療従事者にはより高度な知識と精度、ならびに経験が求められるようになっている。これらの課題に対処するためには、治療計画プロセスの自動化や最適化アルゴリズムの導入、ならびに標準化された品質管理手法の確立が重要である。今後の研究では、これらの先端技術を臨床運用へ効果的に統合する方法の検討や、複雑化する放射線治療における品質管理体制の効率化に関するさらなる検証が求められる。

6. 謝　　辞

本論説の執筆にあたり、多くの方々にご協力とご支援いただきましたこと心より感謝申し上げます。

7. 倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

8. 利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Schouten LJ, Rutten J, Huveneers HA, Twijnstra A: Incidence of brain metastases in a cohort of patients with carcinoma of the breast, colon, kidney, and lung and melanoma. Cancer. 2002: 94: 2698-2705.

2） Barnholtz-Sloan JS, Sloan AE, Davis FG, Vigneau FD, Lai P, Sawaya RE: Incidence proportions of brain metastases in patients diagnosed (1973 to 2001) in the Metropolitan Detroit Cancer Surveillance System. J Clin Oncol. 2004: 22: 2865-2872.

3） Tsao MN, Lloyd N, Wong RK, Chow E, Rakovitch E, Laperriere N, et al: Whole brain radiotherapy for the treatment of newly diagnosed multiple brain metastases. Cochrane Database Syst Rev. 2012: 4: CD003869.

4） Mehta MP, Shapiro WR, Glantz MJ, Patchell RA, Weitzner MA, Meyers CA, et al: Lead-in phase to randomized trial of motexafin gadolinium and whole-brain radiation for patients with brain metastases: centralized assessment of magnetic resonance imaging, neurocognitive, and neurologic end points. J Clin Oncol. 2002: 20: 3445-3453.

5） Zhou H, Wu T, Zhu X, Li Y: Re-irradiation of multiple brain metastases using CyberKnife stereotactic radiotherapy: Case report. Medicine (Baltimore). 2021: 100: e27543.

6） Kaufmann TJ, Smits M, Boxerman J, Huang R, Barboriak DP, Weller M, et al: Consensus recommendations for a standardized brain tumor imaging protocol for clinical trials in brain metastases. Neuro Oncol. 2020: 22: 757-772.

7） Yokoi K, Kamiya N, Matsuguma H, Machida S, Hirose T, Mori K, et al: Detection of brain metastasis in potentially operable non-small cell lung cancer: a comparison of CT and MRI. Chest. 1999: 115: 714-719.

8） Bertolini F, Spallanzani A, Fontana A, Depenni R, Luppi G: Brain metastases: an overview. CNS Oncol. 2015: 4: 37-46.

9） Rastogi K, Bhaskar S, Gupta S, Jain S, Singh D, Kumar P: Palliation of Brain Metastases: Analysis of Prognostic Factors Affecting Overall Survival. Indian J Palliat Care. 2018: 24: 308-312.

10） Fuentes R, Osorio D, Expósito Hernandez J, Simancas-Racines D, Martinez-Zapata MJ, Bonfill Cosp X: Surgery versus stereotactic radiotherapy for people with single or solitary brain metastasis. Cochrane Database Syst Rev. 2018: 8: CD012086.

11） Fuentes R, Bonfill X, Exposito J: Surgery versus radiosurgery for patients with a solitary brain metastasis from non-small cell lung cancer. Cochrane Database Syst Rev. 2006: 1: CD004840.

12）Rades D, Nguyen T, Schild SE: Elderly Patients With Single Brain Metastasis - Overall Survival After Surgery Plus Whole-Brain Irradiation and a Radiation Boost. In Vivo. 2020: 34: 1421-1425.
13）Sankey EW, Tsvankin V, Grabowski MM, Nayar G, Batich KA, Risman A, et al: Operative and peri-operative considerations in the management of brain metastasis. Cancer Med. 2019: 8: 6809-6831.
14）日本放射線腫瘍学会 編：放射線治療計画ガイドライン2016年版．東京．金原出版．2016.
15）Brown PD, Gondi V, Pugh S, Tome WA, Wefel JS, Armstrong TS, et al: Hippocampal Avoidance During Whole-Brain Radiotherapy Plus Memantine for Patients With Brain Metastases: Phase III Trial NRG Oncology CC001. J Clin Oncol. 2020: 38: 1019-1029.
16）Brown PD, Ahluwalia MS, Khan OH, Asher AL, Wefel JS, Gondi V: Whole-Brain Radiotherapy for Brain Metastases: Evolution or Revolution? J Clin Oncol. 2018: 36: 483-491.
17）Gondi V, Pugh SL, Tome WA, Caine C, Corn B, Kanner A, et al: Preservation of memory with conformal avoidance of the hippocampal neural stem-cell compartment during whole-brain radiotherapy for brain metastases (RTOG 0933): a phase II multi-institutional trial. J Clin Oncol. 2014: 32: 3810-3816.
18）Tsao MN, Xu W, Wong RK, Lloyd N, Laperriere N, Sahgal A, et al: Whole brain radiotherapy for the treatment of newly diagnosed multiple brain metastases. Cochrane Database Syst Rev. 2018: 1: CD003869.
19）Hoffmann C, Distel L, Knippen S, Gryc T, Schmidt MA, Fietkau R, et al: Brain volume reduction after whole-brain radiotherapy: quantification and prognostic relevance. Neuro Oncol. 2018: 20: 268-278.
20）Popp I, Rau S, Hintz M, Schneider J, Bilger A, Fennell JT, et al: Hippocampus-avoidance whole-brain radiation therapy with a simultaneous integrated boost for multiple brain metastases. Cancer. 2020: 126: 2694-2703.
21）Guckenberger M, Baus WW, Blanck O, Combs SE, Debus J, Engenhart-Cabillic R, et al: Definition and quality requirements for stereotactic radiotherapy: consensus statement from the DEGRO/DGMP Working Group Stereotactic Radiotherapy and Radiosurgery. Strahlenther Onkol. 2020: 196: 417-420.
22）Kirkpatrick JP, Kelsey CR, Palta M, Cabrera AR, Salama JK, Patel P, et al: Stereotactic body radiotherapy: a critical review for nonradiation oncologists. Cancer. 2014: 120: 942-954.
23）Sacher F, Gandjbakhch E, Maury P, Jenny C, Khalifa J, Boveda S, et al: Focus on stereotactic radiotherapy: A new way to treat severe ventricular arrhythmias? Arch Cardiovasc Dis. 2021: 114: 140-149.
24）Calderon B, Vazquez L, Belkacemi M, Pourel N: Stereotactic radiotherapy for brain metastases: predictive factors of radionecrosis. Eur J Med Res. 2023: 28: 12.
25）Ehret F, Rueß D, Blanck O, Fichte S, Chatzikonstantinou G, Wolff R, Mose L, Mose S, Fortmann T, Lehrke R, Turna M, Caglar HB, Mortasawi F, Bleif M, Krug D, Ruge MI, Fürweger C, Muacevic A: Stereotactic radiosurgery and radiotherapy for brainstem metastases: An international multicenter analysis. Int J Cancer. 2024: 155: 916-924.
26）Fuentes R, Osorio D, Expósito Hernandez J, Simancas-Racines D, Martinez-Zapata MJ, Bonfill Cosp X: Surgery versus stereotactic radiotherapy for people with single or solitary brain metastasis. Cochrane Database Syst Rev. 2018: 8: CD012086.
27）Abdali A, Astaf Eva L, Trunin Y, Kalinin P, Golanov A, Abdali B, et al: Modern Methods of Stereotactic Radiosurgery and Radiotherapy for the Treatment of Cushing Disease. Neurol India. 2020: 68: 1172-1178.
28）Husain ZA, Thibault I, Letourneau D, Ma L, Keller H, Suh J, et al: Stereotactic body radiotherapy: a new paradigm in the management of spinal metastases. CNS Oncol. 2013: 2: 259-270.
29）Putz F, Mengling V, Perrin R, Masitho S, Weissmann T, Rösch J, et al: Magnetic resonance imaging for brain stereotactic radiotherapy: A review of requirements and pitfalls. Strahlenther Onkol. 2020: 196: 444-456.
30）Mereniuk TR, Burney HN, Lautenschlaeger T, Watson GA, Rhome RM: Discovery of increased number or interval growth of brain metastases on same-day GammaKnife™ planning MRI: Predicting factors and patient outcomes. J Radiosurg SBRT. 2022: 8: 189-199.
31）Potrebko PS, Keller A, All S, Sejpal S, Pepe J, Saigal K, et al: GammaKnife versus VMAT radiosurgery plan quality for many brain metastases. J Appl Clin Med Phys. 2018: 19: 159-165.
32）Vergalasova I, Liu H, Alonso-Basanta M, Dong L, Li J, Nie K, et al: Multi-Institutional Dosimetric Evaluation of Modern Day Stereotactic Radiosurgery (SRS) Treatment Options for Multiple Brain Metastases. Front

Oncol. 2019: 9: 443.
33) Seneviratne DS, Vallow LA, Hadley A, Malouff TD, Stross WC, Herchko S, et al: Intracranial motion during frameless Gamma-Knife stereotactic radiosurgery. J Radiosurg SBRT. 2020: 6: 277-285.
34) Wang J, Zheng Q, Wang Y, Wang C, Xu S, Ju Z, et al: Dosimetric comparison of ZAP-X, Gamma Knife, and CyberKnife stereotactic radiosurgery for single brain metastasis. BMC Cancer. 2024: 24: 112.
35) Soman C, Alghamdi SRM, Alazemi FNM, Alghamdi AAA: Cyberknife Radiosurgery for the Treatment of Head and Neck Cancer: A Systematic Review. Eur J Dent. 2022: 16: 266-273.
36) Ianiro A, Infusino E, D'Andrea M, Marucci L, Farneti A, Sperati F, et al: Multiple Brain Metastases Radiosurgery with CyberKnife Device: Dosimetric Comparison between Fixed/Iris and Multileaf Collimator Plans. J Med Phys. 2023: 48: 120-128.
37) Sio TT, Jang S, Lee SW, Curran B, Pyakuryal AP, Sternick ES: Comparing gamma knife and cyberknife in patients with brain metastases. J Appl Clin Med Phys. 2014: 15: e4764.
38) Romagna A, Alexander R, Schwartz C, Ladisich B, Hitzl W, Heidorn SC, et al: CyberKnife Radiosurgery in Recurrent Brain Metastases: Do the Benefits Outweigh the Risks? Cureus. 2018: 10: e3515.
39) Hsieh CT, Chang CF, Liu MY, Chang LP, Hueng DY, Chang SD, et al: Successful treatment of metastatic brain tumor by CyberKnife: a case report. Kaohsiung J Med Sci. 2010: 26: 144-149.
40) Zhou H, Wu T, Zhu X, Li Y: Re-irradiation of multiple brain metastases using CyberKnife stereotactic radiotherapy: Case report. Medicine (Baltimore). 2021: 100: e25828.
41) Edwards AA, Keggin E, Plowman PN: The developing role for intensity-modulated radiation therapy (IMRT) in the non-surgical treatment of brain metastases. Br J Radiol. 2010: 83: 133-136.
42) Iwai T, Imagumbai T, Hiraoka S, Kishi T, Okabayashi S, Ashida R, et al: Clinical outcomes of scalp or face angiosarcoma treatment with intensity-modulated radiotherapy: a multicenter study. J Radiat Res. 2024: 65: 78-86.
43) Osman AFI, Maalej NM: Applications of machine and deep learning to patient-specific IMRT/VMAT quality assurance. J Appl Clin Med Phys. 2021: 22: 20-36.
44) Zhao N, Yang R, Jiang Y, Tian S, Guo F, Wang J: A hybrid IMRT/VMAT technique for the treatment of nasopharyngeal cancer. Biomed Res Int. 2015: 2015: 940102.
45) Hao J, Magnelli A, Godley A, Yu JS: Use of a Linear Accelerator for Conducting In Vitro Radiobiology Experiments. J Vis Exp. 2019: 147: e59665.
46) Matsuda R, Hasegawa M, Tamamoto T, Ochi T, Miyasaka T, Inooka N, et al: Linac-based stereotactic radiosurgery and fractionated stereotactic radiotherapy with a micro-multileaf collimator for brain metastasis in the primary motor cortex. J Radiat Res. 2022: 63: 63-70.
47) Uto M, Torizuka D, Mizowaki T: Single isocenter stereotactic irradiation for multiple brain metastases: current situation and prospects. Jpn J Radiol. 2022: 40: 987-994.
48) Ruggieri R, Naccarato S, Mazzola R, Ricchetti F, Corradini S, Fiorentino A, et al: Linac-based VMAT radiosurgery for multiple brain lesions: comparison between a conventional multi-isocenter approach and a new dedicated mono-isocenter technique. Radiat Oncol. 2018: 13: 38.
49) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy: ICRU Report 50. Bethesda. ICRU Publications. 1993.
50) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy (Supplement to ICRU Report 50): ICRU Report 62. Bethesda. ICRU Publications. 1999.
51) Gondi V, Pugh SL, Tome WA, Caine C, Corn B, Kanner A, et al: Preservation of memory with conformal avoidance of the hippocampal neural stem-cell compartment during whole-brain radiotherapy for brain metastases (RTOG 0933): a phase II multi-institutional trial. J Clin Oncol. 2014: 32: 3810-3816.
52) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording, and Reporting of Stereotactic Treatments with Small Photon Beams: ICRU Report 91. Bethesda. ICRU Publications. 2017.
53) Flickinger JC, Kondziolka D, Niranjan A, Lunsford LD: Dose selection in stereotactic radiosurgery. Prog Neurol Surg. 2007: 20: 28-42.
54) Kilby W, Dooley JR, Kuduvalli G, Sayeh S, Maurer

CR Jr: The CyberKnife Robotic Radiosurgery System in 2010. Technol Cancer Res Treat. 2010: 9: 433-452.
55) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording, and Reporting Intensity-Modulated Photon-Beam Therapy (IMRT): ICRU Report 83. Bethesda. ICRU Publications. 2010.
56) Slosarek K, Bekman B, Wendykier J, Grządziel A, Fogliata A, Cozzi L: In silico assessment of the dosimetric quality of a novel, automated radiation treatment planning strategy for linac-based radiosurgery of multiple brain metastases and a comparison with robotic methods. Radiat Oncol. 2018: 13: 41.
57) Gondi V, Bauman G, Bradfield L, Burri SH, Cabrera AR, Cunningham DA, et al: Radiation Therapy for Brain Metastases: An ASTRO Clinical Practice Guideline. Pract Radiat Oncol. 2022: 12: 265-282.

Abstract

The roles and challenges of radiotherapy in brain metastases

Hinata Hikawa, Keisuke Usui

Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Science, Juntendo University

Brain metastases are a frequent complication in patients with advanced malignancies and significantly affect quality of life and prognosis through neurological symptoms and cognitive impairment. Whole-brain radiotherapy has long been the standard treatment for patients with multiple brain metastases; however, concerns regarding late adverse effects, particularly neurocognitive decline, have led to a reconsideration of its role in contemporary practice. Recent technological advances in radiotherapy have enabled highly conformal dose delivery to intracranial lesions while minimizing irradiation of normal brain tissue. Stereotactic radiotherapy (SRT), including stereotactic radiosurgery and fractionated SRT, has emerged as an effective, achieving high local control with better preservation of neurocognitive function. Dedicated systems such as Gamma Knife and CyberKnife, as well as linac-based techniques including intensity-modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy (VMAT), have broadened the indications for SRT in patients with multiple brain metastases. More recently, HyperArc, a single-isocenter VMAT-based technique, has been developed to improve treatment efficiency and dose conformity for multiple lesions. HyperArc allows simultaneous irradiation of multiple targets with steep dose gradients and reduced treatment time through automated planning. Despite these advances, challenges remain in the standardization of prescription dose definitions and dosimetric evaluation indices across modalities and institutions. This review summarizes the evolution of radiotherapy for multiple brain metastases and discusses current issues and future perspectives, with a particular focus on dose prescription and standardization.

Key Words: brain metastases, stereotactic radiotherapy, high-precision radiotherapy, prescribed dose, dosimetric evaluation

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 104-112, 2026]

論　説

ICU リハビリテーションにおけるプロトコル化の歴史と現在の課題

柳澤佑哉[1, 2]、山田莞爾[3]、岩津弘太郎[3]、高橋哲也[3]

[1] 順天堂大学大学院保健医療学研究科理学療法学専攻
[2] 日本大学病院リハビリテーション室
[3] 順天堂大学大学院保健医療学研究科

要　旨

ICU 生存退院患者における post-intensive care syndrome（PICS）が新たな課題として注目されている。その予防策として、包括的なケアが推奨されており、リハビリテーションは重要な役割を担う。鎮静管理等のプロトコル化を先立てとして、ICU でのリハビリテーションもプロトコルに基づいて実施することが推奨されているが、最適なプロトコルの内容に関しては十分明らかになっていない。現在、ICU では様々な身体機能的評価尺度が使用されているが、プロトコルの段階指標として最も広く用いられているのは ICU Mobility Scale（IMS）である。IMS は多職種が迅速・簡便に評価できる一方で、離床到達度の低い症例では床効果が存在する。ICU 内でのリハビリテーションの大半がベッド上での活動のため、IMS のみを基盤としたプロトコルには一定の限界がある。今後、より適したリハビリテーションプロトコルへと発展していくためには、床効果の少ない Functional Status Score for the ICU（FSS-ICU）など、他の評価指標を組み込んだプロトコルの構築が必要である。

キーワード：ICU、リハビリテーションプロトコル、早期離床、IMS、FSS-ICU

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，113-118頁，2026年（受付　2026.3.30.；受理　2026.5.1.）

背　景

近年、集中治療領域における救命率が向上している[1]一方で、生存患者における post-intensive care syndrome（PICS）が新たな課題として注目されている。PICS とは intensive care unit（ICU）在室中や退室後、あるいは退院後に発症する身体機能、認知機能、精神機能低下を包含した症候群であり、QOL の低下や社会復帰困難と関連し、長期的な機能低下をもたらすことが示されている[2]。本邦においては、48時間以上の人工呼吸管理を受けた患者の63.5% が、これらのいずれか、あるいは複数の領域において PICS を発症したと報告されている[3]。さらに、最新の多施設前向き研究においても、PICS の主要領域を含む global functional decline は72.8% と高率に発生することが明らかとなっている[4]。

このような背景から、PICS の予防および重症化抑制のための介入として ICU Liberation バンドルに基づく包括的ケア[5]（**表1**）が推奨されており、リハビリテーションは重要な役割を担っている。日本版重症患者のリハビリテーション診療ガイドライン[6]においても、リハビリテーションプロトコルの導入が推奨されてい

表 1　ICU Liberation バンドル

ケア項目	日本語訳
A: Assess, prevent, and manage pain	疼痛の評価、予防と管理
B: Both SAT and SBT	覚醒トライアルと自発呼吸トライアル
C: Choise of analgesia and sedation	鎮痛、鎮静薬の選択
D: Delirium; Assess, prevent, and manage	せん妄の評価、予防と管理
E: Early mobilization and exarcise	早期離床と運動療法
F: Family engagement and empowerment	家族の関与とエンパワーメント

SAT = Spontaneous Awakening Trial, SBT = Spontaneous Breathing Trial
重症患者に対して実施されるべきケアのバンドル（束）であり、遵守率と死亡率、せん妄発生率減少の関連が報告されている[5]。

責任著者：高橋哲也
順天堂大学大学院保健医療学研究科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12
E-mail: te-takahashi@juntendo.ac.jp

るが、その最適な内容については十分明らかにされていない。そこで本論説では、ICU リハビリテーションがプロトコル化されてきた歴史的背景と、現状のリハビリテーションプロトコルが抱える課題について、ICU で用いられる身体機能評価尺度に着目して概説する。

ICU リハビリテーションにおけるプロトコル化の歴史

ICU におけるリハビリテーションに関する報告は、2000年以降に増加している。2007年には Bailey ら[7] が人工呼吸管理中におけるリハビリテーションの安全性を報告し、2008年には Morris[8] らがコホート研究により人工呼吸管理中のリハビリテーションの効果を示した。さらに2009年には、Schweikert ら[9] がランダム化比較試験によって、早期からの理学療法および作業療法が人工呼吸期間を短縮し、ICU 退室後の ADL 自立率を向上させることを明らかにした。Morris らの研究[8] では、すでにリハビリテーションプロトコルの内容が記載されている。その後、およそ15年間でプロトコル導入の流れは急速に進み、現在では各種ガイドラインにおいても、プロトコルに基づいた段階的なリハビリテーションが推奨されている。

ICU リハビリテーションのプロトコル化が急速に発展した歴史的背景には、鎮静管理のプロトコル化が大きく関与していると考えられる。1990年代以前に漫然と行われていた鎮静管理[10] は、2000年代以降、プロトコルに基づく浅鎮静管理へと変遷してきた。これにより対象者の能動的な活動が可能となった結果、人工呼吸管理中でもリハビリテーションが可能となった。その潮流の中で、ICU リハビリテーションはバンドルケアの一構成要素として位置付けられ、日常診療に組み込まれた標準的ケアへとその役割を拡大してきた。これに伴い、再現性の高い介入を実現する目的で、プロトコルに基づく介入内容の標準化が進められてきた[7-19]（図1）。

Schweikert らの報告以降、ICU における早期リハビリテーションの効果検証は活発に行われてきたが、その一方で適切なアウトカム指標の不足が課題となった。この課題に対応する形で、2010年代前半には複数の身体的機能評価尺度が開発され、現在に至るまで臨床と研究の両面で広く使用されている。

ICU で使用される身体機能評価尺度

Parry らの systematic review[20] によると、ICU で活用される身体機能的評価尺度のうち、臨床測定学的特徴が検証され、かつ ICU での使用を目的として開発さ

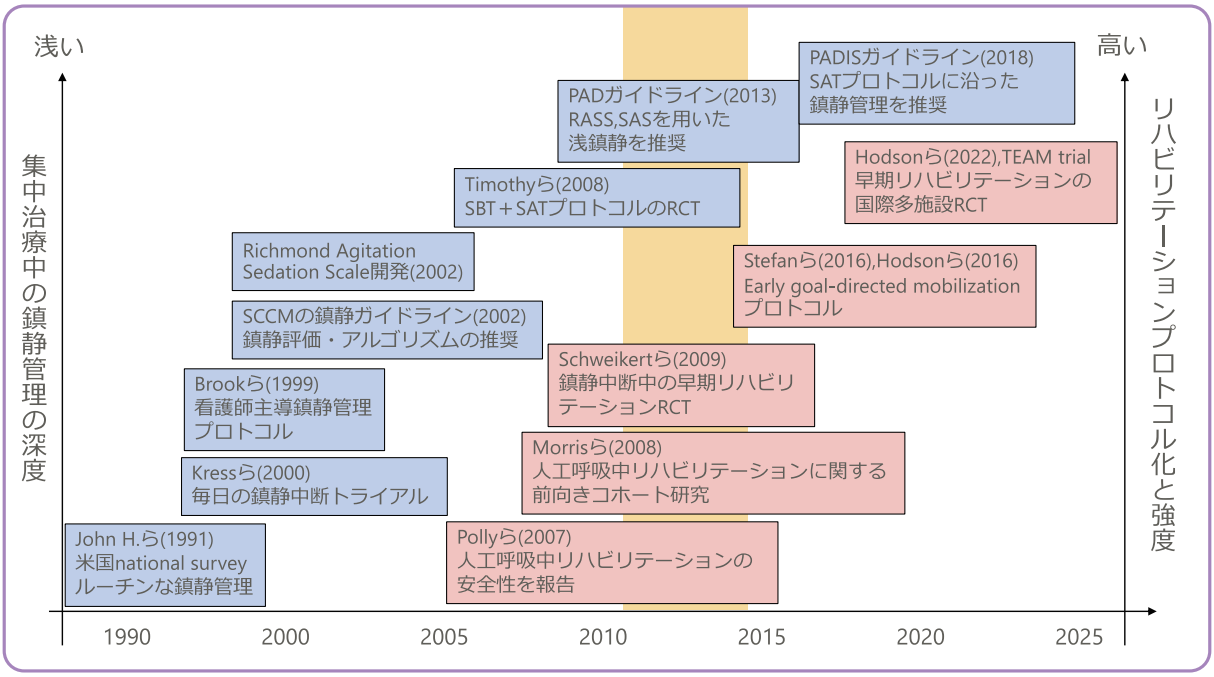


図 1　鎮静管理とリハビリテーションにおけるプロトコル化の進展

SCCM=Society of Critical Care Medicine, SBT=Spontaneous Breathing Trial, SAT=Spontaneous Awakening Trial, RCT=randomized controlled trial, RASS=Richmond Agitation–Sedation Scale, SAS=Sedation Agitation Scale

漫然と行われていた鎮静管理は 2000 年代から浅鎮静、プロトコル運用が注目され、2018 年にはプロトコルに沿った浅鎮静管理が推奨された。それに続き、2007 年頃から人工呼吸中のリハビリテーションに関する報告が増え、国際的な大規模ランダム化比較試験の実施に至った。図中に黄色で示す年代には、現在 ICU で使用されている身体機能評価尺度が相次いで開発された。

れた評価尺度は、Functional Status Score for the ICU（FSS-ICU）[21, 22]、Physical Function in Intensive Care Test-scored（PFIT-s）[23]、Chelsea Critical Care Physical Assessment tool（CPAx）[24]、Perme Intensive Care Unit Mobility Score（PMS）[25]、Surgical ICU Optimal Mobilization Score（SOMS）[26]、ICU Mobility Scale（IMS）[27] の6種類である。各評価尺度の特徴について表に示す（**表2**）。

その中で最も歴史が古いのは PFIT-s の前身である PFIT であり、2009年に開発された。PFIT-s は PFIT をスコア化できるように改変した尺度であり、ICU-acquired weakness（ICU-AW）の診断基準として用いられる Medical Research Council（MRC）sum score[28] との高い相関が報告されている。一方で、起立動作や足踏みができない症例では評価が困難である点が課題とされている。

次いで開発された FSS-ICU は、2010年に Zanni ら[21] によって初めて報告された ICU 特異的身体機能評価尺度である。寝返り、起き上がり、座位保持、立ち上がり、歩行の5項目について、それぞれの自立度を0〜7点の8段階で評価する尺度であり、幅広い重症度の症例に適用可能である。これらの評価尺度は、主として内科系 ICU 患者を対象に使用されてきたことから、外科系 ICU 患者の評価を目的として2012年に SOMS が開発された。SOMS は外科系 ICU 患者を対象に、0〜4の段階評価と、次の段階へ進むためのアルゴリズムを備えている。

しかし、PFIT-s、FSS-ICU、SOMS はいずれも ICU 患者特有の人工呼吸管理、補助循環装置、各種ライン類といったデバイスの影響を評価項目に反映していない。その点を補完するように、2012年に CPAx、2014年には PMS が開発された。CPAx は呼吸機能や咳嗽力の評価を含む点が特徴であり、PMS は覚醒度や離床を阻害する要因まで評価項目に含めている点に強みがある。一方で、評価項目数が多く、評価が煩雑であることから、多職種による日常的なベッドサイド評価には適さない側面もある。

こうした背景を踏まえ、Hodgson らは多職種が簡便かつ迅速に評価可能な尺度として、2014年に IMS を開発した。IMS は患者の最大移動能力を0〜10の11段階で評価する尺度であり、日々の離床到達度を把握する指標として有用である。

これらの評価尺度のうち、リハビリテーションプロトコルの基盤として広く活用されているのは IMS と SOMS である。いずれも最大移動能力を簡便に評価できることから、課題指向型リハビリテーションプロトコルの段階指標として用いられている[17, 18]。

評価尺度間の比較研究としては、2015年に Parry らが PFIT-s を基準として IMS および FSS-ICU の臨床測定学的特性を検討している[29]。その結果、IMS では患者覚醒時において16.7% の床効果を認めたのに対し、FSS-ICU の床効果は3.0% であった。すなわち、離床到達度が低い症例では、FSS-ICU の方が鋭敏に機能差を捉えられる可能性がある。

2016年には Huang ら[22] が FSS-ICU の臨床測定学的

表 2　ICU で利用される身体機能的評価尺度の特徴と利点

名称	評価項目	特徴
FSS-ICU	基本動作 5 項目の自立度	利点：自立度の評価が可能 床効果が少ない 欠点：評価項目が ADL に限定的
PFIT-s	上肢筋力 立ち上がり ステップ数	利点：筋力が反映されやすい 欠点：立位が取れない場合評価が困難
CPAx	呼吸機能、咳嗽、動作能力、握力	利点：呼吸機能や咳嗽力を評価に含む 欠点：項目が多く煩雑である
PMS	精神状態、筋力、離床の障壁、動作能力	利点：精神状態や離床の障壁を評価に含む 欠点：項目が多く煩雑である
SOMS	5 段階の離床段階と安全基準	利点：外科系 ICU 患者を対象としている 簡便でわかりやすい 欠点：離床到達度以外を反映できない
IMS	11 段階の最大移動能力	利点：多職種が簡便・迅速に評価可能 欠点：離床到達度以外を反映できない 低離床強度は細分化できない

FSS-ICU= Functional Status Score for the ICU, PIFT-s= Physical Function in Intensive Care Test-scored, CPAx= Chelsea Critical Care Physical Assessment tool, PMS= Perme Intensive Care Unit Mobility Score, SOMS= Surgical ICU Optimal Mobilization Score, IMS= ICU Mobility Scale, MRC sum score= Medical Research Council sum score

特性について、ICU 成人患者819例の国際データセットを用いて検討し、最小臨床重要差（minimal clinically important difference：MCID）が2.0〜5.0点であることを示した。さらに同研究において、FSS-ICU は高い内部一貫性、構成妥当性および予測的妥当性を有することが確認されている。

現状のリハビリテーションプロトコルの課題

2023年に発表された大規模ランダム化比較試験[19]において、IMS を基盤とした Step-Down プロトコルは、ICU 患者の転帰を有意に改善せず、むしろ不整脈などの有害事象が増加することが報告された。本研究の特徴は、対象者が実施可能な最高到達度からリハビリテーションを開始し、疲労の出現に応じて離床強度を段階的に低下させていく Step-Down プロトコルを採用している点にある。この結果により、早期から高強度のリハビリテーションを一律に実施することには一定の限界があることが示唆された。一方で、これまでに報告されてきた多くの研究では、離床強度を段階的に高めていく Step-Up プロトコルが採用され、安全性と有効性が示されている[17, 18]。これらの知見を踏まえると、現時点では Step-Up プロトコルに基づいた段階的なリハビリテーションの実施が望ましいと考えられる。

離床プロトコルにおいて頻用されている IMS は、多職種が共通認識を持ちやすく、簡便かつ迅速に評価できるという利点がある一方で、離床到達度が低い症例を十分に細分化できないという課題がある。前述の大規模ランダム化比較試験において実施されたリハビリテーション内容の約50％が IMS 0〜2の範囲にとどまっていたこと、IMS の開発論文[27]においても、100例の IMS の中央値が1［IQR 0-1］であったことから、ICU リハビリテーションの実際の多くはベッド上での介入が中心であると考えられる。このようにベッド上介入が大きな割合を占める ICU リハビリテーションにおいて、ベッド上での自立度や微細な機能変化を捉えにくい IMS を基盤としてプロトコルを構築することには、一定の限界がある可能性が示唆される。特に IMS 0〜2に該当する離床到達度の低い期間は、IMS 上ではスコアの変化が生じにくい。

この点に関連して、多施設前向き研究の二次解析[30]では、重症度が高く ICU 滞在期間が長い患者ほど、離床の進行は遅延する一方で、ICU 内におけるリハビリテーション介入時間は長く、最終的には退院時の ADL が回復することが示されている。この結果は、離床が進まない期間においても、リハビリテーション介入を継続すること自体が機能回復に寄与する可能性を示唆している。このような、離床は進まないが、リハビリテーションを実施している期間は、IMS のみを指標としたプロトコルでは機能的変化が可視化されにくい。そのため、ベッド上動作を含む身体機能の変化を評価可能な FSS-ICU を活用することで、低レベル段階における機能回復の過程をより適切に評価できる可能性がある。今後は、離床到達度のみならず、離床に至るまでの機能的変化を評価に組み込んだリハビリテーションプロトコルの構築が求められる。

ま と め

ICU におけるリハビリテーションのプロトコル化は、鎮静管理のプロトコル化を基盤とし、日常診療の標準的ケアとしてその役割を拡大する過程で広まってきた。現在まで IMS を基盤とした段階的なリハビリテーションプロトコルが発展してきたが、ベッド上介入の期間における機能変化は捉えにくいという課題がある。この課題を克服し、より適したプロトコルへと発展していくためには、FSS-ICU など他の機能評価も組み込んだ、対象者の変化を鋭敏に捉えるリハビリテーションプロトコルの構築が必要である。

倫理的配慮

本論説は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本論説における利益相反は存在しない。

参考文献

1） Zimmerman JE, Kramer AA, Knaus WA: Changes in hospital mortality for United States intensive care unit admissions from 1988 to 2012. Crit Care. 2013: 17: R81.

2） Needham DM, Davidson J, Cohen H, Ramona O, Weinert C, Wunsch H, et al: Improving long-term outcomes after discharge from intensive care unit: Report from a stakeholders' conference. Critical Care Medicine. 2012: 40: 502-509.

3） Kawakami D, Fujitani S, Morimoto T, Dote H, Takita M, Takaba A, et al: Prevalence of post-intensive care syndrome among Japanese intensive care unit patients: a prospective, multicenter, observational J-PICS study. Crit Care. 2021: 25: 69.

4） Iida Y, Watanabe S, Yanagita Y, Shinohara A, Morisawa T, Obata K, et al: Hospital-Acquired Disability as a

Predictor of Functional Decline in ICU Survivors: A Multicenter Prospective Cohort Study in Japan. J Clin Med. 2025: 14: 8168.

5) Pun BT, Balas MC, Barnes-Daly MA, Thompson JL, Aldrich JM, Barr J, et al: Caring for Critically Ill Patients with the ABCDEF Bundle: Results of the ICU Liberation Collaborative in Over 15,000 Adults. Critical Care Medicine. 2019: 47: 3-14.

6) Unoki T, Hayashida K, Kawai Y, Taito S, Ando M, Iida Y, et al: Japanese Clinical Practice Guidelines for Rehabilitation in Critically Ill Patients 2023 (J-ReCIP 2023). J Intensive Care. 2023: 11: 47.

7) Bailey P, Thomsen GE, Spuhler VJ, Blair R, Jewkes J, Bezdjian L, et al: Early activity is feasible and safe in respiratory failure patients. Crit Care Med. 2007: 35: 139-145.

8) Morris PE, Goad A, Thompson C, Taylor K, Harry B, Passmore L, et al: Early intensive care unit mobility therapy in the treatment of acute respiratory failure. Crit Care Med. 2008: 36: 2238-2243.

9) Schweickert WD, Pohlman MC, Pohlman AS, Nigos C, Pawlik AJ, Esbrook CL, et al: Early physical and occupational therapy in mechanically ventilated, critically ill patients: a randomised controlled trial. Lancet. 2009: 373: 1874-1882.

10) Hansen-Flaschen JH, Brazinsky H, Basile C: Use of Sedating Drugs and Neuromuscular Blocking Agents in Patients Requiring Mechanical Ventilation for Respiratory Failure: A National Survey. JAMA. 1991: 266: 2870-2875.

11) Kress JP, Pohlman AS, O'Connor MF, Hall JB: Daily Interruption of Sedative Infusions in Critically Ill Patients Undergoing Mechanical Ventilation. N Engl J Med. 2000: 342: 1471-1477.

12) Jacobi J, Fraser GL, Coursin DB, Riker RR, Fontaine D, Wittbrodt ET, et al: Clinical practice guidelines for the sustained use of sedatives and analgesics in the critically ill adult. Crit Care Med. 2002: 30: 119-141.

13) Sessler CN, Gosnell MS, Grap MJ, Brophy GM, O'Neal PV, Keane KA, et al: The Richmond Agitation–Sedation Scale: Validity and Reliability in Adult Intensive Care Unit Patients. Am J Respir Crit Care Med. 2002: 166: 1338-1344.

14) Girard TD, Kress JP, Fuchs BD, Thomason JWW, Schweickert WD, Pun BT, et al: Efficacy and safety of a paired sedation and ventilator weaning protocol for mechanically ventilated patients in intensive care (Awakening and Breathing Controlled trial): a randomised controlled trial. Lancet. 2008: 371: 126-134.

15) Barr J, Fraser GL, Puntillo K, Ely EW, Gélinas C, Dasta JF, et al: Clinical Practice Guidelines for the Management of Pain, Agitation, and Delirium in Adult Patients in the Intensive Care Unit. Critical Care Medicine. 2013: 41: 263-306.

16) Devlin JW, Skrobik Y, Gélinas C, Needham DM, Slooter AJC, Pandharipande PP, et al: Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Management of Pain, Agitation/Sedation, Delirium, Immobility, and Sleep Disruption in Adult Patients in the ICU. Crit Care Med. 2018: 46: e825-e873.

17) Schaller SJ, Anstey M, Blobner M, Edrich T, Grabitz SD, Gradwohl-Matis I, et al: Early, goal-directed mobilization in the surgical intensive care unit: a randomized controlled trial. Lancet. 2016: 388: 1377-1388.

18) Hodgson CL, Bailey M, Bellomo R, Berney S, Buhr H, Denehy L, et al: A Binational Multicenter Pilot Feasibility Randomized Controlled Trial of Early Goal-Directed Mobilization in the ICU. Crit Care Med. 2016: 44: 1145-1152.

19) Hodgson CL, Bailey M, Bellomo R, Brickell K, Broadley T, Buhr H, et al: Early Active Mobilization during Mechanical Ventilation in the ICU. N Engl J Med. 2022: 387: 1747-1758.

20) Parry SM, Granger CL, Berney S, Jones J, Beach L, El-Ansary D, et al: Assessment of impairment and activity limitations in the critically ill: a systematic review of measurement instruments and their clinimetric properties. Intensive Care Med. 2015: 41: 744-762.

21) Zanni JM, Korupolu R, Fan E, Pradhan P, Janjua K, Palmer JB, et al: Rehabilitation therapy and outcomes in acute respiratory failure: An observational pilot project. J Crit Care. 2010: 25: 254-262.

22) Huang M, Chan KS, Zanni JM, Parry SM, Neto SCBG, Neto JAA, et al: Functional Status Score for the ICU: An International Clinimetric Analysis of Validity, Responsiveness, and Minimal Important Difference. Crit Care Med. 2016: 44: e1155-e1164.

23) Denehy L, de Morton NA, Skinner EH, Edbrooke L, Haines K, Warrillow S, et al: A Physical Function Test for Use in the Intensive Care Unit: Validity, Responsiveness, and Predictive Utility of the Physical Function ICU Test (Scored). Phys Ther. 2013: 93: 1636-1645.

24）Corner EJ, Wood H, Englebretsen C, Thomas A, Grant RL, Nikoletou D, et al: The Chelsea Critical Care Physical Assessment Tool (CPAx): validation of an innovative new tool to measure physical morbidity in the general adult critical care population; an observational proof-of-concept pilot study. Physiotherapy. 2013: 99: 33-41.
25）Perme C, Nawa RK, Winkelman C, Masud F: A Tool to Assess Mobility Status in Critically Ill Patients: The Perme Intensive Care Unit Mobility Score. Methodist Debakey Cardiovasc J. 2014: 10: 41-49.
26）Kasotakis G, Schmidt U, Perry D, Grosse-Sundrup M, Benjamin J, Ryan C, et al: The surgical intensive care unit optimal mobility score predicts mortality and length of stay. Crit Care Med. 2012: 40: 1122-1128.
27）Hodgson C, Needham D, Haines K, Bailey M, Ward A, Harrold M, et al: Feasibility and inter-rater reliability of the ICU Mobility Scale. Heart Lung. 2014: 43: 19-24.
28）Kleyweg RP, Van Der Meché FGA, Schmitz PIM: Interobserver agreement in the assessment of muscle strength and functional abilities in Guillain – Barré syndrome. Muscle Nerve. 1991: 14: 1103-1109.
29）Parry SM, Denehy L, Beach LJ, Berney S, Williamson HC, Granger CL: Functional outcomes in ICU – what should we be using? - an observational study. Crit Care. 2015: 19: 127.
30）Yanagita Y, Iida Y, Watanabe S, Morisawa T, Kawai Y, Kozu R, et al: Impact of ICU Length of Stay and Illness Severity on Rehabilitation Progress and Functional Recovery: A Secondary Analysis of the Japanese Rehabilitation and Risk Factors on the Post-Intensive Care Syndrome (J-RELIFE) Prospective Registry. Crit Care Explor. 2025: 7: e1334.

Abstract

Protocolized ICU rehabilitation: Historical development and current challenges

Yuya Yanagisawa[1, 2)], Kanji Yamada[3)], Kotaro Iwatsu[3)], Tetsuya Takahashi[3)]

[1)] Department of Rehabilitation, Nihon University Hospital
[2)] Graduate School of Health Science, Juntendo University
[3)] Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Post-intensive care syndrome (PICS) is increasingly recognized among patients who survive and are discharged from the intensive care unit (ICU). Preventing PICS requires comprehensive management, in which rehabilitation is a central component. Protocol-based management has been widely adopted in the ICU for sedation and other aspects of care; similarly, rehabilitation is recommended to follow structured protocols. However, the optimal structure and content of ICU rehabilitation protocols remain incompletely defined.

Various tools are currently used to evaluate physical function in the ICU. Among them, the ICU Mobility Scale (IMS) is the most widely used stepwise indicator within rehabilitation protocols. IMS can be administered rapidly and easily by multidisciplinary teams, which facilitates routine clinical use. However, it demonstrates a floor effect in patients with severe mobility limitations. Because most ICU rehabilitation activities occur in bed, protocols that rely exclusively on IMS have inherent limitations.

Further refinement of ICU rehabilitation protocols requires integration of additional assessment tools with less floor effect. One such measure is the Functional Status Score for the ICU.

Key Words: ICU, rehabilitation protocol, early mobilization, ICU Mobility Scale, Functional Status Score for the ICU

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 113-118, 2026]

実践報告

順天堂大学保健医療学部第5回国際シンポジウム — Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships の開催報告 —

宮 森 隆 行

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

2025年5月31日、順天堂大学小川秀興講堂において、順天堂大学保健医療学部第5回国際シンポジウム「Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships」をハイブリッド形式で開催した。参加者は、オンサイト329名、ウェビナー 37名の計366名であった。本シンポジウムは、保健医療学部学生、大学院生、教員、卒業生を対象に、海外における資格制度、ライセンス互換性、研究留学および国際共同研究への理解を深め、国際的視野を備えた保健医療人材の育成を目的として企画した。午前は診療放射線学科、午後は理学療法学科を中心に特別講演を行い、その後、研究発表・討議、病院見学、懇親会を実施した。本シンポジウムは、海外就業や研究活動を具体的に考えるための学修機会を提供し、参加者の国際志向の醸成に寄与する実践であった。

キーワード：国際シンポジウム、国際交流、保健医療教育、海外就業、研究留学

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，119-122頁，2026年（受付　2026.3.30.；受理　2026.4.8.）

緒言（背景と目的）

近年、保健医療専門職には、高度な専門知識・技術に加え、国際的視野、多様な文化・制度への理解、ならびにグローバルな教育研究活動に参画する能力が求められている。とりわけ、診療放射線技師や理学療法士などの保健医療職では、各国における資格制度、登録要件、教育課程、専門分化のあり方が異なるため、海外での就業や研究活動を視野に入れるうえで、制度的理解と実践的情報の双方が不可欠である。

このような背景のもと、順天堂大学保健医療学部では、学生、大学院生、教員、卒業生を対象として、第5回国際シンポジウム「Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships」を開催した。本シンポジウムは、海外における保健医療職の資格制度、登録要件、就業環境、研究留学および国際共同研究に関する理解を深めるとともに、海外で活躍する専門職者および研究者の経験を共有することで、参加者が自身のキャリア形成を中長期的視点から捉え直し、国際社会で求められる専門性、語学力、研究能力、多職種連携能力について具体的に考えることを目的として企画した。講演に加え、研究発表、討議、病院見学、懇親会を組み合わせることで、知識の獲得にとどまらない人的交流と教育研究連携の基盤形成も目指した。本稿では、本シンポジウムの実施内容と教育的意義について報告する。

1. 開催概要

2025年5月31日、順天堂大学小川秀興講堂において、順天堂大学保健医療学部第5回国際シンポジウムをハイブリッド形式で開催した。参加者は、オンサイト329名、ウェビナー 37名の計366名であった。参加対象は、保健医療学部学生、大学院保健医療学研究科生、教員、学部卒業生などであった（図1）。

当日のプログラムは、開会の辞、順天堂大学保健医療学部の紹介、特別講演、学科別企画、懇親会で構成された。前半の部では診療放射線学科関連企画として、Professor Jenny Sim および Ms Li Hoon Sng による特別講演を実施した（図2）。後半の部では理学療法学科関連企画として、Professor Anthony Schneiders および Dr I Putu Gde Surya Adhitya による特別講演を実施した。講演後には、診療放射線学科で大学院生等による研究発表と討議を行い、理学療法学科では順天堂医院の見学を実施した（図3）。最後に有山登メモリアルホー

責任著者：宮森隆行
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12 御茶ノ水センタービル
E-mail: t.miyamori.hi@juntendo.ac.jp



図 1　参加者（代田学長・藤原保健医療学部長・海外演者含む）で記念撮影



図 2　Ms Li Hoon Sng の講演

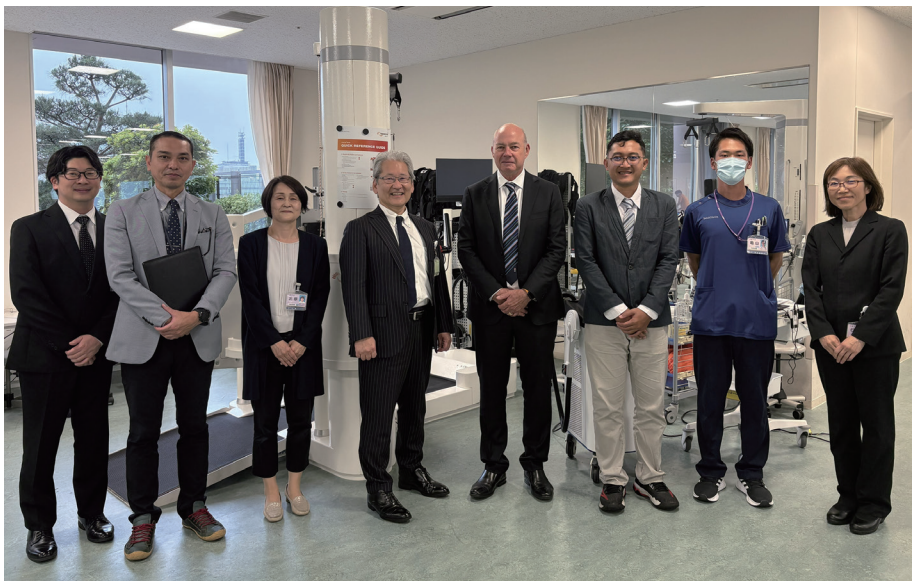


図 3　順天堂医院リハビリテーション室の見学

ルにて懇親会を開催し、海外演者、学生、教員、卒業生の交流を深めた。

2. 講演内容の概要

1）診療放射線学科関連講演

Professor Jenny Sim の講演「The ABC of working abroad: Licensing, culture, personal and professional growth」では、海外で働く意義が、個人生活、専門職としての成長、技術革新、文化的適応の観点から整理された。あわせて、日本とオーストラリア、ニュージーランド等における放射線関連専門職の教育制度や役割分担の相違が示され、海外就業には語学力のみならず、資格制度や職務範囲の違いへの理解が重要であることが示された。

Ms Li Hoon Sng の講演「Navigating International Careers: A Singapore Perspective for Japanese Radiological Technologists」では、シンガポールの医療制度および診療放射線技師登録制度の概要が紹介された。講演では、登録制度、雇用条件、英語力要件、条件付き登録から本登録に至る過程が具体的に説明された。また、多文化環境での実践、英語力向上、生活利便性などの利点が示される一方、言語的障壁、生活費、気候適応、社会文化的調整といった課題も共有された。さらに、事前に実施された海外就業意識調査の結果も提示され、学生に対する実践的情報提供の必要性が示された。

2）理学療法学科関連講演

Professor Anthony Schneiders の講演「Australian Physiotherapy Education: Potential collaborations for both students and academics between universities」では、オーストラリアにおける理学療法教育制度、専門資格制度、大学院教育の構造、ならびに学生・教員双方に対する国際交流や共同研究の可能性が紹介された。特に、学士・修士・博士課程の教育構造、臨床系学位、研究系学位、専門認定制度の違いが整理され、日本とオーストラリアの教育上の共通点と相違点が示された。加えて、学生交流、研究指導、共同研究、学術発表、MOU等を通じた組織間連携の可能性が提示され、今後の学部・大学院教育の発展を考えるうえで有益な内容であった。

Dr I Putu Gde Surya Adhitya の講演では、理学療法士としての臨床経験を基盤としながら、修士課程、博士課程への進学を経て、研究活動、国際学会発表、論文発表、教育活動へと発展していったキャリア形成の実例が紹介された。臨床実践と研究、教育を連続的に捉える視点は、大学院進学や研究活動を志向する学生・若手医療者に対し、具体的なロールモデルを提示するものであった。

3. 講演後企画および交流の実際

講演後、診療放射線学科では大学院生等による研究発表と討議を行った。講演で得られた国際的視点を踏まえ、参加者が自身の研究活動や今後の学術的展望を考察する場となった。一方、理学療法学科では順天堂医院の見学を実施し、海外演者に本学の臨床・教育環境を紹介するとともに、参加者にとっても日常の学びを国際交流の文脈で捉え直す契機となった。

懇親会では、講演内容に関する質疑の継続に加え、留学や共同研究に関する個別相談、学生と教員、卒業生、海外演者との交流が行われた。これにより、本シンポジウムは講演聴講型の行事にとどまらず、知識共有と人的交流を組み合わせた複合的学修の場として機能した。

4. 本シンポジウムの教育的意義

本シンポジウムの意義は、第一に、海外における資格制度、登録要件、教育制度、研究環境に関する具体的情報を、異なる専門分野から体系的に提示した点にある。保健医療職の国際的キャリア形成は、関心があっても十分な情報が得られず、具体化しにくい側面がある。本シンポジウムでは、海外で活動する演者の実践経験を通じて、その実像が多面的に示された。

第二に、講演内容が海外就業にとどまらず、大学院進学、研究留学、国際共同研究、教育研究連携にまで及んでいた点である。これにより、参加者は自身の将来像を単一の進路ではなく、多面的な可能性として捉えることができた。診療放射線学科関連講演では、国際的な資格制度や英語要件、職務範囲の違いが具体的に提示され、理学療法学科関連講演では、大学院教育、研究活動、国際連携、専門職キャリア形成の実際が共有された。こうした内容は、参加者が自らの専門分野に即して国際的発展可能性を考えるうえで有用であった。

第三に、学科横断的に企画された点も重要である。診療放射線学科と理学療法学科の双方が参加することで、保健医療分野における国際交流の多様な形態が共有され、学部横断的視野の拡大につながった。加えて、研究発表、討議、病院見学、懇親会を組み合わせたことで、講演内容の理解を深めるとともに、参加者相互および海外演者との交流を通じた学修の広がりが得られた。

5. 今後の課題

本シンポジウムの成果をより明確に示すためには、参加者の満足度、国際志向の変化、学修成果を定量的または定性的に評価する仕組みの導入が必要である。シンポジウム全体としては、参加前後の認識変化や学修成果を検証する指標は十分に整備されていなかった。今後は、参加後アンケート、自由記述の分析、将来的な留学・研究活動への参加状況の把握などを通じて、教育実践としての有効性をより明確に示す必要がある。

また、単発の講演会として終えるのではなく、短期交流、研究指導、共同研究、大学院進学支援、学術交流協定の具体化など、継続的取り組みへ接続することが重要である。あわせて、ハイブリッド形式の利点を活かしつつ、オンサイトとウェビナー参加者の双方にとって学修価値の高い運営方法を検討する必要がある。

6. 結語

順天堂大学保健医療学部第5回国際シンポジウム「Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships」は、海外での就業、資格制度、研究留学、国際共同研究に関する理解を深める教育実践として実施された。オンサイト329名、ウェビナー 37名、計366名の参加を得て、多職種的かつ国際的視点から保健医療専門職のキャリア形成を考える場を提供した点に意義があった。今後は、本シンポジウムを継続的な国際教育・研究連携へと発展させ、その教育的成果を可視化していくことが求められる。

謝　辞

第5回順天堂大学保健医療学部国際シンポジウムにご登壇いただいた演者の先生方ならびにご参加いただいた皆様に深謝する。

倫理的配慮

本報告は国際シンポジウムの開催内容を記述したものであり、人間または動物を対象とした介入研究は含まれていない。

利益相反

本報告に関連し、開示すべき利益相反はない。

Abstract

Report on the 5th International Symposium of the Faculty of Health Science at Juntendo University: Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships

Takayuki Miyamori

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

On May 31, 2025, the 5th International Symposium of the Faculty of Health Science at Juntendo University, entitled Working in Global Environment: International Qualifications, Licensing Compatibility, and Research Fellowships, was held in a hybrid format at Ogawa Hideoki Memorial Hall, Juntendo University. A total of 366 individuals participated, including 329 onsite attendees and 37 webinar participants. The symposium was designed for undergraduate students, graduate students, faculty members, and alumni of the Faculty of Health Science, with the aim of deepening understanding of international qualification systems, licensing compatibility, research fellowships, and international collaborative research, thereby fostering healthcare professionals with a global perspective. Special lectures were delivered in the morning session primarily by speakers from the Department of Radiological Sciences and in the afternoon session by speakers from the Department of Physical Therapy. These sessions were followed by research presentations and discussions, a hospital tour, and a networking reception. The symposium provided participants with a structured opportunity to consider overseas employment and research activities in concrete terms and served as an educational initiative to promote international perspectives in health professions education.

Key Words: international symposium, global engagement, health professions education, overseas employment, research fellowships

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 119-122, 2026]

The ABC of working abroad: licensing, culture, personal and professional growth

Jenny Sim

Professor and Head of Department of Medical Imaging and Radiation Sciences,
Faculty of Medicine, Nursing and Health Sciences, Monash University, Australia

There is a widely held notion that the world is shrinking and getting smaller as we stay connected with our friends and international peers via social media. Distance is no longer an issue as we are able to reach far flung destinations via air travel. Despite the ease of physical travel and the convenience of staying connected with our friends and families overseas, there remain significant challenges for radiological technologists who wish to work overseas. Different licensing requirements, language and cultural competencies present formidable challenges for healthcare practitioners including radiological technologists aspiring to work overseas.

This presentation provides an overview of the different education qualifications and licensing requirements for radiological technologists globally. Using Australia and New Zealand as examples, the licensing requirements, registration and workplace settings will be considered. Working overseas has its perks. Together, we will explore the benefits of working overseas, cultural enrichment, networking opportunities, personal and professional growth. Ultimately, our patients will benefit from our learning and make the overseas adventure a worthwhile experience.

Navigating international careers: A Singapore perspective for Japanese radiological technologists

Li Hoon Sng

Senior Principal Radiographer at Sengkang General Hospital

Working in a foreign healthcare system can be a daunting prospect, often deterring healthcare professionals from pursuing overseas opportunities. A 2025 survey of 164 Japanese participants, including practicing radiographers, undergraduate and graduate students, revealed interesting insights into their perspectives on international careers.

While fourth-year undergraduates showed the highest interest in overseas work, preferences for developed regions like Oceania, Europe, and North America were consistent across all groups. Key motivators included gaining unique clinical experience (76.8%), improving language skills (72.6%), and personal growth (64.6%). However, language barriers (75.6%) and differences in licensing systems (50.0%) emerged as significant concerns.

This presentation will address these concerns by outlining the professional pathway for radiographers in Singapore, including licensing requirements, registration processes, and educational framework. With English as the primary language and a well-established healthcare system, Singapore offers valuable opportunities for Japanese radiographers considering international practice. The presentation will conclude by examining common challenges faced by non-local radiographers in Singapore, providing practical insights for potential international career development.

Australian physiotherapy education and the potential collaborations for both students and academics between the universities

Anthony G. Schneiders

Professor and Head of College for Health Sciences, School of Health, Medical & Applied Sciences,
Central Queensland University, Australia

Australian Physiotherapy (Physical Therapy) is taught in 31 universities with 56 programs across Australia with credentials ranging from a Bachelor's degree to Bachelor (Honours), Masters and Doctorate entry level programs. As such training in physiotherapy is between 4-6 years full-time. Postgraduate research programs are available at Masters and Doctorate level and there are postgraduate clinical programs which may lead to the achievement of "Titling" and "Specialisation" through the Australian Physiotherapy Association (APA) and Australian College of Physiotherapists (ACP) respectively. A Titling credential is awarded to a physiotherapist who has met requirements of a formalised teaching and assessment process to demonstrate their highly developed physiotherapy experience and knowledge in a field of practice in the one or more of the following areas: Animal, Cardiorespiratory, Gerontological, Musculoskeletal, Neurological, Paediatric, Pain, Research, Sports and Exercise, Women's & Men's Pelvic Health and Occupational Health. Specialist Physiotherapist is awarded by the Australian College of Physiotherapists (ACP) to physiotherapists who have attained the highest level of clinical expertise in their chosen field of physiotherapy by successfully fulfilling all requirements of the Specialisation Training Program (STP) in their chosen field of physiotherapy including most Titled areas.

Juntendo University is a prestigious university in Tokyo and the first in Japan to embrace western medical teaching. The university was established in 1946, although it can find its roots in a medical school and hospital founded in 1838. As such Juntendo University is the oldest institution of medical education in Japan and draws on seminal anatomy teachings from the "Kaitai Shinsho" published in Japan in 1774. Juntendo University has specific strengths in both Medicine and "Sportology", a new research area that integrates multiple fields centering around medicine and sports science. Juntendo teaches a Master of Science (MS) program in Physical Therapy.

Juntendo currently has partnerships in Oceania with Western Sydney University in Australia and the University of Otago in New Zealand and Central Queensland University (CQUniversity) currently has partnerships in Japan with four universities and new partnerships are always possible and welcomed. CQUniversity currently offers medical training in partnership with the University of Queensland and has a Bachelor of Medical Imaging program leading to registration as a diagnostic radiographer.

This presentation will further outline Physiotherapy education focusing on the parallels between Japanese and Australian Physical Therapy programs and offer insight into closer partnerships, alliances and collaboration between university academics and students.

From patient care to knowledge creation: My journey as a physiotherapist

I Putu Gde Surya Adhitya

Department of Physical Therapy, College of Medicine, Universitas Udayana, Indonesia

Building upon a foundation of direct patient care within the dynamic environments of Bali United Football Club and private clinics in Denpasar, my professional journey as a physiotherapist has evolved into a multifaceted pursuit encompassing research, education, and scholarly leadership. The initial years (2015-2017) were marked by an intensive engagement with the immediate rehabilitation needs of athletes and the diverse musculoskeletal challenges of clinic patients, providing a rich tapestry of practical knowledge that continues to inform my academic endeavors. This hands-on experience, coupled with a Master's degree in Sport Physiology (2015-2017), laid the groundwork for a deeper exploration into the scientific underpinnings of injury and recovery.

My doctoral studies at Taipei Medical University (2018-2021) represented a pivotal shift towards rigorous research, culminating in a dissertation focused on the critical area of lower extremity injury prevention and treatment in sports. This immersive research experience has been instrumental in shaping my subsequent scholarly contributions, evidenced by peer-reviewed publications in leading international journals. These works delve into specific aspects of sports medicine, including the efficacy of novel training methodologies like blood flow restriction, predictors of functional recovery following ACL reconstruction, and the identification of risk factors associated with reinjury. My ongoing commitment to research is further underscored by numerous presentations at international conferences, sharing insights on topics ranging from biomechanical analyses of rare injuries to the effectiveness of therapeutic interventions.

Since joining Universitas Udayana as a lecturer in 2016, I have been privileged to mentor and inspire future physiotherapists, bridging the gap between theoretical knowledge and practical application through the lens of my clinical and research experiences. This role allows me to synthesize my diverse experiences, fostering critical thinking and evidence-based practice among students. Furthermore, my appointment as Editor-in-Chief of the Physical Therapy Journal of Indonesia since 2020 reflects a dedication to advancing the scholarly discourse within the national physiotherapy community. By facilitating the publication of high-quality research, I aim to contribute to the growth and recognition of Indonesian physiotherapy on a global scale. My journey, therefore, is a testament to the synergistic relationship between clinical expertise, rigorous scientific inquiry, and a commitment to shaping the future of physiotherapy education and practice.

Keywords: ACL rehabilitation, clinical practice, knowledge creation, physiotherapy journey, sports injuries

Report

A collaborative online international learning (COIL) initiative for students of radiological technology: Practice report on the Radiographer Asia-Pacific Youth Symposium

Yuh Morimoto[1)], Cheryl Pei Ling Lian[2)], Christopher Lai[3)], Jacky Wong[4)], Keisuke Usui[1)]

[1)] Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University
[2)] Diagnostic Radiography and Radiation Therapy Programme, Health and Social Sciences Cluster, Singapore Institute of Technology
[3)] Medical Imaging Programme, School of Medical and Health Sciences, Tung Wah College
[4)] Radiation Therapy Programme, School of Medical and Health Sciences, Tung Wah College

Abstract

This practice report describes the design and implementation of the Radiographer Asia-Pacific Youth Symposium (RAYS), a collaborative online international learning initiative involving students from Japan, Singapore, and Hong Kong in the field of radiological technology. The symposium provided opportunities for cross-cultural exchange and collaborative learning. Post-event survey results indicated high student satisfaction, highlighting the educational potential of high efficiency, collaborative international initiatives in this field.

Key Words: collaborative online international learning, internationalization of higher education, RAYS

Juntendo Health Science Journal 7(1): 127-131, 2026（Received Feb. 13. 2026；Accepted Apr. 8. 2026）

Introduction

With the ongoing globalization of healthcare, medical professionals are increasingly required to provide culturally informed care to patients from diverse backgrounds and to collaborate effectively with colleagues across cultures. In response, higher education institutions are expected to provide international learning opportunities that broaden students' global perspectives.

Collaborative online international learning (COIL) and virtual exchange have been increasingly recognized as accessible and scalable alternatives to mobility-based internationalization[1)]. Compared to travel-based programs, online initiatives offer substantially lower costs, remove barriers related to travel logistics, and are less affected by differences in academic calendars across countries[2)]. These advantages make COIL well-suited particularly for health professions programs, where clinical schedules limit student availability for extended overseas programs.

This practical report is a descriptive account of a single educational initiative. The report describes the design, implementation, and outcomes of an online international symposium aimed at undergraduate and postgraduate students in radiological technology.

Overview of the symposium

In August 2025, RAYS was held online, jointly organized by Juntendo University (Japan), the Singapore Institute of Technology (Singapore), and Tung Wah College (Hong Kong). The symposium brought together students studying in the field of radiological technology from the Asia-Pacific region to engage in academic exchange and intercultural collaboration using English as a common language.

The primary aim of RAYS was to provide students with opportunities to interact with peers studying in the same discipline in other countries. Furthermore, empowering young radiographers with leadership and

Corresponding author: Yuh Morimoto
Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University
2-1-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-8421
E-mail: babau@juntendo.ac.jp

collaboration skills, promoting knowledge exchange to enhance learning and innovation in imaging sciences and radiotherapy, and creating networking opportunities for professional development within the region were determined as the symposium objectives.

Design and implementation

The symposium was structured around a shared theme, "Cancer Patients' Journey." Participants were divided into international groups of five to six students, each assigned a subtheme: Patient-Oriented Approaches, Cancer Diagnosis and Healthcare Systems, and Cancer Treatment (three groups). Prior to the event, students registered via Google Forms (Google LLC, USA), an online form, and indicated their preferred subthemes. While efforts were made to respect these preferences, priority was given to forming diverse groups from all three institutions. Over a one-week preparation period, groups collaborated independently to develop presentation slides. After group formation, the preparation of the presentations was driven by the students, with opportunities to consult faculty available. A dedicated Padlet page (Padlet, USA and Singapore) was created for this symposium and served as a shared workspace where students posted self-introductions, exchanged contact information for further communication, and submitted their final presentation slides after the event. Students communicated within their groups via platforms of their choice, such as WhatsApp or LINE. Faculty did not direct the content or process of group work; this intentional design choice aimed to promote student agency and leadership. Table 1 demonstrates the overview of the timeline and event program, and Figure 1 illustrates the group structure and the types of information participants shared in the Padlet platform.

The presentation

On the event day, each group delivered a 15-minute presentation. The symposium was facilitated by Dr.

Table 1 Overview of the Radiographer Asia-Pacific Youth Symposium (RAYS)

Theme and sub-theme	
Shared theme	Cancer Patients' Journey
Group A	Patient-Oriented Approaches
Group B	Cancer Diagnosis and Healthcare Systems
Group C	Cancer Treatment 1
Group D	Cancer Treatment 2
Group E	Cancer Treatment 3
Schedule overview (2025)	
3 July - 7 August	Registration period
17 August	Group announcement
18–24 August	Collaborate online with your group.
25 August	Online presentation
Timetable on 25 August, 2025[1]	
14:00 – 14:05	Opening remarks & welcome
14:05 – 14:15	Icebreaker & best Zoom background voting
14:15 – 14:45	Student group presentations (Groups A, B)
14:45 – 15:00	Health sciences trivia quiz
15:00 – 15:45	Student group presentations (Groups C, D, E)
15:45 – 16:00	The Health Sciences Trivia Quiz Awards & closing reflections
16:00 – 16:10	Post-event survey
Number of Participants	
Juntendo University	4
SIT[2]	5
TWC[3] (Radiography)	6
TWC[3] (Radiation Therapy)	14

[1] The time zone shown in the table is UTC+8 (SGT/HKT). For UTC+9 (JST), add 1 hour to the times shown.
[2] Singapore Institute of Technology, [3] Tung Wah College

Cheryl Lian and was held over approximately two and a half hours. Interactive activities, such as a "best Zoom background vote" and a "health sciences trivia quiz", were also incorporated as icebreakers to foster a relaxed atmosphere (Fig. 1). The participant with the most correct answers in the trivia quiz was announced as the award recipient at the end of the event. No formal assessment of student presentations was conducted.

Outcomes and reflections

A post-event survey conducted at the end of the symposium using ClassPoint (ClassPoint, Presenter Media Inc., USA), indicated positive student perceptions. A short-answer format comprised three open-ended questions: (1) How would you rate the length of the symposium? (2) What aspects did you find most valuable or effective? (3) What could be improved for future online seminars? The survey received 30 responses from students and faculty, including cases where individuals submitted responses separately for each question. The majority of respondents evaluated the length of the symposium as "just right" or "appropriate", however, a few suggested keeping it under two hours. Responses indicated that the most valuable aspect of the symposium was interaction and collaboration with students from different countries with different background and cultures. Interactive components, such as trivia quizzes, multiple-choice questions, and Q&A sessions, were highly valued for creating an engaging and relaxed learning environment. Suggestions for improvement included extending the preparation period beyond a week for group presentations to allow deeper collaboration amongst group members. Others recommended incorporating more time for discussion, particularly to encourage greater student participation during Q&A sessions. Additional suggestions included facilitating relationship building through self-introductions, increasing cultural exchange components, balancing the number of participants from each country in one group, and involving more institutions in future iterations. Furthermore, sharing insights from experts and professionals was also recommended (Table 2).

Future perspectives

RAYS demonstrated strong potential as a high efficiency, scalable internationalization initiative that higher education institutions can implement collaboratively. The symposium format was especially beneficial

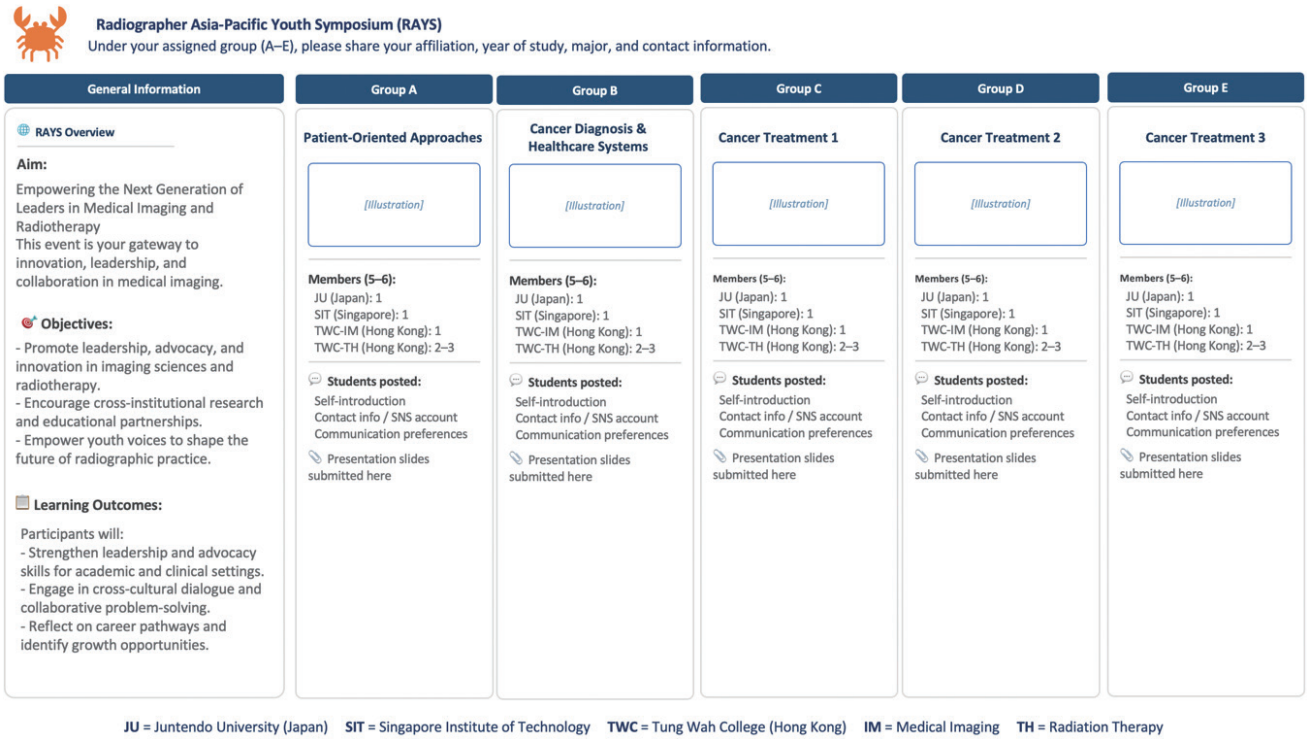


Fig.1 Overview of the RAYS Padlet Workspace. Each group column served as a shared space for self-introductions, contact information, and presentation slide submissions.

Table 2 Summary of participants' responses

Q1. Symposium length
The symposium length was generally perceived as appropriate or "just right."
A small number of respondents suggested a slightly shorter total time.
Q2. Most valuable or effective aspects
Interaction and collaboration with students from different countries.
Opportunities to learn about differences in healthcare systems and radiography practices across regions.
Interactive elements such as quizzes, multiple choice questions, and Q&A sessions that enhanced engagement.
Q3. Suggestions for improvement
Extending the preparation period for group presentations.
Increasing opportunities for discussion and student participation.
Introducing structured self-introduction sessions to facilitate networking.
Expanding cultural exchange components.
Involving more institutions in future symposiums.
Balancing the number of participants from each country in one group
Incorporating a session for experts or professionals to share their insights and perspectives.
Several respondents reported no specific areas for improvement, indicating overall satisfaction.

for Japanese students, who generally have fewer opportunities for informal English discussions compared to their counterparts in Singapore and Hong Kong. Although some Japanese students adopted fewer active roles during discussions, they reported meaningful contributions through research and content development. Finding ways to contribute to a team in an unfamiliar learning environment is itself a valuable form of learning in the context of internationalization.

Improvements proposed to address the imbalance in participant numbers across institutions in future iterations include per-institution registration caps and real-time displays of subtheme availability during registration. Pre-event outreach strategies, such as peer-to-peer promotion among previous participants, may help increase uptake from underrepresented institutions. Introducing learning outcome indicators, such as measures of intercultural competence or online collective efficacy scale[3, 4], remains a potential direction for future research beyond the scope of this practice report.

The operational workload of RAYS was manageable by using general web platforms, such as Google Forms and Padlet. The event required one to two coordinating faculty members per institution and five supporting faculty in total, as reflected in the streamlined schedule outlined in Table 1. For future iterations, a rotating faculty coordination model, where responsibility shifts among institutions, could further reduce the burden on any single institution, and would be a feasible step toward eventual student-led organization.

Conclusion

Given its simple operational framework, future iterations could be organized by students themselves, further enhancing communication, problem solving skills and leadership development. Continued implementation of RAYS is expected to strengthen its impact as an effective tool for fostering global competencies in the education of radiological technology.

Ethical approval

This article does not apply to research, defined in regulatory frameworks such as the U.S. Department of Health and Human Services regulations (45 CFR 46) as systematic investigations designed to develop or contribute to generalizable knowledge. Thus, the initiative of RAYS is outside the scope of Institutional Review Board review. Regarding the responses of the post-event survey, no personally identifiable information is reported. Representative comments have been paraphrased and summarized by the authors.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

1) O'Dowd R: From telecollaboration to virtual exchange: state-of-the-art and the role of UNI Collaboration in moving forward. J Virtual Exch. 2018: 1: 1-23.

2) Rubin J: Embedding collaborative online international learning (COIL) at higher education institutions. Internationalisation of Higher Education. 2017: 2: 28-44.

3) Genkova P, Schreiber H: Measuring intercultural competence-A review and introduction of the Cult Euro 1 test for intercultural competence. Front Psychol. 2025: 16: 1621499.

4) Glassman M, Kuznetcova I, Peri J, Kim Y: Cohesion, collaboration and the struggle of creating online learning communities: Development and validation of an online collective efficacy scale. Computers and Education Open. 2021: 2:100031.

実践報告

専門教育型短期留学（台湾）

新井雅人、岩本真透、奥田桃花、駒谷佳子、友田佳那、臼井桂介

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

2025年3月、台湾・元培医事科技大学での8日間の海外研修に参加した。独特な形式の小テストや、初めて触れる機器を使用した実習など、本学の環境とは異なる学びを得ることができた。また、現地の学生の講義・実習に対する高い積極性や、早期からのキャリア意識、各国学生たちの学会発表を目の当たりにし、自身の学習態度や将来設計を再考する機会となった。
放課後などを活用した学生間の交流では、英語でのコミュニケーションを通して親睦を深め、台湾文化への理解を広げることができた一方、自身の思いや情報を的確に伝えることの難しさも感じた。本研修での経験を活かし、国際的な視野を持つ医療人を目指していきたいと考える。研修プログラムについて、その内容と所感を報告する。

キーワード：専門教育型短期留学、学生交流

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，132-135頁，2026年（受付　2026.3.2.；受理　2026.3.4.）

1. 研修プログラムについて

2025年3月23日から3月30日の8日間、元培医事科技大学での専門教育型短期留学に参加した。本研修では、現地の放射線技術学科の学生と共に、英語および中国語による講義や実習を受講したほか、休み時間や放課後を通して、学生同士の交流を深めた。

元培医事科技大学は、台湾中部の新竹市に位置する総合大学であり、医療系学部を中心に、食品や芸術など様々な分野の学部を有している。中でも放射線技術学科は、台湾で最初に診療放射線技師を養成した歴史ある学科として知られている（図1）。

大学での研修は、平日の5日間にわたり実施された（表1）。

実技実習では、腹部一般撮影や放射線治療における患者固定具の作成、超音波検査といった、診療放射線技師が臨床現場で必要とされる実践的な内容を経験した（図2、図3）。講義では、解剖学やX線CTなどの基礎的な内容に加え、新しい放射線治療技術であるBNCT（ホウ素中性子捕捉療法）について、台湾における現状を学ぶ機会があった。

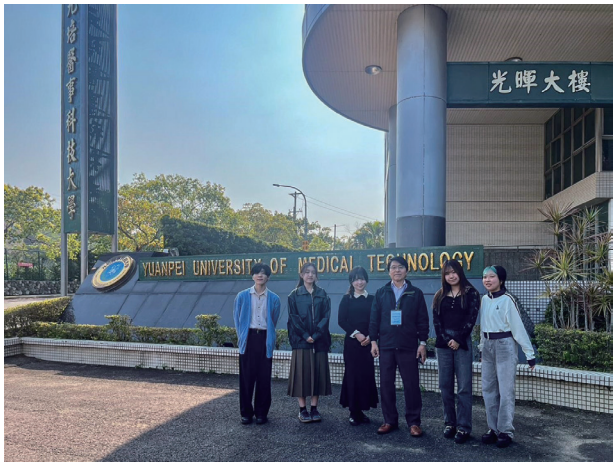


図１　元培医事科技大学 キャンパス入口

表１　研修スケジュール

Date/Time	March 23 (Sun)	March 24 (Mon)	March 25 (Tue)	March 26 (Wed)	March 27 (Thurs)	March 28 (Fri)	March 29 (Sat)	March 30 (Sun)
09:10-10:00	Arrival	Special Radiology Technology (Grade 3)	Ultrasound (Graduate)	Biology Experiment (Grade 1)	Ultrasound(Graduate)	International Students Academic Conference	Free	Departure
10:10-11:00					CT (Grade 3)			
11:10-12:00		Open Ceremony						
12:00-13:00		Lunch Break						
13:00-13:50		RT Lab (Grade 3)	X-ray Lab (Grade 2)	Writing Academic English (Graduate)	Special Lecture (Graduate)	International Students Academic Conference	Free	
14:00-14:50								
15:00-15:50				Seminar (Grade 3)	Cancer Medicine (Graduate)			
16:00-16:50		Students' Activity	Students' Activity			Certifications Presentation		
17:00~		Welcome Party						

責任著者：臼井桂介
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-0034　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp



図２　腹部一般撮影実習の様子



図３　放射線治療における患者固定具作成実習の様子

また、研修最終日には学会にも参加し、様々な国の学生や研究者が英語で研究発表や質疑応答を行う様子を聴講した。

本研修を通して特に印象に残ったのは、講義・実習ともに「学生参加型」の形式がみられたことである。講義中にも学生が教員に対して積極的に質問を行うなど、学生と教員の双方向のやりとりが行われる場面が多くあった。実技実習においても、学生同士で意見交換を行い、改善点を議論し合う様子がみられた。教員が手本を示す際には、多くの学生がスマートフォンで動画や写真を撮影し、その後の学習に活用していた。これらの主体的な学習姿勢は、臨床現場で求められる問題解決能力の向上につながると感じた。

2. 学生交流について

放課後には、現地の学生の案内でショッピングモールや夜市を訪れた。特に夜市では、食事からゲームまで多種多様な屋台が立ち並ぶ、活気あふれる雰囲気に圧倒された（図4）。現地の学生におすすめの料理を紹介してもらい、台湾の食文化を楽しむことができた。

最終日には台北を訪れ、国立故宮博物院や台北101を見学した（図5）。限られた滞在時間ではあったが、台湾にはまだ訪れていない魅力的な場所が多くあることを知り、再び訪れたいという思いが一層強まった。現地の学生とのコミュニケーションでは、言語の違いから自身の思いや情報を的確に伝えることに苦労する



図４　ショッピングセンター



図５　台北 101

場面もあったが、翻訳アプリやジェスチャーを用いながら意思疎通を図った。簡単な日本語を話せる学生や、日本のアニメや音楽文化に関心を持つ学生、日本を訪れた経験のある学生もおり、共通の話題を通して交流を深めることができた。現地の学生は、昼食の手配や街の案内、店員との通訳など様々なもてなしをしてくださり、そのホスピタリティ精神には深い感銘を受けた。研修中に交流を深めた学生たちとは、その後彼らが日本を訪れた際に再会するなど、本研修プログラムの終了後も続く深い友好関係を築くことができた。

3. 研修全体を通じて得られたこと

1）日本と海外の相違点

科目によっては、講義が英語のみで行われるものや、学生への配布資料がすべて英語で記載されているものがあった。母国語ですべての科目を学ぶことができる日本の教育環境と比較し、専門知識を学ぶための土台として英語力が求められる点が大きな違いであると感じた。特に印象に残ったのは、解剖学の講義中に行われていた小テストである。単に用語を回答するだけでなく、白紙に解剖学的な構造や位置関係、名称を図示することが求められていた。本学科の講義ではあまりみられない形式であり、解剖の理解をより深める上で効果的な方法であると感じた。

超音波検査の実習では、ワイヤレスでタブレット端末に映像を転送するポータブル型の装置や、生殖器系のファントムなど、本学科では使用していない機器も実習内容に組み込まれており、非常に充実した設備環境が用意されていることを実感した（図6）。すべての実習において、現地の学生が私たちに操作方法を細かく指導できるほど装置を使いこなしていたことが印象に残った。彼らの技術レベルの高さは、私たちにとって大きな刺激となった。



図 6　ポータブル型超音波診断装置を用いた実習の様子

さらに、研修期間中には、大学内の体育館で約80の病院や企業がブースを出展するキャリアフェスも開催されていた。日本の大学では、就職活動を本格的に意識し始めるのは3年生以降が一般的であるのに対し、現地では1年生の段階からこのようなイベントに積極的に参加していた。低学年のうちから業務内容や福利厚生などについて質問している姿からは、将来の進路について早期から意識する文化や習慣が根付いていることがうかがえた。

2）今回の海外研修と自身の将来について

今回の研修は、専門知識や技術を学ぶだけではなく、自身の学習姿勢や将来設計を見直す大きな機会となった。英語を前提とした教育環境や学会に参加したことで、語学力は専門科目を学ぶ上での基盤であると同時に、内容を正確に理解した上で自らの意見を発信できる力にもなることを強く実感した。また、現地学生の積極的な学習姿勢や、早期からキャリアを意識して行動する姿は、同じ学生として目指すべきものであり、自身の将来像について具体的に考える必要性を痛感させられた。

学会には本学大学院の先輩も参加しており、彼らが英語で発表や質疑応答を行う姿を通じて、研究や学術の分野では、最新の知見を得るために国際的な視野を持つことが特に重要であることを認識した。

今回の研修で得たこれらの教訓を今後の学生生活に活かし、日々の講義や実習に対して、受け身の態度ではなく積極的な姿勢で取り組んでいきたい。さらに、専門知識と英語力の両面を高めることで、将来的には国際的な学術交流や研究活動にも関わりを持ち、臨床・研究の双方で社会に貢献できる医療人を目指したいと考えるようになった。

3）海外研修プログラムに興味を持つ後輩へ

今回のような海外研修プログラムは、大学や国籍の枠を超えて新たな交友関係を広げたい学生や、日本と海外の設備や教育環境の違いを身をもって体感したい学生、言語・文化背景が異なる同世代とのコミュニケーションに挑戦したい学生にとって、非常に価値ある経験になると考える。本学科では、英語は勉強する対象として捉えられ、試験での点数が重視される傾向にある。しかし、今回の研修を通して、英語はコミュニケーションを実践するための道具であることを改めて実感し、学習に対するモチベーションの向上にもつながった。

語学力に不安を感じ、海外研修への参加をためらう

学生もいるかもしれない。しかし、現地の学生にとっても英語は母国語ではなく、私たちと同じ立場で学んでいる。今回の研修においても、互いに完璧な英語ではない中でも、様々な工夫を重ねて内容を伝え合うことができた。本研修に参加したことで、英語でのコミュニケーションに対する心理的なハードルが以前より大きく低下したと実感している。こうした経験から、海外研修は語学力にかかわらず、一歩を踏み出すことで大きな学びが得られる格好の機会であり、ぜひ多くの学生に挑戦してほしいと感じている。

謝　辞

本研修プログラムの実施に向けてご支援をいただいた保健医療学部診療放射線学科の先生方、ご引率いただいた坂野康昌先生、そして現地で歓迎していただいた Chiung-Wen Kuo 先生をはじめとする元培医事科技大学の皆さまに心より感謝申し上げます。

倫理的配慮

本報告は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本報告における利益相反は存在しない。

Abstract

Participation in short-term study abroad for professional education in Taiwan

Masato Arai, Mito Iwamoto, Momoka Okuda, Kako Komaya, Kana Tomoda, Keisuke Usui

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

In March 2025, we participated in an eight-day study abroad program at Yuanpei University of Medical Technology in Taiwan. This program provided us with opportunities to experience a practical session using unfamiliar medical equipment and unique quiz formats, interact with students from another country where different languages than Japanese is spoken, and broaden our understanding of Taiwanese culture.

We were particularly inspired by the following points: the high level of academic engagement among the students, the clear career vision from their freshman year, and the research presentations at an academic conference by students from various countries. These experiences led us to re-evaluate our own learning attitude and future career goals.

Throughout this program, we realized how challenging it can be to express our thoughts and information precisely in our second language. Since we earned valuable experiences from this program, we aspire to become healthcare professionals with a global perspective. This report outlines our experiences and insights from this educational program in Taiwan.

Key Words: short-term study abroad for professional education, student interaction

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 132-135, 2026]

実践報告

臨床実習型短期留学（台湾）

香田　葵、花井香純

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

2025年8月11日から8月22日までの12日間、台北にて臨床実習型短期留学に参加した。今回は保健医療学部理学療法学科から我々2名の学生が、国立台湾大学を拠点に研修を行った。現地での見学を通じて、理学療法における日本と台湾の相違点を明確にし、新たな視点を取り入れることができた。また、プレゼンテーションを通して日本の医療の現状について考察し、学んできた知識を整理・深化させることができた。今回の臨床実習型短期留学を通じて、海外の理学療法に対する関心が高まり、今後の自身のキャリア形成にとって有意義な経験を得ることができた。

キーワード：台湾、臨床実習、異文化交流、理学療法

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，136-139頁，2026年（受付　2026.1.26.；受理　2026.5.8.）

海外研修プログラムの概要・研修の全体スケジュール

2025年8月11日から8月22日までの12日間、我々は臨床実習型短期留学（台湾）に参加する機会を得た。台北にある国立台湾大学（National Taiwan University: 以下、NTU）を訪問し、主に附属病院で外来・入院患者やその家族との関わり方を学んだ。研修のスケジュール施設を表1にまとめた。

研修施設の概要と研修内容および所感

我々は2週間にわたり、NTU 附属病院にて運動器・呼吸器・小児分野など多領域にわたる理学療法の現場を見学した（図1、2）。同院は台北に位置する約2400床規模の国立病院であり、教育・研究・臨床の3つの役割を担っている。実習では、病棟におけるベッドサイドでの理学療法と、理学療法室における外来患者への理学療法の双方を見学した。

ベッドサイドでの理学療法では、患者本人だけでなく、家族やケアギバーと呼ばれる支援者への指導が積極的に行われていた。理学療法士が介入できない時間帯に実施するべき運動内容に加え、更衣、歩行、移乗などの介助方法についても具体的な指導がなされていた。NTU 附属病院の理学療法と比較すると、日本で

表 1　現地における研修の全体スケジュール

	午前	午後
1 日目	病院見学	キャンパスツアー
2 日目	循環器系理学療法	小児理学療法
3 日目	急性期理学療法	物理療法
4 日目	神経系理学療法	小児理学療法
5 日目	神経系理学療法	循環器系理学療法
6 日目	台北観光	
7 日目	台北観光	
8 日目	急性期理学療法	整形外科理学療法
9 日目	急性期理学療法	神経系理学療法
10 日目	筋骨格系理学療法	小児理学療法
11 日目	パーキンソン病理学療法	呼吸器系理学療法
12 日目	最終レポート発表	台北観光

連絡先：澤　龍一
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12　御茶の水センタービル
E-mail: r.sawa.ia@juntendo.ac.jp



図１　急性期病棟にて理学療法士の方との写真



図２　小児科病棟にて理学療法士の方との写真

は患者や支援者と共に理学療法を行う機会が比較的少ないように感じられる。家族や支援者と積極的に関わることで、自宅退院をより具体的に見据えた支援が可能になると考えられる。

外来患者に対する理学療法では、疾患別に分かれた治療室が設けられ、それぞれの特性に応じた物品や器具が配置されていた。特に小児理学療法室には、子ども用トレッドミルや平行棒、視覚的フィードバックを活用した機器（図3）など、多様な器具が整備されていた。図3の機器は、バランス能力が低下した患者に対して、体幹と下肢の安定性に重点を置き、実生活を想定したトレーニング場面の中で、バランスや姿勢の練習を可能にする。また、リアルタイムでのフィードバックにより、利用者は適切な動作で練習でき、達成感を得ることができる。現場では、当日の患者状態を評価し、状況に応じて理学療法内容の調整が行われていた。NTU 附属病院における理学療法は、日本と比較してベッド上での運動機会が少なく、機器を用いた理学療法が積極的に実施されており、その傾向は外来理学療法において顕著であった。外来患者に対する理学療法は ADL や QOL のさらなる向上が目的であり、ベッド上だけでなく、機器を用いた持久力・筋力増強運動を、日本でもより積極的に取り入れるべきであると感じた。

学生交流の概要および所感

NTU の学生が実習に取り組む様子を見学し、理学療法について議論する機会があった。実習生でありながら、適格な根拠を持って理学療法を実施する姿に感銘を受けた。また、日本の実習と比較すると、常に実習指導者と行動するのではなく、学生一人ひとりが自立して行動している点が印象的であり、同じ学生の立場として大きな刺激を受けた。さらに、実習が多岐にわたる領域で実施されている点から、日本よりも幅広い知識や経験の獲得が可能であると考えられる。また、初日の学校・病院見学や土日の台北観光では、NTU の学生が案内を務めてくれた（図4、5）。交流の中で、台湾のソウルフードであるルーローハンやタピオカミルクティー、小籠包を共に味わい、九份、台北101、士



図３　視覚的フィードバックを活用した機器



図４　NTU の学生との昼食



図５　NTU の学生との九份観光

林市場といった観光地を巡ることで、台湾の文化や生活に触れる機会を得た。

日本と台湾の理学療法士の相違点

本実習を通して、日本と台湾の入院およびリハビリテーション体制には大きな違いがあることを学んだ。台湾では、家族に代わってケアギバーが患者に常時付き添い、食事や排泄、移乗などの日常生活動作を支援している。その結果、看護師は医療行為により専念することが可能となり、医療提供の効率向上につながっていると考えられる。また、ケアギバーや家族はリハビリテーションにも積極的に関与し、理学療法士から介助方法や自主トレーニングについて指導を受けており、退院後の在宅生活を見据えた支援体制が構築されている点が特徴的であった。日本では、家族がリハビリテーションに参加する機会は少なく、患者本人と理学療法士の1対1の対応が中心である。家族への指導の時間がない分、患者の機能改善に対しては効率的に進められるのではないかと感じた。

さらに、小児リハビリテーション室には、体重を免荷しながら歩行練習を可能にする小児用トレッドミル（図6）が導入されていた。また、下肢に麻痺や筋力低下のある患者に対して立ち上がりを補助し、免荷しながら立位や歩行練習を行う装置（図7）が導入されていた。そのほかにも立位補助装置や免荷装置、トレッドミルなど理学療法を効果的に進める機器が多く導入されており、治療の安全性向上や理学療法士の負担軽減、自主トレーニングの促進に寄与しており、日本においても積極的な導入が望まれると感じた。加えて、NTU のリハビリテーション室は診療科別に分けられており、感染対策、専門性、治療効率および医療の質の向上が図られている。一方、日本では多くの病院で単一のリハビリテーション室を使用しており、空間や人員を柔軟に活用できる点や、多様な症例を経験できる点が利点である。本実習を通じて、日本の理学療法が持つ強みと課題の双方を理解する貴重な経験となった。



図６　小児理学療法室での小児用トレッドミル

海外研修プログラムに興味を持つ後輩への言葉

短期実習型留学を通して、台湾の医療現場を見学・体験することで、日本では得がたい視点から日本の医療および理学療法の長所や課題を再認識することができた。異なる医療体制や臨床現場に触れる経験により、患者の生活や退院後の支援体制が異なることを学んだ。また、機能改善だけではなく、患者の生活や社会背景を踏まえた理学療法の重要性を考えるようになり、治療内容や目標の立て方に対する思考を広げる貴重な機会となった。

また、現地学生との交流は、自身の知識・経験不足を痛感する貴重な機会となり、今後の理学療法に対する学習意欲を高める大きな刺激となった。加えて、留学前は英語によるコミュニケーションに不安を感じていたが、実際のやり取りを通して意思疎通が可能であることを実感し、語学力向上の重要性と挑戦する意義



図７　立位補助装置

を学んだ。英語に不安がある場合でも、積極的に挑戦することが重要であると後輩に伝えたい。思考の幅を広げ、新たな視点を得るためにも、ぜひ次年度以降、後輩たちにも高い志を持って参加してほしいと願っている。

謝　辞

本研修の実施にあたり、多大なるご支援とご指導を賜りました国立台湾大学ならびに附属病院の皆様に深く感謝申し上げます。特に、現地での見学および学生交流にご協力いただいた理学療法士の皆様、学生の皆様に心より御礼申し上げます。また、本プログラムへの参加に際し、ご指導とご支援を賜りました順天堂大学保健医療学部の教員および関係者の皆様に深謝いたします。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

Abstract

Participation in short-term study abroad for clinical training in Taipei, Taiwan

Aoi Koda, Kasumi Hanai

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

From August 11 to August 22, 2025, we participated in a 14-day short-term clinical training program in Taipei, Taiwan. Two undergraduate students from the Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences, completed the training at National Taiwan University. Through on-site observation, we identified key differences between physical therapy practices in Japan and Taiwan and gained new perspectives on clinical approaches. In addition, through academic presentations, we examined the status of healthcare in Japan and systematically organized and deepened our previously acquired knowledge. This short-term international clinical training experience enhanced our interest in physical therapy in a global context and provided valuable insights that will contribute to future professional and career development.

Key Words: Taiwan, clinical training, cross-cultural experience, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 136-139, 2026]

実践報告

臨床実習型短期留学（台湾）

岩本徳宏、鈴木康世、依田航平

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

2025年8月18日から8月29日の12日間、台湾の台中にて臨床実習型短期留学に参加した。1週目は亞洲大學附屬醫院にて、2週目は中国医薬大学附設医院にて研修を行った。研修では、臨床実習期間が日本と比較して非常に長く、1領域につき約6週間の実習を6領域で経験するという点など、日本と台湾の理学療法教育の違いについて理解を深めた。今回の臨床実習を通じて、様々な文化や価値観に対する視野が広がったと感じている。こうした経験は、今後理学療法士として臨床に携わる上で、多様な価値観を尊重しながら患者と向き合う姿勢を養うことにつながると考える。

キーワード：異文化交流、臨床実習、理学療法

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，140-144頁，2026年（受付　2026.1.27.；受理　2026.3.26.）

海外研修プログラムの概要・研修の全体スケジュール

2025年8月18日から8月29日の12日間、我々は臨床実習型短期留学（台湾）に参加する機会を得た。短期留学前半は台中にある亞洲大學（Asia University: 以下、AU）を訪問し、主に附属病院で入院患者や外来患者に対する理学療法について学んだ。短期留学後半は同じく台中にある中国医薬大学（China Medical University: 以下、CMU）とマリア社会福祉財団（財團法人瑪利亞社會福利基金會）を訪問し、附属病院での実習のほかに、障がい者施設での理学療法士や他のリハビリテーション専門職の関わり方について学んだ。各大学病院で見学した内容や施設をまとめた（表1）。

また、病院・施設見学だけでなく、現地学生と交流する機会もあり、キャンパスツアーや市内巡りを通して台湾の街並みに触れ、異文化理解を深めることができた。研修全体を通して、台湾の国民性や文化に触れつつ、理学療法士の役割について考えることができた。

研修施設の概要と研修内容および所感

1. AU での臨床実習について

短期留学1日目から5日目は AU 病院で、曜日および半日ごとに、運動器系や循環器系などの各分野を見学する機会を得た（図1）。AU 病院は約450床を有する台中の地域医療を支える総合病院であり、急性期から回復期リハビリテーションまで幅広いサービスを提供している。我々は、ベッドサイドでの理学療法と理学療法室での外来患者に対する理学療法の両方を見学した。外来患者のリハビリテーションでは、日本のように時間帯による予約制ではなく、患者が自身の都合のよい時間にリハビリテーションを受けることが可能であった。

午前中、特に始業直後の時間帯は高齢者を中心に全ての治療スペースが埋まるほどであった。一方で、昼食時間前後や夕方は患者数が少なく、夕方以降になると仕事終わりの若年層の患者が複数見られた。また、日本の診療体制とは異なり、9時−18時と12時−21時の2種のシフト制が採用されており、夜間にもリハビリテーションが実施されている点が印象的であった。

2. CMU での臨床実習について

8日目から11日目は CMU 病院で、曜日および半日ごとに、運動器系や循環器系、さらに神経領域や小児領域の理学療法を見学した。CMU 病院は約2,200床を有する台湾中部最大級の総合病院であり、急性期医療から高度専門医療まで幅広く提供していた（図2）。

見学では、特に患者数の多さが目立った。神経領域では、上肢下肢の協調運動用滑車運動器などのリハビリテーション機器が多数導入されているにもかかわらず、治療待ちが生じており、高い需要がうかがえた。エルゴメータなどの一般的な機器に加え、日本では目

連絡先：大路駿介
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12　御茶の水センタービル
E-mail: s.oji.rm@juntendo.ac.jp

表 1　見学した施設及び内容

	午前	午後
1 日目 （8/18）	AU Electrotherapy （物理療法）	AU Electrotherapy & Ortho bedside （整形外科理学療法）
2 日目 （8/19）	AU Electrotherapy （物理療法）	AU CRC[*1] & Cardiopulmonary bedside （心大血管疾患理学療法）
3 日目 （8/20）	AU Neuro physical therapy （中枢神経理学療法）	AU CRC[*1] & Cardiopulmonary bedside （心大血管疾患理学療法）
4 日目 （8/21）	AU Neuro physical therapy （中枢神経理学療法）	AU CRC[*1] & Cardiopulmonary bedside （心大血管疾患理学療法）
5 日目 （8/22）	AU Neuro physical therapy （中枢神経理学療法）	霧峰観光
6 日目 （8/23）	CMU 近辺の宿泊先へ移動	台中観光
7 日目 （8/24）	台北観光、その後台中へ移動	
8 日目 （8/25）	CMU Cardiopulmonary OPD[*2] （心大血管疾患理学療法）	CMU Cardiopulmonary,MS[*3] or MS OPD （心大血管疾患理学療法、運動器理学療法）
9 日目 （8/26）	CMU Cardiopulmonary OPD （心大血管疾患理学療法）	CMU Cardiopulmonary,MS or MS OPD （心大血管疾患理学療法、運動器理学療法）
10 日目 （8/27）	CMU Cardiopulmonary OPD （心大血管疾患理学療法）	CMU Cardiopulmonary,MS or MS OPD （心大血管疾患理学療法、運動器理学療法）
11 日目 （8/28）	CMU Pediatric OPD （小児理学療法）	CMU Neuro OPD （中枢神経理学療法）
12 日目 （8/29）	財團法人瑪利亞社會福利基金會	CMU student report

*[1]CRC: Cardiopulmonary Rehabilitation Center
*[2]OPD: outpatient department
*[3]MS: Musculoskeletal



図 1　Yi chun Huang 先生との写真（写真の掲載については本人の同意を得ている）



図 2　CMU での集合写真

にする機会の少ない下肢リハビリテーション用ロボット式歩行訓練装置もあり、先進的な設備を積極的に導入していることが特徴であった（図3）。

外来患者の多くは家族の付き添いとともに来院しており、理学療法士が移動や準備を誘導する場面は少なかった。この点は、家族がリハビリテーション過程に深く関与する台湾の医療文化を反映していると考えられた。

小児領域のリハビリテーション室は、周囲の騒音が少ない環境に設けられており、患児の運動機能に応じてクッションや台などの用具を配置し、遊びの要素を取り入れた介入が行われていた。運動課題は段階的に構成され、患児が主体的に取り組める工夫がなされていた（図4）。

さらに、日本の臨床現場との違いとして、家族がキーパーソンとなりにくい患者に対して、ケアワーカーと呼ばれる24時間付き添い専任の支援者が見られた。現地の関係者によれば、これは看護師不足の影響により

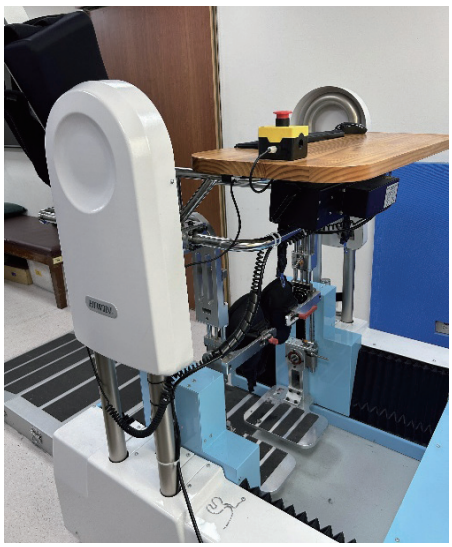


図３　下肢リハビリテーション用ロボット式歩行訓練装置



図４　CMU 小児理学療法室

自然に増えてきた職業であり、入院生活を支える上で重要な役割を果たしていた。

3. 財團法人瑪利亞社會福利基金會での見学について

12日目は財團法人瑪利亞社會福利基金會での見学の機会を得た。同施設は、心身障害児・者やその家族が必要とする医療・教育・福祉支援を包括的に提供することを目的としていた。施設内には、利用者同士でコーヒーを作るレクリエーションや音楽療法が行われる空間、大きなプールを備えた水治療室など、様々な感覚刺激を与えられる設備が整えられていた（図5、6）。

学生交流の概要および所感

本臨床実習型留学における現地学生および理学療法士との交流は、台湾における理学療法の提供体制および教育システムの特徴を深く理解する貴重な機会となった。1週目に訪問した AU での臨床実習においては、現地学生との交流を通じて、日台間の理学療法の在り方の違いを学んだ（図7）。台湾では運動器疾患に対し、主として物理療法が外来中心で実施される傾向が観察され、日本の臨床現場とは異なるアプローチ体系が確認できた。また、教育面における差異もあり、現地のカルテがすべて英語で記載されていた点や、ケースレポート発表が英語で行われていた点は、台湾における理学療法教育が国際的な標準化を強く意識していることを示唆した。英語での教育システムは、理学療法士がより国際的に活躍できる可能性を高め、専門職としての社会的認識や業務内容の認知度向上に貢献し得ると感じた。このことは、今後の自身の英語学習に対する強い刺激となった。

2週目の CMU では、台湾と日本の学生間で両国の教育プログラム、文化の違い、およびケースレポートに関するプレゼンテーションを実施した（図8）。CMU の学生や大学院生との意見交換の機会もあり、お互いの理学療法の前提や台湾の文化・教育課程の違いを認識することができた。



図５　水治療室



図６　財團法人瑪利亞社會福利基金會での集合写真



図 7　AU 実習生との交流



図 8　CMU でのプレゼンテーションの様子

これらの交流経験は、今後の理学療法士としてのキャリア形成における新たな選択肢として、海外での知見を考慮に入れる契機となった。臨床業務や研究面において国際的な視点を取り入れることで、自国の理学療法基準のさらなる発展だけでなく、アジア地域全体の理学療法水準の向上に貢献していきたいと考えている。

研修全体を通じて得られたこと、感じたこと

1. 日本と海外（台湾）の相違点について

本研修を通して、日本と台湾における理学療法士養成および臨床現場の在り方には、いくつかの大きな相違点があることを学んだ。特に印象的であったのは、台湾では臨床実習期間が日本と比較して非常に長く、1領域につき約6週間の実習を6領域で経験するという点である。このような教育体制により、卒業時点で即戦力となることを強く意識した臨床形態が構築されていると感じた。

今回の研修は医療を中心とした海外研修であったため、両国の医療制度や医療に対する考え方の違いを実際の現場から学ぶことができた。同じ理学療法士というライセンスを有していても、国によって求められる役割や能力には違いがあることを理解し、理学療法士という職業をより広い視点で捉える貴重な機会となった。

2. 今回の研修が自身の将来にどのように生かせるか

本研修では、文化や価値観、さらには使用する言語までも異なる人々と交流する機会を得ることができた。異なる背景を持つ学生や医療従事者と意見交換を行う中で、多くの刺激を受け、自身の視野が大きく広がったと感じている。こうした経験は、今後理学療法士として臨床に携わる上で、多様な価値観を尊重しながら患者と向き合う姿勢を養うことにつながると考える。

3. 海外研修プログラムに興味を持つ後輩へのメッセージ

海外研修に参加するにあたり、語学力、とりわけ英語でのコミュニケーションに不安を感じる学生も多いと思う。しかし、台湾においても英語は非母国語であり、完璧な英語力がなくとも、伝えようとする姿勢を持つことで多くのコミュニケーションを取ることができた。意思疎通に苦労した経験そのものが大きな学びとなり、将来必ず自身の糧になると感じている。現在の英語力に自信がなくても、挑戦する価値は十分にある研修であるため、ぜひ多くの後輩に積極的に参加してほしい。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

Abstract

Participation in short-term study abroad for clinical training in Taichung, Taiwan

Tokuhiro Iwamoto, Kousei Suzuki, Kohei Yoda

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

From August 18 to August 29, 2025, We participated in a 12-day short-term clinical training program in Taichung. We conducted training at Asia University Hospital during the first week and China Medical University Hospital during the second week. In the training program, I gained a deeper understanding of the differences in physical therapy education between Japan and Taiwan. In particular, clinical practice periods are significantly longer compared with Japan, with students completing approximately six weeks of clinical training in each of six different specialty areas.

Through this clinical training, we feel our perspectives have broadened. We believe these experiences will help us cultivate an attitude of respecting diverse values when interacting with patients as we engage in clinical practice as physical therapists in the future.

Key Words: cross-cultural exchange, clinical observation, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 140-144, 2026]

実践報告

専門教育型海外短期留学プログラム（台湾）

近藤秀海、祖父江咲紀、大久保結依、宮下ひまり、藤倉穂香、
長谷川真依、中嶋彩水、阪詰徠桃、福永一星、臼井桂介

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科が提供する専門教育型短期留学（元培医事科技大学，台湾）に参加した。本留学では講義、実習、生徒間のコミュニケーションを通し、英語力および専門性の向上につながった。また、台湾での生活を通して異文化理解にもつながった。このような台湾での留学の体験について報告する。

キーワード：専門教育型短期留学、台湾、元培医事科技大学，診療放射線学科

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，145-148頁，2026年（受付　2025.12.23.；受理　2026.1.30.）

研修プログラムについて

2025年9月9日から9月17日までの期間、保健医療学部診療放射線学科が実施する専門教育型海外短期留学プログラムに参加した。今回の留学先は、台湾北の新竹市に位置する元培医事科技大学（Yuanpei University of Medical Technology: 以下，ユンペイ大学）であり、同大学の診療放射線学科の学生との交流や専門分野に関する講義・実習を通して、多くの学びを得ることができた（表1）。

講義は1コマ60分で、日本の講義と同様に紙媒体の資料や教科書を使用し、先生の画面をプロジェクター

表 1　研修プログラム内容

Juntendo University 2025 Academic Exchange Program

Date/Time	9 Sep (Tue)	10 Sep (Wed)	11 Sep (Thurs)	12 Sep (Fri)	13–14 Sep (Sat/Sun)	15 Sep (Mon)	16 Sep (Tue)	17 Sep (Wed)
09:10–10:00			Seminar (Graduate 1)	Biology Experiment (Grade 1)				
10:10–11:00		Academic Writing (Graduate 2)	Research Methodology (Graduate 1)	Biology Experiment (Grade 1)		Radiobiology (Grade 3)	Dental Radiology (Grade 3)	
11:10–12:00		Academic Writing (Graduate 2)	Research Methodology (Graduate 1)	Biology Experiment (Grade 1)		Radiobiology (Grade 3)	Dental Radiology (Grade 3)	
12:00–13:00		Lunch Break	Lunch Break	Lunch Break		Lunch Break	Lunch Break	
13:00–13:50	Arrival	X-ray Experiment (Grade 3)	Physiology Experiment (Grade 2)		City Tour	Sonography Experiment (Grade 3)	Basic AI-Programming (Grade 1)	Departure
14:00–14:50		X-ray Experiment (Grade 3)	Physiology Experiment (Grade 2)			Sonography Experiment (Grade 3)	Basic AI-Programming (Grade 1)	
15:00–16:00		X-ray Experiment (Grade 3)	Physiology Experiment (Grade 2)			Sonography Experiment (Grade 3)	Medical Terminology (Grade 1)	
16:00–16:50							Medical Terminology (Grade 1)	
16:50–		Welcome Party						

責任著者：福永一星
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-0034　東京都文京区湯島1-5-32
E-mail: ifukuna@juntendo.ac.jp

に投影しながら講義を進めていく形式であった。具体的には、1・2年生では生物や物理などの基礎科目の座学、3・4年生では放射線生物などの専門科目に加え、単純 X 線撮影装置や超音波検査装置などの実習が行われていた。大学院の講義では、肝臓がんに対する化学動脈塞栓療法など、最先端の臨床に関する知識を学ぶ講義が展開されていた。学科の1学年あたりの人数は30人ほどと少なく、授業内でのグループワークや先生と学生との活発なコミュニケーションが行われており、日本の講義と大きく違う点だと感じた。

研修の全体スケジュール

現地の研修は、平日は朝から夕方まで大学に通うスケジュールで構成されていた。現地の講義では、1年生が受けている専門基礎科目から大学院生が受けている研究基礎の科目までを実際に受講することができた。講義後には、ユンペイ大学の学生が夜市や周辺の観光地へ案内してくれ、台湾の食文化や生活習慣に触れることができた。また、休日にはショッピングモールや博物館を訪れたほか、九份や台北など台湾を代表する観光地にも足を運び、異文化理解をより一層深めることができた（図1）。

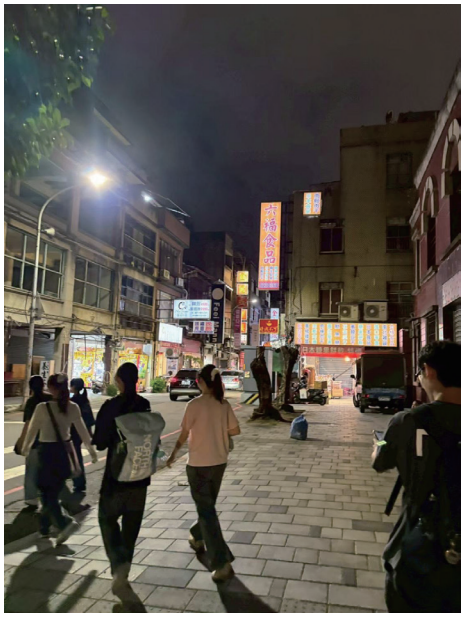


図 1　現地の学生による夜市案内の様子

講義内容について

特に3年生の超音波実習、1年生の医療英語の講義が印象に残っている。超音波実習では、右肋骨弓下縦走査による胆嚢の描出と、右肋骨弓下横走査によるミッキーマウスサインの描出を行った。ミッキーマウスサインとは左上に肝外胆管、右上に固有肝動脈、中心に門脈を描出した際、ミッキーマウスのように見える所見のことである。これは大伏在静脈が深部静脈（大腿静脈）へ合流する部分（伏在大腿静脈接合部）の超音波画像であり、臨床の場では、下肢静脈瘤の原因となる伏在大腿静脈接合部の弁不全を診断する上で重要なポイントとなる。走査は現地の学生がボランティアとして被験者となってくれ、実際の人体に対して走査を行うことができ、貴重な経験となった。また、実習前の講義では、実際の臨床での観察部位や重要疾患の観察部位を取り扱っており、臨床を意識した講義が展開されていると感じた（図2）。

医療英語の講義では、医療英語を接頭語や接尾語などの概念の基礎から丁寧に教えていただき、非常に理解しやすかった。主に心臓の疾患の用語についての講義が行われた。具体的には Myo は筋肉を表す接頭語で、cardi は心臓を表す語源なので Myocardium は心筋を表す。また、Myocardium に梗塞を表す infarction という接尾語を付ければ Myocardialinfarction となり、心筋梗塞を表す単語になるということを学んだ。従来の講義は現地の学生にわかりやすいように台湾語で講義が行われているが、専門用語は英語で理解できるようにする意図があるとのことで、これも臨床を意識している点だと感じられた。現地の学生も英語を流暢に話すことは困難なため、比較的わかりやすい単語で講義が行われていた。超音波実習と医療英語の2科目を担当している先生は英語で指導を行っており、配慮があったため安心して参加することができた。また、現地の学生と英語で自己紹介を行い、交流を深めた。講義の最後には、台湾での学びや観光を振り返るスピーチを現地の学生の前で行い、貴重な経験ができた（図3）。



図 2　エコー実習の様子



図３　スピーチの様子

異文化交流について

留学前は、英語も中国語も話せず、不安でいっぱいであった。しかし、現地の学生がキャンパスや市内の案内、外出時の現地の人とのコミュニケーションなどのサポートをしてくれたおかげで、安心して生活することができた。また、SNS で観光地の候補や集合時間などを伝えてくれたことも安心につながった。言葉は十分に伝わらなくても、伝えようとすれば現地の学生が親身になって聞いてくれ、積極的に声をかけてくれることも多くあった。そのおかげで、日常の中で自然に会話が生まれ、多くの学生と交流することができた。日本の文化や生活について興味を持ってくれる人が多く、日本語を話せる学生もいた。お互いの国の違いについて話し合う時間を設けていただき、新しい発見を多く得られた（図4）。交流を重ねる中で、相手を理解しようとする姿勢の大切さを学び、自分から行動する勇気も身についた。学生同士で支え合いながら学ぶ経験は、自分の成長を強く感じられる貴重な時間となった（図5）。



図４　現地の学生との意見交換の様子



図５　現地の学生との集合写真

後輩へのメッセージ

今回の台湾留学では、勉強だけでなく異文化交流や観光をすることもでき、毎日が充実していた。現地の学生との英語レベルには大差がなく、英語に自信がなくとも現地の学生と交流ができた。また、海外に行ったことがなくとも、臼井先生や友達がいるため安心して行くことができる。食が合わない心配を持つ人もいるかもしれないが、日本でなじみのあるコンビニや飲食店もあるため、自分で食べたいものを食べることができる。現地の学生がお菓子をくれたりするため、お礼を渡せるように日本のお土産を持っていくことをすすめる。1年生で留学することについては、基礎分野しか習っておらず、各モダリティに対する専門的な知識がないため不安であったとの意見もあった。しかし、同学年の他の学生が経験したことのない超音波検査を行い、今後のモチベーション向上や自信につながった。海外留学経験はとても貴重であり、ぜひ検討してみてほしい。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

Abstract

Participation in short-term study abroad for specialized education in Taiwan

Shua Kondo, Saki Sofue, Yui Okubo, Himari Miyashita, Honoka Fujikura, Mai Hasegawa, Sana Nakajima, Kurumi Sakatsume, Issei Fukunaga, Usui Keisuke

Faculty of Health Science, Department of Radiological Technology

We participated in a short-term study abroad program for specialized education offered by the Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Juntendo University, held at Yuanpei University of Medical Technology in Taiwan. Through this program, we improved our English skills and develop our professional knowledge by attending lectures, engaging in hands-on training, and interacting with other students. Additionally, living in Taiwan helped us gain a deeper understanding of a different culture. This report outlines our experiences during the short-term study abroad program in Taiwan.

Key Words: short-term study abroad program, Tiwan, Yuanpei University of Medical Technology, Medical Imaging and Radiological Technology

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 145-148, 2026]

実践報告

第1回順天堂大学保健医療学部大学祭「順白祭」でのレモネードスタンドの実践

前原栄一[1)]、臼井桂介[1, 2)]、赤沼優文[1)]、藤田啓輔[1)]、土屋諒真[1)]、飯野秀慶[1)]、秋元慎太郎[1)]、堀内彪悟[1)]、樋川陽向[1)]、岡本柊生[2)]、榊原大輝[2)]、帖地達哉[2)]、玉井結菜[2)]、鶴谷優香[2)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
[2)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

順天堂大学保健医療学部にて2025年10月11日～ 12日に第1回順天堂大学保健医療学部大学祭「順白祭」が開催され、順天堂大学保健医療学部、順天堂大学大学院保健医療学研究科の臼井研究室としてレモネードスタンドを合同開催した。レモネードスタンドの実施の概要や当日の状況をまとめ、レモネードスタンドの実践について報告する。

キーワード：レモネードスタンド、小児がん支援、順白祭

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，149-151頁，2026年（受付　2025.12.11.；受理　2026.12.16.）

諸　　言

日本では、毎年2500人ほどが小児がんと診断されている[1)]。治療法や臨床研究の進歩により小児がん患者の生存率は8割以上まで向上してきたが[2)]、二次がんの発生や学業成績の低下、就労の中断、精神的心理的負担など多くの課題を有している[3)]。このため、小児がんの研究体制の拡充や心理的負担軽減支援、教育の体制の支援を一層拡充させることが重要であると考えられる。

1. レモネードスタンドの概要

レモネードスタンドは、小児がんの治療中であった米国の少女 Alexandra Alex Scott が、がんと闘う子どもたちを支援するための研究費を集めようと、自宅の庭でレモネードを販売した活動に端を発するとされる[4)]。Alex は、2004年の8月にこの世を去った。彼女は自らの命を奪った病気の研究のために100万ドル以上の寄付を集め、亡くなった後は家族によって Alex's Lemonade Stand Foundation が設立され、現在も小児がん研究支援活動が継続されている[5)]。海外では、レモネードスタンドが学校や大学、マラソン大会、会社において年間を通じて多く開催されている[6)]。日本では、レモネードスタンドジャパンを特定非営利活動法人キャンサーネットジャパンが運営し、新古ウィッグプレゼントや小児がん治療研究への助成を行っている。海外と同様に大学祭や地域のイベント等で多く開催されている[4)]。

2. 開催方法と参加者

順天堂大学保健医療学部にて2025年10月11日～12日に第1回順天堂大学保健医療学部大学祭「順白祭」が開催され、順天堂大学保健医療学部、順天堂大学大学院保健医療学研究科の臼井研究室としてレモネードスタンドを合同開催した。臼井研究室の参加者は14名（保健医療学部5名、保健医療学研究科8名、教員1名）であり（**図1**）、2日間のレモネードスタンドへの来場者は300名を超えた。2日間で229杯のレモネードを販売し（**図2**）、別途設置した募金箱（**図3**）の募金額を含め、82315円を募ることができた。この全額を特定非営利活動法人キャンサーネットジャパンに寄付を行なった（**図4**）。また、レモネードスタンドの一環として診療放射線学科、診療放射線学専攻の強みを活かし、近年の小児がんや成人がんの治療法や小児がんの治癒率、小児がんの放射線治療の概要を掲示し、その説明をする生徒を配置した（**図5**）。来場者は幅広い年齢層であり、小児やその家族、大学関係者に加えて、近隣の住民も含まれていた。掲示ブースでは、小児がんの治

責任著者：臼井桂介
順天堂大学大学院保健医療学研究科診療放射線学専攻
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

療成績や支援制度などに関する質問が多く寄せられ、来場者の小児がんに関する関心の高さが分かった。また、掲示ブースでの学生にとっては、自らの意見や最新の医療状況の発信を行うことで、小児がんについての現状を再認識し、将来の自分自身の医療職としての姿を学ぶ貴重な機会となった。レモネードスタンドの実践は、小児がん啓発および募金活動として一定の成果を挙げるとともに、医療系学生の教育的効果を併せ持つ有意義な試みであったと考えられる。



図１　レモネードスタンド開催時の臼井研究室集合写真



図２　当日の販売の様子（左：京極伸介研究科長・特任教授）



図３　募金箱の設置の様子

3. 臼井研究室での活動

臼井研究室では、小児がんの放射線治療、AI を用いた高精度な診療支援、放射線量測定のゲル線量計の研究を実施している。小児がんの研究では、小児の髄芽腫に対する全脳全脊髄照射（craniospinal irradiation: CSI）の妊孕性温存に関わる研究を進めている。本研究室は、こうした学術的・臨床的課題に取り組む仲間を広く歓迎しており、小児がん治療の未来を共に切り拓く人材の参画を期待している。

4. まとめ

レモネードスタンドを通じて、より一層小児がんに対する理解を臼井研究室で深めることができた。今後、


Lemonadestand Japan
感謝状
Thank You for Your Support
順天堂大学 保健医療学部
保健医療学研究科 臼井研究室の皆様
あなたは、小児がん・AYA 世代*1の
がん体験者支援のための
「レモネードスタンド」へ、ご支援を賜りました。
ここに感謝の意を表します。
*1 Adolescent and young Adult（思春期と若年成人）の略
2025年10月29日
特定非営利活動法人キャンサーネットジャパン
理事長 岩瀬 哲
CancerNet Japan

図４　レモネードスタンド実施と支援についての感謝状



図５　小児がん資料掲示ブース

このような活動が一層世界中に広がり、がんの治療やその後のサポートの輪が広がることを切実に望む。

5. 謝　　辞

多くの来場者の方にご参加、ご支援をいただき、臼井研究室一同心より感謝を申し上げます。また、レモネードスタンドを実施するにあたりまして、NPO 法人キャンサーネットジャパン様、順天堂大学の皆様に多大なるご支援をいただき、感謝を申し上げます。

6. 倫理的配慮

本実践報告には人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

7. 利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1） 国立研究開発法人国立がん研究センター：小児がんの患者数，がん情報サービス．https://ganjoho.jp/public/life_stage/child/patients.html，2025年11月20日．

2） 堀部敬三：小児がん医療・研究の課題と展望．日本小児血液・がん学会雑誌．2021: 58: 331〜339.

3） Devine KA, Christen S, Mulder RL, Brown MC, Ingerski LM, Mader L, et al: Recommendations for the surveillance of education and employment outcomes in survivors of childhood, adolescent, and young adult cancer: A report from the International Late Effects of Childhood Cancer Guideline Harmonization Group. Cancer. 2022: 128: 2405-2419.

4） 一般社団法人レモネードスタンドジャパン：レモネードスタンド活動とは，レモネードスタンドジャパン．https://www.lemonadestand.jp/about，2025年11月20日．

5） Alex’s Lemonade Stand Foundation for Childhood Cancer: About ALSF, Alex’s Lemonade Stand Foundation. https://www.alexslemonade.org/about/meet-alex, 2025年12月8日．

6） Alex’s Lemonade Stand Foundation for Childhood Cancer: Get Involved, Alex’s Lemonade Stand Foundation. https://www.alexslemonade.org/get-involved, 2025年12月8日．

Abstract

Implementation of a lemonade stand at the 1st Junhakusai Festival of the Faculty of Health Science, Juntendo University

Eiichi Maehara[1)], Keisuke Usui[1, 2)], Masafumi Akanuma[1)], Keisuke Fujita[1)], Ryoma Tsuchiya[1)], Hideyoshi Iino[1)], Shintaro Akimoto[1)], Hyogo Horiuchi[1)], Hinata Hikawa[1)], Shu Okamoto[2)], Daiki Sakakibara[2)], Tatsuya Choji[2)], Yuina Tamai[2)], Yuka Tsuruya[2)]

[1)] Deparment of Radiological Technology, Graduate school of Health Science, Juntendo University
[2)] Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

The 1st Junhakusai Festival of the Faculty of Health Science, Juntendo University, was held on October 11–12, 2025. At this event, the Usui Laboratory, which consists of members from both the Faculty of Health Science and the Graduate School of Health Science, jointly operated a lemonade stand. This report summarizes the outline of the lemonade stand initiative and describes its practical implementation, including the activities conducted during the festival.

Key Words: lemonade stand, pediatric cancer support, Junhakusai

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 149-151, 2026]

実践報告

2025年度保健医療学部公開講座「子どもの健康、運動、姿勢～正しく知ってケガを防ごう～」

相 澤 純 也

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

スポーツ庁の調査によると、運動を「嫌い」と感じる子供や体力の低下した子供が近年増加し、特に女子で顕著である。背景には運動時間減少やスクリーンタイム増加がある。幼少期の運動経験不足は、骨折増加や体力低下につながる。神経系の発達を踏まえ、早期からの運動が重要であり、身近な物を使った運動や家族で楽しめるプログラムが推奨されている。また、姿勢不良は外傷や障害の要因となるが、運動や意識づけで改善可能である。これらを踏まえ、公開講座を通じた子供と保護者への健康意識啓発の重要性が示された。

キーワード：児童、身体活動、スポーツ、障害予防、ウェルビーイング

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，152-156頁，2026年（受付　2026.1.8.；受理　2026.1.15.）

スポーツ庁令和6年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果によると「体を動かす遊びを含む運動は好きですか？」という質問への男子および女子の回答は、各々 6.7%、13.7% が「やや嫌い」もしくは「嫌い」となっている（図1）[1]。同調査での握力、立ち幅跳び、ソフトボール投げを含めた8つの体力測定項目のスコアは低下傾向にある（図2）。これらの体力測定合計点の低下傾向は、男子よりも女子で強い（図3）。体力の低下は活動性・範囲低下、肥満もしくはやせ、精神心理面に悪影響を及ぼす可能性があり、かつスポーツ活動中のケガや障害にも強く関連する。このような背景がある中、子供や保護者への健康意識啓発の一環として、2025年度保健医療学部公開講座は「子どもの健康，運動，姿勢」を主題として企画された。本稿ではこの公開講座の内容を実践報告として述べる。

0歳から20歳までの成長段階において、身体各器官の発育過程、成長曲線は異なる[2]。神経系の成長曲線は4，5歳まで比較的早く成長し、12歳前後でほぼプラトーに達する（図4）。したがって、この年齢までに適切な運動・スポーツによって心身の成長を促すことが重要であると考えられている。

10年前と比べて、転倒により骨折する子供が増えてきている[3]。独立行政法人日本スポーツ振興センターが調査した統計資料「学校の管理下の災害」によると、小学生から高校生までの子供の骨折は、この30年で増加傾向にある[4]。幼児期に外遊びの経験が不足し、転

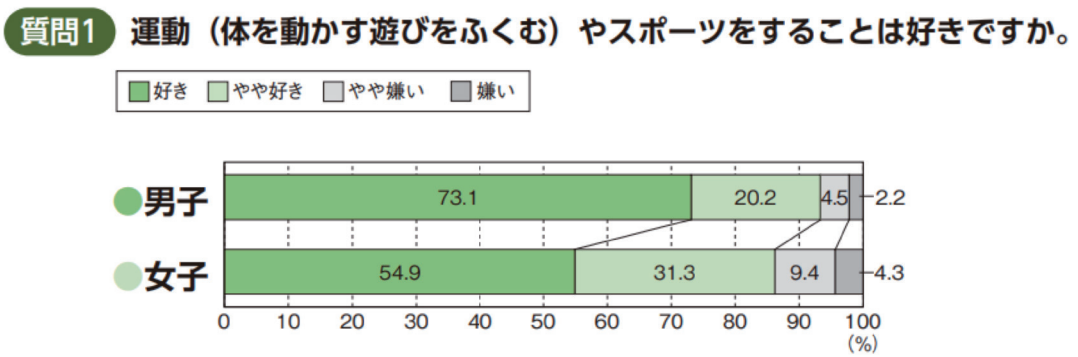


図１　スポーツ庁令和６年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果
https://www.mext.go.jp/sports/content/20241217-spt_sseisaku02-000039139_07.pdf

責任著者：相澤純也
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12
E-mail: j.aizawa.ue@juntendo.ac.jp



図２　スポーツ庁令和６年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果
https://www.mext.go.jp/sports/content/20241219-spt_sseisaku02-000039139_06.pdf

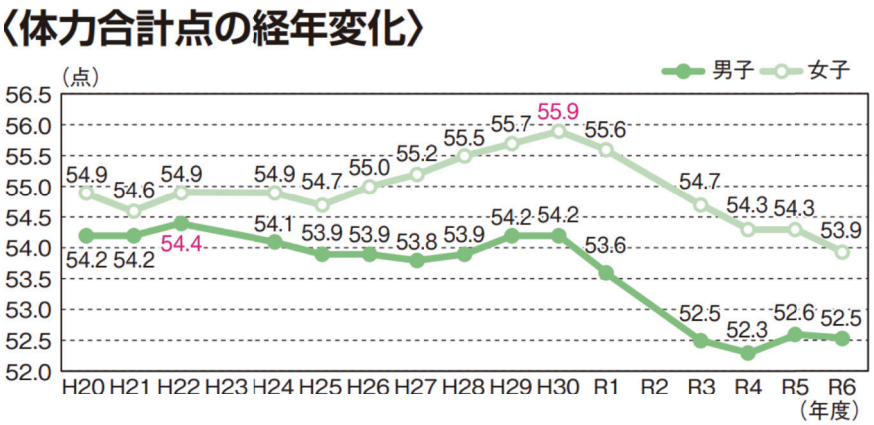


図３　スポーツ庁令和６年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果
https://www.mext.go.jp/sports/content/20241219-spt_sseisaku02-000039139_06.pdf

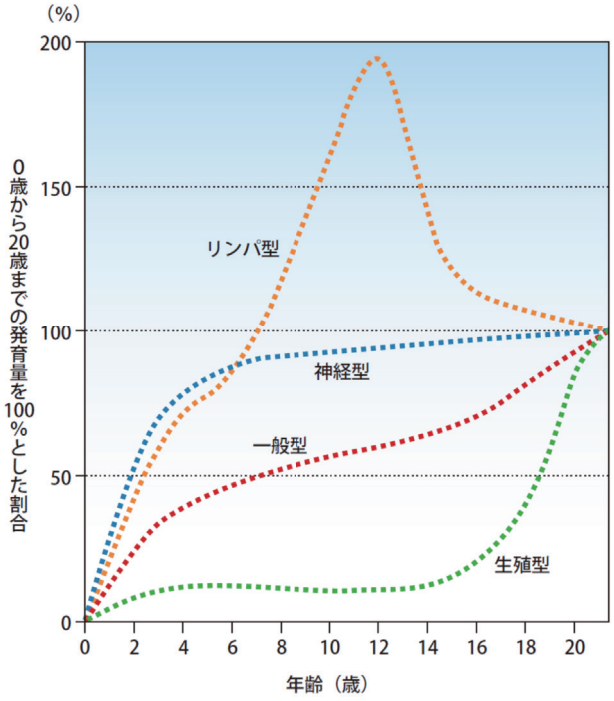


図４　器官ごとの発育過程（スキャモンの発育曲線）
日本臨床スポーツ医学会学術委員会
https://www.rinspo.jp/files/proposal.pdf

ぶ経験が積めないことが原因の一つと考えられている。一方で、部活や運動教室などに積極的な生徒もおり、こうした子供は身体能力が高い印象を受け、「運動をする子」と「そうでない子」の二極化が懸念されている。

平成20年からスポーツ庁は「全国体力・運動能力、運動習慣等調査」を実施している[1)]。これは全国の小学生5年生と中学生2年生を対象とし、子供の体力や運動能力、運動習慣などを経年的に把握・分析し、課題の検証や改善を図ることを主な目的としている。この調査結果によると、令和6年度の体力合計点は、令和元年度と比較して小中学生の男女で平均約1.4ポイント低下している[1)]。調査を開始した平成20年から横ばい、または微増傾向にあったが、近年の調査では低下が認められている[1)]。スポーツ庁は体力合計点の低下の主な原因として「運動時間の減少」「学習以外のスクリーンタイム（平日の1日当たりのテレビ、スマートフォン、ゲーム機などによる映像の視聴時間）の増加」「肥満である児童生徒の増加」を挙げている。

このような背景がある中、スポーツ庁では子供の体力向上企画として、ペットボトルや紙風船、新聞紙、タオルといった身近にある物を利用して、体育授業やレクリエーションとしてペアや集団で可能な運動・エクササイズを紹介している。その場でのウォーキング、跳躍、スローイングの動きにより、協調性や敏捷性を含めた全身の神経筋機能を維持・向上させる内容となっている[5)]。

日本スポーツ協会ではアクティブチャイルドプログラムと称して、家族で楽しみながら体を動かす経験を促す目的で、数十種類の運動・スポーツを紹介している[6)]。「からだじゃんけん」「人間お好み焼き」「棒は倒さんぞ」「お座りバレー」のようにキャッチーなタイトルとともに、子供の神経筋機能の維持・向上に役立つ実践例は大変参考になるであろう（図5）。

子供によくみられる姿勢不良の一つに頭部前方位姿勢がある（図6）。これは頭の位置が明らかに前方に



図５　日本スポーツ協会．家族で挑戦！毎日元気に運動遊び
https://saas.actibookone.com/content/detail?param=eyJjb250ZW50TnVtIjoxNjU0OTI9&detailFlg=1&pNo=1



図６　子供によくみられる頭部前方位姿勢





図７　頭部前方位姿勢の修正法の一例
足裏全体を床につけ、つむじが天井に引っ張られているイメージで顎を軽く引くよう促す。





図８　スクワット中の不良姿勢の修正法の一例
前面では、体幹が右に傾斜し、膝が過度に内側に位置し、つま先の開き方も非対称となっている。側面では、腰椎が前屈し、骨盤の前傾が不足している。

位置し、肩甲骨の前方への突出や、胸腰椎の過度な屈曲を伴うことが多く、頭頸部痛や投球障害、腰部痛の要因となりうる[7-10]。構造的な問題がなければ、気づきやフィードバックにより自己修正は可能である。保護者を含めた他者の補助があれば、より修正されやすい（図7）。スポーツ活動中の下肢の外傷・障害につながりやすい不良姿勢として、膝の過度な外反や体幹の側方傾斜がある（図8）。これらの姿勢不良は走行やジャンプ、方向転換の着地での外傷・障害につながりやすいことが研究で示されている[11, 12]。このような不良姿勢は、椅子での着座・起立動作やスクワット動作を利用して、膝とつま先を前に向けたまま腰幅で立ち、腕を前に上げ、少し後ろにある椅子に座るイメージでエクササイズをすると修正されやすい。以上の内容を含めて、子供や保護者への健康意識啓発として、2025年度保健医療学部公開講座が子供の健康，運動，姿勢の改善に貢献できることを願う。

倫理的配慮

本研究は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

参考文献

1）　スポーツ庁：令和6年度全国体力・運動能力，運動習慣等調査結果．https://www.mext.go.jp/sports/content/20241217-spt_sseisaku02-000039139_07.pdf, 2025年12月20日．

2）　臨床スポーツ医学会学術委員会：子供の運動をスポーツ医学の立場から考える～小・中学生の身体活動が運動器に与える効果～．https://www.rinspo.jp/files/proposal.pdf, 2025年12月20日．

3）　CHANTO Web：「10年前と比べ転ぶ子が増えている」骨折は過去30年で1.5倍「つまずいたときに踏ん張れない子」の見過ごせない問題点．https://

chanto.jp.net/articles/-/1006355?display=b, 2025年12月20日.
4) 独立行政法人日本スポーツ振興センター：学校等の管理下の災害［令和6年版］. https://www.jpnsport.go.jp/anzen/kankobutuichiran/tabid/3053/Default.aspx, 2025年12月20日.
5) スポーツ庁：「子供の体力向上企画」Vol.2 ～室伏前長官による身近なものを活用したウォーミングアップ動画～. https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/sports/mcatetop04/list/1371915_00001.htm. 2025年12月20日.
6) 日本スポーツ協会：家族で挑戦！毎日元気に運動遊び. https://saas.actibookone.com/content/detail?param=eyJjb250ZW50TnVtIjoxNjU0OTl9&detailFlg=1&pNo=1, 2025年12月20日.
7) Javdaneh N, Ambroży T, Barati AH, Mozafaripour E, Rydzikb L: Focus on the Scapular Region in the Rehabilitation of Chronic Neck Pain Is Effective in Improving the Symptoms: A Randomized Controlled Trial. J Clin Med. 2021: 10: 3495.
8) Sepehri S, Sheikhhoseini R, Piri H, Sayyadi P: The effect of various therapeutic exercises on forward head posture, rounded shoulder, and hyperkyphosis among people with upper crossed syndrome: a systematic review and meta-analysis. BMC Musculoskelet Disord. 2024: 25: 105.
9) Pensri C, Liang Z, Treleaven J, Jull G, Thomas L: Cervical musculoskeletal impairments in migraine and tension-type headache and relationship to pain related factors: An updated systematic review and meta-analysis. Musculoskelet Sci Pract. 2025: 76: 103251.
10) Chen Y, Yang C, Nie K, Huang J, Qu Y, Wang T: Effects of scapular treatment on chronic neck pain: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials.BMC Musculoskelet Disord. 2024: 25: 252.
11) Heering T, Rolley TL, Lander N, Fox A, Barnett LM, Duncan MJ: Identifying modifiable risk factors and screening strategies associated with anterior cruciate ligament injury risk in children aged 6 to 13 years: A systematic review. J Sports Sci. 2023: 41: 1337-1362.
12) Seeto AH, Bradford K, Bade D, Johnson L, Maine S, Saxby DJ, et al: Variable Knee-Joint Morphology In Valgus and Non-valgus Aligned Pediatric Patients With Anterior Cruciate Ligament Rupture. Orthop J Sports Med. 2025: 13: 23259671251365625.

Abstract

Children's health, exercise, and posture: Learn the right things to prevent injuries

Jun-ya Aizawa

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

According to a survey by the Japan Sports Agency, the number of children who dislike physical activity and those showing declining physical fitness has increased in recent years, with the trend being particularly pronounced among girls. This decline is associated with reduced exercise time and increased screen time. A lack of physical activity during early childhood is also linked to a rise in fractures and growing polarization between physically active and inactive children. Considering the developmental characteristics of the nervous system, early engagement in appropriate physical activity is essential for healthy physical and mental growth. In response, initiatives have been introduced that promote the use of familiar, everyday items to encourage enjoyable physical activities, as well as programs that allow families to exercise together in a playful manner. Poor posture in children is another concern, as it can contribute to injuries and musculoskeletal disorders during sports activities. However, such posture problems can often be improved through increased awareness, feedback, and simple corrective exercises. Based on these issues, a public lecture organized by the Faculty of Health and Medical Sciences aims to raise health awareness among children and their parents, focusing on improving children's health, physical activity, and posture.

Key Words: children, physical activity, sports, injury prevention, well-being

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 152-156, 2026]

実践報告

2025年度保健医療学部市民公開講座「子どもの健康、運動、姿勢～正しく知ってケガを防ごう～」の実践

中 村 絵 美

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要　旨

令和7年4月15日より、順天堂大学保健医療学部市民公開講座「子どもの健康、運動、姿勢～正しく知ってケガを防ごう～」をオンデマンド方式で開催した。本稿では、成長期の子どもの身体的特徴とケガの発生との関係について解説した講演内容を報告する。

キーワード：市民公開講座、成長期、身体の特徴、セルフチェック

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，157-159頁，2026年（受付　2026.1.9.；受理　2026.3.26.）

緒言（背景と目的）

順天堂大学保健医療学部市民公開講座「子どもの健康、運動、姿勢～正しく知ってケガを防ごう～」を令和7年4月15日よりオンデマンド方式で開催した（図1）。講演では、理学療法士の視点から、成長期の身体の特徴やケガとの関係、さらにセルフチェックの方法について解説した。本稿では、講演の内容について報告する。



図 1　2025 年度市民公開講座の案内

1. 現代の子どもたちの問題点

近年、子どもを取り巻く環境の変化により、屋外で自由に身体を動かす機会の減少や、テレビゲームやスマートフォンの普及を背景とした運動不足が進行し、体力・運動能力の低下が課題として挙げられている。一方､幼少期から単一のスポーツに専門的に取り組み、成人と同等の競技強度で活動する子どもたちも増加しており、子どもの運動習慣や身体活動量は二極化の傾向を示している[1)]。

2. 成長期のからだの特徴

子どもが成長する過程において、身体の機能はその時期によって異なる。小学生期には、筋力や持久力の発達は少なく、神経系の発達が著しく、多様な動作を習得しやすい時期である。そのため、様々な運動に挑戦し、巧みな動きを身につけることが重要となる。中学生期には身長が急激に伸び、身体的変化が顕著となるとともに、持久力の獲得が求められる。筋力の発達はその後にピークを迎えるため、過度に早期からの高負荷の筋力トレーニングを行うことは避ける必要がある。加えて、成長期の骨は成人に比べて柔らかく、骨端線を有している。骨の縦方向への成長は骨端線の発達と密接に関係しており、成長軟骨板は新しい骨を形成する一方で組織学的に脆弱であるため、外力による損傷を受けやすい。このような発達特性を理解し、成

責任著者：中村絵美
順天堂大学保健医療学部理学療法学科
〒113-0033　東京都文京区本郷3-2-12　御茶の水センタービル508
E-mail: e.nakamura.wu@juntendo.ac.jp



図２　セルフチェックとストレッチングの例

長段階に応じた運動実践を行うことが、子どもの健康維持とケガの予防には重要である。

3. からだとケガの関係

成長期の子どもでは、身長が最も伸びる時期に対して、骨量・骨密度、また筋や腱などの除脂肪量のピークは約1年程度遅く[2]、発達に時間的なずれが存在している。そのため、見た目の成長に比べ、身体の支持性は十分とはいえない。この時期には柔軟性の低下や関節可動域の制限が生じやすく、骨折発生率の増加[3]も報告されている。こうした身体的特徴に加え、不良な姿勢は関節運動や筋力発揮を妨げ、運動中のバランス不良やフォームの崩れにつながる。その結果、転倒や衝突などの外傷だけでなく、繰り返しの負荷による障害発生のリスクも高まる。運動量の多少にかかわらず、成長期には姿勢への配慮と柔軟性の維持が、ケガの予防において重要といえる。

4. セルフチェックの方法

これらの成長期特有の身体的特徴やケガのリスクを踏まえ、本講座では、子ども自身や保護者が日常生活の中で実施可能なセルフチェックの方法について紹介した。すでに学校における運動器検診[4]においても実施されている項目を参考に、3つのセルフチェック（ばんざい、体前屈、しゃがみこみ）を行い、動作を改善するためのストレッチングやエクササイズを提示した（図2）。

ま と め

本稿では、成長期の子どもにみられる身体的特徴とケガとの関係について概説した。成長期の骨は成人に比べて脆弱であり、特に身長が急激に伸びる時期には骨折のリスクが高まるとともに、筋肉の柔軟性低下が生じやすいことが特徴である。こうした時期にケガを予防するためには、日常生活や運動場面において良好な姿勢を意識するとともに、定期的なセルフチェックとストレッチングを継続的に行うことが重要である。

謝　辞

本市民公開講座の開催にあたり、ご参加いただいた皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

1）スポーツ庁：令和5年度全国体力・運動能力，運動習慣等調査結果（報告書）．https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/kodomo/zencyo/1411922_00007.html, 2025年2月26日．
2）Martin AD, Bailey DA, McKay HA, Whiting S: Bone mineral and calcium accretion during puberty. Am J Clin Nutr. 1997: 66: 611-615.
3）日本スポーツ振興センター：学校等の管理下の災害（令和6年版）．https://www.jpnsport.go.jp/anzen/kankobutuichiran/tabid/3053/Default.aspx, 2025年2月26日．
4）運動器の健康・日本協会：学校での運動器検診．https://www.bjd-jp.org/guidance, 2025年2月26日．

Abstract

A practice report of the 2025 Faculty of Health Science Public Lecture for Citizens: “Children’s Health, Physical activity, and Posture: Learn Correctly to Prevent Injuries”

Emi Nakamura

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

An on-demand public lecture for citizens entitled “Children’s Health, Physical Activity, and Posture: Learn Correctly to Prevent Injuries” was held by the Faculty of Health Science at Juntendo University beginning on April 15, 2025. This paper reports on the lecture content, which explained the relationship between the physical characteristics of children during the growth period and the occurrence of injuries.

Key Words: public lecture, growth period, physical characteristics, self-check

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 157-159, 2026]

その他

診療放射線学領域の学生を対象とした人工知能教育講座の開発

佐藤裕斗、斎藤巧海、瀬畠知大、後藤政実

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要　旨

医療現場におけるデジタル変革（DX）が加速する中、人工知能（AI）技術は放射線医学の根幹を支える技術となりつつある。しかし、大学教育の現場では、既存の膨大な専門カリキュラムの影響もあり、体系的な AI 教育の導入が追いついていないのが現状である。本稿では、順天堂大学 AI インキュベーションファームのコアバリューに基づき開発した、診療放射線学科3年生を対象としたオンライン AI 教育講座について報告する。対象者は画像解剖学や医療画像情報学等の専門科目の履修が進み、基礎的な知識を習得した段階にある。本講座は、画像処理の基礎から Python プログラミング、機械学習の実践演習までを網羅し、AI 技術の品質管理を実践できる次世代のスペシャリスト育成を目指している。

キーワード：順天堂大学、保健医療学部、人工知能（AI）、医用画像解析

順天堂保健医療学雑誌，第7巻，第1号，160-165頁，2026年（受付　2026.2.9.；受理　2026.3.2.）

1. はじめに

医療現場のデジタル化、ICT（情報通信技術）、および AI（人工知能）の普及により、医療と患者との関わり方には劇的な変革が起きている。これから先の医療は、幼少期からスマートフォンやインターネット等のデジタル技術に親しんできたデジタルネイティブ世代により、医療のデジタル変革がさらに加速されることは想像に難くない。一方で、社会が大きな転換期を迎える中で、教育者には時代に即した新たな価値を提示し、教育内容を刷新していくことが求められている。本稿では、診療放射線学教育における AI 教育の現状と、我々が開発したオンライン講座の意義について述べる。

2. 放射線医学における AI 技術の進展と臨床的意義

現在、臨床現場では、人間の脳の神経回路を模した仕組みにより、膨大なデータから自動的に特徴を学び取るディープラーニング（深層学習）を基盤とした AI 技術が目覚ましい成果を上げている。例えば、3D 冠動脈 MRI において空間解像度を維持しつつ撮影時間を劇的に短縮する超解像技術（SRGAN）[1] や、CT における被ばく線量を抑えながら高品質な画像を得るノイズ低減アルゴリズムの実装[2]、さらには広範な領域での病変検出や組織の自動セグメンテーション[3] などはその代表例である。また、最新の知見では、これらの単独のアルゴリズムに留まらず、従来のノイズ低減手法と AI を組み合わせることによる、さらなる画質向上の達成[2] が報告されている。これらの技術は研究の域を超え、診断精度と検査効率を同時に向上させる不可欠なツールとして定着しつつある。

3. 学術的トレンドと社会的なニーズ

この分野の学術的進展は著しく、関連論文のレビュー数は近年、右肩上がりに増加しており、技術の成熟と応用の広がりを示している（**図1**）。領域別では、特に脳神経領域や乳腺領域において AI の活用が先行しており、モダリティ別では MRI や CT を対象とした研究が主流を占めている。診療放射線技師関連の学会において AI 関連技術のテーマが数多く取り扱われ、国家試験でも出題が開始されるなど、社会的なニーズは極めて高い。しかし、大学の教育現場では学ぶべき



図 1　放射線医学領域における AI 関連システマティック・レビューの年次推移

責任著者：後藤政実
順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
〒113-8421　東京都文京区本郷2-1-1
E-mail: m.goto.ql@juntendo.ac.jp

専門知識が過密であり、AI の体系的な学習まで手が及んでいないのが実情である。

4. 学術的背景と教育的課題

本プロジェクトでは、順天堂大学 AI インキュベーションファームが掲げる5つのコアバリューのうち、「未来を創る次世代教育と人材育成の実現の一助となる研究成果の創出」を目指している。AI およびデータ科学の応用は、エンジニアリング的な基礎知識に加え、データの収集・管理といった情報技術、さらにそれらを臨床の実践と紐付けて課題解決を行う力が有機的に結びつくことで初めて意味を持つ。したがって、技術の「創り手」側だけでなく、医療従事者などの「使い手」側が、基礎から課題解決までを見渡せる広い視野を身につける必要があるが、その教育が社会の変化に追いついていない。

5. 本プロジェクトの目的と独創性

本プロジェクトでは、専門分野である医用画像技術を対象とした、持続可能な AI 教育のためのオンライン講座を開発し、その教育的評価を検証する予定である。本講座の開発にあたっては、Visionary Imaging Services および株式会社 Aidemy との共同事業として連携体制を構築し、臨床現場の高度なニーズと AI 教育の専門的ノウハウを融合させた。

本講座は、学生の創造力を伸ばす教育展開により、デジタル化が進む医療社会において世界的視野を持って対応できるスペシャリストの育成を目指すものである。この講座を通じて教育された学生は、臨床応用が進む AI 技術の品質管理を実践できる限られた医療人材（特に診療放射線技師）となり、将来的には臨床現場での指導的立場や、AI 技術開発を牽引する人材となることが期待される。オンライン形式を採用することで、学習の機会を制限することなく、高度な専門教育を提供できる点に大きな意義がある。

6. オンライン講座の学習環境

本講座は、画像処理の基礎理論から AI の実装までを段階的に習得する構成とした。

講義の前半では、画像処理理論の解説（図2）と、Fiji/ImageJ を用いた実践演習（図3）を行った。デジタル画像の特性を理解し、演算によって画像データがどのように変化するかを、実際のツール操作を通じて学習した。

中盤のプログラミング演習では、Aidemy を活用した。ブラウザ上でコードを記述し、その場で実行・採点が行われるフィードバック機能（図4）により、プログラミング未経験の学生でも自学自習を進めやすい環境で Python の基礎に触れた。

後半の応用演習では、Google Colaboratory や Anaconda（JupyterLab）といった開発環境を使用した（図5）。これらを用いることで、環境構築の負担を軽減しながら、深層学習モデルの構築や Radiomics 解析（医用画像から目視では困難な大量の特徴量を抽出して解析し、新しいバイオマーカーの探索やよりよい個別化医療等を目指す分野）といった、より実務に近い高度な画像解析に取り組んだ。

7. 講義内容

本講座は、医用画像処理の基礎から高度な深層学習の実践まで、約20時間相当の体系的なカリキュラムで構成されている。

1　はじめに
1.1　本コースの紹介（15分）
1.1.1　講師紹介
1.1.2　本コースのゴール
1.1.3　画像を対象とした医用 AI を通じて育まれる生産性
1.1.4　受講のための準備

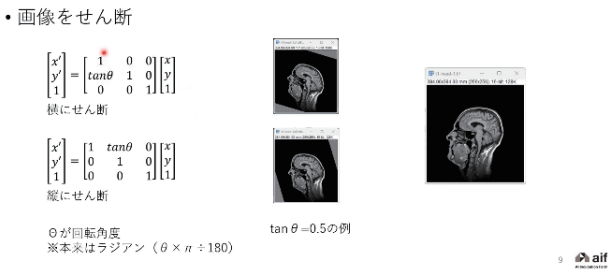


図 2　画像工学の理論解説

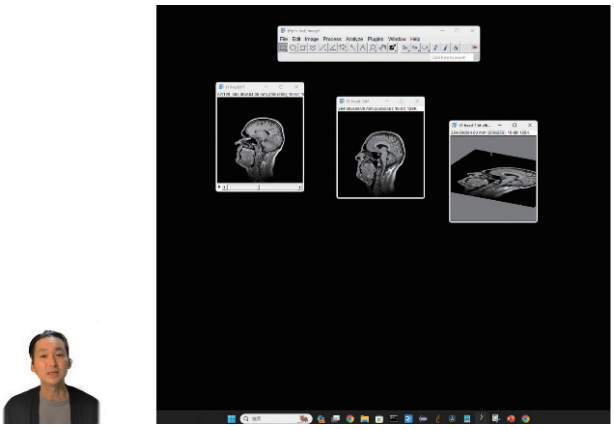


図 3　Fiji/ImageJ を用いた実践演習



図４　プログラミング演習における即時フィードバック機能

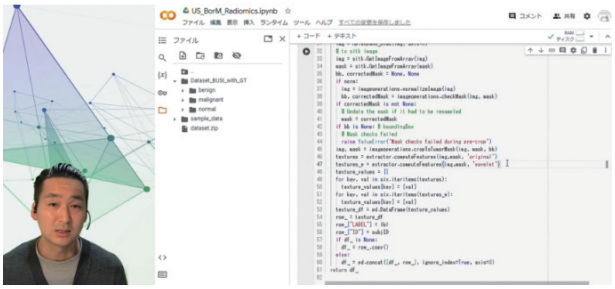


図５　Google Colaboratory を用いたクラウド開発環境

2　医用画像処理超入門
2.1　デジタル画像のはじめの一歩（1時間40分）
2.1.1　Fiji/ImageJ のインストール
2.1.2　ピクセルとボクセル
2.1.3　標本化と量子化
2.1.4　グレースケール画像とカラー画像
2.1.5　カラールックアップテーブル
2.1.6　画像のコントラスト（階調処理）
2.2　デジタル画像の基本操作とその仕組み（1時間10分）
2.2.1　画像の拡大と縮小（画素の補間とパンニング）
2.2.2　画像の変形（回転とアフィン変換）
2.2.3　画像のキャリブレーション
2.3　デジタル画像の演算（1時間30分）
2.3.1　画像の演算
2.3.2　画像の二値化
2.3.3　モルフォロジカル処理
2.3.4　画像処理フィルター
2.4　画像表示の応用（25分）
2.4.1　画像のフュージョン
2.4.2　3次元画像表示
2.5　画像処理解析の初歩（1時間25分）
2.5.1　関心領域（ROI）の作成
2.5.2　画像のセグメンテーション
2.5.3　画像のレジストレーション
2.5.4　テクスチャ解析の紹介

3　Python
3.1　開発環境の構築
3.1.1　Anaconda と Google Colaboratory
3.2　Crash Course
3.2.1　オブジェクト
3.2.2　変数
3.2.3　数
3.2.4　文字の扱い
3.2.5　文字と文字列
3.2.6　何もないという意味の変数
3.2.7　シーケンス（list, tuple, 文字列）
3.2.8　算術演算子
3.2.9　真偽値
3.2.10 計算時の注意点
3.2.11 セット（Set）
3.2.12 辞書（Dictionaries）
3.2.13 変数の住所のようなものの働き
3.2.14 制御構文
3.2.15 ファイルの読み込みと書き出し
3.2.16 Python コード体系
3.2.17 機械学習に備える（ChatGPT でコーディングして作業を高速化）

4　DICOM の初歩
4.1　DICOM の初歩（25分）
4.1.1　DICOM の読み方調べ方
4.2　DICOM 操作の実践（20分）
4.2.1　PyDicom で学ぶ DICOM の操作

5　CAD 開発のための機械学習（基本編）
5.1　機械学習の概要（35分）
5.1.1　機械学習の全体像
5.2　機械学習（ロジスティック回帰モデル※から深層学習まで）（40分）
※複雑な要因を組み合わせて、ある結果が起こる確率を算出する統計手法
5.2.1　教師あり学習で利用される機械学習モデル
5.2.2　教師なし学習で利用される機械学習モデル
5.2.3　深層学習の初歩
5.3　機械学習モデルの評価（40分）
5.3.1　機械学習における前処理
5.3.2　検証法
5.3.3　評価指標

5.3.4　ハイパーパラメータ探索：グリッドサーチ
5.3.5　特徴選択
5.3.6　機械学習モデルが示した結果を説明する手法

6　CAD 開発のための機械学習（応用編）
6.1　プロセスの信頼性を示すために必要なもの（1時間10分）
6.1.1　RSNA CLAIM
6.1.2　データの要約と統計的な説明
6.1.3　サンプルサイズ
6.1.4　推論モデルパフォーマンスの統計的検定
6.2　実践：JSRT 肺結節データセットを用いた良悪性分類（1時間）
6.2.1　JSRT 肺結節データセットを用いた Radiomics 特徴による良悪性分類モデル
6.3　実践：NSCLC-Radiomics/Radiogenomic（40分）
6.3.1　NSCLC-Radiomics: Radiomic signature の探索
6.3.2　NSCLC-Radiogenomics: メタ遺伝子と画像特徴との相関分析
6.4　深層学習の実践（1時間10分）
6.4.1　脳腫瘍を対象とした4クラス分類例
6.4.2　脳腫瘍領域セグメンテーション（超解像化、ノイズ低減、異常検知などへの足掛かり）
6.4.3　ガーゼ遺残ファントム画像を用いたガーゼ位置検出モデル

8. 感想セクション

本講座を受講した学生から、合計約20時間のプログラムに対するフィードバックが得られた。受講した学生3名は、いずれも大学の講義以外でプログラミングに触れる機会はほとんどなく、実質的な未経験者であった。このようなプログラミング初学者という背景の受講者からの感想を6つの観点からまとめる。

1）講義全体の満足度

「大学の座学と臨床実習の知識が結びつきました。特にレジストレーションの演算原理を ImageJ で実践できたことは、画像工学の重要性を再認識する貴重な体験でした。」

「動画視聴する前はただ漠然と『AI ＝難しい』と感じていましたが、動画を通して知識がクリアとなり、何が難しいのかが分かるようになりました。将来の画像解析への取り組みやすさが変わったと感じます。」

「病院実習前だったため、後半の専門的な内容は難易度が高かったですが、実習後にもう一度受講したいと強く感じさせる内容でした。」

2）学習の難易度

「理論は馴染みがありましたが、プログラミングコードの裏側を理解することには難しさを感じました。専門的な視点の必要性を実感し、非常に学び甲斐がありました。」

「演習に入ると難易度が急に上がったように感じました。前半と後半の間に、より段階的なコード解説のステップがあれば、よりスムーズに理解できたかもしれません。」

「後半になるにつれて内容が難しくなり、次第についていけなくなってしまった。また、講義動画の後半で実践の時間を設けられていたが、内容を今一つ理解できていないまま進めてしまったため、流れ作業のようになってしまった。」

3）ボリュームと構成

「動画の長さが適切で、集中力を切らさずに最後まで取り組めました。動画の直後に実践が組み込まれているため、学んだ知識をすぐにアウトプットできる構成が良かったです。」

「合計時間はちょうど良かったです。セクション5・6のコード解説をさらに重視した課題があれば、より効率的に学習できたと思います。」

「パソコンの扱いが苦手でも、作業手順の丁寧な説明のおかげでスムーズに受講することができました。」

4）医用画像と機械学習への理解

「実際に手を動かしたことで、教科書上の理論が具体的なイメージとして定着しました。臨床現場で技師の方が活用している高度な画像処理の基礎が理解できました。」

「特に DICOM 画像についての理解が深まりました。DICOM が持つ数字の羅列が、いかに機械学習において有効に活用しやすいか、プログラミングの視点から初めて理解できました。（図6）」

「後半にかけてはやはり実際にイメージすることが少し難しい内容であったため、ついていくことが難しかった。知識や理解が深まったとはあまり感じなかった。」

5）将来のキャリアと興味の広がり

「『画像から生存時間を予測する』といった Radiomics や相関分析の可能性を知り、1枚の画像に秘められた情報の価値を再認識しました。将来、臨床現場に出た際も本講座の知識を活かしたいです。」

「全体的なプログラミングコードや画像解析、深層

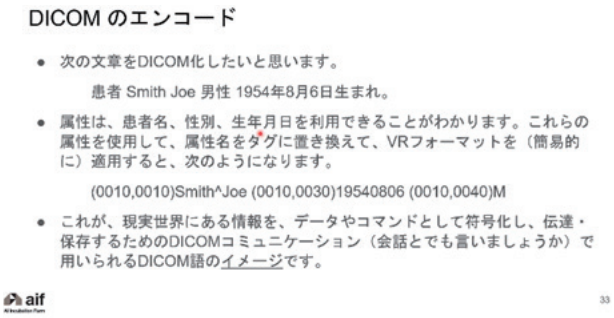


図 6　文章の DICOM 化

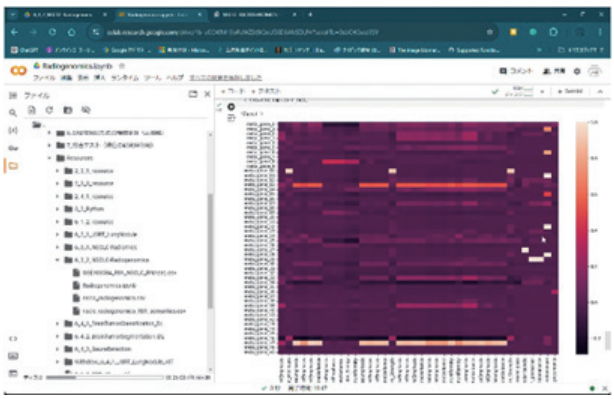


図 7　Radiomics 特徴量とメタ遺伝子情報の相関ヒートマップ

学習の知識を得ることができたことで、やはり難しい分野だと感じました。ただ、プログラミングを習得できれば、将来研究を行う際の選択肢が大きく広がることを確信しました。」

「プログラミングへの興味はこれまで低かったですが、臨床の場でどのように活用されているかを知り、非常に興味深く感じた。病院実習でいろいろと見学したり、実際に体験したりすることで理解を深めていきたいと思う。」

6）特に興味深かった講義タイトル

受講生が選んだ上位の講義は以下の通りである。

・NSCLC-Radiogenomics：メタ遺伝子と画像特徴との相関分析（図7）
・脳腫瘍を対象とした4クラス分類例

9. まとめ

本稿では、医療現場の DX 化に伴い急増する AI 技術へのニーズに応えるべく、診療放射線学科生を対象として開発した体系的な「AI 解析教育講座」の紹介を行った。

受講生のフィードバックからは、プログラミングや高度な画像解析に対する難易度の高さが課題として示された。一方で、「教科書上の理論が具体的なイメージとして定着した」「1枚の画像に秘められた情報の価値を再認識した」といった、肯定的な教育効果が確認された。特に、臨床実習で目にする技術の背景にある演算原理を自ら実装する経験は、単なる知識の習得を超え、次世代の診療放射線技師としてのアイデンティティ形成に寄与するものと考えられる。

今後の展望として、学生の理解度や実習経験に応じた段階的なカリキュラムのさらなるブラッシュアップ、および持続可能な教育体制の構築が不可欠である。本講座を通じて、AI 技術を「ブラックボックス」として扱うのではなく、その品質管理や臨床応用を主導できるスペシャリストを育成していくことが、これからの放射線医学教育における重要な責務であると確信している。（講座動画閲覧についての問合せ先：順天堂大学診療放射線学科・教授・後藤政実・m.goto.ql@juntendo.ac.jp）

倫理的配慮

この稿で扱われたアンケートは、著者により実施されたものであり、医学研究における倫理申請対象外のものである。

利益相反

本稿における利益相反は存在しない。

参考文献

1）Küstner T, Munoz C, Psenicny A, Bustin A, Fuin N, et al: Deep-learning based super-resolution for 3D isotropic coronary MR angiography in less than a minute. Magn Reson Med. 2021: 86: 2837-2852.
2）Balogh ZA, Kis BJ: Comparison of CT noise reduction performances with deep learning-based, conventional, and combined denoising algorithms. Med Eng Phys. 2022: 109: 103897.
3）Mazurowski MA, Buda M, Saha A, Bashir MR: Deep learning in radiology: an overview of the concepts and a survey of the state of the art. Med Image Anal. 2019: 49: 939-954.

Abstract

Development of an artificial intelligence education course for students in radiological sciences

Yuto Sato, Takumi Saito, Tomohiro Sebata, Masami Goto

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

As digital transformation (DX) accelerates in healthcare settings, artificial intelligence (AI) technology is becoming fundamental to radiology. However, due to existing extensive specialized curricula, systematic AI education has yet to be fully integrated into university education. This paper reports on an online AI education course developed for third-year students in the Department of Medical Radiology at Juntendo University, based on the core values of the Juntendo University AI Incubation Farm. The target students have progressed through specialized subjects such as image anatomy and medical image informatics, and have acquired foundational knowledge. This course covers everything from the fundamentals of image processing to Python programming and practical machine learning exercises, aiming to cultivate next-generation specialists capable of implementing quality control for AI technologies.

Key Words: Juntendo University, Faculty of Health Sciences, artificial intelligence (AI), medical image analysis

[Juntendo Health Science Journal 7(1): 160-165, 2026]

抄　録

2024年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録

前十字靱帯損傷・再建術後患者におけるスポーツ復帰に向けた身体機能および心理状態の回復過程

相澤純也[1)]、宮森隆行[1)]、中村絵美[1)]、高橋琢真[2)]、池田　浩[1)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

[2)] 順天堂医院リハビリテーション室

目的：膝の前十字靱帯（ACL）損傷後のスポーツ復帰阻害や再受傷の要因を明らかにすることは、スポーツ理学療法学における重要な課題である。しかし、痛みや筋力といった身体機能と、復帰に向けた心理状態が中長期的にどう推移するかは不明な点が多い。本研究は、ACL 再建術後の患者を対象に、身体機能に加えて心理要素の回復過程を縦断的に明らかにすることを目的とした。

方法／結果：術後3・6・12 ヶ月の各時点で、膝・股・足・体幹の身体機能データと、心理的準備状態を測る指標（ACL-RSI、JACL-25、IKDC-SKF 等）を前向きに収集した。分析の結果、術後3 ヶ月から6 ヶ月にかけて主観的膝機能（IKDC-SKF）や JACL-25は有意な改善を示した。一方で、復帰への心理的準備を示す ACL-RSI は、平均10点向上したものの有意差はなく、心理面での回復は身体機能よりも遅れる傾向がみられた。また、術後6 ヶ月時点での等尺性膝伸展筋力や下肢前方リーチ距離の下肢対称性指数には有意な改善がみられず、片脚ホップ能力や自覚的走行能力も、非術側や受傷前のレベルには到達しにくい実態が浮き彫りとなった。

考察：術後3 ヶ月から6 ヶ月にかけては、主観的な膝機能の改善に比べ、スポーツ復帰に向けた心理的準備は進みにくいことが示唆された。特に心理的準備と関連の深い膝筋力や下肢リーチ距離の改善には時間を要するため、術後半年時点でも完全な機能回復は困難である。これらを踏まえた段階的なリハビリテーションの必要性が示されている。

片脚着地中の膝外反運動を制御するための着地前空中時期の中殿筋電気刺激の効果検証

大路駿介、横山萌香、相澤純也

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：片脚ジャンプ着地動作における着地前空中時期の中殿筋電気刺激が、着地中の膝外反運動に及ぼす影響を明らかにすること。

対象と方法：12人の運動習慣がある健常成人（年齢21.1±0.8歳、身長168±8.6cm、BMI20.1±2.2kg/m^2）を分析対象とした。計測課題は片脚前方ジャンプ着地とした。介入条件は中殿筋への電気刺激あり、なしの2条件とし、順序はランダム化した。電気刺激のタイミングはフォースプレートと電気刺激装置を同期させ、着地前空中時期に中殿筋が刺激されるよう設定した。電気刺激設定は50Hz、刺激幅0.1ms のモノフェージック波形にて、リピートモードで実施した。着地中の運動学・力学的変数の計測には三次元動作解析装置およびフォースプレートを用いた。解析項目は最大垂直床反力、最大垂直床反力出現時の膝内外反モーメント、および膝内外反角度とした。関節モーメント、関節角度ともに負の値が外反、正の値が内反と定義した。各条件で得られた値を比較するため、統計解析には対応のある t 検定を用いた。有意水準は5%とした。

結果：最大垂直床反力は電気刺激あり群3.67±0.64N/kg、なし群3.49±0.40N/kg で有意差を認めなかった（p＝0.216）。最大垂直床反力出現時の膝内外反モーメントはあり群0.19±0.52Nm/kg、なし群0.18±0.48Nm/kg（p＝0.908）、膝内外反角度はあり群－1.53±3.80°、なし群－1.01±3.95°（p＝0.139）であり、いずれも有意差を認めなかった。

結語：着地前空中時期における中殿筋への電気刺激による着地衝撃吸収効果および膝外反制御効果は認められなかった。

心電図 AI 解析から得られる HF-index をガイドとした運動療法の基礎的研究

齊藤正和、澤　龍一

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：これまで健常高齢者を対象に、発作性心臓活動記録装置を用いて、AI 解析により心電図から心不全増悪リスクの指標である「HF-index」を算出するデバイスの基礎研究を実施してきた。本年度は、体液貯留および短時間での体液量減少を認める血液透析患者を対象に、透析前後の HF-index の変動性に関する基礎的研究を実施することを目的とする。

方法：嬉泉病院（葛飾区）に外来通院する維持血液透析患者50例を対象に、血液透析前、血液透析中（1、2、3時間後）および血液透析直後に発作時心臓活動記録装置（SIMPLEX QUANTUM 社製）を使用し、心拍数および心拍変動および AI 解析結果から HF-index を評価する。

結果：2026年2月末までに測定が終了した30例（68±14歳、男性20例、女性20例）の中間データ解析結果を記す。血液透析療法前の体重62.2±10.6kg、血液透析後の体重60.0±10.3kg であり、血液透析療法による体重減少は－2.1±1.0kg であった。心拍数は血液透析前72.4±9.2拍 / 分、血液透析後68.0±11.0拍 / 分、血液透析前後で－6.4±17.7拍 / 分であった。また、HF-index は血液透析療法前52.7±31.6、血液透析療法後72.4±9.2であり、血液透析療法による HF-index の変化は19.0±35.7であった。一方、血液透析前の HF-index の中央値により High HF-index 群と Low HF-index 群に分類すると、血液透析療法による HF-index の変化が異なることが示された（High －6.0±14.2 vs. Low 57.3±16.3）。

考察：血液透析患者の体液量減少に伴う HF-index の推移を検討する基礎的研究から、血液透析前に HF-index が低値を示すような血液透析患者では、体液貯留によるうっ血などを示さない症例群である可能性が推測される。一方、血液透析前に HF-index が高値を示す血液透析患者では、うっ血を呈する心不全患者モデルを呈することから、血液透析による体液減少により HF-index が低下したと推測される。

結語：血液透析患者では、全例が血液透析前にうっ血性心不全を示唆する HF-index が高い症例群ばかりではないことが示された。今後は、体液量以外の心不全兆候の有無も含めて、HF-index による体液量や心不全管理が適応可能な患者像を明らかにすることが臨床応用には必要と考える。

地域在住高齢者における外出頻度、生活活動範囲と疲れやすさ（疲労性）の関連

澤　龍一、飛山義憲、齊藤正和
順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：疲労性は加齢とともに多くの高齢者が経験することで、多くの場合主観的に評価される。主観的な疲労性は生活範囲の制限に関わることが報告されている。近年、Martin Vigorimeter を用いて客観的な疲労性を算出する研究がなされているが、現時点で客観的な疲労性の外出頻度や生活活動範囲への関連については報告されていない。そこで本研究の目的は、地域在住高齢者を対象に、外出頻度および生活活動範囲と疲れやすさ（疲労性）の関連を検討することである。

方法：63名の地域在住高齢者が解析対象となった。生活活動範囲は Life Space Assessment（LSA）を用いて評価した。疲労性は先行研究に基づいて Martin Vigorimeter を用いて評価した。検査者の声掛けとともに対象者に最大握力を発揮させ、それを継続させる。発揮された最大握力の50%値となるまでの時間を疲労性の指標とした。

結果：LSA と疲労性の関連を単回帰分析で検討した結果、統計学的に有意な関連性は見られなかった（非標準化係数（B）: 0.063; 95% 信頼区間（95%CI）: －0.07, 0.20; p 値＝0.36）。

考察：本研究において、生活活動範囲と疲労性の関連を明らかにすることはできなかった。Martin Vigorimeter は急激な血圧上昇を伴う検査であるため、対象者が限られたことが要因として考えられる。リスク管理の観点から、急激な血圧上昇を伴う検査を広く高齢者に実施することは困難であるが、一方で身体的フレイルの早期発見の観点から、身体内部の生理学的変化を伴う評価指標を検討・開発していく必要がある。

持続的なペダリング運動と認知課題が脳血流に及ぼす影響

高橋哲也[1)]、藤野雄次[1)]、根津利也[2,3)]、金子雛与[4)]
[1)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科
[2)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科理学療法学専攻
[3)] 秀和総合病院
[4)] さいたま市民医療センター

目的：運動による急性の脳血流増加に対し、持続的な運動や認知課題負荷に伴う脳循環動態については十分明らかではない。そこで本研究の目的は、持続的なペダリング運動と認知課題が脳血流に及ぼす影響を検討することとした。

方法：対象は健康な男子大学生7名（21.4±2.1歳）とした。課題はリカンベントタイプの自転車エルゴメータ駆動30分（駆動条件）と、自転車エルゴメータ駆動中に認知課題を実施する条件（認知条件）の2条件とし、測定順序は無作為とした。自転車エルゴメータ駆動の負荷は、事前に心肺運動負荷試験を実施し、V-slope 法を用いて嫌気性代謝閾値（AT）を決定し、AT 1 分前のワット数とした。脳血流の評価には、近赤外空間分解分光法（NIRS）を用いた。NIRS は両側前頭葉（ch1：左、ch2：右）の酸素化ヘモグロビン（Oxy-Hb）を測定し、安静時の Oxy-Hb に対する変化率を算出した（%Oxy-Hb）。認知的課題には Stroop 課題を用い、黒

文字で書かれた「あか」「あお」等の色名単語をできるだけ早く読む Word Reading（WR）課題、色名単語がその色とは異なる色で書かれており、文字の色ではなく色名単語をできるだけ早く言う Color Naming（CN）課題、色名単語がその色とは異なる色で書かれており、単語を読むのではなく文字の色をできるだけ早く言う Incongruent Color Naming（ICN）課題とした。NIRS は運動課題の開始1分前の安静状態から運動終了後1分までを計測し、認知的課題は WR 課題・CN 課題・ICN 課題を1セッションとし、駆動中に3セッション実施した。統計的解析には線形混合モデルを用い、%Oxy-Hb の差異を検証した。有意水準は5% とした。

結果：条件（駆動条件 / 認知条件）と左右のチャンネルに交互作用（$p < .001$）を認め、左脳では認知課題によって時間経過に伴い Oxy-Hb が増加するのに対し、右脳では認知的負荷に対する Oxy-Hb の変化が少ないことが示された。

結論：認知課題によって血流量の増加を惹起しうることが示された。一方、認知課題による血流変化は左右の脳で異なるパターンを示したことから、認知課題処理における脳機能の左右差が関与することが示唆された。

舌咽頭呼吸法のメカニズム解明のための口腔内運動の画像化

春山幸志郎[1)]、渋川周平[1)]、木暮陽介[2, 3)]、赤津敏哉[2)]
[1)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科
[2)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
[3)] 順天堂大学医学部附属順天堂医院放射線部

目的：舌咽頭呼吸（glossopharyngeal breathing：GPB）は、筋ジストロフィーや高位頚髄損傷などの神経筋障害患者において、人工呼吸器からの一時的離脱を可能とする重要な呼吸技術である。しかし、舌咽呼吸の動態とそれに伴う指導法の未確立が指摘されている。本研究の目的は、健常者における GPB 中の口腔内運動を画像化し、舌・咽頭・喉頭を含む運動協調メカニズムを視覚的・運動学的に定量化するための手法を確立することである。

方法：対象は GPB を習得し、習慣的に実施している健常成人3名とした。対象者は CT および MRI 装置内で背臥位となり、最大吸気および GPB を任意のタイミングで実施した。各条件において簡易流量計により吸気量を測定し、同時に4D-CT および矢状面 MRI により舌咽頭領域および肺領域の運動を撮像することとした。得られた画像は3次元および時間軸上で解析し、口唇、舌、軟口蓋、喉頭、声帯などの輪郭抽出を行い、各組織の運動方向、開閉状態および口腔内空間の容積変化を定量化することで口腔内運動の解析を検討した。

結果：研究体制および倫理審査は完了し、対象者リクルート体制も構築された。予備実験により、CT 撮影プロトコルの確立および舌咽頭領域・肺領域の MRI 撮影シークエンスの設定を行った。また、時間分解能と空間分解能の最適なバランスについて検討を行い、GPB 中の口腔内運動を時系列的に可視化するための撮像条件を設定した。

考察：本研究で構築した GPB 撮影プロトコルは、舌咽頭領域の運動を4次元的に可視化する試みとして新規性が高い。一方で、撮像条件や解析手法の妥当性については引き続き検討が必要である。今後は対象数を拡大し、GPB の運動学的特徴を明らかにするとともに、臨床における指導法の標準化に寄与する知見の創出が期待される。

ワーキングメモリと運動主体感における加齢性変化の影響

藤野雄次[1, 2)]、松田雅弘[1, 2)]、根津利也[2, 3)]、金子雛与[4)]
[1)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科
[2)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科理学療法学専攻
[3)] 秀和総合病院
[4)] さいたま市民医療センター

目的：本研究の目的は、成人と高齢者を対象に、ワーキングメモリ（WM）の能力が運動主体感（SoA）にどのように関与するかを比較検討することとした。

方法：被験者は健常な成人30名（年齢22.2±2.0歳（平均±標準偏差）、男性19名（63.3%））と、高齢者30名（年齢73.6±2.1歳、男性13名（43.3%））とした。SoA は、ディスプレイ中央下端から上方に異動する白い正方形のボックスを表示し、ランダムなタイミングでボックスが変色し、スペースキーを押したあと100ms ～ 1000ms の10段階（100ms 単位）のランダムな遅延後にボックスが上方にジャンプするソフトを作成し、評価した。被験者には、「スペースキーを押すことでボックスがジャンプする場合」とスペースキーの操作とは無関係に「コンピュータが自動的にボックスをジャンプさせる場合」の両方があることを伝えた。被験者には各試行後に、自分がボックスを操作したと感じたかどうかを「Yes」「No」の二択で口頭にて回答させた。10段階の時間遅れで各10施行（計100施行）実施し、被験者が「Yes」と回答した Yes の応答率（%）を算出した。ワーキングメモリは PC 上に提示される文章を音読させ、文章中の指定した単語を想起させるリーディング

スパンテスト（RST）を用いて評価した。統計的解析にはクラスター分析（Ward 法）を用い、RST の結果から WM 機能を分類し、その後に Kruskal-Wallis 検定を実施した。有意水準は5% とした。

結果：クラスター分析の結果、成人の低 WM 群13名・高 WM 群17名と、高齢者の低 WM 群11名・高 WM 群19名に分類された。群間比較の結果、成人および高齢者の WM が低い対象者では、運動結果の遅延300 ms までは運動主体感を知覚し、運動結果の遅延400 ms 以上では運動主体感が低下した。一方、高齢者の WM が高い対象者では、その境界が異なり、運動結果の遅延600 ms 以上で運動主体感が低下した。

結論：高齢者では、WM の機能差によって運動主体感が生起する時間幅が変容することが示唆された。

448kHz 電気刺激が大腿直筋スティッフネスと筋内血流動態に及ぼす効果

宮森隆行[1)]、杉山　諒[2)]、青柳壮志[3)]、岩木俊平[2)]、中野啓太郎[1)]、池田　浩[1)]、吉村雅文[2)]

[1)] 順天堂大学大学院保健医療学研究科

[2)] 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科

[3)] 順天堂大学スポーツ健康医科学推進機構

目的：大学女子サッカー選手において、容量性／抵抗性モノポーラ高周波療法（CRMF）が大腿直筋の筋スティフネスおよび局所血行動態に及ぼす即時的影響を、ホットパック（HP）および偽介入（sham）と比較して明らかにすること。

方法：対象は大学女子サッカー選手18名。無作為化クロスオーバー試験として CRMF、HP、sham の3条件を各15分実施し、条件間は48時間以上のウォッシュアウト期間を設けた。筋スティフネス（kPa）は超音波せん断波エラストグラフィにより安静位・伸張位で測定した。局所血行動態は近赤外分光法により Oxy-Hb、DeOxy-Hb、Total-Hb、組織酸素飽和度（StO_2）を深さ1.5cm および3.0cm で評価した。測定時点は介入前、介入直後、介入30分後とした。

結果：伸張位の筋スティフネスは CRMF で介入直後に有意に低下し、HP および sham より低値を示した。安静位では CRMF の低下が30分後に明確となり、HP および sham を下回った。血行動態は深部（3.0cm）で変化が顕著で、CRMF は Oxy-Hb および StO_2を有意に増加させ、その増加は30分後まで維持された。HP でも介入直後の Oxy-Hb 増加は認めたが、持続性は限定的であった。DeOxy-Hb の条件間差は明確ではなく、Total-Hb は主に介入直後に増加した。

考察：CRMF は、表層温熱療法（HP）や偽介入と比較して大腿直筋の筋スティッフネスを低減し、深部の酸素化指標をより持続的に改善した。伸張位で即時にスティフネスが低下したことは、受動張力が高い条件下で筋の粘弾性特性が変化しやすい可能性を示唆する。また、深部での Oxy-Hb と StO_2の持続的上昇は、CRMF が表層加温にとどまらず、深部循環・酸素化へ影響し得ることを支持する。ただし、健常アスリートを対象とした短期反応であり、損傷例への一般化や介入量（圧・温度）の定量化、評価者ブラインド等は今後の課題である。

結語：CRMF は大学女子サッカー選手の大腿直筋において、HP および sham に比して筋スティフネスを低下させ、深部の酸素化・循環指標をより持続的に改善した。これらは、下肢筋に対する CRMF の生理学的有用性を示す基礎的知見である。

臨床における動作解析の推進を目的とした計測システムと解析アプリケーション開発

横山萌香[1)]、飛山義憲[1)]、大路駿介[1)]、平田恵介[2)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

[2)] 東京家政大学健康科学部リハビリテーション学科

目的：臨床現場における動作解析は理学療法士に必須の技能であるが、客観的評価に用いられる三次元動作解析装置は高価であり、気軽な臨床導入は難しい。本研究では、多くの人が所有するスマートフォンを活用し、低コストかつ臨床現場でも使用可能な三次元動作解析システムの構築を目的とした。

方法：iPhone13を3台使用し、①チェッカーボードおよび LED を用いたキャリブレーション（カメラの姿勢推定・時間同期）、②4K・30FPS での動画撮影、③OpenPose による関節中心の推定、④ドロップランディング動作の三次元構成、という手順でシステムを構築した。光学式三次元動作解析装置（Plug-gait with OSSCA モデル、マーカー誤差0.02mm）を真値として精度検証を行った。

結果：2台によるキャリブレーションでは再投影誤差0.3〜1.7px（約1mm 前後）と良好な精度が得られた。一方、3台同時位置合わせでは再投影誤差20〜35px となり、精度向上が課題として示された。

考察：2台での位置合わせにおいて実用的な精度が得られたことは、スマートフォンを用いた臨床動作解析の実現可能性を示す成果である。3台同時使用時の精度低下に対しては、リモートシャッターを用いた静止画によるキャリブレーションの改善、およびペアキャリブレーション後の座標変換による3台同時位置合わせの検討を進める。今後は2次元関節座標の3次元再構

成スクリプトの作成と関節角度算出を行い、臨床応用可能なシステムの完成を目指す。

小児・AYA 世代の全脳全脊髄照射における妊孕性温存のための子宮・卵巣線量予測モデルの構築

臼井桂介[1,2]、鹿間直人[2]、斎藤アンネ優子[2]、井上達也[2]、橘　英伸[3]、馬場大海[3]、足立大翔[1]、前原栄一[1]、藏品　豊[4]

[1] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科
[2] 順天堂大学医学部放射線治療学講座
[3] 国立がん研究センター東病院
[4] エルピクセル株式会社

目的：全脳全脊髄照射（craniospinal irradiation; CSI）は小児の髄芽腫における髄膜播種の予防に有用であるが、不妊リスクの増加が課題である。本研究では、強度変調放射線治療（volumetric modulated arc therapy; VMAT）と陽子線治療に対して、膀胱・腸管体積や臓器間距離を含む解剖学的要因を使用した子宮・卵巣線量の統計学的予測モデルを構築した。また、卵巣線量の予測値を用いて早期卵巣機能不全リスク予測ツールによる臨床的有用性を検証した。

方法：公開データの小児患者100名に対し、VMAT および陽子線治療計画を作成して子宮・卵巣線量を取得した。膀胱容量、L5以下の腸管体積、直腸体積、L5から子宮・卵巣までの距離、子宮・卵巣体積を説明因子として、4種類の回帰モデル（重回帰、ランダムフォレスト、勾配ブースティング、Elastic Net）を構築し、5分割交差検証で精度を検証した。予測線量と治療計画時の線量（Dmax）を比較し、決定係数（R2）、平均絶対誤差（mean absolute error; MAE）および相関係数（r）で評価した。機能不全リスクは21 ～ 39歳の実測値と予測値による誤差率で評価した。

結果：VMAT では子宮線量予測において $R^2 = 0.49$、MAE = 0.64 Gy、r = 0.69、卵巣線量で $R^2 = 0.37$、MAE = 0.55 Gy、r = 0.59 と良好な再現性を示した。一方、陽子線治療は予測精度が低かった。機能不全リスク推定では、実測値と予測値の差はいずれの治療法でも1%以内であり、卵巣リスクの予測性能は良好であった。

考察：VMAT の予測モデルは子宮・卵巣線量の予測精度が高く、患者個別の治療計画支援として有用であることが示された。VMAT は照射が広範囲で均一なため、解剖学的要因に対して線量変化が緩やかであり、予測精度が向上したと考えられる。陽子線治療の予測モデルは精度が低く、個々の患者に適する放射線治療計画支援ツールに応用するためには、さらなる改善が必要である。その要因として、陽子線治療計画においてオーバーシュート現象が発生し、子宮・卵巣線量の外れ値が多かったこと、また予測因子が適していなかったことが考えられる。卵巣機能不全リスク解析では、各治療法とも実測と予測によるリスクの差が小さく、提案したモデルの実用性が示された。

頸動脈プラークが起因となった脳卒中を対象としたリスク予測のためのテクスチャ解析

後藤政実、京極伸介

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

目的：脆弱な頸動脈プラークによる脳梗塞リスク評価に対する、MRI に基づくテクスチャ特徴量の有用性を評価することを目的とした。

方法：MRI により頸動脈プラークの存在が診断され、アテローム血栓性脳梗塞の発症までの時間が取得できた10名の患者を解析対象とした。T1・T2 black-blood 画像および頸部3D time-of-flight 画像からのラジオミクス特徴量、生体力学的特性である壁面せん断応力（WSS）を算出した。さらに、新たな特徴量として Gray-Level Fluid Zone Matrix（GLFZM）も算出した。これらの特徴量を基に、臨床モデル、ラジオミクス・プラークモデル、ラジオミクス・ルーメンモデル、GLFZM モデル、WSS モデル、それらを組み合わせた統合モデルを構築した。各モデルの性能は、回帰分析により平均二乗誤差（MSE）を算出して評価した。さらに、各モデルのロバスト性の評価として、ノイズスケールを用いて生成した合成データに基づき、コックス比例ハザードモデルおよびコンコーダンス指数（CI）による評価も行った。

結果：MSE と平均 CI は、臨床モデルが2.58×10^6と0.65、ラジオミクス・プラークモデルが4.62×10^6と0.75、ラジオミクス・ルーメンモデルが3.30×10^6と0.81、GLFZM モデルが2.00×10^6と0.74、WSS モデルが2.47×10^6と0.46、統合モデルが1.48×10^6と0.78となり、統合モデルで最も低い MSE を示した。

結論：本研究は、臨床指標、ラジオミクス特徴量、GLFZM、および WSS を脳梗塞の虚血イベント予測モデルに組み込むことで、脆弱な頸動脈プラークに起因するリスクを評価できる可能性を示した。

* この内容は論文掲載済み（Radiol Phys Technol. 2025 Dec; 18(4): 988-1000.）

診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリの開発（継続）

佐藤英介[1)]、小島裕輔[2)]、堀　拳輔[1)]、小山和也[1)]、津田啓介[1)]、京極伸介[1)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

[2)] 信州大学医学部附属病院放射線部

目的：2022年度・2023年度の共同研究費で「診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリの開発」に取り組み、過去3年分の国家試験問題を実装したPrototypeのスマホアプリ“RT Drills［prototype 1.0.2］”を開発した。2024年度は、これまでの“RT Drills［prototype 1.0.2］”を改良して“RT Drills［prototype 2.0.1］”を開発し、その性能と機能を検証した。

方法：第68回（2015年度）～第77回（2024年度）までの過去10年分の問題・正答をデータベース（DB）に搭載するとともに、画像問題を解答できるように改良した。また、ユーザ自身で問題の解き直しを実施するためのお気に入り機能を追加した。さらに、診療放射線技師国家試験の新出題基準（令和7年版）に対応させるため、インターフェースを構築した。

結果：“RT Drills［prototype 2.0.1］”の主な特徴は、「過去問データベースの追加（3年分⇒10年分）・画像問題への対応・お気に入り機能の追加・診療放射線技師国家試験出題基準（令和7年版）に対応するためのインターフェースの構築」である。

結論：“RT Drills［prototype 2.0.1］”の改良により、学生にとって使いやすインターフェースを実装したことに加え、復習するための機能を搭載した。今後は、アプリリリースに向けた手続きを進める予定である。

機械学習による日本人脳年齢モデルの構築

渋川周平[1)]、小山和也[1)]、津田啓介[1)]、佐保辰典[2)]、原田智也[3)]、緑川竜司[3)]、南川脩斗[1)]、小澤拓也[4)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

[2)] 小倉記念病院放射線技師部

[3)] 新産健会 LSI 札幌クリニック

[4)] 順天堂大学大学院医学研究科放射線診断学

目的：Brain age gap（BAG）は、MRI画像から人工知能により推定された脳年齢と実年齢との差であり、加齢や神経変性を反映するバイオマーカーとして注目されている。しかし、BAGと認知症関連バイオマーカーとの関連は一貫していない。従来の学習データは既往歴やMRI所見に基づいて選択されており、潜在的な代謝・生理学的異常を有する対象が含まれていた可能性がある。本研究では、血液検査による代謝・生理学的指標を選択基準に組み込むことで、BAGと認知症関連指標との関連が変化するかを検討した。

方法：MRIおよび血液検査データを有する680名を対象として、機械学習による脳年齢推定モデルを2種類構築した。Model 1は従来基準、Model 2は血液検査指標を追加した基準に基づいた。MRIおよびアミロイドPETを施行した38名を対象にBAGを算出し、アミロイド陽性群と陰性群の差をWilcoxon順位和検定で比較した。さらに、標準化集積比（SUVR）、Centiloid値、Mini-Mental State Examination（MMSE）との関連をSpearman順位相関で評価した。

結果：Model 2ではアミロイド陽性群でより高いBAG値を示し、BAGはアミロイドβ蓄積指標および認知機能との関連傾向がModel 1より強かった。

考察：血液検査指標を組み込んだ参加者選択は、BAGと認知症関連バイオマーカーとの関連性を強める可能性が示唆された。ただし、差異はハイパーパラメータ設定や独立テストデータのサンプリング変動の影響を受けた可能性があり、より大規模かつバランスの取れたデータセットによる検証が必要である。

プログラミング学習用教材開発の基礎的検討

中世古和真[1)]、福永一星[1)]、梶原宏則[2)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

[2)] 国立がん研究センター東病院放射線技術部

目的：近年、問題解決能力の育成を目的として、プログラミング教育の重要性が高まっている。特に画像処理プログラミングは医療分野においても応用範囲が広いが、プログラムコードと処理結果の対応関係が直感的に理解しにくく、多くの学生にとって学習の障壁となっている。本研究は、学生がプログラムの動作を視覚的・直感的に理解できる補助教材の開発に向けた基礎的検討を目的とする。

方法：本学科では新カリキュラムとして3年次選択科目「情報処理演習」を開講し、2024年度70名、2025年度52名の受講生を対象に講義を実施した。2年間の講義を通して、学習状況および進捗の観察から問題点を整理した。また、履修動機に関する無記名アンケートおよび、基礎的理解度を評価するためのExcelの操作能力（統計処理、信号処理、画像処理など）に関するアンケート調査を実施した。

結果：履修動機としては「単位取得のため」が最多であり、学習意欲にばらつきが見られた。講義観察からは、「手を動かさない」ことが理解不足の主要因であり、基礎知識の不足も影響していた。特に学習内容が1次元信号から2次元画像へと発展する段階で理解が追い付かない傾向が認められた。Excelに関する基礎力調

査では、統計処理は可能である一方、信号処理や画像処理については「できない」「たぶんできない」と回答した学生が大半を占めた。

考察：現状の課題として、①基礎知識の不足、②主体的に手を動かさない学習姿勢、③履修動機の違いによるモチベーションの二極化が挙げられる。これらにより処理過程を具体的にイメージできず、理解が深化しない状況が生じている。対策として、振り返り時間の導入や視覚的教材の試行により、アウトプット機会の増加を図った。今後はExcelを活用した教材により基礎概念の可視化を進め、教育効果の定量的検証を行う。

宇宙での食と健康の未来を考える：食物等への中性子線の影響の解明

初田真知子[1)]、山倉文幸[1)]、高橋昌哉[1)]、家崎貴文[1)]、黒河千恵[1)]、村中由佳[1)]、松本(重永)綾子[2)]、鎌田弥生[3)]、川崎広明[4)]、大竹淑恵[5)]、小林知洋[5)]、高梨宇宙[5)]、若林泰生[5)]、池田啓一[6)]、飯泉恭一[7)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部

[2)] 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科スポーツ健康医科学研究所

[3)] 順天堂大学大学院医学研究科環境医学研究所

[4)] 昭和女子大学食健康科学部

[5)] 理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム

[6)] 北陸大学薬学部

[7)] 柴田学園生活創成学部

目的：宇宙空間における食と健康のリスク評価の一環として、宇宙放射線、特に高速中性子線が食品・医薬品に及ぼす影響の評価を目的とする。食品中のタンパク質・脂質の酸化・ニトロ化修飾や放射化生成核種、医薬品の分子構造や品質への影響を調べる。

方法：理研小型中性子源システム（RANS）により、豚肩肉・鶏卵試料（生・凍結乾燥状態）および麻酔薬プロポフォールに、1–5 MeVの高速中性子線を最大4 Gyまで照射した。放射化分析としてGe検出器によるγ線スペクトルとGM管による放射線量率の経時測定、生化学分析としてWBおよび質量分析によるタンパク質・脂質のニトロ化・酸化修飾の検出、医薬品評価として1H-NMR、HPLC、ミセル径計測等による分子構造と品質の変化を評価した。これまでに作成した大豆・魚の中性子照射試料の解析も行った。

結果：豚肩肉では、生試料に比べて凍結乾燥試料ではタンパク質のニトロ化の中性子照射量依存性が認められず、乾燥状態が放射線誘起化学修飾を抑制する可能性が示唆された。大豆の生・乾燥状態でニトロ化・酸化修飾への影響が示唆された。放射化分析では、豚肉・魚試料に^{24}Na、^{42}K、^{38}Clの等の放射性核種生成が確認され、魚では抗酸化作用を持つ^{75}Se放射化の可能性が示唆された。

麻酔薬プロポフォールに対する最大4 Gyの中性子線照射では、分子構造や品質に顕著な変化はなかったが、バイアル容器が顕著な放射化（24Na）を示した。

結論：これまでの研究により、高速中性子線が食品中のタンパク質・脂質に酸化およびニトロ化修飾を誘起すること[1)]、そして凍結乾燥処理がこれらの修飾を抑制する等の可能性が示された。この結果は、月・火星などの深宇宙環境における食品の輸送・保存において、凍結乾燥が宇宙放射線リスクを低減する有効な手法となり得ることを示唆する。さらに、医薬品プロポフォール自体は一定の耐放射線性を有する可能性がある一方で、容器材料の放射化が重要なリスク要因となることが明らかとなった。

1）Hatsuda, et al., Sci Rep. 2023.

深層学習を用いた動き補正付きCT画像再構成法の開発

堀　拳輔[1)]、福永一星[1)]、村中由佳[1)]、橋本雄幸[2)]

[1)] 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

[2)] 杏林大学保健学部診療放射線学科

目的：CTはX線投影画像を用いて身体の断層画像を再構成できる技術である。被写体に動きがある場合はCT画像上にブレが生じ、画像診断精度に影響を及ぼすため、一般的に胸部や腹部の検査では呼吸停止下で検査を行う。しかし、指示が通らない患者や心臓等の不随意運動をする臓器の撮影では画質が劣化する。本研究の目的は、データ収集時に動きが生じても、被写体の動きを補正できる深層学習を用いた新たなアルゴリズムの開発とした。

方法：深層学習を用いたアルゴリズムを開発して、コンピュータ上でシミュレーション実験を行った。本課題では、一般的に利用されているデジタルファントムで投影データを収集し、提案手法が従来手法と同等またはそれ以上の画質を担保できるかを検証した。画質の評価にはpeak signal noise ratio（PSNR）およびstructural similarity index measure（SSIM）を用いた。

結果：PSNRにおいて、従来手法であるfiltered back-projection（FBP）法、maximum likelihood-expectation maximization（ML-EM）法、total variation（TV）法はそれぞれ19.8、32.4、32.4であったが、提案手法は33.3で良好な結果を示した。SSIMにおいても、従来手法であるFBP法、ML-EM法、TV法はそれぞれ0.78、0.94、0.94であったが、提案手法は0.95で良好な結果を

示した。

考察：ニューラルネットワークが、投影画像に含まれる劣化因子を補正しながら画像再構成できることが実験的に示された。ただし、臨床応用に向けては、シミュレーションでは再現しきれない複雑な体動に対する頑健性について、今後さらなる検討が必要である。

2025年版　保健医療学部教員の代表的な研究・教育活動
保健医療学部教員の、この1年の主たる活動を1つ選び紹介します

京極　伸介（きょうごく　しんすけ）
保健医療学部　研究科長
Kawai S, et al. Evaluation of Nonlinear Pixel-Wise Squaring for Enhancing Low-Contrast Resolution in CT Imaging. Cureus. 2025; 17(11): e97479.

藤原　俊之（ふじわら　としゆき）
保健医療学部理学療法学科　学部長
Tani M, et al. Electromyography (EMG)-triggered transcutaneous spinal cord and hip stimulationfor gait rehabilitation in persons with chronic stroke: a randomized, controlled trial. J Neuroeng Rehabil. 2025; 22(1): 154.

高橋　哲也（たかはし　てつや）
保健医療学部理学療法学科　学科長
高橋哲也．高齢心不全患者の退院後要介護度悪化予測モデルの構築と個別化遠隔リハビリの効果検証．文部科学省学術研究助成基金助成　基盤研究（B, 2025 年 4 月～ 2030 年 3 月）．

坂本　肇（さかもと　はじめ）
保健医療学部診療放射線学科　学科長
坂本肇．日本の診断参考レベル（2025 年版）血管撮影・IVR 領域責任者（放射線診療における放射線防護の最適化のための指針）．

池田　浩（いけだ　ひろし）
保健医療学部理学療法学科　教授
Wakayama T, et al. MRI-Based Evaluation of PRP Therapy in Knee Osteoarthritis: WORMS and Synovial Changes at 6 Months. J Clin Med. 2025; 14(18): 6408.

相澤　純也（あいざわ　じゅんや）
保健医療学部理学療法学科　教授
スポーツ庁「目的を持った運動・スポーツの実践プログラム例」（ライフパフォーマンスの向上に向けた目的を持った運動・スポーツの実践に関する実態・ニーズ調査）．

松田　雅弘（まつだ　ただみつ）
保健医療学部理学療法学科　教授
Matsuda T, et al. Reliability and Validity Examination of a New Gait Motion Analysis System. Sensors (Basel). 2025; 25(4): 1076.

須藤　路子（すどう　みちこ）
保健医療学部理学療法学科　特任教授
須藤路子．早期英語教育の効果的指導法開発−母語獲得と社会認知・運動能力の発達の観点から−．科学研究費助成事業．2025 年 4 月～ 2029 年 3 月．

齊藤　正和（さいとう　まさかず）
保健医療学部理学療法学科　先任准教授
Saitoh M, et al. Concern About Falling Is a Predictor of Fall Risk in Older Patients With Cardiovascular Disease - A 1-Year Longitudinal Study. Circ Rep. 2025; 7(11): 1071-1078.

飛山　義憲（ひやま　よしのり）
保健医療学部理学療法学科　先任准教授
Hiyama Y, et al. Achieving Normative Quadriceps Strength After Total Knee Arthroplasty: Associations with Satisfaction, Function, and a Predictive Nomogram. Bone Joint J. 2025. in press.

澤　龍一（さわ　りゅういち）
保健医療学部理学療法学科　准教授
Sawa R, et al. Development and psychometric properties of the Japanese Residential Environment Checklist for Safety (J-RECS): Self-assessment tool for environmental fall risk factors. Geriatr Gerontol Int. 2025; 25(7): 897-904.

髙橋　容子（たかはし　ようこ）
保健医療学部理学療法学科　准教授
髙橋容子．脳卒中患者の脊髄神経経路活動に融和する歩行同期型振動刺激技術の開発と実証．公益財団法人立石科学技術振興財団 2025 年度研究助成（B）．2025 年 4 月～ 2027 年 3 月．

春山　幸志郎（はるやま　こうしろう）
保健医療学部理学療法学科　准教授
Haruyama K, et al. Impact of rehabilitation on quality of life in patients with degenerative cerebellar ataxias using structural equation modeling. Sci Rep. 2025; 15(1): 21997.

石川　愛子（いしかわ　あいこ）
保健医療学部理学療法学科　准教授 *1
Nakagami T, et al. Predictors of skeletal muscle loss during first-line therapy in diffuse large B-cell lymphoma: the Glasgow Prognostic Score. BMJ Support Palliat Care. 2025: spcare-2025-005797.

藤野　雄次（ふじの　ゆうじ）
保健医療学部理学療法学科　准教授
Nezu T, et al. Evaluating Postural Control Functions With a Focus on Vestibular Sensation in Thalamic Astasia: A Case Report. Cureus. 2025; 17(7): e88661.

宮森　隆行（みやもり　たかゆき）
保健医療学部理学療法学科　准教授
Takayuki Miyamori. Advancing Sports Physical Therapy in Asia: Japan's Contributions to Education, Research, and Clinical Practice. 第 12 回日本スポーツ理学療法学会学術大会．シンポジウム 1　世界とつなぐ〜世界におけるスポーツ理学療法が切り拓く社会創成．北海道札幌市，2025 年 11 月 29 日．

岩津　弘太郎（いわつ　こうたろう）
保健医療学部理学療法学科　講師
Iwatsu K. Severity of mobility limitation and adverse outcomes in heart failure. Heart. 2025: heartjnl-2024-325120.

姉帯　飛高（あねたい　ひだか）
保健医療学部理学療法学科　講師
Anetai H, et al. Twelfth Rib Length as a Predictor of Anatomic Variations in the Lumbosacral Plexus Associated With Atypical Radiculopathy in Lumbar Disc Herniation. Spine (Phila Pa 1976). 2025; 50(24): E505-E512.

中村　絵美（なかむら　えみ）
保健医療学部理学療法学科　助教 *2
中村絵美．第 12 回日本スポーツ理学療法学会学術大会．ショート口述演題：上肢．北海道，2025 年 11 月 29 日〜 30 日．

横山　萌香（よこやま　もえか）
保健医療学部理学療法学科　助教
横山萌香．在宅リハビリテーションのアドヒアランス向上：エビデンスに基づく個別化戦略と実装．勇美記念財団 2025 年度 一般公募「在宅医療推進のための研究」．2025 年 8 月〜 2027 年 8 月．

立本　将士（たてもと　つよし）
保健医療学部理学療法学科　助教
立本将士．エビデンスに基づく理学療法〜神経疾患編〜．東京都理学療法士協会研修会，EBM と理学療法に関する研修会．WEB 開催．

大路　駿介（おおじ　しゅんすけ）
保健医療学部理学療法学科　助教
Ohji S, et al. The relationship between whole-body muscle mass and the isokinetic knee extensor strength of the non-operated side following anterior cruciate ligament reconstruction. Isokinet Exerc Sci. 2025; 33(1): 68-77.

山田　莞爾（やまだ　かんじ）
保健医療学部理学療法学科　助教
山田莞爾．慢性呼吸器疾患患者に対するリハビリテーション．第 47 回日本呼吸療法医学会学術集会．大坂，2025 年 8 月 30 日〜 31 日．

髙橋　昌哉（たかはし　まさや）
保健医療学部診療放射線学科　教授
髙橋 昌哉．The President of the Asian Society of Magnetic Resonance in Medicine 就任．

中西　淳（なかにし　あつし）
保健医療学部診療放射線学科　教授
中西　淳．第 22 回脳核医学画像解析研究会．指定講演．東京，2025 年 9 月 20 日．

初田　真知子（はつだ　まちこ）
保健医療学部診療放射線学科　教授
Hatsuda M, et al. Effects of neutron radiation on pharmaceuticals in deep space-like environments - general anesthesia in space. Life Sci Space Res (Amst). 2025; 46: 61-73.

後藤　政実（ごとう　まさみ）
保健医療学部診療放射線学科　教授
後藤政実．日本磁気共鳴学会 Best Scientific Award 受賞 "Advantages of Using Both Voxel- and Surface-based Morphometry in Cortical Morphology Analysis: A Review of Various Applications".

家崎　貴文（いえさき　たかふみ）
保健医療学部診療放射線学科　先任准教授
家崎貴文．「ビタミン B1 欠乏時における血管の反応性の変化はマグネシウム欠乏とどう関連するか」：2023 年度 基盤研究（C）　課題番号 23K05132.

室井　健三（むろい　けんぞう）
保健医療学部診療放射線学科　先任准教授
室井健三，他．令和 3 年厚生労働省告示第 273 号研修における実技研修．順天堂保健医療学雑誌．2025; 6(1): 122-126.

佐藤　英介（さとう　えいすけ）
保健医療学部診療放射線学科　先任准教授
Sato E, et al. 一般演題（ポスター）．Variations in super-resolution processing of PET images using deep learning, European Congress of Radiology 2025, Scientific Exhibit, C-14350. Vienna, March 2025.

津田　啓介（つだ　けいすけ）
保健医療学部診療放射線学科　先任准教授
Sato M, et al. Development of an anomaly detection system for Gibbs artifact identification in amyloid PET imaging. Radiol Phys Technol. 2025; 18(3): 756-765.

黒河　千恵（くろかわ　ちえ）
保健医療学部診療放射線学科　准教授
黒河千恵．第 129 回日本医学物理学会学術大会 プログラム委員長．

臼井　桂介（うすい　けいすけ）
保健医療学部診療放射線学科　准教授
Suga K, et al. Investigation of dose ratios of hybrid volumetric-modulated arc Therapy plans for nonsmall cell lung cancer. Med Dosim. 2026; 51(1): 72-83.

中世古　和真（なかぜこ　かずま）
保健医療学部診療放射線学科　准教授
第 2 章 医療画像 3 画像処理① 114-155，5 画質評価 183-249，第 3 章 医療情報 2 医療情報システム 289-293，第 5 章 実習の手引き & レポートの取り方 363-369. in 実践 ! 医療画像情報学基礎から実験・演習まで. 橋本雄幸編．メジカルビュー社．ISBN: 978-4-7583-2291-1.

小山　和也（こやま　かずや）
保健医療学部診療放射線学科　准教授
Ogasawara R, et al. Evaluation of the Characteristics of Short Acquisition Times Using the Clear Adaptive Low-Noise Method and Advanced Intelligent Clear-IQ Engine Radiation. 2025; 5(2): 18.

渋川　周平（しぶかわ　しゅうへい）
保健医療学部診療放射線学科　准教授
Shibukawa S, et al. Predicting perceived exertion during high-intensity exercise using quantitative MRI: insights from T2* value and muscle cross-sectional area. T Radiol Phys Technol. 2025; 18(3): 746-755.

赤津　敏哉（あかつ　としや）
保健医療学部診療放射線学科　講師
赤津敏哉．右鼠径部から陰嚢にかけての疼痛を呈した慢性虫垂炎 ― 精巣異常を認めず虫垂が原因と判明した一例 ―．第 10 回日本小児超音波研究会学術集会．一般演題 1（腹部 1）．大宮，2025 年 11 月 2 日．

福永　一星（ふくなが　いっせい）
保健医療学部診療放射線学科　助教
Tani M. Electromyography (EMG)-triggered transcutaneous spinal cord and hip stimulation for gait rehabilitation in persons with chronic stroke: a randomized, controlled trial. J Neuroeng Rehabil. 2025; 22(1): 154.

堀　　拳輔（ほり　けんすけ）
保健医療学部診療放射線学科　助教
Hori K, et al. Limited-angle SPECT image reconstruction using deep image prior. Phys Med Biol. 2025; 70(14).

村中　由佳（むらなか　ゆか）
保健医療学部診療放射線学科　助教
Mizutani A, et al. Application of [^{99m}Tc]Tc-GSA in the diagnosis of Staphylococcus aureus infections. Nucl Med Biol. 2025; 146-147: 109021.

*1 2026 年度より医学部リハビリテーション医学講座准教授
*2 2026 年度よりスポーツ健康科学部スポーツ健康科学科助教
※教員の役職・職位は 2026 年 4 月時点のものを記載

順天堂保健医療学雑誌
Juntendo Health Science Journal
投　稿　規　程

Ⅰ．投稿論文と投稿資格

すべての投稿論文は、保健医療学ならびにこれに関連のある領域とし、投稿者は、以下の者に加え編集委員会が認めた者とする。

1. 順天堂大学保健医療学部の専任教員および非常勤教員
2. 順天堂大学教員（非常勤を含む）、学生、本学医学部附属病院勤務の理学療法士および診療放射線技師

Ⅱ．著者資格

著者とは、投稿された論文に重要な知的貢献をした者である。研究活動に十分に参加し、原稿の作成に関与し、論文の内容について責任を負える者である。資金の獲得、データ収集等の部分的な助言のみを行った者は著者には当たらない。尚、共著者は投稿前に最終原稿を読み、投稿を許可してから責任著者が投稿する。

Ⅲ．原稿の種類

原稿の種類は、総説・論説・原著・研究報告・実践報告・資料・その他であり、内容は次の通りである。

総説：テーマについては編集委員会で決定する。学内外の専門家に依頼することとする。（原則毎年であるが、ない場合も認める）

論説：特定のテーマに関する自説、展望、提言を論述したものとする。

原著：論理的かつ明確な構想に基づき、独自のデータから得られた研究結果を基に、新しい知見が論理的に示され、独創性があり、学術的な意義が明らかであるものとする。

研究報告（症例報告を含む）：内容的に原著論文には及ばないが、研究結果の意義が大きく、発表の価値が認められるものとする。

実践報告：教育活動、順天堂大学医学部附属6病院の実習の報告などで、教育・実習の向上および発展に寄与し、発表の価値が認められるものとする。

資料：有用な調査データや文献等に検討を加えたもので発表の価値が認められるものとする。

その他：編集委員会が認めたもの、および以下とする。

- 学内外活動報告（学生教育、臨床実習等）
- 学会報告・学術講演（国内・国外）
- クラブ活動等
- 合同学生部委員会での活動報告

Ⅳ．倫理的配慮

人および動物が対象である研究は、投稿者が所属する施設等の研究倫理審査委員会で承認されたものでなければならない。尚、本文中には承認を受けた旨を記載する。

Ⅴ．利益相反

投稿時から遡って過去１年以内に発表内容に関係する企業・組織または団体との利益相反となるような経済的支援を受けた場合は、論文の謝辞等の後にその旨を記載する。利益相反がない場合は「本研究（本症例報告）における利益相反は存在しない」と記載する。

Ⅵ．執筆要領（和文）

1. 原稿の書式

原稿のサイズはA4判とし、フォントは明朝体を使用し、文字の大きさは12ポイント、余白は25mmで印字する。原稿提出の際は、表紙には論文題目のみを記載し、①オリジナル原稿（Word）、②査読用原稿（PDF）を提出する。

2. 原稿の長さ

投稿原稿の1編は、論文の種類に関わらず、本文、図・表、文献を含めて原則以下の字数以内とする。超過した場合は、所要経費を著者負担とする。尚、刷り上がりの1頁の文字数は1,600字（目安）とする。

＊総　　説　10,000字
＊論　　説　3,000 ～ 8,000字

＊原　　著　13,000字
＊研究報告　11,200字
＊実践報告　11,200字
＊資　　料　11,200字
＊そ の 他　11,200字

3. 原稿の構成

1）執筆要領：原稿は、編集委員会が指定したテンプレートを使用し作成することとする。書式は、以下の原則による。

2）投稿申請書
論文題目、著者名、所属を和文および英文で記し、希望する論文の種類、連絡先、利益相反、倫理的配慮に関する事項を書式に従って記載する。

3）表紙
表紙には、論文題目（和文、英文）のみを記載する。

4）要旨
要旨は原則すべて和文要旨（500 字程度）、英文要旨（300 words 程度）、5 個以内のキーワード（日本語、英語）を記載する。

4. 本文

1）構成は、原則として緒言（背景と目的）、方法、結果、考察、結論の順とする。

2）各章の見出し番号は、1、1）、（1）の順とする。

3）数値の単位については国際単位系（SI）を用いる。

4）略語は慣用のものとする。一般的でない略語を用いる場合は、論文の初出のところで正式用語とともに提示する。

5. 図・表の作成

図・表は原則オリジナルとする。著作権保持者の許諾を得ている場合、図・表を自由に使用できると明言されている場合は例外とする。

図・表は本文とは別にし、図1、表2などの番号および表題・説明を付ける。写真は図として取り扱い、図や写真は十分な解像度（概ね600dpi 以上）に設定の上、JPEG 形式または TIFF 形式で保存し、PowerPoint や Word に貼付する。図・表を文字数に換算する目安として、A4最大の大きさを1600文字、A4半分程度を800文字とする。

6. 引用文献

引用文献は、印刷されたもの、入手可能なものが望ましい。ウェブページや PDF ファイルからの引用は、そのページのリファレンスとして URL が変化せず、誰でも閲覧可能であるなどの要件を十分検討した上で提示する。文献は文中で引用された順に番号を付けることとし、上付きカッコで、[1)]、[2)]、[3)] などと記載する。文献が複数にわたる場合には、[1, 2)] や[1-3)] と記載する。引用文献リストは著者グループが複数の場合、6名まで記載し、7名以上の場合は著者6名の後に「他」と表示する。

＜引用文献一覧例＞

1）単行書

著者名：書籍名．版表示．出版地．出版社．出版年：始頁～終頁

（1）松尾豊：人工知能は人間を超えるか－ディープラーニングの先にあるもの．東京．KADOKAWA. 2015: 50～53.

2）翻訳書

原著者名，翻訳者名（訳），翻訳書名．版表示．出版地．出版社．出版年：始頁～終頁．

（2）Esping-Andersen G, 林昌宏（訳），アンデルセン、福祉を語る－女性・子ども・高齢者．東京．NTT 出版．2008: 100～102.

3）雑誌掲載論文

著者名：論文名．誌名．出版年：巻数：始頁～終頁

（和文）

（3）香本晃良，崔龍洙，江端望，渡辺由紀子，松尾美紀，片山由紀，他：黄色ブドウ球菌における RNA ポリメラーゼ遺伝子の突然変異は Linezolid の高感受性化に関連する．順天堂医学．2012: 58: 498～450.

（英文）

（4）You WC, Blot WJ, Li JY, Chang YS, Jin ML, Kneller R, et al: Precancerous gastric lesions in a population at high risk of stomach cancer. Cancer Res. 1993: 53: 1317-1321.

4）ウェブページからの引用

著者名：ウェブページの題名，ウェブサイトの名称．入手先，入手日付．

（5）未来投資戦略2018－「Society5.0」「データ駆動型社会」への変革－．https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_

zentai.pdf，2019年2月26日.

（6）American Cancer Society. Cancer Facts & Figures 2003. https://www.adph.org/ascr/assets/AlaCancerFactsFigures2003.pdf, Accessed March 3, 2003.

Ⅶ．著者が負担すべき費用

掲載料は無料とする。尚、著者にはPDFを送付する。ページを超過した場合は別途著者負担とする。

Ⅷ．執筆要領（英文）

1. 原稿の書式（Style for manuscripts）

原稿は、編集委員会が指定したテンプレートを使用し作成することとする。書式は、以下の原則による。すべての投稿はA4用紙に上下左右25mm以上の余白を設け、半角80字×40行に設定し、文字の大きさは12ポイント、フォントはTimes New Romanを使用する。英文は原則としてネイティブチェックを受けることが望ましい。

Manuscripts should be formatted according to the template specified by the editorial committee. The format should follow the principles outlined below. All submissions must be typed on A4 or 8.5”x11” paper. Leave margin of at least 1 inch at the top, bottom, right, and left of every page. Set the lines as 80 strokes × 40 lines. The font should be 12-point-sized Times New Roman.

2. 原稿の長さ（Maximum permissible number of words）

英文による投稿は、文献、注、図・表を含め、総説4,000語、論説4,000語、原著6,500語、研究報告5,600語、実践報告5,600語、資料5,600語、その他5,600語を超えないものとする。

Review articles and Editorials should not exceed 4,000 words

Original articles should not exceed 6,500 words

Research reports should not exceed 5,600 words

Documents and others should not exceed 5,600 words

including references, footnotes, tables, and figures

3. 原稿の構成（Composition for manuscripts）

表紙を作成し、英語のキーワード（5つ以内）、タイトル、氏名、所属を記入する。原則すべてに英文で300 words程度の要約を記載する。

The first page of the manuscripts should be a cover sheet that includes 5 or less keywords, the title, and author’s name along with affiliation. The author’s name and identifying references should appear only on the cover sheet. All articles should be attached with an abstract (300 words around in English).

Ⅸ．論文の採否

投稿論文は査読を行い、編集委員会が論文の採否、掲載順序を決定する。

Ⅹ．校正

著者校正は初校のみとし、この際大幅な加筆修正は認めない。

Ⅺ．著作権

本誌に掲載された論文の著作権は、順天堂大学保健医療学部に帰属し、本学部が電子化の権利を有する。

Ⅻ．原稿の提出方法および提出先

1．提出方法

以下2点の提出を要する。

①オリジナル原稿（Word）

画像がある場合はJPEG形式またはTIFF形式で保存し、原稿に貼付する。

②査読用原稿（PDF）

2．提出先・問い合わせ先

〒113-0033 東京都文京区本郷3-2-12

順天堂保健医療学雑誌編集委員会

TEL: 03-3812-1780

Mail: j-fhs@juntendo.ac.jp

原則E-mailによる投稿のみ受け付ける。

編集後記

順天堂保健医療学雑誌 :Juntendo Health Science Journal の第7巻をお届けする運びとなりました。第7巻は、論説16編、実践報告10編、その他1編、および保健医療学部共同研究・症例研究助成金を獲得された16編の研究抄録で構成されています。第6巻と同様に論説が全体の約半数を占めていますが、これは2023年度に開設された大学院保健医療学研究科の修了要件として、本誌への投稿が定められているためです。大学院生は自身の研究テーマについてレビューを行い、指導教官のもと、研究者としての第一歩として論説を執筆することとなります。ご指導いただいた大学院の先生方に深く感謝申し上げるとともに、査読にご協力いただいた先生方にも、この場を借りて御礼申し上げます。

保健医療学雑誌編集委員会では、原著論文、特に英語論文の投稿数を増やすべく、英文校正サポートも行っております。今後も本誌で取り扱う英語論文数を増やし、国際性を意識した雑誌を目指してまいります。

最後になりましたが、今回の刊行に際し、ご尽力いただいた事務や校正会社の皆様にも、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。今後とも忌憚のないご意見、ご批判、ご叱正を賜りますようお願い申し上げます。

2026年8月

図書・紀要委員会委員長
中西　淳

編集委員

委員長　中西　淳
副委員長　藤野　雄次
委員　髙橋　昌哉
中村　絵美
堀　拳輔
山田　莞爾
善家　雅（事務）
中村　真澄（事務）
森本　ゆふ（事務）

順天堂保健医療学雑誌

JUNTENDO HEALTH SCIENCE JOURNAL

第 7 巻　第 1 号
2026 年 8 月 31 日発行
2020 年創刊

発行人　順天堂大学保健医療学部
〒 113-8421　東京都文京区本郷 2-1-1 順天堂大学内
順天堂保健医療学雑誌編集委員会：電話 03-3812-1780
E-mail j-fhs@juntedo.ac.jp

編集・印刷：株式会社広稜社
〒 113-0034 東京都文京区湯島 2-31-25 4F
電話 03-3868-3352

Juntendo University Faculty of Health Science Aug. 2026　vol.7