



Juntendo Health Science Journal

順天堂保健医療学雑誌

vol.

6

順天堂大学保健医療学雑誌第6巻第1号

目次

巻頭言

| | | |
|---------------------------|------------|---|
| 順天堂保健医療学雑誌第6巻発行にあたって..... | 京極 伸介..... | 1 |
|---------------------------|------------|---|

論説

| | | |
|--|----------------------------|----|
| Narrative review of hospitalization-associated disability and physical activity in older patients with heart failure..... | Ryota Inaba, et al..... | 2 |
| A review of peripheral magnetic stimulation therapy for skeletal muscle strengthening..... | Takeru Echizen, et al..... | 9 |
| Hospitalization-associated disability and treatment strategies in older patients with heart disease: A narrative review..... | Shoki Yusu, et al..... | 15 |
| Relationship between skeletal muscle and postoperative outcomes in older lung cancer patients: A narrative review..... | Junya Ueno, et al..... | 21 |
| 放射線治療におけるロバスト治療計画法の概要..... | 足立 大翔、臼井 桂介..... | 28 |
| 前立腺癌の放射線治療における体内金属の影響..... | 高氏 颯汰、黒河 千恵..... | 34 |
| 脳卒中片麻痺患者に対する長下肢装具に関連する症例対象研究の国内外調査..... | 渡辺 卓馬、松田 雅弘..... | 40 |
| 頭頸部放射線治療における患者位置の不確かさによる線量分布への影響..... | 渡邊 亮、黒河 千恵..... | 47 |
| 脳性麻痺児の座位からの立ち上がり動作における運動学的特性と筋活動に関する文献レビュー..... | 城井麻美子、松田 雅弘..... | 53 |
| 医用画像におけるデータ拡張の基礎と最近の動向..... | 隈本神太朗、後藤 政実..... | 65 |
| シェーグレン症候群の診断における MRI..... | 小泉 達也、後藤 政実..... | 71 |
| 小児がんの陽子線治療の現状..... | 前原 栄一、臼井 桂介..... | 77 |
| 医用画像処理における深層学習の有用性と今後の展望..... | 土屋 諒真、臼井 桂介..... | 83 |
| fMRI を用いた偏頭痛患者の脳機能解析..... | 加藤 倭、後藤 政実..... | 93 |

実践報告・その他

| | | |
|---|-----------------------------|-----|
| The 4th Annual JUHS 2024 (Department of Physical Therapy)..... | Masakazu Saitoh, et al..... | 98 |
| The 4th Annual JUHS 2024 (Department of Radiological Technology)..... | Kensuke Hori, et al..... | 101 |

| | | |
|---|--|-----|
| The 4th Annual JUHS 2024 (Program)..... | | 104 |
|---|--|-----|

国際シンポジウム抄録

Digital health in Denmark & a digital heart:

| | | |
|---|----------------------|-----|
| The path to tele-rehabilitation for atrial fibrillation in Denmark | Birthe Dinesen | 106 |
| Application of artificial intelligence for infant motor assessment | Suh-Fang Jeng | 107 |
| Recent trends in breast imaging techniques in breast cancer detection | Chiung-Wen Kuo | 108 |
| AI in radiation oncology | Jin Sung Kim | 109 |

| | | |
|----------------------------------|-------------|-----|
| 臨床見学型短期留学（台湾）..... | 内山 翔太 他.... | 110 |
| 臨床実習型短期留学（台湾）..... | 小山 珠 他.... | 114 |
| 語学教育型海外短期留学（カナダ）..... | 高木 亜季..... | 118 |
| 令和3年厚生労働省告示第273号研修における実技研修..... | 室井 健三 他.... | 122 |
| 2024年度春季保健医療学部市民公開講座の実践..... | 福永 一星..... | 127 |
| 順天堂大学保健医療学部市民公開講座「放射線の基礎知識」..... | 村中 由佳..... | 130 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 2023年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録..... | 133 |
|------------------------------|-----|

| | |
|----------------------------------|-----|
| 2024年版 保健医療学部教員の代表的な研究・教育活動..... | 140 |
|----------------------------------|-----|

| | |
|-----------|-----|
| 投稿規程..... | 145 |
|-----------|-----|

| | |
|-----------|-----|
| 編集後記..... | 149 |
|-----------|-----|

順天堂保健医療学雑誌第6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月には本学で4番目となる大学院保健医療学研究科（修士課程）を開設しました。さらに2025年4月には博士課程も加わり、学部・大学院ともに着実な発展を遂げています。現在、学部卒業生はすでに3期生を送り出し、初めての修士課程修了者も誕生しました。

本学術雑誌『順天堂保健医療学雑誌』は、学部創設と同時に創刊され、本号をもって第6巻の発行を迎える運びとなりました。この節目を迎えるにあたり、本誌の継続的な発展と、それを支えてくださった多くの皆様に深い感謝の意を表したいと思います。

本誌は、保健医療学部および大学院研究科の歩みとともに成長を続けており、その歴史はあたかも年輪のごとく、確かな軌跡を刻んできました。創刊当初は教員による投稿が中心でしたが、回を重ねるごとに学部生の卒業研究や大学院生による原著論文・論説などが掲載されるようになり、投稿者層の若返りとともに誌面の内容も一層充実してきています。

社会は超高齢化の進行という未曾有の課題に直面し、また新型コロナウイルス感染症を経た今、医療を取り巻く環境はますます複雑かつ厳しいものとなっています。そのような中で、理学療法学および診療放射線学の果たす役割と重要性は、今後ますます高まることが予想されます。保健医療分野における教育・研究・実践の融合を図る場として、本誌の意義は一層大きなものになると確信しています。

最後に、本誌の刊行にあたりご寄稿いただいた研究者や学生の皆様、論文作成を指導された教員の先生方、査読をご担当いただいた方々、そして編集・発行に携わってくださったすべてのスタッフの皆様に、心より感謝申し上げます。なお、年々ページ数が増加し、それに伴って発行コストも上昇していることは、本誌の成長を示す“贅沢な悩み”とも言えるでしょう。

今後とも、本誌が保健医療学の発展に資する学術的プラットフォームとして、皆様に親しまれ、広く活用されることを願ってやみません。

2025年7月吉日
保健医療学研究科長
京極伸介

Narrative review of hospitalization-associated disability and physical activity in older patients with heart failure

Ryota Inaba^{1,2)}, Keita Fujiyama²⁾, Atsuko Seki²⁾, Tetsuya Takahashi¹⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University

²⁾ Department of Rehabilitation, Fujinomiya City General Hospital

Abstract

The current number of older patients with heart failure (HF) is rapidly increasing, named the HF pandemic. Hospitalization-associated disability (HAD) is the decline in activities of daily living (ADL) caused by hospitalization. Additionally, HAD increases readmissions and mortality, making it an urgent issue. Moreover, reduced physical activity (PA) has drawn attention as a factor in HAD. This review aimed to summarize previous reports on HAD in older patients with HF as well as HAD and PA. Keyword searches were performed in the PubMed database. The results revealed 10 studies on HAD in older patients with HF and 2 studies on HAD and PA during hospitalization, of which 1 study on HAD and PA in older patients with HF was extracted. Older patients with HF demonstrated high HAD incidence, ranging from 10.6% to 41%, and HAD exhibits a poor prognostic factor. Conversely, effective physical therapy remains unknown. Additionally, few studies on HAD and PA and no studies on cut-off values or amount of change in PA to prevent HAD in older patients with HF were found. In the future, clarifying the appropriate PA as well as the amount of change in PA for each patient to be effective in preventing HAD will be important.

Key Words: heart failure, hospitalization-associated disability, hospital acquired disability, physical activity

Juntendo Health Science Journal 6(1): 2-8, 2025 (Received Jun. 20, 2024 ; Accepted Oct. 10, 2024)

Introduction

In Japan, the number of patients with heart failure (HF) continues to increase as the population ages, and the number of patients with HF is estimated to reach 1.3 million by 2030¹⁾. Furthermore, patients with HF are more likely to be older than those with myocardial infarction, with the greatest number of patients in their 80s²⁾. These older patients with HF may experience a decline in activities of daily living (ADL) because the acute phase treatment severely limits their activities when hospitalized.

Currently, hospitalization-associated disability (HAD) is defined as a decline in ADL ability caused by hospitalization. HAD development worsens prognosis³⁾ and increases hospitalization costs⁴⁾; thus, taking action to prevent and control HAD is an urgent need. Furthermore, physical activity (PA) is attracting attention to maintain and improve health and extend

healthy life expectancy. PA is defined as “any bodily movement by skeletal muscle activity that results in energy expenditure”⁵⁾. The Japanese “Physical Activity Standards for Health Promotion 2013”⁶⁾ broadly categorized PA into exercise and life activities, with exercise defined as “activities performed in a planned and continuous manner to maintain and improve physical fitness” and life activities as “activities in daily life, such as work, household chores, commuting, and school.” Imagining that the PA of older patients with HF decreases due to bed rest when they are hospitalized is easy. Therefore, physical therapy during hospitalization needs to focus on PA, including ADL on the ward. However, PA during hospitalization of older patients with HF remains inadequately assessed. This review summarizes previous studies, focusing on HAD in older patients with HF and on the HAD and PA during hospitalization, as well as reports on issues associated with HAD and PA in older patients with HF.

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

Materials and methods

1. Database and search terms

English-language articles published in the PubMed database from 1982 to 2024 were included.

- 1) The keywords “heart failure” and “hospitalization-associated disability” were used to search for studies on HAD in older patients with HF.
- 2) The keywords “hospitalization-associated disability” and “physical activity” were utilized to search for studies on HAD and PA during hospitalization.
- 3) The keywords “heart failure,” “hospitalization-associated disability,” and “physical activity” were used to search for studies on HAD and PA during hospitalization in older patients with HF.

The search was repeated using “hospital acquired disability” as a synonym for “hospitalization-associated disability.” Additionally, we included a search for “decline” and “activity of daily living” because we found some studies that did not use the definition of HAD as a decline in ADL ability during hospitalization.

2. Search string

- 1) (heart failure) AND (hospitalization-associated disability)
- 2) (heart failure) AND (hospital acquired disability)
- 3) (heart failure) AND (decline) AND (activity of daily living)
- 4) (hospitalization-associated disability) AND (physical activity)
- 5) (hospital acquired disability) AND (physical activity)
- 6) (heart failure) AND (hospitalization-associated disability) AND (physical activity)
- 7) (heart failure) AND (hospital acquired disability) AND (physical activity)

Results

Search results included 5, 28, 159, 8, 132, 1, and 4 studies for search strings 1-7, respectively. The content of the main text was reviewed after title and abstract screening.

The results of the sampling revealed 10 studies on HAD in older patients with HF and 2 studies on HAD and PA during hospitalization, of which 1 study was

on HAD and PA in older patients with HF.

The results of this search demonstrated that HAD in older patients with HF has not been reported overseas, only in Japan.

We added 2 studies on HAD and PA during hospitalization from the references of the study by Pavon et al since only 2 studies on HAD and PA during hospitalization were found⁷⁾.

1. Studies on HAD in older patients with HF

We found 10 studies on HAD in older patients with HF. The sample size, HAD definition, and inpatient cardiac rehabilitation (CR) status differed by studies (Table 1).

1) HAD definition

Currently, HAD has no established definition, and researchers and studies demonstrate differences. In the past days, Convinsky et al.⁸⁾, in 2011, defined HAD as the inability to independently perform one or more of the basic ADLs (bathing, dressing, rising from bed or chair, toileting, eating, and walking across the room).

Takabayashi et al.⁹⁾ classified ADLs into four categories (independent outdoor ambulation, independent indoor ambulation, indoor ambulation with assistance, or abasia both before hospitalization and at discharge) and defined HAD as a decrease in ambulation ability at discharge compared with ambulation ability before hospitalization.

Yaku et al.¹⁰⁾ classified mobility status as ambulatory (including patients using any aid, including a cane), wheelchair use only outdoors, wheelchair use indoors and outdoors, and bedridden, based on Japanese long-term care insurance definitions, and defined HAD as a decrease in at least one mobility level at discharge compared with that before hospitalization.

Saitoh et al.³⁾ defined HAD as a decrease of at least 5 points in the Barthel Index (BI) score at discharge compared with that before hospitalization. The BI consists of 10 items: feeding, grooming, transfers, toileting, bathing, dressing, mobility, stairs, bowel control, and bladder control, and is scored on a 100 points scale¹¹⁾. No previous studies have evaluated the minimal clinically important difference (MCID) in BI scores in patients with HF. However, Saitoh et al.

Table 1 Studies on HAD in older patients with HF

| Authors, year | Sample size/ Age (years) | Definition of HAD | Incidence of HAD | CR |
|---|-----------------------------|--|---------------------|----|
| Takabayashi K et al, 2019 ⁹⁾ | 923/ 75.7 ± 11.2 | Change in walking ability before and after admission | 10.6% | NR |
| Yaku H et al, 2020 ¹⁰⁾ | 3555/ 80 (71-86) | Change in mobility level before and after admission | 14.9% | NR |
| Saitoh M et al, 2021 ³⁾ | 1941/ 81 (75-86) | BI score before hospitalization - BI score at discharge ≥ 5 points | 25% | ○ |
| Takara Y et al, 2021 ¹⁶⁾ | 70/ 78 (74-83) | BI score before hospitalization - BI score at discharge ≥ 5 points | 41% | ○ |
| Kato M et al, 2021 ¹²⁾ | 411/ NR | NCGG-ADL score before hospitalization - NCGG-ADL score at discharge ≥ 1 point | 21% | ○ |
| Sakuyama A et al, 2022 ¹⁹⁾ | 408/ 82 (76-86) | BI score before hospitalization - BI score at discharge ≥ 5 points | 15% | ○ |
| Yokota J et al, 2023 ¹⁷⁾ | 360/ 84 (78-88) | BI score before hospitalization - BI score at discharge ≥ 5 points | 38.1% | ○ |
| Nemoto S et al, 2023 ¹⁴⁾ | 241/ 69.5 ± 14.2 | A decrease in one item in the Katz Index at discharge compared to before hospitalization | 26.1% | ○ |
| Kito K et al, 2023 ¹³⁾ | 576/ 82 (76-87) | NCGG-ADL score before hospitalization - NCGG-ADL score at discharge ≥ 1 point | 20% | ○ |
| Takahashi T et al, 2024 ¹⁸⁾ | 9403/ 83 (77-88) | BI score before hospitalization - BI score at discharge ≥ 5 points | 37.1% | ○ |

Data are mean ± standard deviation or median (interquartile range). CR: Cardiac Rehabilitation; NR: Not Reported; BI: Barthel Index; NCGG-ADL: National Center for Geriatrics and Gerontology-Activities of Daily Living Scale

indicated that a decrease of at least 5 points during hospitalization would be useful as a simple risk stratification in older patients with HF. Of 10 studies, 5 used this definition.

Kato et al.¹²⁾ and Kito et al.¹³⁾ defined HAD as a decrease of one or more points in the National Center for Geriatrics and Gerontology-Activities of Daily Living Scale (NCGG-ADL) score at discharge compared with before hospitalization, using the instrumental activities of daily living (IADL) assessment tool. The NCGG-ADL is a 13-item questionnaire (0-13 points scale) that utilizes a dichotomous (yes/no) question method.

Nemoto et al.¹⁴⁾ defined HAD as a decrease in at least one Katz Index item at discharge compared with that before hospitalization. The Katz Index evaluates the status of six ADLs (bathing, dressing, toileting, feeding, bowel control and bladder control, and transfers) on a 7-point scale (A-G) in terms of independence or assistance¹⁵⁾.

2) HAD incidence

HAD incidence in older patients with HF in Japan ranged from 10.6% to 41% (Table 1).

3) Risk factors

Of the 10 studies, 5 reported on risk factors for HAD development as follows:

- Age of ≥80 years, female, prior stroke, dementia, ambulatory before hospitalization, elevated body temperature, New York Heart Association (NYHA) class III or IV on admission, decreased albumin levels, hyponatremia, and renal dysfunction¹⁰⁾
- Multi-faceted frailty before hospitalization, decrease in PA during hospitalization, and prolonged urinary catheter duration¹⁶⁾
- Short of average daily rehabilitation time¹²⁾
- Dysphagia¹⁷⁾

Furthermore, Takahashi et al.¹⁸⁾ reported that the risk factors for developing HAD differed according to the BI score before hospitalization. They revealed that factors associated with HAD were older age and frailty in the group with a pre-hospitalization BI score of ≥ 85, whereas severity of heart disease (NYHA classification) and cognitive decline were associated with HAD in the group with a pre-hospitalization BI score of <85.

4) Prognosis

Of the 10 studies, 5 reported on the prognosis of older patients with HF with HAD.

Takabayashi et al.⁹⁾ investigated outcomes 900 days post-hospital discharge and revealed HAD as an independent risk factor for increased hospitalization for HF (hazard ratio [HR]: 1.42, 95% confidence interval [CI]: 1.01-1.96; $p = 0.046$) and mortality (HR: 1.95, 95% CI: 1.23–2.99; $p < 0.01$), despite adjusting risk factors.

Yaku et al.¹⁰⁾ investigated outcomes at 1-year post-hospital discharge and revealed that HAD was associated with an increased risk of all-cause death or hospitalization for HF (HR: 1.95, 95% CI: 1.71-2.21; $p < 0.001$), despite adjusting baseline characteristics, as well as an increased risk of death or hospitalization for HF (HR: 1.46; 95% CI: 1.24-1.71; $p < 0.001$).

Saitoh et al.³⁾ evaluated outcomes 2 years post-hospital discharge and demonstrated that those who developed HAD exhibited a significantly higher risk of all-cause death ($p < 0.001$) and HF readmission ($p = 0.031$) compared with those who did not develop HAD. Additionally, they reported HAD as an independent predictor of all-cause mortality after adjusting for the Meta-Analysis Global Group in Chronic (MAGGIC) risk score (HR: 1.772, 95% CI: 1.450-2.167; $p < 0.001$) and HF readmission (HR: 1.193, 95% CI: 1.005-1.416; $p = 0.043$). Furthermore, they revealed a similar association between HAD and all-cause mortality for patients with independent ADL, moderately dependent ADL, and highly dependent ADL.

Sakuyama et al.¹⁹⁾ examined outcomes 2 years post-hospital discharge and exhibited that HAD development independently increased all-cause mortality (HR: 1.857, 95% CI: 1.062–3.250; $p = 0.030$). Additionally, they revealed significantly higher all-cause mortality rates in those with underweight patients ($<18.5 \text{ kg/m}^2$) who developed HAD compared to those who did not develop HAD (HR: 3.797, 95% CI: 1.646-8.758; $p = 0.002$).

Kito et al.¹³⁾ investigated outcomes 1-year post-hospital discharge and revealed that HAD development, as assessed by IADL, was associated with significantly higher all-cause mortality (HR: 1.923, 95% CI: 1.085-3.409; $p = 0.023$) after adjusting risk factors.

5) Prevention and countermeasures for HAD

Currently, no studies evaluated specific physical therapy for HAD in older patients with HF. However, Kato et al.¹²⁾ revealed that the incidence of HAD was significantly lower in older patients with HF who received 40 min of rehabilitation per day compared with those who received 20 min (odds ratio [OR]: 0.475, 95% CI: 0.231-0.975; $p = 0.042$).

2. Association between HAD and PA during hospitalization

Four studies have investigated the association between HAD and PA during hospitalization.

1) HAD and PA during hospitalization in older patients

Pavon et al.⁷⁾ prospectively investigated the association between accelerometer-measured PA (number of steps, physical activity time, etc.) and HAD. Participants were 196 hospitalized older adults aged ≥ 60 years who were ambulatory (with or without assistance from another person or walking aid), cognitively intact at the time of admission, and able to follow instructions. The accelerometer was placed on the Patient's ankle (above the lateral malleolus) within 24 h of admission. Patients wore the accelerometer continuously (including during sleep) until discharge or for a maximum of 7 days. The results revealed that lower in-hospital PA, as measured by the accelerometer, was associated with HAD. They demonstrated that patients with HAD exhibited less active time (0.8 vs. 1.4 h/day; $p = 0.04$) and fewer steps (1186 vs. 1808 steps/day; $p = 0.04$), but no difference in sedentary time (14.9 vs. 14.3 h/day; $p = 0.16$).

Agmon et al.²⁰⁾ prospectively investigated whether 900 steps/day could discriminate against patients with HAD. Participants were 177 older adults, aged ≥ 65 years, admitted to the Department of Internal Medicine who were ambulatory (with or without a walking aid) and cognitively intact two weeks before admission. The accelerometer was attached to the patient's ankle and worn for a maximum of 3 days. They revealed that walking <900 steps per day was strongly associated with HAD, and those who walked fewer than 900 steps per day had a 4.7-fold increased risk of developing HAD (OR: 4.7, 95% CI: 2.0-11.0) compared with

those who walked more than 900 steps per day.

Cohen et al.²¹⁾ investigated the effect of an exercise program (WALK-FOR program) on HAD prevention using a pre–post two-group comparative design based on Agmon et al. Participants were 377 older adults aged ≥ 65 years who were admitted to the Department of Internal Medicine and were ambulatory at the time of admission. They included 189 patients in the control group and 188 in the intervention group, with the intervention group reporting a 41% HAD incidence reduction with at least 900 steps per day (OR: 0.59, 95% CI: 0.34-1.0; $p = 0.05$).

2) HAD and PA during hospitalization in older patients with HF

Only one study by Takara et al.¹⁶⁾ investigated HAD and PA during hospitalization in older patients with HF. Participants were 70 older patients aged ≥ 65 years who were hospitalized for acute HF and were independent (BI score of >70 points) pre-hospitalization. The accelerometer was attached to the patient's waist and worn from the first ambulation until discharge. They revealed that patients with HAD exhibited fewer steps per day (457 vs. 1692 steps; $p < 0.01$) and less time of moderate-intensity PA (>3 metabolic equivalents: METs/min) during hospitalization (0 vs. 1 min; $p < 0.05$).

Discussion and conclusion

This study summarized previous reports on HAD and PA in older patients with HF.

All of the studies of HAD in older patients with HF in this study were reported from Japan. The definition of HAD was not well defined, and the incidence of HAD varied widely from 10.6% to 41%. Takabayasi et al.⁹⁾ and Yaku et al.¹⁰⁾ reported HAD incidence rates of 10.6% and 14.9%, respectively, which were lower than other studies. This may have been an underestimate because only mobility decline, one of the basic activities of daily living (BADL), was used in the definition. And, Kato et al.¹²⁾ and Kito et al.¹³⁾ used an assessment of IADL and reported an incidence of HAD of about 20%, but caution should be used in interpretation because the content of the assessment is very different from the BI and the Katz Index, which

assess BADL. In the present study on HAD in older patients with HF, BI was the most commonly used method of assessment. BI is simple and has demonstrated inter-rater reliability²²⁾. As the population ages, it is expected that more patients will have declining ADL and low physical function prior to hospitalization, therefore it is important to focus on BADL during hospitalization. In addition, patients with HF may have difficulty not only with mobility and walking, but also with a variety of other activities due to their symptoms²³⁾, therefore a comprehensive assessment is necessary. BI may be useful in assessing HAD in older patients with HF during hospitalization. However, as mentioned above, there are no previous studies evaluating the MCID of BI scores in patients with HF, therefore further investigation into the definition of HAD is needed. Although it is essential to standardize the definition and assessment method of HAD in the future, it is also an idea to assess HAD with an assessment battery that is appropriate for each stage of the disease and each hospital.

HAD is not uncommon in older patients with HF, and HAD is a poor prognostic factor. Some studies have revealed risk factors, and some of them are non-modifiable, such as pre-symptomatic state and illness severity, but PA during hospitalization, indwelling urinary catheter duration, cognitive decline, and short rehabilitation time are modifiable factors. Therefore, physical therapists have plenty of room to intervene. However, the specific duration, intensity, and content of physical therapy are unclear, and further research, including intervention studies, is warranted.

In the present study, we investigated reports of HAD and PA during hospitalization, but the number of reports remains small. In particular, patients with acute HF frequently have very limited PA due to HF symptoms and oxygen administration. Additionally, older patients with HF frequently have many comorbidities, and early mobilization is often challenging due to decreased strength and frailty pre-hospitalization. With shorter hospital stays, providing evidence-based physical therapy and ways of spending time outside of physical therapy is important. Managing and increasing PA during hospitalization as the patient's condition and physical function improve is important

despite the necessity to limit PA during worsening HF.

Agmon et al.²⁰⁾ used 900 steps per day as an effective cut-off for HAD prevention, and Cohen et al.²¹⁾ revealed that 900 steps per day prevented HAD development in older adults who were ambulatory at admission. However, a study by Pavon et al.⁷⁾ demonstrated many false negatives at 900 steps/day, which missed one-third of patients newly diagnosed with HAD (sensitivity: 40%, specificity: 85%). The effective PA for preventing HAD is unclear despite the variability in the study population in each research. Therefore, just as Takahashi et al.¹⁸⁾ investigated risk factors for HAD in older patients with HF according to differences in preadmission ADL scores, a single cut-off value for PA may be insufficient. Clarifying the appropriate PA to prevent HAD for each patient is important. Furthermore, no studies focus on the association between the amount of change in PA from admission (start of physical therapy) to discharge and HAD. Identifying not only the cut-off value for PA but also the amount of change in PA that is effective in preventing HAD may help guide the physical therapy program during hospitalization.

Ethical approval

This article does not contain any studies performed with human participants or animals. Great care has been considered not to violate copyrights in the handling of references, and citations have been strictly adhered to.

Competing interests

The authors declare that they have no conflict of interest.

Funding

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 20H04055.

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) Yasuda S, Nakao K, Nishimura K, Miyamoto Y, Sumita Y, Shishido T, et al: The current status of cardiovascular medicine in Japan—analysis of a large number of health records from a nationwide claim-based database, JROAD-DPC—. *Circ J*. 2016; 80: 2327-2335.
- 3) Saitoh M, Takahashi Y, Okamura D, Akiho M, Suzuki H, Noguchi N, et al: Prognostic impact of hospital-acquired disability in elderly patients with heart failure. *ESC Heart Fail*. 2021; 8: 1767-1774.
- 4) Ogawa M, Yoshida N, Nakai M, Kanaoka K, Sumita Y, Kanejima Y, et al: Hospital-associated disability and hospitalization costs for acute heart failure stratified by body mass index- insight from the JROAD/JROAD-DPC database. *Int J Cardiol*. 2022; 367: 38-44.
- 5) Caspersen CJ, Powell KE, Christenson GM: Physical activity, exercise, and physical fitness: definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Rep*. 1985; 100: 126-131.
- 6) Ministry of Health, Labour and Welfare. Physical activity guidelines for health promotion 2013. <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xppl-att/2r9852000002xpqt.pdf>, Accessed March 9, 2024.
- 7) Pavon JM, Sloane RJ, Pieper CF, Colón-Emeric CS, Cohen HJ, Gallagher D, et al: Accelerometer-measured hospital physical activity and hospital-acquired disability in older adults. *J Am Geriatr Soc*. 2020; 68: 261-265.
- 8) Covinsky KE, Pierluissi E, Johnston CB: Hospitalization-associated disability: "She was probably able to ambulate, but I'm not sure". *Jama*. 2011; 306: 1782-1793.
- 9) Takabayashi K, Kitaguchi S, Iwatsu K, Morikami Y, Ichinohe T, Yamamoto T, et al: A decline in activities of daily living due to acute heart failure is an independent risk factor of hospitalization for heart failure and mortality.

- J Cardiol. 2019; 73: 522-529.
- 10) Yaku H, Kato T, Morimoto T, Inuzuka Y, Tamaki Y, Ozasa N, et al: Risk factors and clinical outcomes of functional decline during hospitalisation in very old patients with acute decompensated heart failure: an observational study. *BMJ Open*. 2020; 10: e032674.
 - 11) Mahoney FI, Barthel DW: Functional evaluation: The Barthel index. *Md State Med J*. 1965; 14: 61-65.
 - 12) Kato M, Mori Y, Watanabe D, Onoda H, Fujiyama K, Toda M, et al: Relationship between average daily rehabilitation time and decline in instrumental activity of daily living among older patients with heart failure: A preliminary analysis of a multicenter cohort study, SURUGA-CARE. *PLoS One*. 2021; 16: e0254128.
 - 13) Kito K, Mori Y, Watanabe D, Onoda H, Fujiyama K, Toda M, et al. Relationship between instrumental activities of daily living decline during hospitalization and one-year mortality in elderly patients with heart failure: A multi-center prospective cohort study. *Arch Gerontol Geriatr*. 2023; 110: 104985.
 - 14) Nemoto S, Kasahara Y, Izawa KP, Watanabe S, Yoshizawa K, Takeichi N, et al: Hospital-acquired disability in older heart failure patients decreases independence and increases difficulties in activities of daily living. *Eur J Cardiovasc Nurs*. 2023; 22: 355-363.
 - 15) Katz S, Ford AB, Moskowitz RW, Jackson BA, Jaffe MW: Studies of illness in the aged. The index of adl: A standardized measure of biological and psychosocial function. *Jama*. 1963; 185: 914-919.
 - 16) Takara Y, Saitoh M, Morisawa T, Takahashi T, Yoshida N, Sakiyama M, et al: Clinical characteristics of older heart failure patients with hospital-acquired disability: A preliminary, single-center, observational study. *Cardiol Res*. 2021; 12: 293-301.
 - 17) Yokota J, Takahashi R, Chiba T, Matsukawa Y, Matsushima K, Sasaki K: Dysphagia is an independent predictor of hospital-acquired disability in older patients with heart failure: a propensity score-matched analysis: Predictors of HAD in older HF patients. *Heart Vessels*. 2023; 38: 66-76.
 - 18) Takahashi T, Iwata K, Morisawa T, Kato M, Kono Y, Taya M, et al: Incidence of hospitalization-associated disability in older patients with heart failure. *Circ J*. 2024; 88: 672-679.
 - 19) Sakuyama A, Saitoh M, Hori K, Adachi Y, Iwai K, Nagayama M: Associations of body mass index and hospital-acquired disability with post-discharge mortality in older patients with acute heart failure. *J Geriatr Cardiol*. 2022; 19: 209-217.
 - 20) Agmon M, Zisberg A, Gil E, Rand D, Gur-Yaish N, Azriel M: Association between 900 steps a day and functional decline in older hospitalized patients. *JAMA Intern Med*. 2017; 177: 272-274.
 - 21) Cohen Y, Zisberg A, Chayat Y, Gur-Yaish N, Gil E, Levin C, et al: Walking for better outcomes and recovery: The effect of Walk-for in preventing hospital-associated functional decline among older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2019; 74: 1664-1670.
 - 22) Formiga F, Mascaró J, Pujol R: Inter-rater reliability of the Barthel index. *Age Ageing*. 2005; 34: 655-656.
 - 23) Dunlay SM, Manemann SM, Chamberlain AM, Cheville AL, Jiang R, Weston SA, et al. Activities of daily living and outcomes in heart failure. *Circ Heart Fail*. 2015; 8: 261-267.

A review of peripheral magnetic stimulation therapy for skeletal muscle strengthening

Takeru Echizen¹⁾, Shoki Yusu¹⁾, Urara Chiba¹⁾, Tomoyuki Morisawa^{1, 2)}, Masakazu Saitoh^{1, 2)}, 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

Repetitive peripheral magnetic stimulation (rPMS) has emerged as a promising neuromodulation technique for stimulating peripheral nerves and skeletal muscles. Compared to electrical stimulation, rPMS has the advantage of causing less pain to the skin and producing stronger muscle contractions. This paper reviews the findings on the safety and efficacy of rPMS focused on skeletal muscle strengthening that have been reported to date and discusses the prospects of rPMS.

The rPMS requires limitation of stimulation parameters due to the heat generated by the coil when used for extended periods of time. With regard to safety, there have been few detailed reports on adverse events and side effects, particularly those related to hemodynamics. In the future, verification on the efficacy of rPMS using a wide range of stimulation parameters and evaluation of its hemodynamic safety will be required to expand the range of indications for rPMS.

Key Words: repetitive peripheral magnetic stimulation, muscle strengthening, muscle hypertrophy, safety

Juntendo Health Science Journal 6(1): 9-14, 2025 (Received Jul. 8, 2024 ; Accepted Mar. 3, 2024)

Introduction

Repetitive peripheral magnetic stimulation (rPMS) began to be used in the 1980s as a new neuromodulation technique to stimulate peripheral nerves and skeletal muscles¹⁾. On the other hand, despite the extensive use of electrical stimulation in clinical practice, it has been observed to have certain limitations. Such limitations include the tendency to cause discomfort to the skin and the difficulty of obtaining sufficient muscle contraction in patients with edema²⁾. This, in turn, can impact the effectiveness of the muscle-strengthening effect.

In contrast, rPMS is distinguished by its capacity to excite deep motor and proprioceptive nerves with minimal discomfort³⁾, as it does not involve the activation of skin nociceptors. This unique feature of rPMS has the potential to overcome the disadvantages of electrical stimulation and is expected to prevent and

improve muscle atrophy and weakness. However, there are few reports on the clinical application of rPMS for muscle strengthening, and there is insufficient evidence for both safety and efficacy. This paper presents a summary of the findings on the safety and efficacy of rPMS for muscle strengthening that have been reported to date, along with a discussion of the clinical prospects for rPMS.

Features of rPMS

The primary advantage of rPMS is that it causes less pain during stimulation because it does not involve superficial sensation. Additionally, it is possible to produce stronger muscle contractions compared to electrical stimulation^{4, 5)}. Furthermore, in order to cause more effectively muscle contractions, it is recommended that the electrodes be placed near the "motor point" for electrical stimulation⁶⁾. Conversely, the coil utilized in rPMS is not required to be applied

Corresponding author: Tetsuya Takahashi

Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University, Tokyo, Japan

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University, Tokyo, Japan

3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033

E-mail: te-takahashi@juntendo.ac.jp

directly to the skin, as is the case with electrical stimulation. This feature allows for the simple identification of motor points, which is one of the key advantages of rPMS. Additionally, rPMS can be applied to areas where it is difficult to expose the skin, such as under clothing. These features suggest that rPMS may be more convenient and effective than electrical stimulation. However, rPMS is not widely used in clinical practice due to the large size of the device, its high cost, and the difficulty of using it for long periods of time due to the heat storage effect of the coils.

Actual practice of rPMS muscle-strengthening effect

A number of randomized controlled trials (RCTs) have been conducted to verify the muscle-strengthening effects of rPMS (Table 1).

Three RCTs have been conducted on rPMS muscle strengthening, and the effects of rPMS have begun to be recognized. Yang et al.⁷⁾ reported a significant increase in maximal isokinetic and isometric knee extensor strength in the quadriceps muscle of healthy adults who were conducted rPMS three times a week for five weeks. In an RCT of patients with COPD, Bustamante et al.⁸⁾ conducted rPMS three times a week for eight weeks on the patients' quadriceps muscles. The results demonstrated that the stimulation group exhibited significant improvement in maximal isometric knee extensor strength as measured by a hand-held dynamometer compared to the control group. Furthermore, Baek et al.⁹⁾ reported that patients who had undergone arthroplasty or artificial head replacement after a proximal femur fracture were conducted rPMS five times a week for three weeks. The results showed that surface electromyographic activity in the vastus lateralis muscle was significantly improved.

On the other hand, two RCTs have been reported to examine the effect of rPMS on muscle hypertrophy. One study reported that rPMS was performed on the quadriceps muscles of healthy subjects, and no change in muscle cross-sectional area (CSA) or muscle thickness was observed five weeks after the start of the intervention⁷⁾. In a study conducted by Suzuki et

al.¹⁰⁾, rPMS was performed on acute stroke patients. The intervention consisted of 5 sets per day, 5 times per week, with a frequency of 30 Hz, on phase of 1.3 seconds, and off phase 3 seconds. The interval between sets was 2 minutes, with each set comprising 30 stimulation repetitions. This intervention prevented a decrease in CSA in the rectus femoris muscle on the paralyzed side. However, they reported that they could not completely clarify the effect of rPMS on preventing muscle atrophy because the subjects in the rPMS group were older, which may have affected the results.

Thus, previous reports indicate that rPMS produces an increase in muscle strength. On the other hand, the effects of rPMS on muscle morphological changes, such as muscle atrophy and hypertrophy, are still limited. It has been demonstrated that the muscle contraction induced by rPMS is caused by the activation of intramuscular motor nerves^{11,12)}. Given that the previous report showed that rPMS led to an increase in muscle strength without muscle hypertrophy, it is suggested that the muscle strengthening effects of rPMS are largely influenced by neurological factors⁷⁾. In order to achieve a muscle hypertrophy effect, it is essential to carefully set the stimulation parameters of rPMS. In general, the higher the stimulation intensity and frequency, the stronger and more stable muscle contraction is obtained¹³⁾. However, due to the characteristics of the rPMS system, the coil tends to heat up as the stimulation intensity and frequency increase, making it difficult to use high intensity and high frequency stimulation for prolonged periods of time in practice for safety reasons. In the study by Hirono et al.¹⁴⁾, 15 healthy males were subjected to rPMS at a frequency of 50 Hz, duty cycle 1:3 (1 second stimulation phase, 3 seconds rest phase), and a total of 5000 shots (approximately 7 minutes) at the maximum stimulation intensity of the device. As a consequence, the researchers observed a selective increase in muscle thickness of the vastus lateralis muscle as an acute effect of rPMS. By setting such short intervention times, rPMS was demonstrated to increase muscle thickness, albeit only as an acute effect, even when high-frequency and high-intensity stimulation parameters were utilized.

In recent years, the device itself has been developed

Table 1 Muscle strengthening effects of rPMS

| First author (year of publish) | Subjects | | rPMS protocol | | | Main results |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|---|
| | Characteristics | Number of patients, Age (years) | Parameter | Intervention frequency (days/week) | Intervention period (weeks) | |
| Yang SS, et al. (2017) | healthy subjects | 40 subjects (rPMS group: 20, control group: 20) Age (rPMS group: 29.4±1.9, control group: 28.8±1.8) | Target muscle: quadriceps Frequency: 10 Hz Intensity: Maximum intensity tolerated DC: on phase 5s/off phase 25s Intervention time: 15 min / day | 3 | 5 | • Isokinetic and isometric peak knee extensor strength ↑ • CSA and thickness of RF ↑ |
| Bustamante V, et al. (2010) | severe COPD patients | 18 subjects (rPMS group: 10, control group: 8) Age (rPMS group: 61±6, sham group: 62±8) | Target muscle: quadriceps Frequency: 7-15 Hz Intensity: 40% (15 Hz) to 70% (7 Hz) of the maximum output of the device DC: on phase 2s/off phase 4s Intervention time: 15 min / day (Performed on bilateral quadriceps muscles) | 3 | 8 | • Isometric peak knee extensor strength ↑ |
| Baek J, et al. (2018) | post hip replacement surgery patients | 22 subjects (rPMS group: 11, sham group: 11) Age (rPMS group: 77.09±6.78, sham group: 80.36±7.97) | Target muscle: VL Frequency: 10 Hz Intensity: level that produces visible muscle contraction DC: on phase 1.5s / off phase 4.5 s Intervention time: 25 min / day | 5 | 3 | • Surface electromyographic activity of VL ↑ |
| Suzuki K, et al. (2020) | acute stroke patients | 12 subjects (rPMS group: 6, non-rPMS group: 6) Age (rPMS group: 75.5±6.4, non-rPMS group: 62.5±11.8) | Target muscle: RF Frequency: 30 Hz Stimulation intensity: 0.9 Tesla (maximum output of the stimulator) DC: on phase 1.3s / off phase 3s Intervention time: approx. 20 min / day | 5 | 2 | • CSA of RF in rPMS group → • CSA of RF in non-rPMS group ↓ |
| Hirono T, et al. (2021) | healthy young male | 15 subjects (Subjects: 25.5 ± 3.7) | Target muscle: VL Frequency: 50 Hz Intensity: 0.9 Tesla (maximum output of the stimulator) DC: on phase 1s / off phase 3s Number of muscle contractions: 50 times/ session (2 sessions performed) | — | — | • Muscle thickness of VL after rPMS ↑ |

COPD: chronic obstructive pulmonary disease, VL: Vastus lateralis, RF: Rectus femoris, DC: duty cycle, CSA: Cross-sectional area, ↑: Increase, ↓: decrease, →: no change, MVC: maximal voluntary contraction

with a cooling function to prevent heat generation from the coils. It is expected that the prevention of muscle atrophy and the effect of muscle hypertrophy will be clarified in the future through the design of more effective stimulation parameters and further development of the rPMS device.

Actual practice of rPMS safety

1. Contraindications and precautions for rPMS

In principle, it is recommended that contraindications and precautions for rPMS be in accordance with the Guidelines for the Safety of Magnetic Stimulation Therapy¹⁵⁾ (Table 2). Patients with pacemakers or metal objects in close proximity to the stimulation site are absolute contraindications to magnetic stimulation, and medical professionals should always confirm those contraindications before performing rPMS. In addition, because rPMS produces involuntary muscle contractions, the muscle pumping action can cause changes in blood flow that may affect heart rate and other hemodynamic indicators. Therefore, when

using rPMS in patients with cardiac or respiratory disease, or other patients prone to hemodynamic changes, it is recommended to communicate with the doctor to ensure that vital signs such as ECG monito-

Table 2 Contraindications and precautions for rPMS

| |
|--|
| 1. Absolute contraindications |
| <ul style="list-style-type: none"> • Patients with a pacemaker • Patients with metal objects (cochlear implants, magnetic clips, stimulators for deep brain stimulation, vagus nerve stimulation, etc.) in close proximity to the stimulation site |
| 2. Relative contraindications |
| <ul style="list-style-type: none"> • Patients with metal not in close proximity to the stimulation site (e.g. medications pumps implanted in the body), intracranial titanium products, or dentures or implants that are magnetically attached to the patient's body. • Patients with a history of or at risk for epileptic or convulsive seizures, pregnancy, or complications of serious physical illness. |
| 3. Precautions |
| <ul style="list-style-type: none"> • Approval of the ethics committee at the institution concerned must be obtained. • The subject must be fully informed about the research and informed consent must be obtained in writing. • When performing magnetic stimulation, remove hairpins, earrings, piercings, glasses, hearing aids, wallets, cards, cell phones, etc. from the subject and the researcher. • When performing rPMS for patients with cardiac or respiratory disease and other patients at high risk for fluctuating circulatory dynamics, it is recommended to monitor vital signs such as electrocardiogram, blood pressure, heart rate, and respiratory rate. |

* Prepared by author based on reference 15)

ring, blood pressure, heart rate, and respiratory rate are under control.

2. Adverse events and side effects related to rPMS

To date, no serious adverse events have been reported to date regarding the safety of rPMS¹⁶⁾. Since rPMS produces involuntary muscle contraction, excessive muscle contraction may lead to muscle damage. In addition, the muscle pumping action caused by muscle contraction may affect hemodynamics. However, the majority of clinical studies on rPMS have focused on the effects of rPMS on spasticity¹⁷⁻²³⁾ and dysphagia^{24, 25)} in stroke patients. There have been few reports on the safety of rPMS for muscle strengthening.

To date, in the clinical use of rPMS for muscle strengthening, only two studies have reported the presence or absence of adverse effects. Bustamante et al.⁸⁾ observed changes in creatine kinase (CK) and lactate dehydrogenase (LD), which represent tissue inflammatory response, as indicators of muscle damage after rPMS in patients with COPD. No significant changes in CK and LD were observed before or after the intervention, and subjects reported only occasional mild muscle pain that was not persistent. Hirono et al.¹⁴⁾ conducted rPMS on healthy adult males and reported that no subject discontinued stimulation due to pain or discomfort. To date, there have been no reports of serious adverse events or side effects associated with rPMS for muscle strengthening, but there are only a few detailed safety reports.

Prospects for rPMS

As with electrical stimulation, rPMS is expected to be introduced into the intensive care unit (ICU) in the future. It is well documented that intensive care unit-acquired weakness (ICU-AW) is a frequent occurrence in critically ill patients following their admission to the ICU²⁶⁾. Given that rPMS is capable of stimulating skeletal muscles in patients who have difficulty performing voluntary movements, it is anticipated that it will be applied to critically ill patients in a manner analogous to electrical stimulation. However, many critically ill patients require inotropic support or ventilator, and the question of whether rPMS can be

used in such patients with unstable hemodynamics is a serious concern.

The safety of electrical stimulation has already been verified in the postoperative cardiovascular surgery patients²⁷⁾ and critically ill patients in the ICU²⁸⁾. In terms of efficacy, Japanese Clinical Practice Guidelines for Rehabilitation in Critically Ill Patients 2023 (J-ReCIP 2023)²⁹⁾, "We suggest performing neuromuscular electrical stimulation for critically ill patients." Neuromuscular electrical stimulation is being validated as a means of preventing ICU-AW. However, there are no reports on hemodynamics during rPMS. In the future, more detailed reports on hemodynamics, including basic vital signs such as electrocardiogram monitoring, blood pressure, heart rate, and respiratory rate, will be required.

Conclusion

This paper has described the current status of rPMS applications for enhancing skeletal muscle strength from the viewpoints of safety and efficacy. It is anticipated that rPMS will have greater muscle-strengthening effects than electrical stimulation due to its characteristics. However, prolonged use of rPMS may cause coil heating, and thus limited stimulation parameters, such as stimulation intensity and frequency, which may have resulted in insufficient changes in muscle CSA and muscle thickness. Currently, rPMS devices with a cooling function have been developed, and it is anticipated that a wider range of stimulation parameters will be utilized in the future to verify the effects of muscle hypertrophy. With regard to safety, there have been few detailed reports on adverse events and side effects, and in particular, there have been no reports on the evaluation of hemodynamics.

In order for rPMS to be applied to a variety of diseases and conditions in the future, and to expand its indications to critically ill patients in the same way as electrical stimulation, it is first necessary to establish basic data on hemodynamics safety.

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) Barker AT, Freeston IL, Jalinous R, Jarratt JA. Magnetic stimulation of the human brain and peripheral nervous system: an introduction and the results of an initial clinical evaluation. *Neurosurgery*. 1987; 20: 100-109.
- 2) Van Aerde N, Meersseman P, Debaveye Y, Wilmer A, Gunst J, Casaer MP, et al. Five-year impact of ICU-acquired neuromuscular complications: a prospective, observational study. *Intensive Care Med*. 2020; 46: 1184-1193.
- 3) Struppeler A, Binkofski F, Angerer B, Bernhardt M, Spiegel S, Drzezga A, et al. A fronto-parietal network is mediating improvement of motor function related to repetitive peripheral magnetic stimulation: A PET-H2O15 study. *Neuroimage*. 2007; 36 Suppl 2: T174-186.
- 4) Abe G, Oyama H, Liao Z, Honda K, Yashima K, Asao A, et al. Difference in Pain and Discomfort of Comparable Wrist Movements Induced by Magnetic or Electrical Stimulation for Peripheral Nerves in the Dorsal Forearm. *Med Devices (Auckl)*. 2020; 13: 439-447.
- 5) Han TR, Shin HI, Kim IS. Magnetic stimulation of the quadriceps femoris muscle: comparison of pain with electrical stimulation. *Am J Phys Med Rehabil*. 2006; 85: 593-599.
- 6) Gobbo M, Maffiuletti NA, Orizio C, Minetto MA. Muscle motor point identification is essential for optimizing neuromuscular electrical stimulation use. *J Neuroeng Rehabil*. 2014; 11: 17.
- 7) Yang SS, Jee S, Hwang SL, Sohn MK. Strengthening of Quadriceps by Neuromuscular Magnetic Stimulation in Healthy Subjects. *PM R*. 2017; 9: 767-773.
- 8) Bustamante V, Lopez de Santa Maria E, Gorostiza A, Jimenez U, Galdiz JB. Muscle training with repetitive magnetic stimulation of the quadriceps in severe COPD patients. *Respir Med*. 2010; 104: 237-245.
- 9) Baek J, Park N, Lee B, Jee S, Yang S, Kang S. Effects of Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation Over Vastus Lateralis in Patients After Hip Replacement Surgery. *Ann Rehabil Med*. 2018; 42: 67-75.
- 10) Suzuki K, Ito T, Okada Y, Hiraoka T, Hanayama K, Tsubahara A. Preventive Effects of Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation on Muscle Atrophy in the Paretic Lower Limb of Acute Stroke Patients: A Pilot Study. *Prog Rehabil Med*. 2020; 5: 20200008.
- 11) Lotz BP, Dunne JW, Daube JR. Preferential activation of muscle fibers with peripheral magnetic stimulation of the limb. *Muscle Nerve*. 1989; 12: 636-639.
- 12) Machetanz J, Bischoff C, Pichlmeier R, Riescher H, Meyer BU, Sader A, et al. Magnetically induced muscle contraction is caused by motor nerve stimulation and not by direct muscle activation. *Muscle Nerve*. 1994; 17: 1170-1175.
- 13) Kremenec IJ, Ben-Avi SS, Leonhardt D, McHugh MP. Transcutaneous magnetic stimulation of the quadriceps via the femoral nerve. *Muscle Nerve*. 2004; 30: 379-381.
- 14) Hirono T, Ikezoe T, Taniguchi M, Nojiri S, Tanaka H, Ichihashi N. Acute effects of repetitive peripheral magnetic stimulation following low-intensity isometric exercise on muscle swelling for selective muscle in healthy young men. *Electromagn Biol Med*. 2021; 40: 420-427.
- 15) Japanese Society of Clinical Neurophysiology. Safety Guidelines for Magnetic Stimulation Techniques (2019). *Japanese Journal of Clinical Neurophysiology*. 2019; 47: 126-130. (in Japanese)
- 16) Beaulieu LD, Schneider C. Repetitive perip-

- heral magnetic stimulation to reduce pain or improve sensorimotor impairments: A literature review on parameters of application and afferents recruitment. *Neurophysiol Clin.* 2015; 45: 223-237.
- 17) Chen S, Li Y, Shu X, Wang C, Wang H, Ding L, et al. Electroencephalography Mu Rhythm Changes and Decreased Spasticity After Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation in Patients Following Stroke. *Front Neurol.* 2020; 11: 546599.
 - 18) Serag H, Abdelgawad D, Emara T, Moustafa R, El-Nahas N, Haroun M. Effects of para-spinal repetitive magnetic stimulation on multiple sclerosis related spasticity. *Int J Phys Med Rehabil.* 2014; 2: 1000242.
 - 19) Jiang YF, Zhang D, Zhang J, Hai H, Zhao YY, Ma YW. A Randomized Controlled Trial of Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation applied in Early Subacute Stroke: Effects on Severe Upper-limb Impairment. *Clin Rehabil.* 2022; 36: 693-702.
 - 20) Krewer C, Hartl S, Muller F, Koenig E. Effects of repetitive peripheral magnetic stimulation on upper-limb spasticity and impairment in patients with spastic hemiparesis: a randomized, double-blind, sham-controlled study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2014; 95: 1039-1047.
 - 21) Beaulieu LD, Masse-Alarie H, Brouwer B, Schneider C. Noninvasive neurostimulation in chronic stroke: a double-blind randomized sham-controlled testing of clinical and corticomotor effects. *Top Stroke Rehabil.* 2015; 22: 8-17.
 - 22) Werner C, Schrader M, Wernicke S, Bryl B, Hesse S. Repetitive peripheral magnetic stimulation (rpMS) in combination with muscle stretch decreased the wrist and finger flexor muscle spasticity in chronic patients after CNS lesion. *Int J Phys Med Rehabil.* 2016; 4: 1000352.
 - 23) El Nahas N, Kenawy FF, Abd Eldayem EH, Roushdy TM, Helmy SM, Akl AZ, et al. Peripheral magnetic theta burst stimulation to muscles can effectively reduce spasticity: a randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil.* 2022; 19: 5.
 - 24) Momosaki R, Abo M, Watanabe S, Kakuda W, Yamada N, Mochio K. Functional magnetic stimulation using a parabolic coil for dysphagia after stroke. *Neuromodulation.* 2014; 17: 637-641; discussion 41.
 - 25) Mori S, Kagaya H, Nagashima Y, Toda F, Kuwabara A, Masuda Y, et al. Feasibility of repetitive peripheral magnetic stimulation for dysphagia with reduced hyoid elevation: a report of two cases. *Japanese Journal of Comprehensive Rehabilitation Science.* 2019; 10: 42-46.
 - 26) Kress JP, Hall JB. ICU-acquired weakness and recovery from critical illness. *N Engl J Med.* 2014; 370: 1626-1635.
 - 27) Iwatsu K, Yamada S, Iida Y, Sampei H, Kobayashi K, Kainuma M, et al. Feasibility of neuromuscular electrical stimulation immediately after cardiovascular surgery. *Arch Phys Med Rehabil.* 2015; 96: 63-68.
 - 28) Segers J, Hermans G, Bruyninckx F, Meyfroidt G, Langer D, Gosselink R. Feasibility of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patients. *J Crit Care.* 2014; 29: 1082-1088.
 - 29) 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.

Hospitalization-associated disability and treatment strategies in older patients with heart disease: A narrative review

Shoki Yusu¹⁾, Tomoyuki Morisawa^{1,2)}, Kotaro Iwatsu^{1,2)}, Masakazu Saitoh^{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

With the rapid ageing of the population in this country, healthcare for older patients is an important role. In addition, the number of patients with heart disease is increasing worldwide due to the ageing of the population, a situation that should be called a pandemic. Concern regarding the rapid increase in the number of patients with heart disease is noted as the population ages. As older patients with heart failure are frequently complicated by sarcopenia, frailty, and geriatric syndromes, their activities of daily living (ADL) and physical function are likely to decline during hospitalization. During hospitalization, the bed rest-induced ADL decline that is not caused by the underlying disease is called hospitalization-associated disability, and it has recently received much attention. The incidence of hospitalization-associated disability in older patients is relatively high, ranging from 30% to 62%, and is associated with age, sex, chronic poor nutritional status, and cognitive dysfunction. Moreover, specific factors including the amount of physical activity during hospitalization and the duration of indwelling urinary catheters have been reported in patients with heart disease. As the onset of hospitalization-associated disability is associated with prognosis (readmission rate and all-cause mortality), rehabilitation and the use of long-term care insurance are significant, and it is necessary to understand treatment strategies because the number of patients is expected to increase in the future. This article reviews the definition of hospitalization-associated disability, incidence, factors, and treatment strategies in older patients and patients with heart disease.

Key Words: hospitalization-associated disability, heart disease, cardiac rehabilitation, prognosis

Juntendo Health Science Journal 6(1): 15-20, 2025 (Received Sep. 30, 2024 ; Accepted Nov. 26, 2024)

Introduction

Japan's population is ageing rapidly, and it is estimated that by 2025, the proportion of the population aged 65 and over will have risen to 25.9%¹⁾. As the population ages, the number of patients with heart disease is increasing, and it is now the second most common cause of death, so further measures in the fields of healthcare and nursing care are an important issue for the future²⁾. Older patients with heart disease have frailty, cognitive impairment, multimorbidity, poor physical function and exercise tolerance³⁾. Owing to activity limitations due to hospitalization and surgery, patients are prone to decline in physical function and activities of daily living (ADL)⁴⁾. Although treatment and physical therapy are expected to improve physical function and ADL that existed before hospitalization,

physical therapy and patient education may be inadequate, and patients may be discharged with decline ADL. The recent, decline ADL due to bed rest during hospitalization that is not caused by the underlying disease has been termed hospitalization-associated disability (HAD)⁵⁾ (Fig. 1). The incidence of HAD is associated with increased all-cause mortality and hospital readmission⁶⁾.

Understanding and preventing HAD not only affects prognosis but also greatly influences the significance and quality of rehabilitation. This article reviews the definition of HAD, its incidence, factors associated with its development, prognosis, and treatment strategies in older patients and patients with heart disease.

Corresponding author: Tomoyuki Morisawa
Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University
3-2-12 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0033
E-mail: t.morisawa.ul@juntendo.ac.jp

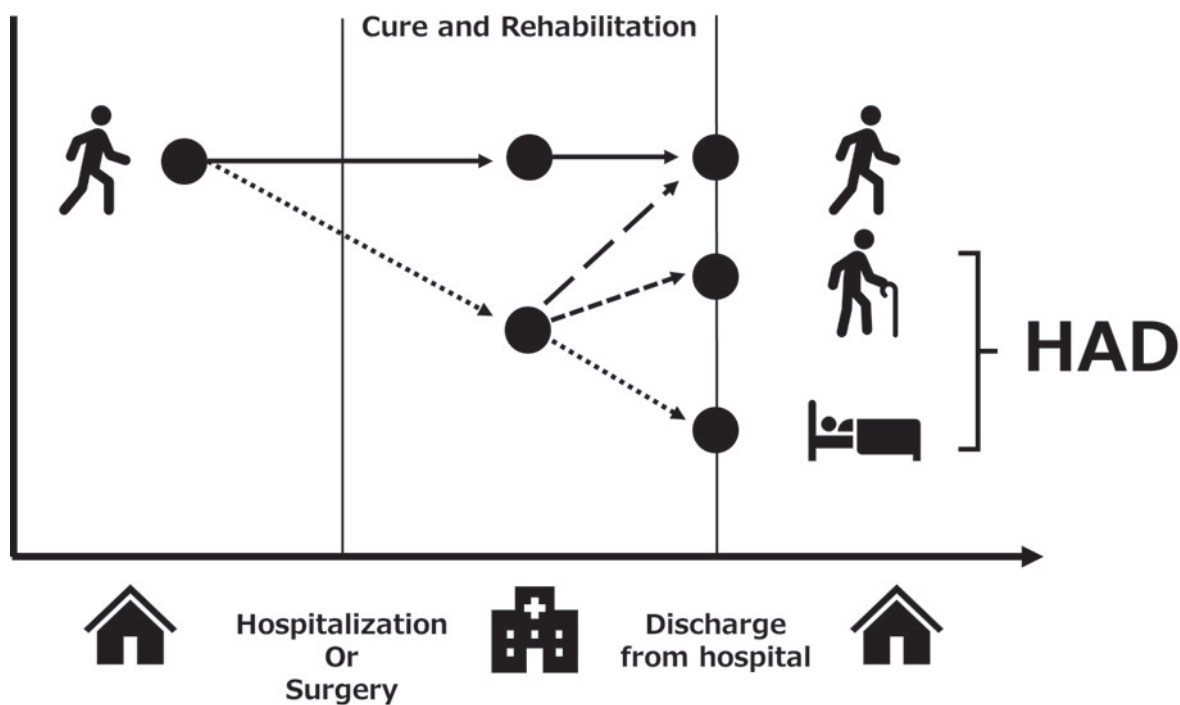


Fig.1 The process of HAD onset

HAD: hospitalization-associated disability

HAD definition and criteria

HAD has several synonyms, including hospitalization-associated disability, hospital-associated disability, hospital-associated functional decline and hospital-acquired disability; however, researchers differ in their definitions, and no consensus definition exists. Covinsky defined HAD as “an older adult living independently at home and independently managing all basic ADL develops an acute illness requiring hospitalization. During hospitalization, the acute medical issues are treated. However, the patient was discharged with a new major disability that was not present before the onset of acute illness.”⁵⁾; to date, this definition is the most frequently used.

The ADL evaluation battery is the main criterion of HAD. Saitoh defined HAD as “any decline in the Barthel index (BI) before discharge compared with the BI within 1 month before hospital admission.”⁶⁾

HAD has become a generalized term for ADL decline during hospitalization, but the terminology is mixed and varied. This review paper used PubMed and the keywords “hospitalization-associated disability”, “hospital-acquired disability”, “heart disease” and “older patient” were used. These keywords were combined using the Boolean operators AND and OR.

HAD incidence

1. HAD incidence in older adult patients

A meta-analysis of the incidence of HAD in adult patients over 65 years old treated with medical and acute surgical procedures revealed an incidence of approximately 30%⁷⁾. Japan is an aging society and the number of patients with HAD is expected to increase.

2. HAD incidence in patients with heart disease

In patients with heart failure, the incidence of HAD is 10.6%–37.1%^{3, 8, 9)} and that in patients undergoing cardiac surgery is 5.2%–24%^{10, 11)}.

Factors associated with HAD development

Several factors are associated with HAD development. These factors should be collected and evaluated before and during hospitalization.

1. Before hospitalization factors

The following patient characteristics are associated with HAD: older age^{6, 8-14)}, low body mass index^{6, 12, 15)}, female sex^{8, 11, 12, 14)}, low nutrition¹²⁾, frailty¹²⁾, cognitive impairment^{9, 11, 13, 15)}, chronic obstructive pulmonary disease¹⁴⁾, and heart disease¹³⁾. Moreover, baseline blood tests include the following: albumin^{6, 9-11, 13, 15)},

hemoglobin⁹⁾, N-terminal pro B-type natriuretic peptide^{6, 12)} and estimated glomerular filtration rate¹²⁾. Regarding physical function, preoperative SPPB¹⁰⁾, history of falls^{12, 15)}, and the Kihon Checklist¹⁶⁾ are identified, and assessing them before hospitalization or surgery is essential.

2. During hospitalization factors

Medical and surgical treatment-related factors also contribute to HAD development and are associated with operation time¹¹⁾, length of intensive care unit stay^{10, 11)}, and postoperative delirium^{11, 15)}. Additionally, hospitalization-related events and activity levels during hospitalization including rehabilitation start date¹⁰⁾, ambulation start day^{8, 9)}, physical activity time¹⁶⁾, number of steps¹⁴⁾, and urinary catheter placement^{16, 17)} are significantly associated with HAD development. Furthermore, physical function assessments including SPPB⁶⁾, gait speed⁶⁾, and length of hospital stay^{6, 14)} at discharge are associated with HAD development.

Prognosis following HAD onset

1. Prognosis of older adult patients with HAD

It was reported that 28.6% of patients discharged with decline ADL did not recover and continued to

have ADL impairment, and 41.3% of patients died¹³⁾. In addition, patients with decline physical function were approximately three times more likely to be admitted to a nursing home¹⁸⁾. ADL impairment at the time of discharge affects prognosis and increases the burden of care.

2. Prognosis of patients with heart disease HAD

Older patients with heart failure reported to have significantly increased rates of all-cause mortality and rehospitalization for heart failure⁶⁾, as well as with cardiac surgery¹⁹⁾. Additionally, the group with lower ADL at discharge had lower service rates despite being enrolled in long-term care insurance⁸⁾.

Treatment strategies for HAD

Although no clear prevention or treatment for HAD development has been demonstrated, we believe that HAD-associated factors differ between pre and posthospitalization and that appropriate assessment and treatment strategies significantly influence post-discharge prognosis (Fig. 2).

1. Prehospitalization and preoperative treatment strategies

As previously mentioned, various pre hospitali-

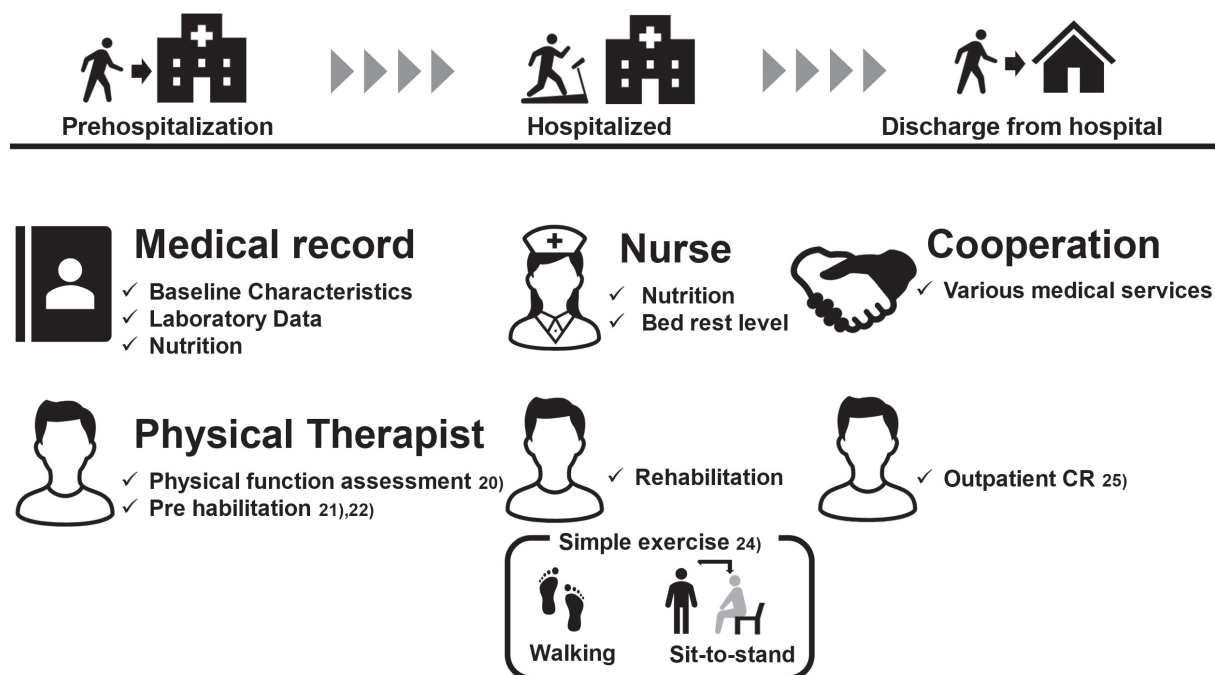


Fig.2 Prevention and treatment strategies for HAD development from prehospitalization to postdischarge
CR: cardiac rehabilitation

zation and preoperative factors associated with HAD development are noted and collecting information on these factors is significant. Patients with cognitive problems, gathering information from family members and significant others are essential.

Several factors associated with HAD development include physical function assessment and evaluation by a physiotherapist. The joint guidelines of the Japanese Society of Cardiovascular Physiotherapy and the Japanese Society of Cardiac Rehabilitation Research, "JCS/JACR 2021 guideline on rehabilitation in patients with cardiovascular disease" list the following physical function assessment indices: grip strength, SPPB, walking speed, and balance²⁰. Currently, no predictive model can accurately predict HAD development in older patients with cardiovascular disease, and this remains a future challenge.

Prehabilitation is an option for patients on a waiting list for cardiac surgery²¹. Prehabilitation has been reported to improve the lengths of ICU and hospital stay, quality of life (QOL), and postoperative physical function, as well as reduce HAD incidence^{21, 22}.

2. Postoperative and inpatient treatment strategies

Assessing patients for any decline in nutritional status or physical function following surgery and hospitalization and sharing this information with physicians and nurses are the initial treatment strategies. Falls among older adult patients are associated with heart failure and diuretic use²³ and setting a high resting level to prevent falls may have contributed to HAD development. The incidence of HAD in older adult patients admitted to an acute care hospital was lower in the exercise intervention group (sit-to-stand exercise and walking) than in the usual care group²⁴. Furthermore, a previous study that used an accelerometer for assessing physical activity volume demonstrated the significance of physical activity volume time outside rehabilitation¹⁶. Rehabilitation is significant in preventing HAD development. However, several uncertainties regarding specific rehabilitation programs and workloads still exist, and further studies are needed.

3. Postdischarge treatment strategies

As the length of hospital stay is shortened owing to advances in medical technology, the response to prevent HAD onset is limited only during hospitalization. Therefore, continuous management of patients suspected of developing HAD such as outpatient cardiac rehabilitation facilities, and the use of long-term care insurance services is considered significant. Although outpatient cardiac rehabilitation has been associated with reduced mortality and readmission rates without increasing medical costs, only 7% of patients receive outpatient cardiac rehabilitation following hospital discharge²⁵. Conversely, patients with heart failure who received long-term care insurance services had significantly lower rehospitalization and mortality rates than non-users, suggesting that continued treatment following discharge affects prognosis²⁶. To date, studies on the prognostic impact of transitioning to outpatient cardiac rehabilitation for patients with HAD are limited, and further studies are warranted to determine how continued treatment affects the long-term health and QOL of patients.

Conclusion

The definition of HAD, its incidence, factors associated with its development, prognosis, and treatment strategies were reviewed. Several factors are involved in HAD development and influence its prognosis. However, owing to the shortened length of stay in the acute care setting, vast amount of information available, and daily fluctuations in patient status, standard protocols for preventing HAD development have not yet been established. Developing protocols and validating the weighting of assessments to determine effective treatment strategies according to the risk of developing HAD are significant.

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) Annual Report on the Ageing Society, 2024. https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/zenbun/pdf/1s1s_01.pdf, Accessed October 20, 2024.
- 2) Summary of Annual Vital Statistics Report (Preliminary Data), 2023. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai23/dl/gaikyouR5.pdf>, Accessed October 20, 2024.
- 3) Takahashi T, Iwata K, Morisawa T, Kato M, Kono Y, Taya M, et al: Incidence of hospitalization-associated disability in older patients with heart failure. *Circ J*. 2024; 88: 672-679.
- 4) Murad K, Kitzman DW: Frailty and multiple comorbidities in the elderly patient with heart failure: implications for management. *Heart Fail Rev*. 2012; 17: 581-588.
- 5) Covinsky KE, Pierluissi E, Johnston CB: Hospitalization-associated disability: "She was probably able to ambulate, but I'm not sure". *Jama*. 2011; 306: 1782-1793.
- 6) Saitoh M, Takahashi Y, Okamura D, Akiho M, Suzuki H, Noguchi N, et al: Prognostic impact of hospital-acquired disability in elderly patients with heart failure. *ESC Heart Fail*. 2021; 8: 1767-1774.
- 7) Loyd C, Markland AD, Zhang Y, Fowler M, Harper S, Wright NC, et al: Prevalence of hospital-associated disability in older adults: a meta-analysis. *J Am Med Dir Assoc*. 2020; 21: 455-61.
- 8) Takabayashi K, Kitaguchi S, Iwatsu K, Morikami Y, Ichinohe T, Yamamoto T, et al: A decline in activities of daily living due to acute heart failure is an independent risk factor of hospitalization for heart failure and mortality. *J Cardiol*. 2019; 73: 522-529.
- 9) Kato M, Mori Y, Watanabe D, Onoda H, Fujiyama K, Toda M, et al: Relationship between average daily rehabilitation time and decline in instrumental activity of daily living among older patients with heart failure: a preliminary analysis of a multicenter cohort study, SURUGA-CARE. *PLoS One*. 2021; 16: e0254128.
- 10) Hirakawa K, Nakayama A, Saitoh M, Arimitsu T, Iwai K, Hori K, et al: Physical function examination at intensive care unit as predictive indicators for hospitalization-associated disability in patients after cardiovascular surgery. *Rev Cardiovasc Med*. 2022; 23: 77.
- 11) Hori K, Usuba K, Sakuyama A, Adachi Y, Hirakawa K, Nakayama A, et al: Hospitalization-associated disability after cardiac surgery in elderly patients - exploring the risk factors using machine learning algorithms. *Circ Rep*. 2021; 3: 423-430.
- 12) Zisberg A, Shadmi E, Gur-Yaish N, Tonkikh O, Sinoff G: Hospital-associated functional decline: the role of hospitalization processes beyond individual risk factors. *J Am Geriatr Soc*. 2015; 63: 55-62.
- 13) Boyd CM, Landefeld CS, Counsell SR, Palmer RM, Fortinsky RH, Kresevic D, et al: Recovery of activities of daily living in older adults after hospitalization for acute medical illness. *J Am Geriatr Soc*. 2008; 56: 2171-2179.
- 14) Morisawa T, Saitoh M, Otsuka S, Takamura G, Tahara M, Ochi Y, et al: Association between hospital-acquired functional decline and 2-year readmission or mortality after cardiac surgery in older patients: a multicenter, prospective cohort study. *Aging Clin Exp Res*. 2023; 35: 649-657.
- 15) Geyskens L, Jeuris A, Deschodt M, Van Grootven B, Gielen E, Flamaing J: Patient-related risk factors for in-hospital functional decline in older adults: a systematic review and meta-analysis. *Age Ageing*. 2022; 51: afac007.
- 16) Takara Y, Saitoh M, Morisawa T, Takahashi T, Yoshida N, Sakiyama M, et al: Clinical

- characteristics of older heart failure patients with hospital-acquired disability: a preliminary, single-center, observational study. *Cardiol Res.* 2021; 12: 293-301.
- 17) Palese A, Gonella S, Moreale R, Guarnier A, Barelli P, Zambiasi P, et al: Hospital-acquired functional decline in older patients cared for in acute medical wards and predictors: findings from a multicentre longitudinal study. *Geriatr Nurs.* 2016; 37: 192-199.
 - 18) Fortinsky RH, Covinsky KE, Palmer RM, Landefeld CS: Effects of functional status changes before and during hospitalization on nursing home admission of older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 1999; 54: M521-526.
 - 19) Sato M, Mutai H, Yamamoto S, Tsukakoshi D, Takeda S, Oguchi N, et al: Decreased activities of daily living at discharge predict mortality and readmission in elderly patients after cardiac and aortic surgery: a retrospective cohort study. *Medicine (Baltimore).* 2021; 100: e26819.
 - 20) Makita S, Yasu T, Akashi Y, Adachi H, Izawa H, Ishihara S, et al: JCS/JACR 2021 guideline on rehabilitation in patients with cardiovascular disease. *Circ J.* 2023; 87: 160-162.
 - 21) Takahashi T, Watanabe H, Mochizuki M, Kikuchi Y, Kitahara E, Yokoyama-Nishitani M, et al: Relationship between prehabilitation responsiveness and postoperative physical functional recovery in cardiovascular surgery. *J Cardiol.* 2024; 84: 366-371.
 - 22) Arora RC, Brown CH 4th, Sanjanwala RM, McKelvie R: "NEW" prehabilitation: a 3-way approach to improve postoperative survival and health-related quality of life in cardiac surgery patients. *Can J Cardiol.* 2018; 34: 839-849.
 - 23) Falcão RMM, Costa K, Fernandes M, Pontes MLF, Vasconcelos JMB, Oliveira JDS: Risk of falls in hospitalized elderly people. *Rev Gaucha Enferm.* 2019; 40: e20180266.
 - 24) Ortiz-Alonso J, Bustamante-Ara N, Valenzuela PL, Vidán-Astiz M, Rodríguez-Romo G, Mayordomo-Cava J, et al: Effect of a simple exercise program on hospitalization-associated disability in older patients: a randomized controlled trial. *J Am Med Dir Assoc.* 2020; 21: 531-537.
 - 25) Kanaoka K, Iwanaga Y, Nakai M, Nishioka Y, Myojin T, Kubo S, et al: Multifactorial effects of outpatient cardiac rehabilitation in patients with heart failure: a nationwide retrospective cohort study. *Eur J Prev Cardiol.* 2022; 30: 442-450.
 - 26) Takabayashi K, Fujita R, Iwatsu K, Ikeda T, Morikami Y, Ichinohe T, et al: Impact of home- and community-based services in the long-term care insurance system on outcomes of patients with acute heart failure: insights from the kitakawachi clinical background and outcome of Heart failure registry. *Geriatr Gerontol Int.* 2020; 20: 967-973.

Relationship between skeletal muscle and postoperative outcomes in older lung cancer patients: A narrative review

Junya Ueno^{1,2)}, Tomoyuki Morisawa¹⁾, Masakazu Saito¹⁾, Kotarou Iwatsu¹⁾, Tetsuya Takahashi¹⁾

¹⁾ Department of Physical Therapy, Graduate School of Health Science, Juntendo University

²⁾ Department of Rehabilitation, National Cancer Center Hospital East

Abstract

There is a global surge in the number of cancer patients. While advances in surgical techniques and supportive care have allowed better treatments for older, frail, and financially dependent patients, many older cancer patients have comorbidities and experience loss of physical function. Sarcopenia, a skeletal muscle-derived problem, has been associated with an increased risk of postoperative complications and mortality after cancer treatment. Sarcopenia, a problem that originates in skeletal muscle, is associated with an increased risk of postoperative complications and mortality after cancer treatment. This review investigated the prevalence of sarcopenia in patients with lung cancer and the relationship between the quantity and quality of skeletal muscle and postoperative complications and prognosis in patients with lung cancer. Sarcopenia is highly prevalent (40-50%) among lung cancer patients undergoing surgery. Sarcopenia was significantly associated with aging, smoking, increased inflammation, and decreased physical activity time. It was found that skeletal muscle mass is one of the most important prognostic factors for older lung cancer patients. Evaluating skeletal muscle mass before lung cancer treatment may help to identify patients who require intensive physical therapy.

Key Words: lung cancer, sarcopenia, older patient, complication, prognosis

Juntendo Health Science Journal 6(1): 21-27, 2025 (Received Jan. 22, 2025 ; Accepted Mar. 10, 2025)

Introduction

Surgical outcomes for lung cancer have improved significantly thanks to the latest innovations and advances in surgical techniques and perioperative management, as well as the introduction of the Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) protocol. Despite these measures, the incidence of sarcopenia is high in lung cancer patients with preoperative complications such as chronic obstructive pulmonary disease (COPD), reaching 43% in non-small cell lung cancer (NSCLC) patients and 52% in small cell lung cancer (SCLC) patients¹⁾. Sarcopenia is associated with both cachexia and wasting, these patients are at a higher risk of postoperative serious pulmonary complications, poor prognosis, and lower overall survival rates^{1,2)}. In addition to perioperative factors, these patients also tend to have long-term physical and psychological effects³⁾. Therefore, it is important

to select patients who may benefit from enhanced physical therapy to address prognosis and possible adverse events before initiating cancer treatment for older lung cancer patients. Ideally, the severity of sarcopenia should be assessed by measuring physical ability, but in many previous studies that investigated sarcopenia in surgical patients, including patients with NSCLC, only muscle mass was measured as an indicator of sarcopenia⁴⁻¹⁰⁾. However, in recent years, attention has also been paid to muscle quality, including the amount of fat infiltration in the muscles⁶⁻¹⁰⁾. In particular, many older lung cancer patients are thin, and it is thought that the quality as well as the quantity of muscle is clinically important.

However, there is no sufficient consensus on the evaluation method for lung cancer patients or its relationship with prognosis. In this regard, we investigated the prevalence of sarcopenia in lung cancer patients, and in addition, whether the quantity and

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

quality of skeletal muscle in lung cancer patients are related to postoperative complications and prognosis.

Materials and methods

We decided to search for studies that focused on the skeletal muscles, complications, and survival rates of older lung cancer patients in particular. We searched the PubMed database for all papers published in English between 2014 and 2024 using the following keywords and strategies.

1. Databases and search terms

Combinations of the following keywords were used as search terms:“(Lung cancer) AND (Skeletal Muscle OR SMI) AND (physical function) AND (Overall Survival OR Complications) AND (Older)”. After each search, duplicated records were removed.

All open-access articles (clinical trials, meta-analyses, randomized controlled trials, reviews, and systematic reviews) excluding conference proceedings, books, and documents were considered for inclusion. The references in the retrieved articles were manually searched for associated studies.

2. Search string

- 1) (lung cancer) AND (skeletal muscle).
- 2) (Lung cancer) AND (skeletal muscle) AND (physical function)
- 3) (Lung cancer) AND (skeletal muscle mass) AND (complications OR survival)
- 4) (Lung cancer) AND (skeletal muscle mass) AND (older)
- 5) (Lung cancer) AND (skeletal muscle OR SMI) AND (overall survival OR complications) AND (older)

Results

The search yielded the following results for the five aforementioned search strings: 1. 90 abstracts, 2. 19 abstracts, 3. 132 abstracts, 4. 4 abstracts, and 5. none, respectively. The titles and abstracts of these 245 studies were screened for suitability for inclusion. The main texts of the eligible ones were reviewed thoroughly and categorized along the following two themes:

1. Relationship between lung cancer, skeletal muscle,

and physical function.

2. Relationship of sarcopenia and geriatric assessment in lung cancer patients.

1. Relationship between lung cancer, skeletal muscle, and physical function

- 1) Significance of measuring skeletal muscle and physical function in patients with lung cancer

The tumor/node/metastasis (TNM) classification is a general framework based on tumor size, local invasion, and distant metastasis, and is used to estimate the life expectancy of cancer patients¹¹. However, this classification system has limited value for patients with advanced cancer or those receiving targeted or immunotherapy. In patients with lung cancer, functional status assessed using the Eastern Cooperative Oncology Group (ECOG) performance status scale is used as an independent tool for predicting prognosis. However, because it uses a subjective assessment, the clinical applicability of this tool is limited¹². Assessment of body weight and skeletal muscle is another important factor in lung cancer. Initial weight loss has been reported to be independently associated with poor prognosis in both non-small cell lung cancer (NSCLC) and small cell lung cancer (SCLC) patients¹³. However, there is a problem with the lack of objectivity in weight measurement. One reason for this is that body weight varies depending on body size. In this regard, there are currently many studies being conducted to identify more reliable prognostic factors than weight loss, and sarcopenia is one such factor. Sarcopenia is a skeletal muscle disorder characterized by a progressive decrease in muscle mass and function throughout the body^{14, 15}. Studies have shown that NSCLC patients with reduced skeletal muscle mass and decreased skeletal muscle density have a lower response rate to chemotherapy and a higher discontinuation rate¹⁶. Furthermore, in many diseases, sarcopenia is a clinically urgent issue that places a heavy burden on healthcare, including falls, fractures, functional impairment, and hospitalization^{17, 18}.

- 2) Prevalence of skeletal muscle loss

Previous A large-scale meta-analysis of patients with malignant solid tumors in the past reported that

sarcopenia was observed in 35% to 45% of cases^{1, 19, 20}. In this study, we investigated the prevalence of sarcopenia in patients with lung cancer in the perioperative period. Results: In 11 articles, the prevalence of sarcopenia in patients was found to be 16% to 56%. (Table 1)^{3, 6, 21-28}.

3) Factors affecting skeletal muscle loss in lung cancer

The decrease in skeletal muscle mass and strength seen in sarcopenia may be age-related (primary) or may develop due to disuse, disease, or undernutrition (secondary). Cancer patients may additionally develop

cachexia, which is a condition characterized by anorexia, weight loss, and skeletal muscle loss. Cachexia is seen in association with many diseases apart from cancer and shares several similarities with sarcopenia (especially secondary) in terms of pathogenesis. Nishimura et al.¹⁹ found that aging was significantly associated with sarcopenia, especially in patients with lung cancer. Pin et al.²⁰ observed that inflammatory cytokines, such as interleukins, play an important role in cancer patients. Metabolic abnormalities attributed to inflammatory cytokines are known to contribute to muscle atrophy, decreased appetite, and reduced body

Table 1 Prevalence of sarcopenia reported in the included studies (n = 11)

| Author, Year | Lung cancer type | Treatment | Diagnostic tool of sarcopenia | Number/ Age (y) | Patients with SP, n (%) |
|---------------------------------------|---|---|---|--|-------------------------|
| Nakamura, et al. 2018 ⁶ | Adenocarcinoma Squamous cell other | Sublobar Lobectomy or more | CT / L3, PMI / HU: -29to +150 | 328 / Med 71y | 183 (55.8) |
| Shinohara, et al. 2020 ³ | Adenocarcinoma Squamous cell other | Sublobar lobectomy pneumonectomy | CT / L3, PMI / HU: -29to +150 | 391 / Mean 69.3 ± 8.0y | 198 (50.6) |
| Troschel, et al. 2021 ²¹ | Adenocarcinoma Squamous cell Non-small cell other | Standard Carinal Completion | CT / Th10, CSA / HU: -29to +150 | 367 / Med 62.2y | 104 (28.3) |
| Suzuki, et al. 2016 ²² | Non small cell | Wedge + Segmentectomy Lobectomy | CT / L3, SMA / HU: -29to +150 | 90 / Mean 68.7 ± 8.7y | 38 (42.2) |
| Shoji, et al. 2017 ²³ | Adenocarcinoma other | Lobectomy Segmentectomy Wedge resection | CT / L3, SMA / HU: -29to +150 | 147 / Med 68y | 57 (38.7) |
| Fintelmann, et al. 2018 ²⁴ | Adenocarcinoma Squamous cell Neuroendocrine Mucoepidermoid | Lobectomy Bilobectomy | CT / Th5 SMA / HU: -29to +150 | 135 / Med 69y | 67 (49.6) |
| Takamori, et al. 2018 ²⁵ | Adenocarcinoma Squamous cell | Lobectomy | CT / Th12, SMA / HU: - | 101 / Med 68y | 31 (30.7) |
| Kim, et al. 2018 ²⁶ | Adenocarcinoma Squamous cell Or more | Lobectomy Or more | CT / L3, SMI / HU: -29to +150 | 272 / Mean 62.9 ± 9.6y | 30 (49.2) |
| Kawaguchi, et al. 2021 ³⁰ | Squamous cell Non Squamous cell | major resection | CT / L3, PMI / HU: - | 173 / Mean 78.8y | 32 (18.5) |
| Ozeki, et al. 2020 ²⁷ | Squamous cell Adenocarcinoma | major resection limited resection | CT/ umbilical level PMI / HU: -29to +150 | SCC 165 Mean 69.6 ± 7.0y ADC 556 / Mean 68.1 ± 8.5y | 116 (16.0) |
| Lee, et al. 2020 ²⁸ | Adenocarcinoma Squamous cell Or more | VATS OPEN | CT / L3, PVI / HU: -200to -50 | 236 / NA | 59 (25.0) |

CT: Computed Tomography, CSA: Muscle Cross-Sectional Area, SMA: skeletal muscle area, HU: Hounsfield Unit threshold, SP: Sarcopenia, PMI: Psoas Muscle Index (cross-sectional area of the bilateral psoas muscle/height²), PVI: Psoas Volume Index (psoas muscle volume/height³ (in m³), L3: The third lumbar vertebra, Th10: The 10th Thoracic vertebra, VATS: video-assisted thoracic surgery, Open: open thoracotomy.

fat mass. Therefore, multiple causes with a background of systemic inflammation may be implicated in cancer-related cachexia and associated sarcopenia. Other factors that have been pointed out include a decrease in physical activity, smoking habits, and the effects of oxidative stress caused by chronic obstructive pulmonary disease (COPD), which many lung cancer patients have³⁰⁻³⁴. It has been reported that oxidative stress inhibits mitochondrial respiration and is a factor in skeletal muscle dysfunction³¹.

4) Methods for diagnosing sarcopenia in lung cancer patients / Sarcopenia as a complication and prognostic factor in the surgical treatment of lung cancer

Sarcopenia is diagnosed using dual-energy X-ray absorptiometry, bioelectrical impedance analysis, computed tomography (CT), upper arm circumference, grip strength, and subcutaneous fat thickness. Recently, CT has come to be used as a major tool for confirming the diagnosis of sarcopenia using a value called the skeletal muscle index (SMI; cm^2/m^2). The SMI is calculated by dividing the skeletal muscle cross-sectional area (SMA; cm^2) visualized in the cross-sectional CT image by the square of the patient's height (m^2). Similar to SMI, the psoas muscle index is a standard method for evaluating sarcopenia, and is calculated by dividing the psoas muscle area (cm^2) by the height (m^2). Skeletal muscle density is another

indicator of body composition measured by CT imaging, and is measured in Hounsfield units (HU), which reflect the infiltration of adipose tissue in the muscle or the quality of the muscle³⁵. Table 2 is a summary of the relationship between the diagnosis of sarcopenia and the results of lung cancer treatment, compiled from the literature. Nakamura et al.⁶) reported that postoperative complications (Clavien-Dindo classification grade ≥ 3) occur more frequently in patients with sarcopenia ($p = 0.036$). In terms of prognosis, Buentzel et al.³⁶) conducted a study of 2,521 lung cancer patients receiving various anticancer therapies (surgery, targeted therapy, chemotherapy, radiotherapy, or a combination of these), and found that sarcopenia was an independent risk factor for death (hazard ratio [HR]: 3.13; 95% CI: 2.06-4.76). Other studies have also shown that patients with sarcopenia have a poor disease-free survival and overall survival rate, suggesting that sarcopenia may affect the prognosis after lung cancer surgery^{1,30}.

2. Relationship of sarcopenia and geriatric assessment in lung cancer patients.

Ganti et al.³⁸) evaluated predictors of OS (such as performance status [PS] and weight loss in the past 3-6 months) in 1,467 lung cancer patients aged 70 years or older. Results showed that for every 1-level increase in PS, there was a risk of shorter OS (PS 0-1:

Table 2 The relationship between the diagnosis of sarcopenia and the results of lung cancer treatment

| Author, Year | Skeletal muscle assessment and cutoff values | Outcome | findings |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Nishimura, et al. 2019 ¹⁹⁾ | CT: SMI at L3 < 43.75-55 cm^2/m^2 for men and < 39-41.10 cm^2/m^2 for women, SMA at T5 < 181.2 cm^2 for men and < 129.4 cm^2 for women, SMA at T8 < 115.3 cm^2 for men and < 74.0 cm^2 for women | 1.prevalence 2.post-operative complications 3.overall survival | The overall prevalence of sarcopenia was 42.8%. There was increased risk of early complications and worse survival in lung cancer patients with concomitant sarcopenia |
| Buentzel, et al. 2019 ³⁶⁾ | 1.DEXA: < 7.26 kg/m^2 for men, < 5.45 kg/m^2 for women 2. BIA: phase angle ≤ 5.3 or 5.8 degrees 3. CT: SMI at L3 < 41-55 cm^2/m^2 for men and < 38-41.10 cm^2/m^2 for women, SMI at T4 < 67.3 cm^2/m^2 for men and < 46.3 cm^2/m^2 for women, SMD < 28-44.1 HU for men and < 23.8-40.5 HU for women | Overall survival | Sarcopenia was an independent risk factor for death regardless of the stage of lung cancer. |
| Takenaka, et al., 2021 ³⁷⁾ | CT: SMI at L3 < 25.63-52.4 cm^2/m^2 for men and < 21.73-41 cm^2/m^2 for women, SMD < 33-41 HU for men and women | Disease free survival Overall survival | Sarcopenia was a predictor for worse overall survival, disease free survival and disease control rate in NSCLC patients. |

BIA: Bioelectrical Impedance Analysis, BMI: Body Mass Index, CT: Computed Tomography, DEXA: Dual-Energy X-ray Absorptiometry, L1/3: First/Third Lumbar Vertebrae, NSCLC: Non-Small Cell Lung Cancer, SMA: Skeletal Muscle Area, SMI: Skeletal Muscle Index, SMD: Skeletal Muscle Density

HR: 1.39, 95% CI: 1.21-1.61; PS 2-3: HR: 2.08, 95% CI: 1.61-2.69). Similar results were shown for patients who had lost 5-10% of their body weight in the previous 3-6 months (HR: 1.43; 95% CI: 1.24-1.64). Chun et al.³⁹⁾ described the importance of using the Comprehensive Geriatric Assessment (CGA) as a prognostic factor in the geriatric population. They performed a pretreatment CGA in lung cancer patients (median age: 75 years) and found that activities of daily living (HR: 3.78; 95% CI: 1.27-11.22) and nutritional status (HR: 3.2; 95% CI: 1.15-8.87) were significantly correlated significantly with OS.

On the other hand, these geriatric assessment study did not consider combined sarcopenia.

Conclusions

This review summarizes the main findings of previous reports investigating the association between skeletal muscle mass characteristics and physical function in older patients with lung cancer undergoing surgery.

Sarcopenia is often assessed by considering skeletal muscle as a complementary component of functional status as represented by the TNM classification and the ECOG performance status scale. Lung cancer patients undergoing surgery have a notably higher prevalence of sarcopenia, ranging from 40-50%, which is particularly associated with aging, among other factors. In addition, decreased physical activity, smoking habits, and the effects of oxidative stress from COPD, which affects many lung cancer patients, were also correlated. In addition, inflammatory cytokines from cancer promote muscle protein degradation and activate an acute phase response in skeletal muscle, leading to muscle atrophy and sarcopenia. The result is a fragile body, which can lead to postoperative complications and affect Poor prognosis²⁹⁻³⁴⁾.

In recent years, severe muscle weakness has come to be recognized as an indicator of poor prognosis for malignant tumors, regardless of the diagnosis, stage, or treatment of cancer. Many cancer patients show abnormalities in physical function and skeletal muscle before treatment, and many of them have sarcopenia. However, there is a lack of consistency and standardized guidelines in terms of the measurement site, method, and procedures for assessing skeletal muscle mass

and objectively quantifying sarcopenia. In addition, there is no consensus on the cut-off points for different measurement methods used to assess sarcopenia because skeletal muscle mass varies with population- and individual-level factors, such as race, age, sex, comorbidities, and prevalence of obesity. Recently, in non-cancer settings, the definition of sarcopenia has been expanded to include both muscle mass and function as per the Asian working group for sarcopenia-2019³⁾. On the other hand, there are not enough reports on skeletal muscle assessment and scientifically strong evidence supporting its impact on older patients undergoing surgery for NSCLC. Nevertheless, this review highlights the importance of assessing skeletal muscle characteristics during the development of supportive and rehabilitative therapies for older cancer patients. Further research is needed to delve deeper into this topic.

Ethical approval

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

Conflict of interest

The authors have no conflicting interests to declare.

References

- 1) Yang M, Shen Y, Tan L, Li W. Prognostic Value of Sarcopenia in Lung Cancer: A systematic review and meta-analysis. *Chest*. 2019; 156: 101-111.
- 2) Cruz-Jentoft AJ, Bahat G, Bauer J, Boirie Y, Bruyère O, Cederholm T, et al. Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age Ageing*. 2019; 48: 16-31.
- 3) Shinohara S, Otsuki R, Kobayashi K, Sugaya M, Matsuo M, Nakagawa M. Impact of sarcopenia on surgical outcomes in non-small cell lung cancer. *Ann Surg Oncol*. 2020; 27: 2427-2435.
- 4) Chen LK, Woo J, Assantachai P, Auyeung TW, Chou MY, Iijima K, et al. AWGS Asian working group for sarcopenia: 2019 consensus update on sarcopenia diagnosis and treatment. *J Am Med Dir Assoc*. 2020; 21: 300-307.
- 5) Yang M, Shen Y, Tan L, Li W. Prognostic value of sarcopenia in lung cancer: A systematic review

- and meta-analysis. *Chest*. 2019; 156: 101-111.
- 6) Nakamura R, Inage Y, Tobita R, Yoneyama S, Numata T, Ota K, et al. Sarcopenia in resected NSCLC: effect on postoperative outcomes. *J Thorac Oncol*. 2018; 13: 895-903.
 - 7) Friedman J, Lussiez A, Sullivan J, Wang S, Englesbe M. Implications of sarcopenia in major surgery. *Nutr Clin Pract*. 2015; 30: 175-179.
 - 8) Zhang S, Tan S, Jiang Y, Xi Q, Meng Q, Zhuang Q, et al. Sarcopenia as a predictor of poor surgical and oncologic outcomes after abdominal surgery for digestive tract cancer: A prospective cohort study. *Clin Nutr*. 2019; 38: 2881-2888.
 - 9) El Amrani M, Vermersch M, Fulbert M, Prodeau M, Lecolle K, Hebbar M, et al. Impact of sarcopenia on outcomes of patients undergoing pancreatotomy: A retrospective analysis of 107 patients. *Medicine*. 2018; 97: e12076.
 - 10) Erkul O, Cekic AB, Cansu A, Yildirim R, Guner A. Effects of sarcopenia on postoperative outcomes in patients who underwent gastrectomy for gastric cancer. *J Surg Res*. 2022; 274: 196-206.
 - 11) Goldstraw P, Chansky K, Crowley J, Rami-Porta R, Asamura H, Eberhardt WE, et al. The IASLC lung cancer staging project: proposals for revision of the TNM stage groupings in the forthcoming (Eighth) edition of the TNM classification for lung cancer. *J Thorac Oncol*. 2016; 11: 39-51.
 - 12) Woodard GA, Jones KD, Jablons DM. Lung cancer staging and prognosis. *Lung Cancer*. 2016; 170: 47-75.
 - 13) Simmons CP, Koinis F, Fallon MT, Fearon KC, Bowden J, Solheim TS, et al. Prognosis in advanced lung cancer-A prospective study examining key clinicopathological factors. *Lung Cancer*. 2015; 88: 304-309.
 - 14) Grønberg BH, Valan CD, Halvorsen T, Sjøblom B, Jordhøy MS. Associations between severe comorbidity and muscle measures in advanced non-small cell lung cancer patients. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2019; 10: 1347-1355.
 - 15) Kara M, Kaymak B, Frontera W, Ata AM, Ricci V, Ekiz T, et al. Diagnosing sarcopenia: functional perspectives and a new algorithm from the ISARCO-PRM. *J Rehabil Med*. 2021; 53: jrm00209.
 - 16) Shepshelovich D, Xu W, Lu L, Fares A, Yang P, Christiani D, et al. Body mass index (BMI), BMI change, and overall survival in patients with SCLC and NSCLC: A Pooled Analysis of the International Lung Cancer Consortium. *J Thorac Oncol*. 2019; 14: 1594-1607.
 - 17) He Z, Li H, Cao B, Zan Z, Feng H, Wei Q, et al. Predictive Value of Skeletal Muscle Function Test Combined with Climbing Test for Postoperative Cardiopulmonary Complications in Patients with COPD and Concurrent Lung Cancer. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*. 2023; 18: 2699-2706.
 - 18) Cruz-Jentoft AJ, Bahat G, Bauer J, Boirie Y, Bruyère O, Cederholm T, et al. Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age Ageing*. 2019; 48: 16-31.
 - 19) Nishimura JM, Ansari AZ, D'Souza DM, Moffatt-Bruce SD, Merritt RE, Kneuert PJ. Computed tomography-assessed skeletal muscle mass as a predictor of outcomes in lung cancer surgery. *Ann Thorac Surg*. 2019; 108: 1555-1564.
 - 20) Surov A, Wienke A. Prevalence of sarcopenia in patients with solid tumors: A meta-analysis based on 81,814 patients. *JPEN J Parenter Enteral Nutr*. 2022; 46: 1761-1768.
 - 21) Troschel FM, Jin Q, Eichhorn F, Muley T, Best TD, Leppelmann KS, et al. Sarcopenia on preoperative chest computed tomography predicts cancer-specific and all-cause mortality following pneumonectomy for lung cancer: A multicenter analysis. *Cancer Med*. 2021; 10: 6677-6686.
 - 22) Suzuki Y, Okamoto T, Fujishita T, Katsura M, Akamine T, Takamori S, et al. Clinical implications of sarcopenia in patients undergoing complete resection for early non-small cell lung cancer. *Lung Cancer*. 2016; 101: 92-97.
 - 23) Shoji F, Matsubara T, Kozuma Y, Haratake N, Akamine T, Takamori S, et al. Relationship between preoperative sarcopenia status and immunonutritional parameters in patients with early-stage non-small cell lung cancer. *Anticancer Res*. 2017; 37: 6997-7003.
 - 24) Fintelmann FJ, Troschel FM, Mario J, Chretien YR, Knoll SJ, Muniappan A, et al. Thoracic skeletal muscle is associated with adverse outcomes after

- lobectomy for lung cancer. *Ann Thorac Surg.* 2018; 105: 1507-1515.
- 25) Takamori S, Toyokawa G, Okamoto T, Shimokawa M, Kinoshita F, Kozuma Y, et al. Clinical impact and risk factors for skeletal muscle loss after complete resection of early non-small cell lung cancer. *Ann Surg Oncol.* 2018; 25: 1229-1236.
 - 26) Kim EY, Lee HY, Kim KW, Lee JI, Kim YS, Choi WJ, et al. Preoperative computed tomography-determined sarcopenia and postoperative outcome after surgery for non-small cell lung cancer. *Scand J Surg.* 2018; 107: 244-251.
 - 27) Ozeki N, Kawaguchi K, Fukui T, Nakamura S, Hakiri S, Mori S, et al. Psoas muscle mass in patients undergoing lung cancer surgery: a prognostic difference between squamous cell carcinoma and adenocarcinoma. *Int J Clin Oncol.* 2020; 25: 876-884.
 - 28) Lee J, Moon SW, Choi JS, Hyun K, Moon YK, Moon MH. Impact of sarcopenia on early postoperative complications in early-stage non-small-cell lung cancer. *Korean J Thorac Cardiovasc Surg.* 2020; 53: 93-103.
 - 29) Pin F, Bonewald LF, Bonetto A. Role of myokines and osteokines in cancer cachexia. *Exp Biol Med (Maywood).* 2021; 246: 2118-2127.
 - 30) Kawaguchi Y, Hanaoka J, Ohshio Y, Okamoto K, Kaku R, Hayashi K, et al. Does sarcopenia affect postoperative short- and long-term outcomes in patients with lung cancer? A systematic review and meta-analysis. *J Thorac Dis.* 2021; 13: 1358-1369.
 - 31) Bernardo I, Bozinovski S, Vlahos R. Targeting oxidant-dependent mechanisms for the treatment of COPD and its comorbidities. *Pharmacol Ther.* 2015; 155: 60-79.
 - 32) Kong S, Shin S, Lee JK, Lee G, Kang D, Cho J, et al. Association between sarcopenia and physical function among preoperative Lung Cancer Patients. *J Pers Med.* 2020; 10: 166.
 - 33) Steffl M, Bohannon RW, Sontakova L, Tufano JJ, Shiells K, Holmerova I. Relationship between sarcopenia and physical activity in older people: a systematic review and meta-analysis. *Clin Interv Aging.* 2017; 12: 835-845.
 - 34) Ohashi K, Ishikawa T, Hoshi A, Suzuki M, Mitobe Y, Yamada E, et al. Relationship between sarcopenia and both physical activity and lifestyle in patients with chronic liver disease. *J Clin Med Res.* 2018; 10: 920-927.
 - 35) Collins J, Noble S, Chester J, Coles B, Byrne A. The assessment and impact of sarcopenia in lung cancer: a systematic literature review. *BMJ Open.* 2014; 4: e003697.
 - 36) Buentzel J, Heinz J, Bleckmann A, Bauer C, Röver C, Bohnenberger H, et al. Sarcopenia as prognostic factor in lung cancer patients: A systematic review and meta-analysis. *Anticancer Res.* 2019; 39: 4603-4612.
 - 37) Takenaka Y, Oya R, Takemoto N, Inohara H. Predictive impact of sarcopenia in solid cancers treated with immune checkpoint inhibitors: a meta-analysis. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2021; 12: 1122-1135.
 - 38) Ganti AK, Wang X, Stinchcombe TE, Wang Y, Bradley J, Cohen HJ, et al. Clinical prognostic model for older patients with advanced non-small cell lung cancer. *J Geriatr Oncol.* 2019; 10: 555-559.
 - 39) Chun YJ, Kim KJ, Lee JY, Choi JW, Kim TH, Kim HR, et al. The prognostic value of comprehensive geriatric assessment on the management of older patients with small cell lung cancer. *Korean J Intern Med.* 2023; 38: 254-263.

放射線治療法におけるロバスト治療計画法の概要

足立大翔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

放射線治療法は、がんの根治や症状の緩和を目指す治療法であり、腫瘍に線量を集中させつつ周囲の正常組織への線量を最小限に抑えることが求められる。しかし、治療時には腫瘍の大きさや位置の変動、患者の体動などの不確かさが生じるため、治療計画装置上の線量分布と実際に患者に照射された線量分布との差異も考慮する必要がある。これらに対処するためには、ロバスト治療計画法が必要である。本稿では、具体例を挙げながら、放射線治療法における各種の不確かさに対するロバスト治療計画法の有用性と今後の展望について解説する。

今後、ロバスト治療計画の研究と臨床応用の進展による、患者に投与される線量分布の正確性の向上、腫瘍の制御率の向上、予期せぬ線量がリスク臓器（OAR: Organ at Risk）に照射されるリスクの低減、正常組織の障害の最小化などが期待される。

キーワード：放射線治療、ロバスト、線量分布、変動、不確か性

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 28-33頁, 2025年 (受付 2024.1.30.; 受理 2024.4.30.)

序 論

現在、本国のがんの3大療法として、手術療法、化学療法および放射線療法がある。放射線療法は、腫瘍に放射線量を集中させると共に周囲の正常組織への線量を極力低減させて、がんの根治を目指すことや症状の緩和を実現する治療法である¹⁾。この放射線療法には、がんの治癒と長期生存を目指す根治的放射線療法と、がんによる苦痛を低減し、生活の質（QOL: Quality of Life）を維持する緩和的放射線療法、および急速に悪化する重篤な症状や生命に関わる危機を回避する緊急放射線療法がある¹⁾。放射線療法の過程において、照射方法の策定に係る放射線治療計画の作成がある。放射線治療計画には、これまでX線透視画像を用いた2次元放射線治療計画法が行われていたが、現在ではX線CT画像をもとにする3次元放射線治療計画法が主流である。前者では、透視画像で描出される骨格情報などをもとに、標的体積、リスク臓器（OAR: Organ at Risk）などの位置や形を想定することによって、治療ビームのエネルギー、照射方向、照射野、線量分割などを決定する。一方、後者では、CT画像から標的体積、OARを輪郭描出することによって、これらの情報から照射方法を決定する¹⁾。現在では放射線治療計画は2次元放射線治療計画法から3次元放射線

治療計画法へと完全に移行し、さらに強度変調放射線治療（IMRT: Intensity Modulated Radiation Therapy/VMAT: Volumetric Modulated Arc Therapy）や定位放射線治療（SRT: Stereotactic Radiation Therapy）などの高精度放射線治療法が実現可能となった²⁾。また、放射線治療計画の作成にあたっては、患者の年齢、全身状態（PS: Performance Status）、原発巣の部位と状態、進展範囲、臨床病期、病理組織、周囲のOARとの位置関係とOARの耐容線量、過去の治療歴、合併症などを慎重に考慮する必要がある¹⁾。しかし、治療計画装置上の線量分布は患者のある瞬間を映像化したCT画像で線量計算が行われるため、この線量分布は理想像であり、実際の線量分布は、線量出力、治療装置の機械精度、線量計算精度、患者および臓器の位置の再現性などの要因によって異なる²⁾。そのため、治療計画装置上の線量分布と実際に患者に照射された線量分布との差異を最小限に抑えるためには、これらの不確かさを考慮した堅牢（ロバスト）な治療計画法が必要である。

ロバストとは、「頑強な」または「頑丈な」という意味である³⁾。図1にロバストの概念図を示す。例えば地震や強風、増水という環境の変動に対して、橋は崩れることなく、車や人が安全に通行することができる。このように、ロバストとは変動（地震、増水、強風）に対して崩れることなく立っている橋のようなも

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

〒113-8421 東京都文京区本郷2-1-1

E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

のである。放射線治療におけるロバストとは、腫瘍の大きさの変化、照射位置の変動、照射中の体動等の様々な要因の影響があった場合でも、標的に対して制御可能な線量を補償できることであるといえる。ロバスト治療計画とは、セットアップの不確実性、解剖学的構造の変化、呼吸性移動および放射線物理特性が線量分布に与える影響に対して、ロバストな放射線治療を作成する手法である²⁾。ロバスト治療計画の一例として、セットアップエラーを仮定し、アイソセンタをAP (Anterior/Posterior) 方向に±3mm、LR (Left/Right) 方向に±3mm、IS (Inferior/Superior) 方向に±5mmの計6方向に移動させて線量最適化計算を行うものがある⁴⁾。ロバスト治療計画の利点として、毎回の治療時の臓器の変形および治療中の臓器の動きに対してロバストな照射計画ができるという点が挙げられる。このような変動や不確実性が考慮されないと腫瘍やOARの線量が計画時と大きく異なる可能性があるが、この変動に対してロバストな治療計画が作成できる。一方で、ロバスト治療計画の欠点として、従来の計画標的体積 (PTV: Planning Target Volume) ベースの計画と比較して、標的の線量均一性が低下してしまう⁵⁾ という点が挙げられる。治療時に想定したような変動が生じなかった場合に、PTVの線量均一性 (HI: Homogeneity Index) が劣化してしまう。近年、ロバスト治療計画はIMRT/VMAT、粒子線治療などの高精度放射線治療だけでなく、三次元原体照射 (3D-CRT: three-dimensional conformal radiation therapy) でも用いられることがある²⁾。そこで、本稿では、ロバスト治療計画の具体例と今後のロバスト治療計画についてまとめる。

ロバスト治療計画の具体例

1. Inter-fractional motion に対するロバスト治療計画

・ 変動

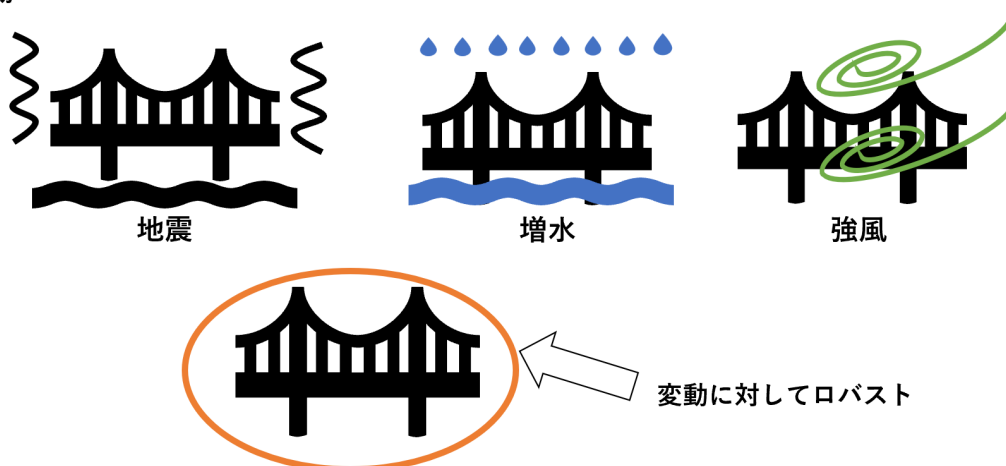


図1 ロバストの概念図

Inter-fractional motion とは、毎回の放射線治療ごとに認められる臓器の移動や変形のことである。主に、消化器の内容物や蠕動運動、尿の貯留状態、腫瘍サイズの縮小や拡大などによるものである⁶⁾。Inter-fractional motion に対するロバスト治療計画は、体動や蠕動運動、蓄尿量などの解剖学的構造の変化に応じるよう放射線治療計画が作成される (図2a)。Dunlop らは、乳癌患者に対して、治療日ごとの体動変化を考慮したロバスト治療計画を用いたVMATを作成することで、標的への線量を補償しつつ、周辺臓器への線量を最小限に抑えることができることを示した⁷⁾。

頭頸部腫瘍の放射線治療では、放射線による副作用として食道炎や喉頭痛が生じ、これが食欲の低下を引き起こし、体重減少を招くことがある。頭頸部では、腫瘍を含む各組織が非常に近接しており、これらの体積が変化すると正常組織を含む周囲組織の解剖学的位置が変わる。腫瘍と耳下腺、腫瘍と脊髓腔などの解剖学的位置の変化は、数ミリ単位のズレが線量分布に影響を与え、OARの副作用を引き起こす可能性がある⁸⁾。Ding らは、鼻咽頭癌 (NPC: Naso Pharyngeal Carcinoma) の通常のVMAT計画において、セットアップエラーに対する堅牢性を評価し、脳幹のような重要な組織がセットアップエラーに弱く、耳下腺などの臓器に対しても敏感であり、治療のリスクを増加させる可能性がある⁹⁾。このような照射部位に対しては、セットアップエラーに対してロバストな治療計画法を用いることで、脳幹および耳下腺へ計画以上の線量が照射されることを避けることができると考えられる。

放射線治療には、強度変調陽子線治療 (IMPT: Intensity Modulated Proton Therapy) と呼ばれるものがある。陽子線を用いて照射線量を腫瘍に集中させながら、周りの臓器に与える影響を低減できるような照射

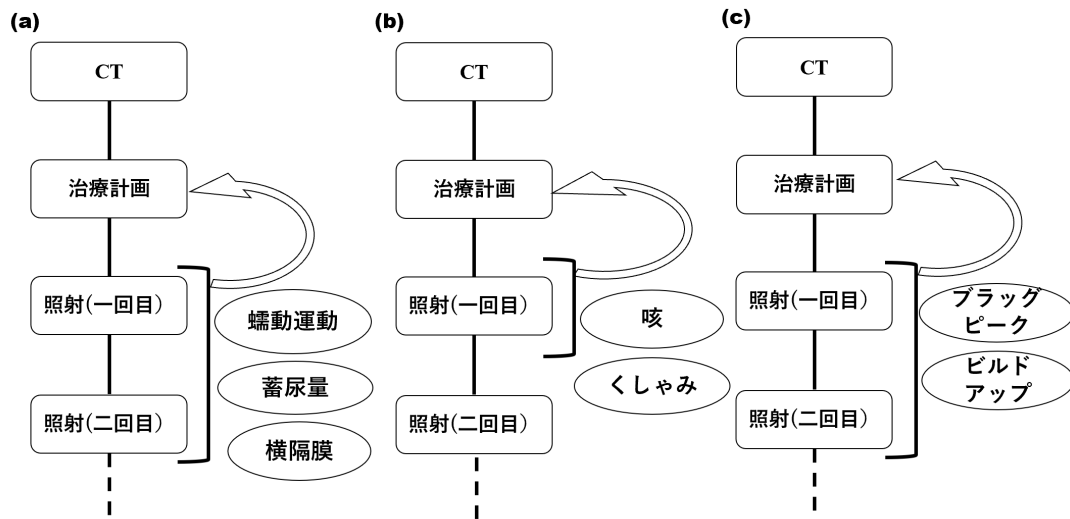


図2 ロバスト治療計画

- (a) 照射ごとの変化に考慮した Inter-fraction motion に対するロバスト治療計画
- (b) 照射中の変化に考慮した Intra-fractional motion に対するロバスト治療計画
- (c) 放射線の性質や特徴を考慮した放射線物理特性に対するロバスト治療計画

法である。人体に陽子線が入射した際に、患者の解剖学構造が変化することでブラックピークの位置が変動し、ビームごとの線量にばらつきが生じる。そのため、IMPTは患者の体位の変化が陽子線の飛行に不確かさを与え、照射線量分布に大きな影響を与える可能性がある。よって、このような不確かさを治療計画に考慮しないと、実際の照射線量分布は計画通りの線量と異なることがある。Van de waterらは、頭頸部癌の患者におけるIMPT計画において、鼻腔内の密度変化に対する放射線治療計画の堅牢性を、従来型の照射計画(SFUD: Single-Field Uniform Dose)、異なる患者の複数のCTスキャンを使用して作成した解剖学的変化に対しロバスト最適化を実施した治療計画、およびオンライン適応治療計画に対して、線量分布の比較を行った。解剖学的変化に対してロバスト最適化した計画では、SFUDに比べてCTVへの処方線量を補償しつつ、同時にOARへの線量も低減したことを示した¹⁰⁾。Lalondeらは、頭頸部領域で行われるIMPTにおいて、日々の解剖学的変化が治療効果に影響を及ぼす可能性があるため、通常の最適化計算を行った計画、解剖学的な変化を考慮したロバスト治療計画、治療中に患者の解剖学的または生理学的変化に応じて放射線治療計画を調整するオンライン適応治療計画を作成し、比較を行った。解剖学的な変化を考慮したロバスト治療計画は、通常の計画より優れた線量分布が得られたが、オンライン適応治療計画が最も患者の解剖学的または生理学的変化が照射線量分布に与える影響を減らすことを示した¹¹⁾。このように、ロバスト治療計画だけでは計画の堅牢性を担保できない可能性があるため、日々の変

動を監視し、適応放射線治療を実施する必要がある。また、Gortらは、骨盤と周囲臓器の移動を考慮し、陽子線治療で用いるPencil Beam Scanning Proton Therapy (PBS-PT)によって、子宮頸癌の放射線治療を実施した。VMATと比較して、治療日ごとの変動に対する標的への堅牢性が同等であり、有意に優れたOAR線量の制約が可能であることを示した¹²⁾。以上のように、Inter-fraction motionに対するロバスト治療計画は、治療日ごとに変化が生じた場合でも、標的への線量補償と周囲臓器への線量低減を実現する治療計画法である。

2. Intra-fractional motion に対するロバスト治療計画

Intra-fractional motionとは、治療中に生じる標的や臓器の動きのことである。主に呼吸性移動によるものが多い⁶⁾。Intra-fractional motionに対するロバスト治療計画は、照射中の体動、呼吸運動および腸管蠕動といった照射中の変化を考慮した治療計画が作成される(図2b)。Casares-Magazらは、肺癌の陽子線治療において、呼吸による水等価線量経路(WEPL: Water Equivalent Path Length)の変化を評価する四次元画像に基づく計画を提示した。MIP(Maximum Intensity Projection)CTにおける体内標的体積(ITV: Internal Target Volume)について、3度のガントリごとにMIP画像を最適化するという計画は、WEPLの変化に対してロバストな陽子線のガントリ-カウチ角度の組み合わせを同定できることを示した¹³⁾。Batistaらは、膵臓癌患者に対して、陽子または¹²Cを用いたIMPTを行う際の治療中の体の動きが線量分布に及ぼす影響を調査し、体動が生じると治療計画時の線量均一性が劣化することで標的線

量が減少することを示した。そこで、複数のビームを用いることや体動による密度変化の影響を受けにくい方向からビームを照射することで、治療計画の堅牢性を高めることができると示した¹⁴⁾。Liuらは、肺癌治療における三次元および四次元画像を使用して、ロバスト最適化をしたIMPTの不確実性、呼吸運動と照射される陽子ビームにより発生する相互作用の影響を比較した。不確実性に直面した場合、四次元画像を使用したIMPTでは三次元画像を使用したIMPTと比べ、標的への線量を担保しつつ、均一性を向上させ、相互作用に耐性もあると示した¹⁵⁾。Engwallらは、陽子放射線治療における相互作用効果の影響を軽減する四次元画像を使用して、ロバスト最適化を行う計画を提案した。この計画では時間構造と臓器の移動を考慮して計画を生成するため、大きな腫瘍変動がある場合に効果的であることを示した¹⁶⁾。以上のように、Intra-fractional motionに対するロバスト治療計画は、治療中の呼吸や体動に対する放射線治療計画の堅牢性に有益である。

3. 放射線物理特性に対するロバスト治療計画

放射線物理特性に対するロバスト治療計画は、照射ビームのブラッグピークやビルドアップの変化によって発生する不確かさを考慮した治療計画である(図2c)。Guらは、頭蓋底腫瘍患者と頭頸部腫瘍患者に対して、陽子線のスポットごとの影響の差を均等に調整する手法であるSensitivity Regularization (SenR)、患者の体位のずれや陽子線ビーム到達範囲の不確かさなどの最悪な場合を想定しCTVに対して最適化を行う手法であるCTV-based voxel-wise worst-case scenario optimization approach (WC)、およびPTVに対して最適化を行う手法であるconventional PTV-based optimization method (ConV)を用いて、計画線量分布を比較した。その結果、SenRを使用することにより、計算効率を向上させた上で、患者に対する照射線量の不確実性の影響を軽減できることを示した¹⁷⁾。肺野領域におけるPTVには腫瘍と正常肺組織が含まれているため、IMRTまたはVMATを使用して腫瘍周辺における低密度領域の肺組織に十分な線量を投与するには、皮膚表面のビルドアップ領域と同様に、腫瘍周囲の肺領域に対しても高い強度のビームフルエンスが必要となる。このビームフルエンスは、位置誤差が生じた場合に腫瘍や周辺正常組織に予期していない高線量の照射をもたらす可能性がある。この問題を解決するために、PTVの電子密度を水等価相当に置換する方法が報告されている¹⁸⁾。以上のように、放射線物理特性の変化が照射線量分布に対する与える影響を低減すること

が、放射線物理特性に対するロバスト治療計画であるといえる。

考 察

放射線治療時に生じる様々な変化変動に対するロバスト治療計画の具体例についてまとめた。今後の放射線治療計画において、ロバスト治療計画は標的周囲の臓器の温存および高精度な治療の実施という点で、必要不可欠な治療計画法になると考えられる。現在、実施されているロバスト治療計画の研究例を示す。一つ目は、堅牢性の高いIMRTの臨床実現に向けた医学的および物理的検討という研究である。この研究では、患者位置の幾何学的不確かさと体型変化や急激な腫瘍縮小の解剖学的な変形との複合的な不確かさに対するロバスト線量分布の堅牢性を検討している。さらに、特定の患者に対し、ロバスト治療計画による治療を実際に行い、実臨床での実現可能性を評価し、臨床に導入するための確かなエビデンスを得ることを目指している¹⁹⁾。二つ目は、最大限の線質最適化を実現するための高度重粒子線治療における堅牢性評価という研究である。この研究は、線質をコントロールする高度重粒子線治療である強度変調複合イオン照射法 (IMPACT: Intensity Modulated composite PartiCle Therapy)²⁰⁾において、線量分布に対して治療過程に発生する患者の位置ズレなどの誤差の影響を従来照射と比較することで、誤差の影響下で最適となる線量・線質分布を明らかにすることを目指している²¹⁾。三つ目は、放射線治療において椎体の屈曲・伸展・回旋による体位の誤差を検出補正する方法の検討という研究である。この研究では、コーンビームCTを用いずに2方向X線画像のみで変形を検出し、仮想CT画像を生成することで実投与線量の評価を可能にするとともに、線量分布誤差が最も小さくなるような位置補正法、および変形による誤差に対して堅牢な線量分布となるよう治療計画を最適化する手法を開発している²²⁾。上述の研究例のように、高精度かつより臨床に役立つようなロバスト治療計画の研究は、今後も進歩していくと考えられる。また、技術的な部分だけに目を向けるのではなく、初めての場所での放射線治療に緊張している患者自身の精神面も考慮すべきであり、ロバストな放射線治療を行うためには、放射線治療に関わるスタッフ間で患者情報を共有することが重要である²⁾。ロバスト治療計画には患者との協力も必要であると考えられる。

結 論

ロバスト治療計画の具体例と今後のロバスト治療計

画についてまとめた。ロバスト治療計画に関する研究と臨床での実用化が進むことで、患者に投与される線量分布の正確性や腫瘍の制御率の向上が見込まれる。また、ロバスト治療計画により予期せぬ線量が OAR に照射されることが避けられることから、正常臓器の障害を最小限に抑えることにつながると考えられる。

謝 辞

本論文の作成にあたりまして、多くの方々にご協力を頂きました。心から感謝いたします。

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) 日本放射線腫瘍学会：放射線治療計画ガイドライン2020年版．第5版．東京．金原出版．2020: 388～401.
- 2) 三浦英治：ロバストな放射線治療計画．日本放射線技術学会雑誌．2022: 78: 882～888.
- 3) 中塚慧，松岡由幸：ロバストデザイン，その概念．日本デザイン学会研究発表大会概要集．2008: 55: 38～39.
- 4) Zhang X, Rong Y, Morrill S, Fang J, Narayanasamy G, et. al: Robust optimization in lung treatment plans accounting for geometric uncertainty. *J Appl Clin Med Phys*. 2018; 19: 19-26.
- 5) Yagihashi T, Inoue K, Nagata H, Yamanaka M, Yamano A, Suzuki S, et. al: Effectiveness of robust optimization against geometric uncertainties in TomoHelical planning for prostate cancer. *J Appl Clin Med Phys*. 2023; 24: e13881.
- 6) 森崇：がんの放射線治療の現状と獣医療における展望．日本獣医師会雑誌．2015: 68: 173～177.
- 7) Dunlop A, Colgan R, Kirby A, Ranger A, Blasiak-Wal I: Evaluation of organ motion-based robust optimisation for VMAT planning for breast and internal mammary chain radiotherapy. *Clin Transl Radiat Oncol*. 2019; 16: 60-66.
- 8) 川守田龍，山田和成，中島俊文，奥野芳茂，小倉昌和：頭頸部 IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy) における経時的な頭頸部領域体積の変
- 化と線量分布への影響．日本放射線腫瘍学会誌．2006: 18: 199～207.
- 9) Ding Z, Xiang X, Zeng Q, Ma J, Dai Z, Kang K, et al: Evaluation of plan robustness on the dosimetry of volumetric arc radiotherapy (VMAT) with set-up uncertainty in Nasopharyngeal carcinoma (NPC) radiotherapy. *Radiat Oncol*. 2022; 17: 1.
- 10) Van de Water S, Francesca A, Damien CW, Ben JMH, Mischa SH, Antony JL: Anatomical robust optimization to account for nasal cavity filling variation during intensity-modulated proton therapy: a comparison with conventional and adaptive planning strategies. *Phys Med Biol*. 2018; 63: 025020.
- 11) Lalond A, Bobic M, Winey B, Verbarq J, Sharp GC, Paganetti H: Anatomic Changes in Head and Neck Intensity-modulated Proton Therapy: Comparison between Robust Optimization and Daily Adaptation. *Radiother Oncol*. 2021; 159: 39-47.
- 12) Gort EM, Beukema JC, Matysiak W, Sijtsema NM, Aluwini S, Langendijk JA, et al: Inter-fraction motion robustness and organ sparing potential of proton therapy for cervical cancer. *Radiother Oncol*. 2021; 154: 194-200.
- 13) Casares-Magaz O, Toftegaard J, Muren LP, Kallehauge JF, Bassler N, Poulsen PR, et al: A method for selection of beam angles robust to intra-fractional motion in proton therapy of lung cancer. *Acta Oncol*. 2014; 53: 1058-1063.
- 14) Batista V, Richter R, Chaudhri N, Naumann P, Herfarth K, Jäkel O: Significance of intra-fractional motion for pancreatic patients treated with charged particles. *Radiat Oncol*. 2018; 13: 120.
- 15) Liu W, Schild SE, Chang JY, Liao Z, Chang YH, et al: Exploratory study of 4D versus 3D robust optimization in intensity modulated proton therapy for lung cancer. *IJROBP*. 2016; 95: 523-533.
- 16) Engwall, E, Albin F, Lars G: 4D robust optimization including uncertainties in time structures can reduce the interplay effect in proton pencil beam scanning radiation therapy. *Med Phys*. 2018; 45: 4020-4029.
- 17) Gu W, Ruan D, O'Connor D, Zou W, Dong L, Tsai MY, et al: Robust optimization for intensity-modulated proton therapy with soft spot sensitivity regularization. *Med Phys*. 2019; 46: 1408-1425.
- 18) Wiant D, Vanderstraeten C, Maurer J, Pursley J, Terrell J, Sintay BJ: On the validity of density overrides for

- VMAT lung SBRT planning. Med Phys. 2014; 41: 081707.
- 19) 茂木佳菜：堅牢性の高い強度変調放射線治療の臨床実現に向けた医学的および物理的検討. <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-22K15890/>, 2024年1月10日.
- 20) 稲庭拓：重粒子線治療の LET 修飾. 医学物理. 2020; 40: 23～27.
- 21) 笠松幸生：最大限の線質最適化を実現するための高度重粒子線治療における堅牢性評価. <https://kaken.nii.ac.jp/grant/KAKENHI-PROJECT-23K19600/>, 2024年1月10日.
- 22) 宮部結城：放射線治療において椎体の屈曲・伸展・回旋による誤差を検出補正する方法の検討. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-23K07169/>, 2024年1月10日.

Abstract

Overview of robust treatment planning methods in radiotherapy

Hiroto Adachi, Keisuke Usui

Graduate School of Health Science, Juntendo University Master Course of Radiological Technology

The radiotherapy is a treatment method that aims to cure cancer radically or relieve symptoms and requires that the dose be concentrated on the tumor while minimizing the dose to the surrounding normal tissue. However, there are uncertainties during treatment, such as fluctuations in tumor size and position, patient body movements, etc., and differences between the dose distribution on the treatment planning device and the dose distribution actually delivered to the patient must also be taken into account. Robust treatment planning methods are needed to address these issues. This paper describes robust treatment planning methods as a response to uncertainties in radiotherapy and their future prospects, with specific examples.

Future advances in research and clinical application of robust treatment planning are expected to improve the accuracy of dose distribution delivered to patients, increase tumor control rates, reduce the risk of unexpected doses being delivered to organs at risk, and minimize damage to normal tissue.

Key Words: radiotherapy, robust, dose distribution, variability, uncertainty

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 28-33, 2025]

前立腺癌の放射線治療における体内金属の影響

高氏 颯汰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

前立腺癌の発生頻度は世界的に高く、近年、日本においても顕著な増加が見られる。放射線治療は前立腺癌に対して有効な治療法の一つであり、特に、腫瘍へ高線量を与えつつ、周囲のリスク臓器への線量を減らすことができる強度変調放射線治療 (IMRT) は広く用いられている。また、腫瘍位置を正しく得るために、画像誘導放射線治療 (IGRT) が IMRT と併用されている。前立腺癌では、IGRT の方法の一つとして、腫瘍の位置や動きをより明確に認識できる金属マーカが用いられることがあるが、高原子番号の金属であるため、CT 画像中に金属アーチファクトが発生し、画像の歪みや、CT 値に不確かさが生じうる。また、人工股関節を持つ前立腺癌の患者では、金属による画像の歪みが大きいため、金属を通過しない方向からビームを設定し、アーチファクトの影響を回避するのが一般的である。しかし、この方法では、ビーム角度の制限により、標的に対して均一な線量付与が困難となりうるということが指摘されている。本報告では、前立腺癌の症例において、体内に金属が存在した場合の線量への影響についての先行研究を紹介し、未だ残されている課題について検討を行う。

キーワード：前立腺癌、IMRT、IGRT、金属マーカ、金属アーチファクト

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 34-39頁, 2025年 (受付 2024.1.31.; 受理 2024.5.7.)

1. はじめに：前立腺癌について

2012年の全世界での前立腺癌罹患数は約110万人で、男性の癌の14.8% (第2位) を占めており、死亡数は年間約31万人 (6.6%) で5番目に多い^{1,2)}。年齢調整罹患率は10万人あたり30.7 (第2位)、年齢調整死亡率は10万人あたり7.8 (第5位) であり、いずれも欧米等の先進国で高い傾向がある^{1,2)}。一方、日本人の前立腺癌の罹患数は、1980年の3,944人に対し、30年後の2010年には64,934人と16倍以上にまで増えている³⁾。最新のデータ (2019年) では、前立腺癌の罹患数は94,749人で、日本人男性が罹るがんの第1位となり³⁾、約9人に1人の男性が生涯の内で前立腺癌に罹患すると推定されている。

前立腺癌との関連性が推測されている後天的要因としては、①生活習慣 (食事、運動、嗜好品、機能性食品等)、②肥満、糖尿病およびメタボリック症候群、③前立腺の炎症や感染、④前立腺肥大症や男性下部尿路症状、⑤環境因子や化学物質への曝露等が挙げられる。ただし、いずれの要因についても相反する研究があり、方法論的にも交絡因子を除外するには限界があるため、前立腺癌の罹患に関与する後天的要因を特定することは困難である。

2. 前立腺癌の放射線治療

前立腺がんに対する治療モダリティは、根治的前立腺摘除術、放射線外部照射 (三次元原体照射・強度変調放射線治療・粒子線治療)、組織内照射、内分泌治療、高密度焦点式超音波治療法、凍結療法、そして prostate specific antigen 監視療法 (active surveillance) と多岐にわたる。その中で、治療技術やテクノロジーの進歩により、より安全に局所線量を高めることができるようになってきた放射線外部照射が注目されている⁴⁾。放射線外部照射では、これまでの三次元原体照射による照射方法から、強度変調放射線治療 (intensity modulated radiation therapy: IMRT) へ進化したことで、正常組織である消化管や泌尿器系への有害事象を軽減しながら⁵⁾、局所 (腫瘍) のみに投与線量を増加させることが可能となり、治療効果を高めることに成功している。実際に、これまでの研究により、高齢者に対する放射線外部照射の有害事象は、性機能に与える影響は大きいものの、消化管や泌尿器系への有害事象は早期、晚期ともに年齢に影響されることが明らかとなっており^{6,7)}、高齢者にも適した治療であると考えられている。

上述の IMRT は、マルチリーフコリメータと呼ばれ

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

る放射線を遮蔽する金属を動かすことによって、照射野内の放射線の量の強度をつけることが可能な治療方法である。これにより、腫瘍（標的）周辺に急峻な線量勾配を形成し、腫瘍へ高線量を与えるとともに、周囲のリスク臓器への線量を減らすことを可能とする（図1）⁷⁾。

前立腺癌の治療の場合、IMRTを用いることで、リスク臓器となる膀胱と直腸への線量を減らすことができる。一方、急峻な線量勾配を作成できるIMRTを用いて患者へ照射する際、治療時における患者のセットアップや呼吸などの生理的な動きによる標的位置の不確かさを可能な限り減らす必要がある。そこで、近年、IMRTの実施には、照射直前または治療中の2方向のX線画像やcone beam computed tomography (CBCT)などを用いた画像誘導放射線治療 (image guided radiation therapy: IGRT)⁸⁾が必須となっている。IGRTを用いることにより、照射位置を画像情報として得ることができるため、上述した照射位置に関する不確かさを減らすことが可能となり、腫瘍へ適切な線量を照射しつつ、正常組織への線量を低減させることができる。IGRTにおける照射位置の照合は、治療する疾患や標的位置に応じて、体表面、骨構造、腫瘍のいずれかの位置情報を画像から取得し、実施される⁹⁾。

3. 放射線治療における体内金属の影響

前述のIGRTの方法の一つとして、腫瘍の位置や動きをより明確に認識できる金属マーカが用いられることがある（図2）。金属マーカは高原子番号の金属からできているため、画像において特定しやすいことが特徴である^{8,10)}。しかし、高原子番号の金属マーカを留置し、治療計画用のcomputed tomography (CT)画像を撮影すると、画像中に金属アーチファクトや、それに関連してCT値に不確かさが生じる。放射線治療では、CT画像を用いた治療計画が一般的であり、得

られたCT画像を用いて腫瘍や重要臓器の輪郭描出や線量計算を行う¹¹⁾。画像中に金属アーチファクトが存在すると、正確な輪郭描出が困難となることや、CT値から得られる電子密度に不確かさが生じることで、計算される線量にも不確かさが生じてしまうなどの問題が生じる^{12,13)}。このような体内金属による治療計画への影響は、金属マーカだけでなく、血管内治療で用いるコイルやステント、人工股関節、歯科治療で用いるインプラントといったものでも注意が必要となる。以下に、体内金属が存在する場合の治療計画への影響について、先行研究を紹介する。

3.1 金属マーカ

羽原らは、肺癌の定位放射線治療において肺腫瘍付近に金属マーカを留置した場合に、金属マーカが線量分布に与える影響を研究した¹⁴⁾。その結果、肺野内の金属マーカ付近の線量計算において、線量分布計算アルゴリズムにsuperposition法を使用した場合、X線または電子の後方散乱、前方散乱、側方散乱などが生じ、正しく計算できない可能性があると報告した。更に、Monte Carlo simulationを用いて詳細に調べた研究では、金属マーカの散乱線が、腫瘍組織への線量不足やリスク臓器への約10%の線量増加につながるものが考えられるため、金属マーカと腫瘍との間の距離を5mm以上離すべきであると指摘している¹⁵⁾。また、福永らは、前立腺癌に対するIMRTの治療計画における腫瘍内金属マーカの線量分布および線量評価指標への影響を研究した¹⁶⁾。その結果、IGRTに使用される金属マーカが前立腺内に存在している場合、前立腺がんIMRTの治療計画において、腫瘍内金属マーカの周辺で起こる局所的線量変化が、線量分布および線量評価指標へ影響を及ぼすことが確認された。ただし、金属マーカの散乱線による影響が金属マーカの近傍のみであり、10症例における臨床標的体積の平均体積

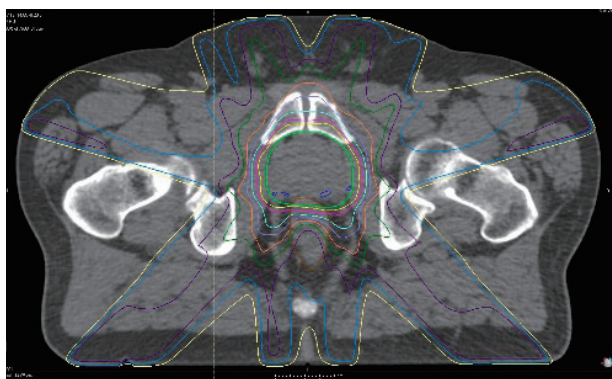


図1 IMRTによる線量分布の例

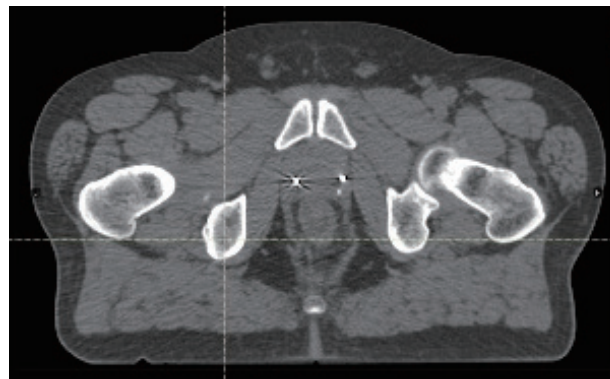


図2 金属マーカを含んだCT画像

(33.945 cm³) と計画標的体積の平均体積 (97.972 cm³) に対して、用いた金属マーカの体積が最大でも0.0095 cm³ (直径1.1 mm、長さ10 mm のとき) と小さかったため、金属マーカを挿入しない場合と大きな変化はないと報告された。このように、前立腺 IMRT において、金属マーカによる散乱線が治療標的である前立腺内であれば問題とならないが、リスク臓器である直腸や膀胱、尿道の近くで生じると問題となる可能性がある¹⁵⁾。一方、標的体積に対して金属マーカのサイズが大きい場合の線量への影響については、今後検討すべきであると考える。

3.2 人工股関節

現在の人工股関節手術は約7万件で、10年前と比べ1.5～2倍程度に増加している¹⁷⁾。このことから、人工股関節の患者が前立腺癌に罹患する確率も高くなっていると考えられる。このような人工股関節の患者に対する放射線治療では、金属を通過しない方向からビームを設定することで、アーチファクトの影響を回避する工夫がなされるのが一般的である (図3)。

しかし、この方法ではビームの角度が制限されることによって、強度変調を十分に行うことが困難となりうる。その結果、リスクのある臓器への線量が増えることにより、患者の治療を困難にする可能性がある。

また、CT で取得された画像のピクセル値が、治療計画装置で設定された値の上限または下限に達してしまうような金属では、CT 画像が不明瞭となるため、正確な線量計算のために、放射線科医や医学物理士、診療放射線技師によって手作業で輪郭を描き、金属に適切な値を割り当てる必要がある場合がある。この対処法の一つとして、American Association of Medical Physics のタスクグループでは、金属インプラントの存在下で CT 画像のダイナミックレンジを広げて線量を直接計算することで、異なる組織や物質の微細な電

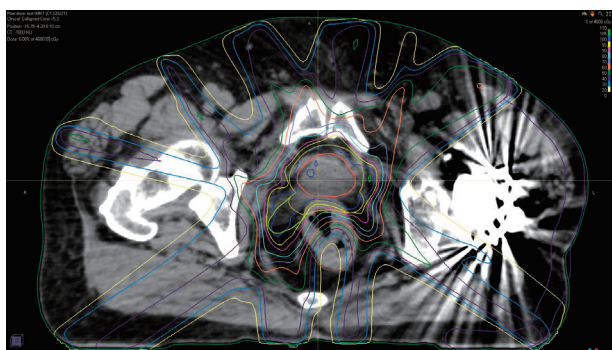


図3 ビームの入射方向より金属を通過しないように作成した IMRT 線量分布

子密度の差を強調することができ、臨床的に実行可能な治療計画を作成することができるとしている¹⁸⁾。これにより、臨床ワークフローの効率が向上し、手動による CT 値の割り当てによる潜在的な人的エラーの原因を排除できる¹⁸⁾。しかし、金属近傍の腫瘍に対しては金属を通過するビーム設定を回避することが難しく、また、水の CT 値に置き換える方法では、誤って水ではない領域の CT 値を置き換えてしまう可能性もあり、このような場合は線量計算の誤差をより大きくしてしまう可能性がある。その他、CT 画像の金属アーチファクトの対策として、金属を通過した領域のデータを処理することによって、金属部分の形状判定を CT 画像の輝度から抽出し、金属アーチファクトを低減する画像再構成処理による方法¹⁹⁾がある。しかし、金属アーチファクトの発生した CT 画像から金属形状を正確に抽出することは困難であると考えられ、金属アーチファクトの低減手法としては有効性に疑問が残されている²⁰⁾。また、放射線治療計画においても、その CT 装置で作成された CT-電子密度変換テーブルでは計算結果に相違が生じる場合があると考えられる。

このような金属アーチファクト低減処理については複数メーカから考案されており、株式会社フィリップスエレクトロニクスジャパン製の O-MAR²¹⁾ (orthopedic-metal artifact reduction) やシーメンス株式会社製の iMAR²²⁾ (iterative metal artifact reduction)、東芝メディカルシステムズ株式会社製の SEMAR (single energy metal artifact reduction) がある。SEMAR は逐次近似応用再構成法で用いられる forward projection、back projection を繰り返して、投影データと画像データの金属領域を抽出して得られたデータから金属領域を補間することによって、アーチファクトを低減する技術である²³⁾。SEMAR を使用した研究として、現在までに診断の分野で視覚的評価を用いた画質改善の報告がなされている²⁴⁻²⁶⁾。SEMAR の利用について、放射線治療の分野でも研究がなされている。西谷らの研究では、放射線治療計画で SEMAR ありと SEMAR なしの線量計算精度の改善はわずかなものであったが、輪郭抽出精度に関しては大きく改善することが示された²⁷⁾。しかし、金属が複雑な形の場合 (突起部分等が含まれる場合など) では、SEMAR を使用することによって金属アーチファクトが増強してしまう場合があることも指摘されている²⁸⁾。そのため、金属アーチファクト低減処理を使用する際は、必ず SEMAR あり画像と SEMAR なし画像を比較して、金属アーチファクト低減効果を確認して治療計画に用いることが重要であるとされている²⁸⁾。

4. まとめ

CT画像を用いた放射線治療計画において、金属アーチファクトが存在した場合、CT値に大きな不確かさが生じ、計算精度に影響を及ぼしうる。金属マーカなど金属の体積が小さい場合には、腫瘍への線量には大きな影響を及ぼさないことが示されているが、リスク臓器である直腸や膀胱、尿道が近接している場合には問題となる可能性がある。また、人工股関節など金属の体積が大きい場合、一般的には金属を通過しない方向からビームを設定することや、アーチファクト低減処理を行うことで、アーチファクトの影響を回避するが、これによりIMRTやVolumetric Modulated Arc Therapyでは強度変調が十分に行えず、標的に対して均一な線量付与が困難となりうることが指摘されている。以上の先行研究の結果から、金属が体内に含まれる症例に対して放射線治療を行う場合は、CT値の不確かさに影響されない治療計画の実現可能性について、今後検討していく必要があると考えられる。

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) Torre LA, Bray F, Siegel RL, Ferlay J, Lortet-Tieulent J, Jemal A: Global cancer statistics 2012, CA Cancer J Clin. 2015; 65: 87-108.
- 2) World Health Organization. Globocan 2012.
- 3) 国立がん研究センターがん情報サービス「がん登録・統計」 https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html, 2024年3月5日.
- 4) 横溝晃：高齢者前立腺がん治療の現状と展望. 日老医誌. 2015; 52: 26-33.
- 5) Shioyama Y, Tsuji H, Suefuji H, Sinoto M, Matsunobu A, Toyama S, et al: Particle radiotherapy for prostate cancer. International Journal of Urology. 2015; 22: 33-39.
- 6) Hamilton AS, Stanford JL, Gilliland FD, Albertsen PC, Stephenson RA, Hoffman RM, et al: Health outcomes after external-beam radiation therapy for clinically localized prostate cancer: results from the Prostate Cancer Outcomes Study. Journal of clinical oncology. 2001; 19: 2517-2526.
- 7) Ashesh BJ, Parikh SD, Vijayakumar S, Gratzle J: Analysis of influence of age on acute and chronic radiotherapy toxicity in treatment of prostate cancer. Urology. 2005; 65: 1157-1162.
- 8) Ezzell GA, Galvin JM, Daniel L, Palta JR, Rosen I, Sharpe MB, et al: Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: report of the IMRT Subcommittee of the AAPM Radiation Therapy Committee. Medical Physics. 2003; 30: 2089-2115.
- 9) 日本医学物理学会, 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臨床導入のためのガイドライン (略称: IGRT ガイドライン). 2022.
- 10) 日本医学物理学会, 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臨床導入のためのガイドライン (略称: IGRT ガイドライン). 2010.
- 11) Mutic S, Palta JR, Butker EK, Das IJ, Huq S, Loo LN, et al: Quality assurance for computed-tomography simulators and the computed tomography-simulation process: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 66. Medical Physics. 2003; 30: 2762-2792.
- 12) Chen Y, O'Connell JJ, Ko CJ, Mayer RR, Belard A, McDonough JE: Fiducial markers in prostate for kV imaging: quantification of visibility and optimization of imaging conditions. Physics in Medicine & Biology. 2012; 57: 155-172.
- 13) Brandon M, Lee RJ, Handrahan D, Welsh KT, Cook JT, Sause WT: Image-guided radiotherapy (IGRT) for prostate cancer comparing kV imaging of fiducial markers with cone beam computed tomography (CBCT). International Journal of Radiation Oncology Biology Physics. 2011; 80: 301-305.
- 14) 羽原幸作, 下郷智弘, 青山裕一, 林直樹, 安井啓祐, 松浦寛司, 他: 外部放射線治療における腫瘍位置確認用金マーカからの散乱線による人体への影響の検討. 日本放射線技術学会雑誌. 2011; 67: 1164-1173.
- 15) Lloyd S, Ansbacher W: Evaluation of an analytic linear Boltzmann transport equation solver for high-density inhomogeneities. Medical Physics. 2013; 40: 117071-117075.
- 16) 福永淳一, 有村秀孝, 梅津芳幸, 大石歩, 廣瀬貴章: 前立腺がん IMRT の治療計画における金属

- マーカの線量分布および線量評価指標への影響.
日本放射線技術学会雑誌. 2014; 70: 1429-1438.
- 17) 一般財団法人日本人工関節学会. <https://jsra.info/>.
2023年12月20日.
- 18) Chester R, Rodica A, Indra JD, Bruce JG, Paul K, Eugene L, et al: Dosimetric considerations for patients with HIP prostheses undergoing pelvic irradiation. Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 63. *Med Phys.* 2003; 30: 1162-1182.
- 19) Mullins JP, Grams MP, Herman MG, Brinkmann DH, Antolak JA: Treatment planning for metals using an extended CT number scale. *J Appl Clin Med Phys.* 2016; 6: 179-188.
- 20) Koseki M, Hashimoto S, Sato S, Kimura H, Inou N: CT Image Reconstruction Algorithm to Reduce Metal Artifact. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering.* 2008; 2: 374-383.
- 21) Li H, Noe C, Chen H, Li HH, Low D, Moore K, et al: Clinical evaluation of a commercial orthopedic metal artifact reduction tool for CT simulations in radiation therapy. *Medical Physics.* 2012; 39: 7507-7517.
- 22) Weiß J, Schabel C, Bongers M, Raupach R, Clasen S, Notohamiprodjo M, et al: Impact of iterative metal artifact reduction on diagnostic image quality in patients with dental hardware. *Acta Radiologica.* 2017; 58: 279-285.
- 23) Teixeira PAG, Meyer JB, Baumann C, Raymond A, Sirveaux F, Coudane H, et al: Total hip prosthesis CT with single-energy projection-based metallic artifact reduction: impact on the visualization of specific periprosthetic soft tissue structures. *Skeletal Radiology.* 2014; 43: 1237-1246.
- 24) Kido M, Utsunomiya D, Ikeda O, Tamura Y, Oda S, Funama Y, et al: Reduction of metallic coil artefacts in computed tomography body imaging: effects of a new single-energy metal artefact reduction algorithm. *European Radiology.* 2016; 26: 1378-1386.
- 25) Funama F, Taguchi K, Utsunomiya D, Oda S, Hirata K, Yuki H, et al: A newly developed metal artifact reduction algorithm improves the visibility of oral cavity lesions on 320-MDCT volume scans. *Phys Med.* 2015; 31: 66-71.
- 26) Hirata K, Utsunomiya D, Oda S, Kidoh M, Funama Y, Yuki H, et al: Added value of a single energy projection-based metal-artifact reduction algorithm for the computed tomography evaluation of oral cavity cancers. *Japan Journal of Radiology.* 2015; 33: 650-656.
- 27) 西谷拓也, 松木清倫, 北野哲哉, 山本裕之, 金子雅一, 山田茂樹: 放射線治療計画における金属アーチファクト低減処理による CT 画像の改善—輪郭抽出精度と線量計算の基礎的検討. *日本放射線技術学会雑誌.* 2018; 74: 39-47.
- 28) 西谷拓也: つかえるの? 金属アーチファクト低減処理. pre かたろう会.

Abstract

Effect of metallic implants on radiotherapy treatment planning for prostate cancer

Takauji Sota¹⁾, Chie Kurokawa²⁾

¹⁾ Department of Radiological Sciences, Graduate School of Health Sciences, Juntendo University

²⁾ Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Juntendo University

Prostate cancer is the most common cancer in males worldwide, and its number in Japan has significantly increased in recent years. Radiation therapy is one of curative treatment modalities for localized prostate cancer, and especially intensity-modulated radiation therapy (IMRT) is widely used since it allows high doses to the tumor target while reducing the dose to surrounding risk organs. Image-guided radiation therapy (IGRT) improves target localization accuracy and it combined with IMRT can be effective in preventing the occurrence of normal tissue toxicity. For prostate cancer treatment, intra-prostatic fiducial markers are used for IGRT due to its accurate tumor localization and motion management. However, these markers are made of high atomic number metals, which can cause metal artifacts in CT images, leading to image distortion and uncertainties in CT values. Also, some prostate cancer patients have prosthetic hip and metal artifacts in their CT images induced some uncertainties in the treatment planning. Therefore, in treatment planning for such prostate cancer patients, beam angles are usually selected to avoid the metal along the path in CT images to avoid such uncertainties. Although this method can avoid the dosimetric complications of the metal artifacts, it may result in non-uniform target dose due to insufficient intensity modulation in IMRT. In this report, I reviewed the uncertainties in treatment planning for prostate cancer patients with metallic implants, especially in dose calculations, and discussed remaining challenges.

Key Words: prostate cancer, IMRT, IGRT, metal marker, metal artifact

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 34-39, 2025]

脳卒中片麻痺患者に対する長下肢装具に関連する症例対象研究の国内外調査

渡辺卓馬^{1,2)}、松田雅弘²⁾¹⁾ タムス浦安病院²⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

脳卒中に伴う片麻痺患者では歩行障害を呈することがあり、歩行能力に応じて装具療法が実践される。特に運動麻痺が重症の患者には knee ankle foot orthosis (KAFO) を使用することがあるが、現行の脳卒中治療ガイドラインにおいて、KAFO に対する十分なエビデンスが示されていない。今回は脳卒中片麻痺患者に対する装具療法の中でも、KAFO を用いた症例対象研究に注目して国内外の論文についてレビューを実施した。脳卒中片麻痺患者を対象とした KAFO に関する国内外の報告は合計 215 編であり、そのうち KAFO を用いた症例対象研究は 26 編であった。使用時期としては回復期 20 編、急性期 4 編であった。単施設からの報告が 24 編と最多であり、一部多施設も確認できたが、回復期における多施設からの報告はなかった。研究の目的としては、KAFO とその他 (KAFO 非作成群や AFO 群など) を比較した研究が 11 編、カットダウンに関連する研究が 5 編であった。上記 16 編の研究では、評価項目として運動麻痺 (100%) や ADL (62%) が半数を超えて検討されていたが、その他の項目は部分的な選択に留まり、多角的に評価されている報告は少なかった。今後の展望として、統一された標準的な評価を選定した上での前向きコホート研究が望まれる。

キーワード：脳卒中、装具療法、長下肢装具、リハビリテーション

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 40-46頁, 2025年 (受付 2024.2.6.; 受理 2024.6.4.)

はじめに

脳卒中片麻痺患者における歩行障害は、国際生活機能分類における参加制約に直接影響を及ぼす重要な因子であり¹⁾、脳卒中片麻痺患者の歩行能力の再獲得は、理学療法士にとって患者の生活再建の重要な課題の一つである²⁾。脳卒中患者に対してリハビリテーションを実施するにあたり、特に歩行障害に関しては歩行能力を改善し、治療効果を得るために装具を用いることがある。

装具は制度・目的の違いによって、治療用装具または更生用装具に分けられる。治療用装具とは、疾病の病状固定前の治療過程において用いられる装具のことで、治療遂行上必要な範囲に限り、医師の処方のもとで一時的に使用される装具のことである³⁾。更生用装具とは、治療が終了し障害が固定した後、身体障害者の日常生活向上を目的とした補装具のことである⁴⁾。両制度や使用目的によって適切な装具が処方され、時期に応じて目的別の装具を用いて、生活を支援するための歩行練習を実施する。これが一般的な本邦での装具療法と制度である。脳卒中後の運動麻痺が重度の場

合は、治療用装具として knee ankle foot orthosis (KAFO) を用いる³⁾。そして、運動機能の回復にともなって KAFO から短下肢装具 (ankle foot orthosis: AFO) へと移行する。これは、特に下肢の麻痺の改善により、歩行時の膝折れや、立脚相の荷重時に膝関節が過剰に屈曲することで歩行が困難になることが減り、立位バランスが改善することで膝関節の固定が不要になることを示している。そのため、早期からの KAFO を用いた立位・歩行練習は、歩行獲得のために重要な練習とされている⁵⁾。重度の脳血管障害患者に KAFO を処方して運動療法を実施した場合、歩行能力や日常生活動作 (activities of daily living: ADL) 能力の改善、入院期間の短縮に効果があり⁶⁾、KAFO 未使用群より KAFO 使用群のほうが functional independence measure (FIM) 得点が高値であったことなどが報告⁷⁾ されている。

本邦では、一般社団法人日本脳卒中学会脳卒中治療ガイドライン委員会によって作成された『脳卒中治療ガイドライン2021 (改訂2023)』⁸⁾ が発行されている。装具療法について記載されたのは『脳卒中治療ガイドライン2009』⁹⁾ であり、内容は以下の2点である。

廃用性症候群を予防し、早期の ADL 向上と社会復

責任著者：松田雅弘

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2-1-1

E-mail: t.matsuda.ye@juntendo.ac.jp

帰を図るために、十分なリスク管理のもと、できるだけ発症後早期から積極的なリハビリテーションを行うことが強く求められる（グレードA）。その内容には、早期座位・立位、装具を用いた早期歩行訓練、摂食・嚥下訓練、セルフケア訓練などが含まれる（急性期リハビリテーション）。

脳卒中片麻痺で内反尖足がある患者に、歩行の改善のために短下肢装具を用いることが勧められる（グレードB）（歩行障害に対するリハビリテーション）。

また、KAFOについて追記されたのは『脳卒中治療ガイドライン2021』⁸⁾からであり、記載は以下の通りである。

亜急性期以降の障害に対するリハビリテーション診療のうち、歩行障害にて「脳卒中片麻痺で膝伸展筋筋力もしくは股関節周囲筋筋力が十分でない患者に対して、歩行機能を訓練するために長下肢装具を使用することは妥当である」（推奨度Bエビデンスレベル低）。

KAFOについては推奨度Bであり、KAFOを使用することは妥当とされているが、エビデンスレベルは低であり、良質な研究モデルによる研究がほとんどみられない。

脳卒中片麻痺患者に対する機能改善や能力改善のために、装具療法としてKAFOを用いることは珍しくないが、エビデンスレベルの高い研究が少なく、エビデンスは確立されていない。そのため、現在臨床で行われているKAFOを用いた運動療法の有効性を検証することは不可欠である。そこで本稿では、脳卒中片麻痺患者に対するKAFOに関連する症例対象研究の

国内外調査を実施した。

方法

1. データ収集

国内外での脳卒中片麻痺患者に対する装具療法の研究状況を把握するために、データベース検索を以下の方法で実施した。国内論文に関しては医中誌web版（以下、医中誌）、海外論文に関してはPubMedを使用した。医中誌の検索範囲および検索式は、（＃1：脳卒中 or 片麻痺 or 脳血管障害 or Stroke）AND（＃2：下肢装具 or 補装具 or 装具療法 or Brace or Orthosis）AND（＃3：長下肢装具 or KAFO or knee-ankle-foot orthoses or LLB or long leg brace）とした。PubMedの検索範囲および検索式は、（＃1：Stroke）AND（＃2：Orthotics）AND（＃3：KAFO or knee-ankle-foot orthoses or LLB or long leg brace）とした。各データベースの掲載開始年から最終検索日までの論文の検索を行った（最終検索日：2023年11月27日）。

2. レビュー対象となる論文の抽出

得られた文献情報をもとに、脳卒中片麻痺患者に対してKAFOを使用していた研究の中から、総説や専門家の意見、ケーススタディ、介入研究ではない装具・機器の開発、アンケート調査などを除外した。脳卒中片麻痺患者に対してKAFOを用いた症例対象研究を取り込み、KAFOの効果判定を統合、要約することを目的に、論文の著者、発表年、研究デザイン、研究参加施設、病期、参加者、調査項目、結果を抽出した（図1）。

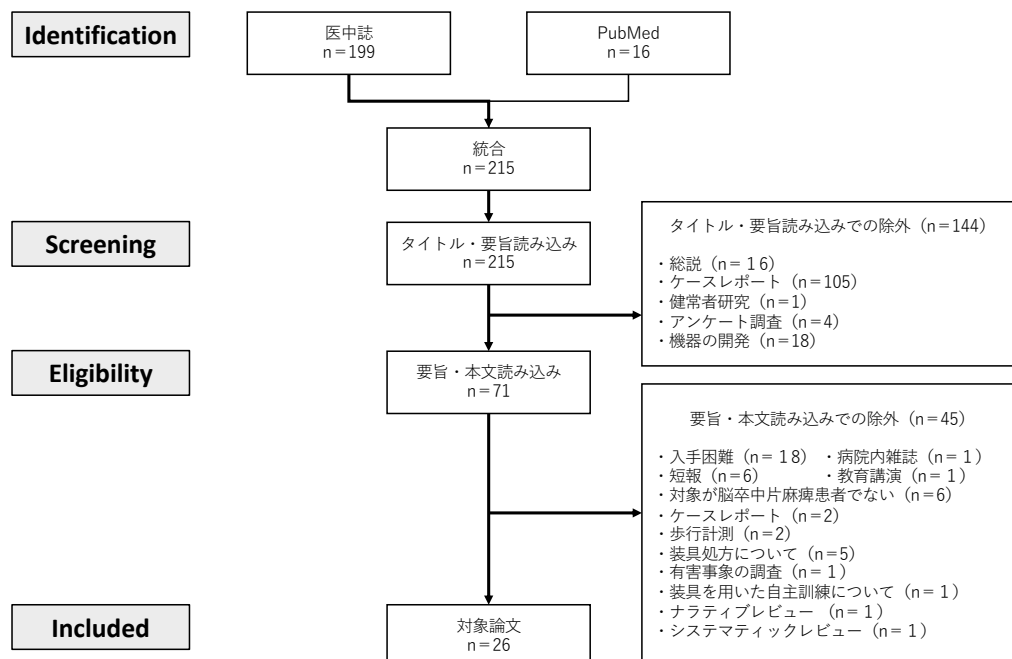


図1 レビュー対象論文選択のフローチャート

結 果

1. レビュー対象論文の選択の過程

データベース検索の結果、脳卒中片麻痺患者に対する装具療法、KAFOを含む論文は、国内199編、海外16編、合計215編であった。タイトルと要旨をもとに適格基準に合致した国内61編、海外10編の合計71編に対して、全文レビューを実施した。脳卒中片麻痺患者に対する装具療法、KAFOを使用した症例対象研究の効果判定を行っていた国内22編、海外4編、合計26編¹⁰⁻³⁵⁾を最終的なレビュー対象論文とした(表1)。

2. KAFOに関連した研究の特徴

1) 研究参加施設について

24/26 (92%) が単施設で行われており、2/26 (8%) が多施設で行われていた。複数の回復期病院で行われている研究は確認できなかった。

2) 脳卒中の病期別における KAFO に関する研究について

病期に関して、回復期が20/26 (76%) と最多であり、次いで急性期が4/26 (15%) であった。2/26 (8%) は急性期～回復期まで調査した研究であった。

3) 研究デザインについて

選択された26編のうち、過去起点コホート研究が22編^{10-15, 17, 19, 20, 22-33, 35)}と最も多く、他は前後比較研究2編^{16, 34)}、横断的研究1編¹⁸⁾、症例対照研究1編²¹⁾であった。

4) 研究の目的について

研究の目的は、KAFO群とその他(KAFO非作成群やAFO群など)を比較した研究が11編^{10, 11, 13, 16, 21, 23-26, 29, 35)}と最多であり、次いでカットダウンに関連する研究が5編^{12, 14, 18, 19, 28)}確認できた。その他はKAFOの長期使用¹⁵⁾に関連する研究、退院時の移動形態^{17, 22)}やBrace Conference (BC)の導入²⁷⁾、KAFO早期作成³¹⁾に関連する研究であった。

5) 研究で用いられている身体機能評価について

身体機能の総合評価の指標としては、Japan Stroke Scale (JSS)、Stroke Impairment Assessment Set (SIAS)、意識障害の指標としては、Japan Coma Scale (JCS)、Glasgow Coma Scale (GCS)を用いた研究が見出された。ADLの指標としては、FIM、modified Rankin Scale (mRS)、Barthel Index (BI)を用いた研究が見出された。運動麻痺の指標としては、Brunnstrom Recovery Stage

(BRS)、Fugl Meyer Assessment (FMA)、12段階片麻痺グレード、バランス機能の指標としては、Functional Balance Scale (FBS)、Functional Reach (FR)、プッシャー症状の指標としては、Scale for Contraversive Pushing (SCP)を用いた研究が見出された。認知機能の指標としては、Mini Mental State Examination (MMSE)を用いた研究が見出された。また、筋緊張ではModified Ashworth Scale (MAS)、体幹機能ではTrunk Control Test (TCT)、歩行状況ではFunctional Ambulation Categories (FAC)、Gait Assessment and Intervention Tool (GAIT)がそれぞれ指標として用いられていた。その他の指標としては、体格指数であるBody Mass Index (BMI)が使用されていた。

研究の目的別に見た場合、KAFO群とその他を比較した研究、およびKAFOからAFOに移行するためのカットダウンに関連した研究16編で用いられた評価指標は、運動麻痺の指標16件、ADLの指標10件、感覚障害の指標6件、歩行状況の指標5件、Unilateral Spatial Neglect (USN) 4件、バランス機能の指標4件、Weight Bearing Rate (WBR)、意識障害、総合評価の指標が各2件、筋緊張、高次脳機能障害、認知機能、プッシャー症状の指標が各1件であった。

考 察

KAFOに関する国内外の論文を網羅的にレビューした結果、国内199編、海外16編と、国際的に本邦の研究報告が多かった。症例対照研究に絞った最終的なレビュー対象論文も、国内22編、海外4編と国内外に偏りがあった。国内外で差が生じた理由として、保険制度と文化の違いがあることが考えられる。本邦では脳卒中患者に対して装具療法が積極的に行われ、装具に対する保険制度も整えられている³⁾。国民皆保険制度であり、生活保護を受給している低所得者であっても手続きを行うことで自身の装具を作成することが可能である⁴⁾。対して、例えばアメリカでは、国民一般を対象とする公的医療保険(社会保険)は存在しないために負担が大きい。それによって民間医療保険にも加入できない無保険者の存在が社会問題となっている³⁶⁾。また、国民の肥満率が高く³⁷⁾、KAFOを用いた介助歩行はセラピストの負担が大きいと、免荷式トレッドミルのようなセラピストの負担の少ない治療が選択されやすい傾向にあるのではないかと考えられる。このような制度的問題、セラピストの身体的負担は、装具に関する研究が少なくなる要因でないかと考えられる。装具は脳卒中後の運動麻痺の代償的な動きを与え、痙縮の抑制、立位・歩行練習の促進などの様々な効果

表 1 KAFO を用いた症例対象研究の一覧

| 著者、発行年 | 参加者 | 参加施設 | 病期 | 研究デザイン | 比較対象 | 調査項目 | 結果 |
|------------------------------------|-------|------|------------|--------------|--|---|---|
| Kakurai 他 1996 ¹⁰⁾ | N=28 | 単施設 | — | 過去起点 コホート | KAFO vs AFO | ・片麻痺の重症度 ・ 装具の装着時間 ・ BI ・ 機能回復段階 ・ 合併症の有無 | AFOと比較して、合併症の有無の項目以外に有意差はなく 主要合併症の発生率が有意差ありと歩行能力に影響を与えていた |
| 杉本 他 1997 ¹¹⁾ | N=53 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO vs AFO | ・ BRS ・ 非麻痺側筋力 ・ 座位平衡機能 | KAFO vs AFOにて運動麻痺の重症度の割合に有意差あり 重症例：61% > 13% 中等度：38% < 86% 非麻痺側筋力：0.76 < 1.01Nm/kg 動的座位能力：19.3 < 27.2mm |
| Yamanaka 他 2004 ¹²⁾ | N=12 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 早期cut down群(<14日) vs 遅延cut down群(15日≧) | ・ 麻痺側優位屈筋シナジーパターン ・ FIM | 統計的有意差の提示なし |
| 笹原 他 2010 ¹³⁾ | N=67 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO作製時 vs AFO変更時 vs 未変更 | ・ 座位バランス能力 ・ BRS ・ 表在、深部感覚 ・ 下肢挙上検査 ・ 下肢の支持性 | KAFO vs AFO変更時に以下の項目に有意差あり 座位バランス能力、BRS、下肢挙上、下肢の支持性 |
| 皆川 他 2011 ¹⁴⁾ | N=27 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 入院時 vs 装具完成時 vs cut down時 vs cut down 2週後 vs 退院時 | ・ BRS ・ 深部感覚障害 ・ MMSE ・ FR ・ 6MD ・ 膝伸展筋力 | ・ 下肢深部感覚障害およびMMSE：有意差なし ・ 両側膝伸展筋力および6MD、FRは各時期において有意差あり |
| 村山 他 2014 ¹⁵⁾ | N=139 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO使用 30日以下vs 31日以上 | ・ JCS ・ USN ・ 下肢深部感覚 ・ FBS ・ FIM ・ 下肢12段階片麻痺グレード | KAFOを31日以上使用する場合は以下の要因があり FIM移乗、高齢、バランス能力低下 |
| 山本 他 2015 ¹⁶⁾ | N=14 | 単施設 | 急性期 | 前後比較 | KAFO vs AFO | ・ BRS ・ FMA ・ 下肢の最大荷重量 ・ 歩行(速度、歩幅、歩行率) | AFOと比較してKAFOで以下の項目に有意な改善あり 麻痺側最大荷重量、歩行速度 |
| 平野 他 2015 ¹⁷⁾ | N=49 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 退院時歩行可能群 vs 歩行不能群 | ・ JSS ・ MMSE ・ FAC ・ 失語症、失行症、失認症の有無 ・ 非麻痺側下肢筋力 ・ TCT | 重度片麻痺患者の退院時歩行予測は以下の項目が挙げられる 年齢、体幹機能、非麻痺側筋力 |
| 今岡 他 2016 ¹⁸⁾ | N=58 | 単施設 | 回復期 | 横断的 | A群(≦50日)vsB群(51-70日) vs C群(71-90日)vsD群(91日≧) | ・ BRS ・ FBS ・ NTP ・ FIM | 退院時 FBS、退院時 FIM ・ C群 > A, B群 > D群 > A, B, C群 |
| 田中 他 2017 ¹⁹⁾ | N=43 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 早期 cut down 群 vs 遅延 cut down 群 | ・ 感覚障害 ・ BRS ・ USN ・ FIM | cut down移行期間と関連を認めた項目は以下4項目 USN重症度、下肢BRS、mFIM、cFIM |
| 岩瀬 他 2018 ²⁰⁾ | N=46 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO導入時vs退院時 | ・ SIAS ・ FIM | KAFO導入までの日数は以下の項目で有意な相関あり SIAS 体幹機能、FIM 排泄、移乗、移動 |
| 高島 他 2018 ²¹⁾ | N=8 | 単施設 | 急性期 | 症例対照 | KAFO作成群 vs 非作成群 | ・ BRS ・ 10 m 歩行(速度、歩幅) ・ FIM ・ リハ実施単位数 | KAFO 作成群は非作成群と比較して有意な改善あり FIM 歩行(中間評価)、FIM 階段(退院時) |
| 川野 他 2018 ²²⁾ | N=78 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 歩行自立群(I) vs 車いす自立群(W) vs 移動介助群(A) | ・ BRS ・ FIM (利得) | 退院時 mFIM：I群>W、A群 ・ W群 > A群 退院時 cFIM：A群>I群 退院時下肢：BRS；I群 > A群 |
| Ota 他 2018 ²³⁾ | N=381 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO vs AFO | ・ BRS ・ FIM | AFO群がKAFO群と比較して以下の項目で有意な改善あり mFIM、cFIM、FIM合計 |
| Ota 他 2018 ²⁴⁾ | N=442 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO vs AFO | ・ BRS ・ FIM | KAFOが重度が多く、AFOは中等症が多い KAFO < AFO：全てのFIMに有意差あり FIM移乗は装具選定に関連を認めた |
| Ota 他 2019 ²⁵⁾ | N=29 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFOあり vs なし (a)開眼開脚、(b)閉眼開脚、 (c)開眼閉脚、(d)タンデム立位 | ・ BRS ・ SIAS | KAFOありはなしと比較して以下の項目で有意な改善あり (a)開眼開脚 (b)閉眼開脚 (c)開眼閉脚 (d)タンデム立位 |
| 木村 他 2020 ²⁶⁾ | N=47 | 多施設 | 急性期 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO使用群 vs 非使用群 | ・ 高次脳機能障害 ・ USN ・ 感覚障害 ・ FIM ・ BRS | KAFO 使用群は非使用群と比較して以下の項目に有意な改善あり 回復期退院時 FIM 歩行、階段 |
| 関 他 2020 ²⁷⁾ | N=36 | 単施設 | 急性期 | 過去起点 コホート | BC導入前vsBC導入後 ①KAFO使用 ②AFO+KAFO使用 ③AFO使用 ④無装具 | ・ BMI ・ GCS ・ FAC ・ BRS ・ ROM ・ MAS ・ SIAS ・ SCP ・ 歩行練習距離 ・ 脳画像所見 | BC導入することで、精度が向上した 導入前62.5%→導入後85.7% |
| 岸 他 2021 ²⁸⁾ | N=38 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO作製時 vs cut down時 vs 退院時 | ・ FMA-LE ・ 感覚障害 ・ USN ・ FIM | cut down移行期間には以下の項目が関係を認めた FMA-LE、mFIM、cFIM、USNの有無 |
| 栗田 他 2021 ²⁹⁾ | N=18 | 多施設 | 急性期 回復期 | 過去起点 コホート | KAFO群 vs 非KAFO群 | ・ BRS ・ JCS ・ 感覚障害 ・ USN ・ FIM | KAFO 群は非KAFO群と比較して以下の項目に有意な改善あり 退院時 FIM 歩行、階段、装具脱卸割合 |
| 阿部 他 2021 ³⁰⁾ | N=34 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | ①装具あり群vs 装具なし群 ②KAFOvs MAFOvs PAFO | ・ 画像所見 ・ FAC ・ SIAS ・ FIM | ・ 装具処方での在院日数、歩行能力、運動機能、ADLで有意差あり ・ 出血量と短径は KAFO-PAFO 群間、長径は KAFO-PAFO 群、 MAFO-PAFO 群間で有意差あり |
| Sato 他 2022 ³¹⁾ | N=112 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 早期作成群(<発症 48日) vs 遅延作成群(発症 49日≧) | ・ BRS ・ FIM (利得) ・ 1日の介入時間 | 早期作成群は遅延作成群と比較して以下の項目で有意な改善あり FIM 運動、認知、合計 |
| Ota 他 2022 ³²⁾ | N=31 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | 1) KAFOを装着しないとFR不可 vs 2) KAFOなしでもFR可 | ・ BRS ・ SIAS ・ FBS ・ FR | 1) KAFO装着にてFRできる割合は増加 2) KAFO装着しないより、装着した方が、FR可能 |
| 上野 他 2022 ³³⁾ | N=200 | 単施設 | 回復期 | 過去起点 コホート | — | ・ BMI ・ FIM ・ JCS ・ BRS ・ SCP ・ USN | KAFOからAFOにcut downに移行する因子は以下の項目 年齢、下肢BRS、SCP点数、mFIM項目点数 |
| 宮永 他 2022 ³⁴⁾ | N=39 | 単施設 | 回復期 | 前後比較 | WW群vs KAFO群 | ・ 歩行FIM5点に達するまでに要した日数 ・ 介助セラピストの修正Borg Scale | ・ 歩行FIM5点に達するまでの日数で有意差あり ・ WW群の方が介助セラピストの修正Borg Scaleで有意差あり |
| Tsujimoto 他 2023 ³⁵⁾ | N=139 | 単施設 | 急性期 | 過去起点 コホート | KAFO vs 非KAFO | ・ BMI ・ FAC ・ BRS ・ SCP ・ ROM ・ GAIT ・ GCS ・ MAS ・ SIAS | KAFO の継続的な必要性の予測因子 BRS、表在感覚、入院時BMI、患側膝伸展の A-ROM |

6MD : six-minute walk test, AFO : Ankle Foot Orthosis, APS : Adjustable posterior strut, BBS : Berg balance scale, BI : Barthel Index, BMI : Body Mass Index, BRS : Brunnstrom Recovery Stage, FAC : Functional Ambulation Categories, FBS : Functional Balance Scale, FIM : Functional Independence Measure, FMA : Fugl Meyer Assessment, FR : Functional Reach, GAIT : Gait Assessment and Intervention Tool, GCS : Glasgow Coma Scale, JCS : Japan Coma Scale, JSS : Japan Stroke Scale, KAFO : Knee Ankle Foot Orthosis, KAFO : Modified Ashworth Scale, MAS : Mini Mental State Examination, mRS : modified Rankin Scale, NTP : Neck-Trunk-PelvisMotorFunctiontest, ROM : Range Of Motion, SCP : Scale for Contraversive Pushing, SIAS : Stroke Impairment Assessment Set, TCT : Trunk Control Test, USN : Unilateral Spatial Neglect, WW : ウェルウォークWW-1000、— : 記載なし

があることが知られている⁵⁻⁷⁾。しかし、装具の活用は、社会的な背景を含めて、研究の増減に関わるものと考えられる。本邦の論文の多くは単施設を対象とした研究報告であり、多施設で行われた報告は2編(8%)であった。多施設における研究も、先行病院の急性期から後継病院の回復期での前後連携の研究であり、複数の回復期病院で治療方針や装具療法に対する価値観を共有することは難しく、研究が行われなかったのではないかと考える。

研究デザインは後ろ向き研究とコホート研究が最も多く、最もエビデンスレベルの高い比較対照試験である randomized controlled trial (RCT) は皆無であった。それが、種々のガイドラインにおける脳卒中後の患者に対する下肢装具の推奨度の低さにつながっていると考えられる。国内の研究が多く、通常のリハビリテーション医療で装具が着用されており、装具を着用しない群を設定することが困難なことから、RCT 研究がないと考えられる。

研究の目的では、KAFO とその他を比較する研究やカットダウンに関連する研究が16編と多くあった。下肢装具製作の判断基準は複数の報告^{38,39)} でみられるが、十分なコンセンサスを得られたものではなく、判断基準が確立されているとは言い難い。そのためカットダウンの研究の多さは、曖昧な判断基準を明確にしようとする研究への関心の高さを示しているのではないかと考える。また、上記の研究で使用されていた評価項目として、運動麻痺(100%)やADL(62%)は半数を超えて比較・検討されていたが、そのほかの項目、例えば感覚障害、バランス機能などは部分的な選択に留まっており、多角的な身体機能の評価はなされていない。しかし、運動麻痺などの身体機能の面だけでなく、複合的な評価によって、装具療法が判断される必要があることが示唆されており^{38,39)}、総合的・多角的な共通した評価項目を用いた上で装具選択を行う必要があると考えられる。

装具療法は古くから臨床的に活用されているが、コントロールスタディが難しく、また盲検化も難しいとされている⁴⁰⁾。回復期病院は全国に多く、脳卒中のリハビリテーションに従事している理学療法士は多い。多施設での研究を実施するために、統一された標準的な評価を調整して、多施設間共同研究という形で前向きコホート研究を行うことが望まれる。しかし、装具の使用に関しては、地域や施設間で差があることが指摘されており⁴¹⁾、施設の選考にあたって注意が必要となる。また、日本理学療法士学会と日本支援工学理学療法学会の報告によると⁴²⁾、装具療法や装具の活用に

についての知識量は、理学療法士や施設によって差が大きいため、国内外で標準となる指標を選定することが、本邦の回復期病院における標準的な装具療法の確立につながると考えられる。

まとめ

本研究結果によると、脳卒中片麻痺患者の装具療法に関する報告は国内で多かったが、多施設での検討が少なかった。KAFO と AFO の比較、KAFO からのカットダウンに関する報告が多く、装具の適応基準や運動療法の違い、カットダウンの時期に関する報告であった。しかし、報告で使用されている身体機能の評価は一定しておらず、それが原因で多施設共同研究に発展していないことが考えられる。今後、装具療法の標準的な評価をもとにした多施設での研究が望まれる。

引用文献

- 1) 石川朗, 大畑光司編: 神経障害理学療法学 I. 東京, 中山書店. 2011: 113~122.
- 2) Selves C, Stoquart G, Lejeune, T: Gait rehabilitation after stroke: Review of the evidence of predictors, clinical outcomes and timing for interventions. Acta Neurol Belg. 2020; 120: 783-790.
- 3) Yamanaka T, Akashi K, Ishii M: Stroke rehabilitation and long leg brace. Top Stroke Rehabil. 2004; 11: 6-8.
- 4) テクノエイド協会. 補装具費支給事務ガイドブック(平成30年度告示改正対応版). 2018.
- 5) 渡邊英夫: 脳血管障害による片麻痺への下肢装具による実用的アプローチ. The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine. 2019; 56: 260~266.
- 6) 石神重信, 鈴木英二, 大竹朗, 佐竹将宏: 脳卒中早期リハビリテーションにおける長下肢装具の使用とその効果の考察. 日本義肢装具学会誌, 1986; 2: 41~47.
- 7) 小口健, 田中良実, 北本健太郎, 神谷克二, 中本佳代子, 田島文博, 他: 重度脳卒中片麻痺患者における長下肢装具を使用した歩行訓練の効果の検討. リハビリテーション科診療近畿地方会誌. 2012; 12: 27~30.
- 8) 日本脳卒中学会脳卒中ガイドライン委員会: 脳卒中治療ガイドライン2021 [改訂2023]. 東京, 協和企画. 2023: 1~332.
- 9) 脳卒中合同ガイドライン委員会: 脳卒中治療ガイドライン2009. <http://www.jsts.gr.jp/jss08.html>, 2024年1月30日.
- 10) Kakurai, S. Akai, M: Clinical experiences with a

- convertible thermoplastic knee-ankle-foot orthosis for post-stroke hemiplegic patients. *Prosthet Orthot Int.* 1996; 20: 191-194.
- 11) 杉本諭, 網本和, 青木詩子, 青木治人, 松下数彦, 田代真奈美: 脳血管障害患者に対する下肢装具処方決定要因の検討. *理学療法学.* 1997; 24: 384~388.
 - 12) Yamanaka, T. Akashi, K. Ishii, M: Stroke rehabilitation and long leg brace. *Top Stroke Rehabil.* 2004; 11: 6-8.
 - 13) 笹原順, 原田直樹, 西本加奈, 本多歩美, 志谷佳久, 宮本奈央, 他: 脳卒中片麻痺患者の下肢装具に関する評価のポイントについて. *長崎理学療法.* 2010; 10: 14~20.
 - 14) 皆川知, 西尾大祐, 平野恵健, 前島伸一郎, 大沢愛子, 武田浩二, 他: 短期集中的な治療により在宅復帰を成し得た重症脳卒中患者のリハビリテーション. *埼玉県包括的リハビリテーション研究会雑誌.* 2010; 10: 11~15.
 - 15) 村山稔, 加辺憲人: 脳卒中片麻痺患者の長下肢装具を使用する訓練期間の予測. *日本義肢装具学会誌.* 2014; 30: 91~95.
 - 16) 山本征孝, 藤本康浩, 森義統, 椿野稔: 急性期脳卒中患者のカットダウン可能な時期における装具療法の効果短下肢装具と長下肢装具を比較した即時効果の検討. *日本義肢装具学会誌.* 2015; 31: 248~254.
 - 17) 平野恵, 西尾大祐, 池田誠, 新田收, 宮崎泰広, 皆川知也, 他: 脳卒中重度片麻痺患者の歩行可否に関与する因子の検討長下肢装具を処方された患者を対象に. *日本義肢装具学会誌.* 2015; 31: 115~119.
 - 18) 今岡信介, 佐藤浩二: 発症から長下肢装具作製までの期間が身体機能および ADL 能力に与える影響. *日本義肢装具学会誌.* 2016; 32: 270~273.
 - 19) 田中周, 武藤友和, 吉田真一, 鈴木活水: 脳卒中片麻痺患者における長下肢装具処方例でのカットダウン移行期間に影響を及ぼす入院時因子の検討. *理学療法科学.* 2017; 32: 757~761.
 - 20) 岩瀬弘明, 東智里, 村上貴士, 中井良哉, 窓場勝之, 村田伸: 脳血管障害患者に対する長下肢装具導入までの日数と麻痺側運動機能および FIM 変化率との関係. *ヘルスプロモーション理学療法研究.* 2018; 7: 185~190.
 - 21) 高島悠次, 阿部浩明: 重度片麻痺例における急性期からの長下肢装具作製が歩行および階段昇降の予後におよぼす影響. *日本義肢装具学会誌.* 2018; 34: 52~59.
 - 22) 川野義晴, 小林浩介, 平山秀和, 矢谷悠貴: 退院時移動能力の異なる回復期脳卒中片麻痺患者における特性の相違に関する検討長下肢装具を作製した患者を対象として. *理学療法の臨床と研究.* 2018; 27: 31~34.
 - 23) Ota, T. Hashidate, H. Shimizu, N. Saito, A: Difference in independent mobility improvement from admission to discharge between subacute stroke patients using knee-ankle-foot and those using ankle-foot orthoses. *J Phys Ther Sci.* 2018; 30: 1003-1008.
 - 24) Ota, T. Hashidate, H. Shimizu, N. Saito, A: Differences in activities of daily living between people with subacute stroke who received knee-ankle-foot and ankle-foot orthoses at admission. *J Phys Ther Sci.* 2018; 30: 1245-1250.
 - 25) Ota, T. Hashidate, H. Shimizu, N. Yatsunami, M: Early effects of a knee-ankle-foot orthosis on static standing balance in people with subacute stroke. *J Phys Ther Sci.* 2019; 31: 127-131.
 - 26) 木村友亮, 馬場浩充, 大洲人士: 急性期脳卒中患者における長下肢装具を用いた歩行練習が身体機能と移動能力の長期予後に与える影響. *理学療法ジャーナル.* 2020; 54: 969~975.
 - 27) 関崇志, 阿部浩明, 大鹿糠徹: 脳卒中急性期から適切な長下肢装具作製を進めるための装具カンファレンスの導入後の変化. *総合リハビリテーション.* 2020; 48: 1191~1199.
 - 28) 岸広樹, 渡辺光司: 脳卒中患者における長下肢装具から短下肢装具へのカットダウン移行期間に関わる因子の検討回復期リハビリテーション病棟入棟時の因子を用いて. *東北理学療法学.* 2021; 33: 25~31.
 - 29) 栗田慎也, 高橋忠志: 急性期病院での長下肢装具の作製が脳卒中片麻痺患者の回復期リハビリテーション病棟退院時の歩行能力に与える効果 多施設の回復期リハビリテーション病棟のデータより. *理学療法科学.* 2021; 36: 41~45.
 - 30) 阿部紀之, 細矢貴宏, 松田雅弘: 脳出血回復期における装具処方の必要性和種類の判断に有用な指標の検討. *日本義肢装具学会誌.* 2021; 37: 137~142.
 - 31) Sato, K. Inoue, T. Maeda, K. Shimizu, A. Murotani, K. Ueshima, J. et al: Early Wearing of Knee-Ankle-Foot Orthosis Improves Functional Prognosis in Patients after Stroke. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2022; 31:

- 106261.
- 32) Ota, T. Hashidate, H. Shimizu, N. Yatsunami, M: The Immediate Effects of a Knee-Ankle-Foot Orthosis on Standing Reach in Individuals with Subacute Stroke. *Asian Journal of Occupational Therapy*. 2022: 18: 47-54.
- 33) 上野奨太, 高屋成利, 増田知子, 吉尾雅春: 脳卒中患者の歩行練習において長下肢装具から短下肢装具への移行に要する日数に関連する因子. *理学療法学*. 2022: 49: 361~366.
- 34) 宮永陽亮, 平川裕紀, 河野誉, 群敏宏, 河野寛一: 当院における歩行練習支援ロボット「ウェルウォーク WW-1000」導入後の効果検証. *臨床と理学療法*. 2022: 8: 3~8.
- 35) Tsujimoto, N. Abe, H. Okanuka, T. Seki, T. Fujimura, M: Predictors indicating the continuous need for a knee-ankle-foot orthosis in stroke patients at 1 month after onset. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2023: 32: 107425.
- 36) 中浜隆. アメリカの医療扶助改革と民間医療保険. *社会科学研究*. 2008: 59: 7~42.
- 37) 中出佳操: アメリカと日本の肥満の現状と対策. *人間福祉研究*. 2007: 10: 121~131.
- 38) 石神重信, 鈴木英二, 大竹朗, 佐竹将宏: 脳卒中早期リハビリテーションにおける長下肢装具の使用とその効果の考察. *日本義肢装具会誌*. 1986: 2: 41~47.
- 39) 森中義広, 日野工, 酒井潤: 脳卒中片麻痺の病態とC.C. AD継手付き下肢装具療法. *日本義肢装具会誌*. 2007: 23: 131~141.
- 40) 藤原俊之: 脳卒中ガイドラインと装具のかかわり. *日本義肢装具学会誌*. 2015: 31: 149~151.
- 41) 藤崎拓憲, 山城勉, 平山史朗, 島袋公史, 渡辺英夫: 脳卒中片麻痺に処方されている短下肢装具の機能についての検討—全国アンケート調査より—. *日本義肢装具学会誌*. 2013: 29: 51~56.
- 42) 日本理学療法士学会, 日本支援工理学療法学会. 福祉用具・義肢・装具支援に関する啓発と実態調査～装具編～. http://www.japanpt.or.jp/upload/branch/jptsat/obj/files/sougu_h29_04.pdf, 2024年1月30日.

Abstract

A national and international survey of case-control studies related to long-limb orthoses for hemiplegic stroke patients

Takuma Watanabe^{1,2)}, Tadamitsu Matsuda²⁾

¹⁾ Tums Urayasu Hospital

²⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Patients with stroke-induced hemiplegia can present with gait disturbance, and orthotic therapy is practiced according to their ability to walk. Knee ankle foot orthosis (KAFO) is sometimes used, especially for patients with severe motor paralysis, but current stroke treatment guidelines do not provide sufficient evidence for KAFO. In the present study, we reviewed articles both in Japan and overseas, focusing on case studies using KAFO among orthotic therapies for stroke hemiplegia patients. A total of 215 domestic and international reports on KAFOs were reviewed for hemiplegic stroke patients, including 26 case-control studies using KAFOs. The use period was 20 studies in the recovery period and 4 studies in the acute period. The largest number of reports came from single institutions (24), and some were from multiple institutions, but none were from multiple institutions during the recovery period. Eleven studies compared KAFOs to others (eg, non-KAFO and AFO groups), and five studies were related to cut-offs. More than half of the 16 studies used the evaluation elements mentioned above, such as motor paralysis (100%) and ADL (62%), but the other elements were only partially selected, and there were few reports of multifaceted evaluations. Prospective cohort studies are desirable to select a unified, standardized assessment as a future prospect.

Key Words: stroke, orthotic therapy, long-limb orthosis, rehabilitation

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 00-00, 2025]

頭頸部放射線治療における患者位置の不確かさによる線量分布への影響

渡邊 亮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

頭頸部癌の根治的治療を目的として、放射線治療は手術療法と並んで重要な役割を果たす。頭頸部領域では解剖学的な特徴から intensity-modulated radiation therapy (IMRT) が標準的に用いられるが、その原体性の高さから不確かさによる影響を大きく受ける。この不確かさを軽減するために、患者の位置決めと固定は高精度であることが求められるが、その目的は標的の位置合わせにあり、標的外の解剖学的構造に対する不確かさは無視されることがある。本稿では、頭頸部治療計画において考慮すべき標的外の解剖学的構造の不確かさとして、肩部の位置誤差と治療期間中の体重減少が線量分布に与える影響について、現行の対策の問題点をレビューするとともに、治療計画における不確かさに対する新しい対策として、ロバスト最適化について解説する。

キーワード：頭頸部、ロバスト最適化、強度変調放射線治療、強度変調陽子線治療、肩部位置誤差

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 47-52頁, 2025年 (受付 2024.1.31.; 受理 2024.5.8.)

1. 頭頸部癌に対する放射線治療

全国放射線治療施設の2019年定期構造調査報告 (第1報) によると、本邦において頭頸部腫瘍に対する放射線治療適応患者は37,064人とされ、放射線治療新規適応患者全体の8.5%に及ぶ¹⁾。頭頸部扁平上皮癌 (head and neck squamous cell carcinoma: HNSCC) に対する根治的放射線治療は、その機能温存、形態温存の利点から外科療法と並んで大きな役割を担う²⁾。進行癌や放射線抵抗性腫瘍には手術が適応されるが、術後照射として放射線治療が用いられる²⁾。近年では、強度変調放射線治療 (intensity modulated radiotherapy: IMRT) を代表とする技術的な進歩により、放射線晩期毒性を軽減するだけでなく、3D-CRT (3dimensional-conformal radiation therapy) などの従来法と比較して腫瘍への線量を増加することが可能となるため、高い腫瘍制御率を得ることができる^{3,4)}。さらに、VMAT (volumetric modulated arc therapy) 技術の開発により、ガントリ角度、MLC (multi leaf collimator)、線量率を連続的に変調させながら照射を行うことが可能となり、通常IMRTと比較して治療時間、MU (monitor unit) 値の大幅な短縮を実現した⁵⁾。このような強度変調技術によってOAR (organ at risk) への線量寄与を抑え、標的の形状に一致した線量分布の作成が可能となった。

特に頭頸部領域では、脊髄、脳幹、脳の視路、腕神経叢、唾液腺、嚥下関連構造を含む多数の重要な構造を多く含むため、現在ではIMRT/VMATが標準的に用いられている。871人の上咽、中咽頭、下咽頭、喉頭癌患者を登録したメタアナリシスで、Martaらは、2Dまたは3D-CRTで治療した患者と比較して、IMRTで治療した患者の局所制御率が優れていることを実証した⁴⁾。さらに、IMRTで有意な口腔乾燥症の減少が示されている。しかし、小照射野により作成された複雑な形状を呈する線量分布は、患者位置の不確かさによる影響を大きく受け、わずかな位置の不確かさにより、大きな線量誤差につながる危険性が高くなる⁶⁾。また、頭頸部領域では放射線治療期間中の体重変化により、腫瘍形状に変化が生じる可能性があり、これも線量精度に大きな影響を与える。

本稿では、頭頸部癌に対する放射線治療計画に関して、患者位置の不確かさが生じた場合、それが線量分布に与える影響とその対策についてレビューする。

2. 頭頸部放射線治療計画における不確かさの影響

放射線治療は、健康な組織における副作用のリスクを最小限に抑えながら、腫瘍に根治的な線量の放射線を照射することを目的としている。そのため、患者の

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

位置決めと固定は高い精度で実施されることが求められる。しかし、その目的は標的の位置合わせにあり、照射野中心を定義するアイソセンタ (isocenter) から解剖学的位置が離れた構造に対しての位置精度については、優先度が下がることがある。アイソセンタはガントリ、コリメータ、カウチ各回転軸の交点であり、通常は標的中心に定義される。アイソセンタを標的中心に配置することで、標的内線量分布に対する位置不確かさの影響を低減することができる。また、多くの場合はこの点に線量評価点を配置するため、線量投与の適合性向上も期待できる。

頭頸部癌の90%程度は扁平上皮癌であり、ほとんどは頸部リンパ節へ系統的に進展することにより、頸部下部に予防的な臨床標的体積 (clinical target volume: CTV) の設定が必要となる。標的へ十分な線量を投与し、周囲の正常組織への線量を可能な限り抑えるには、入射ビームが患者の肩部を直接通過するものもありうることとなる。そのため、頭頸部癌 IMRT を施行するにあたり、患者肩部の位置精度が重要となる。例えば、患者の肩部が計画位置に対して上方にシフトすると、肩部が放射線ビームを遮り、腫瘍への線量不足を引き起こす可能性がある。対して、下方へのシフトでは減弱の低下により、重要な構造への線量増加の可能性が生じる。多くの場合、患者を固定するために頭部と肩部を同時に覆う様々な固定具が用いられるが、可動域の広い肩の動きを制御するには限界があり、Neubauer らの研究⁷⁾では、シェル、ヘッドレストなどの固定装置を用いて固定を行ったとしても、肩部の位置誤差は左右、前後、上下方向の各方向の平均シフトが2~6 mm、最大20 mm 発生することが示されている。さらに、この肩部の位置誤差により target coverage loss (治療計画で設定された放射線照射範囲が、標的領域を十分にカバーできていない状態) が発生する可能性がある。また、target coverage loss は95%線量域で最大40 cm³発生することが示されている。さらに、下方シフトにより腕神経叢への線量増加が発生することが示されており、肩部が下方に15 mm 移動することで、0.1 cm³に対する線量が治療期間中に最大410 cGy 上昇する可能性がある。そのため、肩部を放射線が通過するような症例では、一般的に治療計画上で下記のような対策が必要となる。

1) 側方向からの照射の制限

肩部を回避するために、側方対向2門を前方に10度程度振った斜め方向のビームを組み合わせる照射方法である。IMRT/VMAT においても同様に肩部を避けた

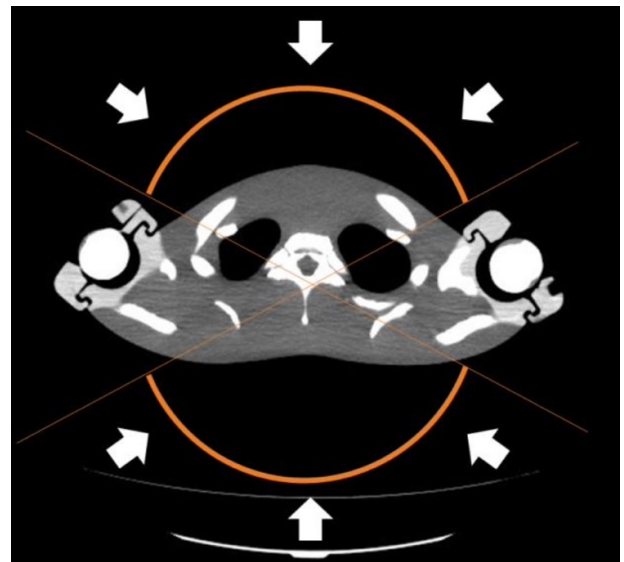


図1 頭頸部領域に対する側方向からの照射を制限した IMRT/VMAT (→: ビーム方向)

ビームが選択される (図1)。標的内の線量均一性を保つため、補償フィルターやウェッジフィルタ、さらには field-in-field 法を用いることで均一化を図る必要がある⁸⁾。

2) 肩部位置誤差による影響の生じる部位のみ3D-CRT によって照射

原発病変と上中頸部は左右対向2門照射で行い、下頸部から鎖骨上窩は前方から1門照射で行う。この時に接合部に同一のアイソセンタを置き、照射野の重なりを最小化する手法が用いられる⁸⁾。Casey らは、鎖骨上領域のリンパ節領域への治療が必要な6人の頭頸部腫瘍患者に対して治療計画を行った⁹⁾。この研究では、ビーム方向を制限しない Full-VMAT 法と field を頭部方向2つに分割し、上中頸部に対して VMAT、下頸部に対して前方から1門 (3D-CRT) 追加した Half-Beam VMAT 法 (図2) で比較を行っており、その結果、ほとんどの場合、肩部の位置誤差による Dmean と D95の両方の標準偏差は、Full-VMAT 法よりも Half-Beam VMAT 法の方が小さくなること示された⁹⁾。

上記のようなビーム方向を制限した照射法では、線量分布の最適化が不十分であり、腫瘍への線量の均一性および OAR の線量不適合の可能性が示唆される。また、上記の2) の手法では、set-up error により、つなぎ目位置で過大線量および過少線量が発生する可能性がある。この対策として、つなぎ位置を20 Gy 程度で変更することが推奨されている⁸⁾。

さらに、頭頸部治療において問題となるのが、口腔咽頭粘膜の炎症、嚥下痛、口内乾燥によって、栄養と

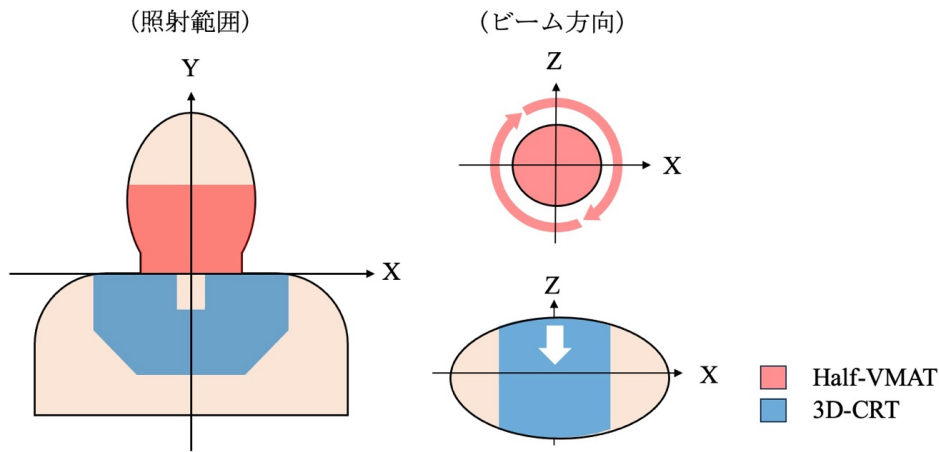


図2 Half-VMAT 法における照射範囲およびビーム方向（赤色：肩部位置誤差の影響を受ける部分を Half-Beam VMAT 法で照射、青色：肩部位置誤差の影響を受けない領域を前方1門 3D-CRT で照射）

水分が不足することによる体重の減少である。このような有害事象による体型の変化は set-up 精度の低下を引き起こす。特に IMRT では線量勾配が急峻であり、この影響を大きく受ける。この対策として、近年、次世代の放射線治療技術として適応放射線治療 (adaptive radiation therapy: ART) の適応が考慮される。MR 画像誘導即時適応ガイドライン¹⁰⁾において、ART は「放射線治療期間中に生じる腫瘍の縮小および患者の体重増減等により初期の治療計画では標的への線量不足および周囲正常臓器への線量増加等が危惧される場合に、治療期間中に取得した三次元画像に基づき新たな治療計画を立案し照射する放射線治療」と定義されている。Castelli らによって行われたメタアナリシスでは、ART の適応がない場合と比較して、ART 適応例では耳下腺を温存し、口腔乾燥症を軽減することが示されている¹¹⁾。ただし、ART では治療前に計画時間が発生することが問題点として挙げられている。例えば、kV-CBCT (Cone-beam CT) を用いた on-line ART では、33分の計画時間が発生することが報告されている¹²⁾。

3. ロバスト最適化

前述したように、患者に照射される線量分布には不確かさがあり、治療計画システムで示される線量分布と実際に照射される線量との間に不一致が生じる可能性がある。このような不確かさへの対策として、近年、ロバスト最適化といった手法が注目されている。従来、治療計画時と照射時の臓器の位置ズレによる CTV の位置誤差を補償するためのマージン (internal margin: IM) と、治療における set-up に関わるマージン (setup margin: SM) を CTV に対して付与した計画標的体積 (planning target volume: PTV) を設定し、PTV を照射する方法が用いられていた。しかし、PTV を設定する

方法では、例えば、呼吸性移動による標的の位置の不確かさがあつた場合、CTV は照射野内には含まれるが、線量指標や線量均一性へ悪影響が及ぼされることが報告されている¹³⁾。これに対し、患者の負担、被ばくを軽減し、患者固有の不確かさを考慮した線量分布を作成する方法として、ロバスト最適化法が提案されている。ロバスト最適化の「ロバストネス」とは、ある系が応力や環境の変化といった外乱の影響によって変化することを阻止する内的な仕組み、または性質のことである。ロバストネスを持つような設計をロバスト設計、ロバストネスを最適化することをロバスト最適化という。治療計画におけるロバスト最適化とは、CTV を標的に設定し、最適化の各ステップにおいて不確かさを考慮した線量分布計算を行い、その結果を最適化関数に反映させることで、不確かさに対してロバストな線量分布を作成する方法であるとされている¹⁴⁾。陽子線治療、特に強度変調陽子線治療 (intensity modulated proton therapy: IMPT) では、X 線による治療に比べて、治療範囲の不確かさ、set-up の不確かさ、解剖学的変化の不確かさ、線量計算の不確かさを含むさまざまな不確かさに対して敏感であり、ロバスト最適化が日常的に用いられる。以下に頭頸部放射線治療計画におけるロバスト最適化の臨床応用例を挙げる。

1) X 線治療に対するロバスト最適化治療計画

喉頭癌などの体輪郭辺縁の標的では、partial-arc VMAT を使用した場合、側方向の set-up error により、標的の深さが増減し、入射線量が増減する可能性がある。Miura らはこの問題に関するロバスト最適化の有効性を調べた。この研究では、ロバスト最適化法と PTV ベースの最適化計画が比較され、ロバスト最適化手法では頸動脈への線量低減、頸静脈、脊髄への線

量変動の低減を示した。また、CTV への優れた線量収束性も示した¹⁵⁾。

2) 粒子線治療に対するロバスト最適化治療計画

陽子線の深部線量分布は、深くなるにつれて徐々に線量が増えるプラトーと呼ばれる領域と、急激に線量が最大値に達するブラッグピークと呼ばれる領域とからなる。臨床では治療する領域に均一に線量を投与するために、拡大ブラッグピーク (spread-out bragg peak: SOBP) と呼ばれる深部方向に様な高線量領域を作成する。現在まで多くの頭頸部癌 (head and neck cancer: HNC) 患者が IMRT によって治療されてきたが、IMRT と比較して陽子線治療は、その物理的な特徴から正常組織への線量を低減しつつ標的に対して集中的に治療を行うことが可能であり、治療上の利点につながる可能性が示されている^{16, 17)}。しかし、患者体内での陽子線の範囲、つまり解剖学的構造に対する SOBP の位置には不確かさが存在する。これは、CT 値の不確かさ、患者の体重増減、CT 値から阻止能への変換など、複数の要因から生じる。特に IMPT では IMRT と同等の原性を持つが、距離の不確かさにより、標的に対してビームのオーバーシュート、アンダーシュートが発生し、過大線量および過少線量が発生する可能性がある。また、IMPT の計画手法として用いられる MFO (multiple field optimization) では、各照射方向からのビームが標的に様な線量投与を行う SFO (single field optimization) に対して、複数照射門のスポットウェイトを同時に最適化するため、個々のビームが標的内で不均一となり、深部方向の不確かさによる影響が大きい¹⁸⁾。HNC は体表面に近くに位置する傾向があり、IMPT ではレンジシフタや患者固有のボアラスを利用する必要がある。または、IMPT においてマルチフィールド最適化 (MFO-IMPT) を行うことで、レンジシフタを使用せずに高品質な治療計画を達成することができる^{18, 19)}。Liu らは、IMPT に対してロバスト最適化が、従来の set-up の不確かさのみを考慮する PTV ベースの最適化法と比較して不確かさの影響が少ない計画を作成することができ、OAR 線量、標的範囲、線量の均一性のすべてにおいて最適化されることを示した²⁰⁾。

また、頭頸部放射線治療では、鼻腔や副鼻腔の充満度による解剖学的な不確かさによる影響も受ける。鼻腔の充満度の変化は毎日起こる可能性があり、その結果、不十分な target coverage および、OAR への過大線量につながる可能性がある²¹⁾。この問題に対し、van de Water らはロバスト最適化を用い、従来の SFO と

比較して、CTV に対する coverage の改善と OAR に対する線量低減を示している²²⁾。

4. まとめ

頭頸部癌に対する放射線治療は、その技術的な進歩に伴い有用性が高まっているが、適切に使用するためには、その精度の向上も同時に求められる。頭頸部領域では、その解剖学的な特徴から IMRT が日常的に用いられるが、不確かさによる線量への影響を大きく受ける。患者の位置決めは標的の位置合わせを目的として行われるが、標的外の解剖学的構造の変化は線量分布に大きな影響を与える可能性がある。特に頭頸部領域において重要となるのが肩部の位置誤差による標的への線量変化であるが、従来の対策ではビーム方向の制限により、OAR が標的に近接している場合などに標的に対する均一な線量投与が困難となり、また、OAR への線量増加の可能性が示唆される。さらに、治療期間中の体重の減少も照射精度に大きな影響を与える。この対策として ART が用いられるが、計画時間の増加が課題となる点が指摘されており、これらの課題を克服するための効果的な方法が模索される。このような不確かさへの対処として、ロバスト最適化の適用可能性を検討することは重要であると考えられる。

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) JASTRO データベース委員会: 全国放射線治療施設の2010年定期構造調査報告 (第1報). https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/data_center/JASTRO_NSS_2010-01_2212.pdf, 2023年2月29日.
- 2) 日本癌治療学会: がん診療ガイドライン, 頭頸部癌. <http://www.jsco-cpg.jp/headandneck-cancer/>, 2023年12月2日.
- 3) Rathod S, Gupta T, Ghosh-Laskar S, Murthy V, Budrukkar A, Agarwal J: Quality-of-life (QOL) outcomes in patients with head and neck squamous cell carcinoma (HNSCC) treated with intensity-modulated radiation therapy (IMRT) compared to three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT): evidence from a prospective randomized study. Oral

- Oncol. 2013; 9: 634-642.
- 4) Marta GN, Silva V, de Andrade Carvalho H, de Arruda FF, Hanna SA, Gadia R, et al: Intensity-modulated radiation therapy for head and neck cancer: systematic review and meta-analysis. *Radiother Oncol.* 2014; 110: 9-15.
 - 5) Clemente S, Wu B, Sanguineti G, Fusco V, Ricchetti F, Wong J, et al: SmartArc-based volumetric modulated arc therapy for oropharyngeal cancer: a dosimetric comparison with both intensity-modulated radiation therapy and helical tomotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2011; 80: 1248-1255.
 - 6) Schwarz M, Van der Geer J, Van Herk M, Lebesque JV, Mijnheer BJ, Damen EM: Impact of geometrical uncertainties on 3D CRT and IMRT dose distributions for lung cancer treatment. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2006; 65: 1260-1269.
 - 7) Neubauer E, Dong L, Followill DS, Garden AS, Court LE, White RA, et al: Assessment of shoulder position variation and its impact on IMRT and VMAT doses for head and neck cancer. *Radiat Oncol.* 2012; 8: 7-19.
 - 8) 福村直樹:放射線治療計画ガイドライン2020年版. 東京. 金原出版. 2021: 111~155.
 - 9) Casey KE, Wong PF, Tung SS: Effect of interfractional shoulder motion on low neck nodal targets for patients treated using volumetric-modulated arc therapy (VMAT). *J Appl Clin Med Phys.* 2015; 16: 40-51.
 - 10) 日本放射線腫瘍学会, 日本磁気共鳴医学会, 日本医学物理学会, 仁保医学放射線学会, 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 2021年版. <https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/guideline/20211123.pdf>, 2023年12月2日.
 - 11) Castelli J, Simon A, Louvel G, Henry O, Chajon E, Nassef M, et al: Impact of head and neck cancer adaptive radiotherapy to spare the parotid glands and decrease the risk of xerostomia. *Radiat Oncol.* 2015; 10: 6.
 - 12) Guberina M, Guberina N, Hoffmann C, Gogishvili A, Freisleben F, Herz A, et al: Prospects for online adaptive radiation therapy (ART) for head and neck cancer. *Radiat Oncol.* 2024; 19: 4.
 - 13) 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>, 2023年12月2日.
 - 14) スキャニングガイドライン作成ワーキンググループ: 粒子線治療装置の物理・技術的 QA システムガイドライン (粒子線 QA2016). <https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/guideline/qa202101.pdf>, 2023年12月2日.
 - 15) Miura H, Doi Y, Ozawa S, Nakao M, Ohnishi K, Kenjo M, et al: Volumetric modulated arc therapy with robust optimization for larynx cancer. *Phys Med.* 2019; 58: 54-58.
 - 16) Youssef I, Yoon J, Mohamed N, Zakeri K, Press RH, Chen L, et al: Toxicity Profiles and Survival Outcomes Among Patients With Nonmetastatic Oropharyngeal Carcinoma Treated With Intensity-Modulated Proton Therapy vs Intensity-Modulated Radiation Therapy. *JAMA Netw Open.* 2022; 5: e2241538.
 - 17) Cozzi L, Fogliata A, Lomax A, Bolsi A: A treatment planning comparison of 3D conformal therapy, intensity modulated photon therapy and proton therapy for treatment of advanced head and neck tumours. *Radiother Oncol.* 2001; 61: 287-297.
 - 18) Cubillos-Mesias M, Baumann M, Troost EGC, Lohaus F, Löck S, Richter C, et al: Impact of robust treatment planning on single- and multi-field optimized plans for proton beam therapy of unilateral head and neck target volumes. *Radiat Oncol.* 2017; 12: 190.
 - 19) Moreno AC, Frank SJ, Garden AS, Rosenthal DI, Fuller CD, Gunn GB, et al: Intensity modulated proton therapy (IMPT) - The future of IMRT for head and neck cancer. *Oral Oncol.* 2019; 88: 66-74.
 - 20) Liu W, Frank SJ, Li X, Li Y, Zhu RX, Mohan R: PTV-based IMPT optimization incorporating planning risk volumes vs robust optimization. *Med Phys.* 2013; 40: 021709.
 - 21) Fukumitsu N, Ishikawa H, Ohnishi K, Terunuma T, Mizumoto M, Numajiri H, et al: Dose distribution resulting from changes in aeration of nasal cavity or paranasal sinus cancer in the proton therapy. *Radiother Oncol.* 2014; 113: 72-76.
 - 22) van de Water S, Albertini F, Weber DC, Heijmen BJM, Hoogeman MS, Lomax AJ: Anatomical robust optimization to account for nasal cavity filling variation during intensity-modulated proton therapy: a comparison with conventional and adaptive planning strategies. *Phys Med Biol.* 2018; 63: 025020.

Abstract

Dosimetric impact of patient positioning uncertainties in head and neck radiation therapy

Ryo Watanabe¹⁾, Chie Kurokawa²⁾

¹⁾ Department of Radiological Sciences, Graduate School of Health Sciences, Juntendo University

²⁾ Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Juntendo University

During radiation therapy for head and neck cancer using intensity modulated radiation therapy (IMRT), patient positioning uncertainties can affect negatively on dose distribution. In this report, I reviewed issues due to the patient positioning uncertainties, especially for shoulder positioning error and weight loss, and introduced robust optimization technique to solve the problems.

Key Words: head and neck, robust optimization, IMRT, IMPT, shoulder motion

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 47-52, 2025]

脳性麻痺児の座位からの立ち上がり動作における運動学的特性と筋活動に関する文献レビュー

城井麻美子、松田雅弘

順天堂大学大学院保健医療学研究科

要 旨

【はじめに・目的】脳性麻痺 (cerebral palsy, 以下 CP) 児を対象とした歩行に関する文献は数多くみられるが、座位から立位への立ち上がり動作 (sit-to-stand, 以下 STS) に関する研究は少ない。本調査では、現在までに研究されてきた CP 児の STS の運動学的特性や筋活動の特徴、今後の CP 児の STS への理学療法介入や研究課題を明らかにすることを目的とした。

【方法】PubMed を文献データベースとして用いて、網羅的に文献検索を行った。得られた結果から、検索結果の重複があるものと研究の目的に直接的に関係しない文献を除外した。さらに抽出した文献の記述内容を、客観的に把握するように精読して検討した。

【結果】CP 児における STS は、運動学的特徴やバランス能力に特徴があり、理学療法介入や環境調整などで STS の改善を図ることが可能である。また、CP 児の STS における筋シナジーに関する文献は見当たらないが、CP 児における歩行動作時の STS の筋シナジーに特徴がみられたことから、CP 児における STS の筋シナジーにも特徴がある可能性が考えられた。

【結論】CP 児の STS 動作にはこれまで多くの特徴が述べられてきており、運動学的特性やバランス能力、環境調整などで特徴が現れることが分かった。加えて、CP 児の STS では筋シナジーにも特徴が現れると考えられた。

キーワード：脳性麻痺児、椅子からの立ち上がり動作、運動学的特性、筋シナジー

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 53-64頁, 2025年 (受付 2024.2.7.; 受理 2024.7.5.)

1. 緒言 (背景と目的)

脳性麻痺 (cerebral palsy, 以下 CP) は、非進行性脳病変により永続的に続く姿勢と運動の障害である^{1,2)}。病態としては痙直型、アテトーゼ型、強直型、失調型に分かれ、運動麻痺の分布によって四肢麻痺、両麻痺、片麻痺などに分けられる²⁾。発達期からの運動障害のため、姿勢以外にも運動発達に影響を及ぼし、姿勢保持困難なレベルから歩行獲得レベルまで様々な臨床像を示す。多様な病態を示すことで理学療法の手法も多様であり、CP 児の病態に応じた理学療法アプローチを実践する必要がある。我々は CP 児の立ち上がり動作に着目し、理学療法のアプローチの提案をしていきたい。

CP 児を対象とした歩行に関する文献は数多くみられる³⁻⁷⁾ が、座位から立位への立ち上がり動作 (sit-to-stand, 以下 STS) に関しては十分に研究されていない。しかし、STS はトイレ動作や移乗動作など、日常生活の多くの場面で必要とされる動作である。したがって、STS が自立しているかどうかは介護者の負担量を大き

く変える要素の一つとなり得る。

また、理学療法を行う際には、1つの筋のみにアプローチすることはほとんどなく、動作にともなう複数の筋群に対してアプローチを行っていく。さらに、近年、動作に筋活動のパターンが現れる筋シナジーが世界的に注目されており、脳卒中などの神経疾患では、健常者と異なる筋シナジーの特徴がみられる⁸⁾。動作に対して筋の活動パターンである筋シナジーの特徴を明らかにすることで、理学療法のアプローチ方法の選択肢を増やすことが考えられる。

本調査では、現在までに研究されてきた CP 児の STS の運動学的特性や筋活動の特徴について調べ、CP 児の STS の改善のために必要な今後の研究課題を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

立ち上がり動作と筋シナジーを主たる検索語句として、2つに分けて網羅的に文献検索を実施した。

PubMed を文献データベースとして用い、(cerebral palsy) AND ((stand) AND (sit)) OR ((muscle) AND

責任著者：松田雅弘

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2-1-1

E-mail: t.matsuda.ye@juntendo.ac.jp

(synergy))を検索語とした。なお、通常、臨床において STS を評価指標として使用する際には立ち上がり動作のみならず、座る動作も含まれるため、stand と sit の両語を含む文献を検索した。得られた結果から、調査の目的に直接的に関係しない文献を除外した。採択基準は、CP 児を対象とした研究で、かつタイトル、抄録、キーワードのいずれかに STS または筋シナジー、もしくはその両方に関する記載のある文献とした。

3. 結果

上記の検索式にて187件（うち、clinical trial 30件、RCT 19件、review 12件、systematic review 6件（重複あり））が該当した（最終検索日：2023年12月7日）。さらに、採択基準に基づき抽出された42件の文献を精読した。文献の概要について「バイオメカニクス」「運動に関する介入」「バランス」「装具」「環境」「評価」「筋シナジー」に分類した（図1、表1）。

また、分類の内容について、「バイオメカニクス」は「生体力学的分析を行っているもの」、「運動に関する介入」は「立ち上がり動作への介入やトレーニングの検証を行っているもの」、「バランス」は「立ち上がり時のバランスや重心動揺について分析を行っているもの」、「装具」は「立ち上がり動作における装具やテーピングの効果を検証しているもの」、「環境」は「立ち上がり動作時の椅子や手すりなどの環境の違いによる動作や運動戦略を分析しているもの」、「評価」は「立ち上がり動作と関連する評価指標」、「筋シナジー」は「筋シナジーについて述べられているもの」とした。

1) 運動学的特性

(1) バイオメカニクス

バイオメカニクスに関する文献は、4件抽出された。Suriyaamarit ら⁹⁾によると、痙直型両麻痺の STS の

特徴として、定型発達（typical development, 以下 TD）児と比較すると動作時間の延長、非効率的な動作の増加がみられた。また、STS 開始時には TD 児よりも体幹の屈曲と骨盤の後傾がみられ、STS 中は TD 児よりも体幹・股関節・膝関節の屈曲がみられた。しかし、足関節の背屈は TD 児に比べて小さかった。また、すべての関節モーメントについて、CP 児に非対称性がみられ、非利き足（利き足は、参加者に「ボールを蹴る」、「床にある小さな物体を足で拾う」、「床上の形状を足でなぞる」という質問をし、2つ以上当てはまる側の足と定義した）の最大股関節伸展モーメント、最大膝関節伸展モーメント、最大足底屈曲モーメント、最大垂直接地反力（grand reaction force, GRF）は、利き足の値よりも高かった。Park ら¹⁰⁾によると、痙直型 CP 児では STS 中の緩慢さ、骨盤前傾の増大、股関節屈曲がみられ、TD 児と比較して早期の急激な膝伸展が認められた。さらに、膝関節の最大伸展モーメントの低下と、股関節および膝関節の伸展力の低下がみられた。

次に、Yonetsu ら¹¹⁾によると、TD 児と CP 児の STS の共通する特徴から、TD 児・CP 児を①健康児群、② A 群（体幹前方移動が大きい群）、③ B 群（体幹前方移動が大きい群が A 群ほどではなく臀部を前方に移動した群）、④ C 群（体幹前方移動が小さく臀部を前方に移動した群）、⑤ D 群（離殿前に膝関節が伸展していた群）の5グループに分類することが可能であった。特に特徴的であるのは、体幹の傾きであり、粗大運動能力分類システム（gross motor function classification system: GMFCS）のレベルが I～II では体幹を前傾させ（A・B 群）、レベル III～IV では体幹の前傾が小さい（C・D 群）傾向にあった（図2）。

また、Thanapan ら¹²⁾によると、自立して STS を獲得できた痙直型両麻痺 CP 児（Independence STS, I-

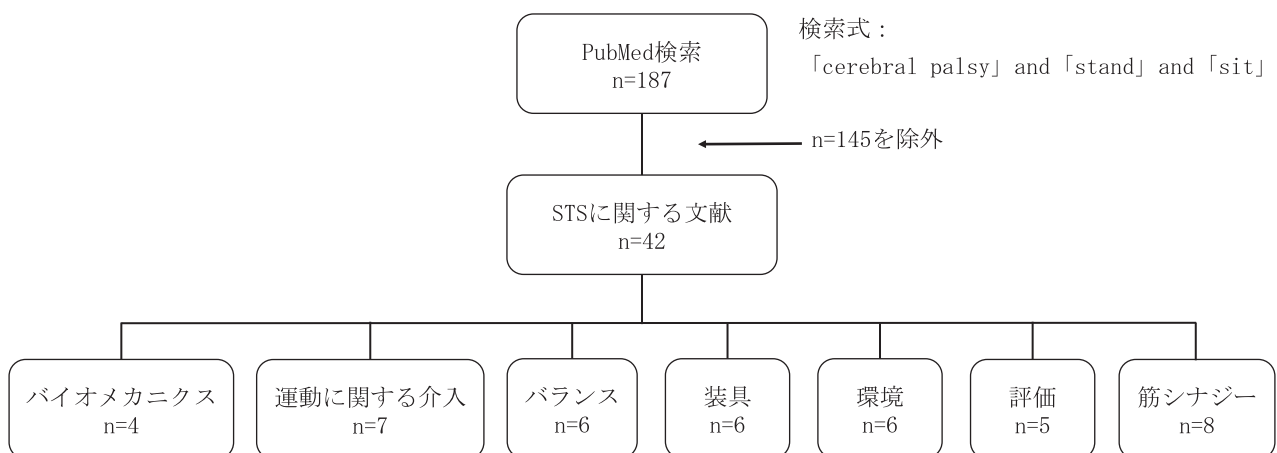


図1 文献分類の結果

表 1 運動学的特性の文献

| | タイトル | 著者 | 対象者 | 結果 |
|----------|---|------------------------------|--|---|
| バイオメカニクス | Mechanical work, kinematics, and kinetics during sit-to-stand in children with and without spastic diplegic cerebral palsy. | Suriyaamarit D et al. (2019) | ・痙性両麻痺 CP 児 11 名 (GMFCS レベル I ~ II) ・TD 児 11 名 (7~12 歳) | SDCP 児 : TD 児に比べ、STS に要する時間が長く、非効率的な動作が多い。 |
| | The characteristics of sit-to-stand transfer in young children with spastic cerebral palsy based on kinematic and kinetic data. | Park ES et al. (2003) | ・痙性両麻痺 CP 児 15 名 ・痙性片麻痺 CP 児 12 名 ・TD 児 21 名 | ・TD 児 : STS の一貫したパターンと 6 つの移行点がある。 ・CP 児 : STS で、課題中の動作の緩慢さ、骨盤前傾の増大、股関節屈曲が認められた。 |
| | "Patternizing" standards of sit-to-stand movements with support in cerebral palsy. | Yonetsu R et al. (2009) | ・CP 児 50 名 (平均年齢 9 歳 11 ヶ月) ・TD 児 10 名 (平均年齢 7 歳 2 ヶ月) | TD 児と CP 児の STS 運動の特徴と違いを区別可。CP 児 : STS 運動の共通する特徴から 4 つのグループに分類。 |
| | Comparison of body segmental kinematic characteristics between children with cerebral palsy performing sit-to-stand with and without a walker. | Thanapan P et al. (2013) | ・痙性両麻痺 CP 児 18 名 (7~14 歳) | 自立して STS を獲得できた CP 児 (Independence STS, I-STS) : 股関節よりも上半身と膝関節の最大の水平移動量の平均値が高い。 |
| | Sit-to-stand movement in children with hemiplegic cerebral palsy: relationship with knee extensor torque and social participation. | dos Santos AN et al. (2013) | ・痙性片麻痺 CP 児 7 名 (GMFCS レベル I・II) ・TD 児 18 名 (8.4±2.3 歳) | 痙直型片麻痺 CP 児 : 患肢の膝伸展筋トルクが低く、微細運動制御や言語能力に関連する領域で社会参加が制限。 |
| 運動に関する介入 | Critically appraised paper: A task-specific sit-to-stand training program for children with cerebral palsy improves mobility and self-care function [synopsis]. | Spittle A (2022) | ・CP 児 38 名 (GMFCS レベル III ~ IV : 4~12 歳) | 中等度から重度の運動制限のある CP 児を対象とした 6 週間の課題別座位保持プログラム : セルフケア、運動能力、座位保持能力がわずかに改善、介護者の負担を軽減。 |
| | Sit-to-stand training for self-care and mobility in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. | Chaovalit S et al. (2021) | ・痙性片麻痺 CP 児 8 名 (4~6 歳) ・TD 児 5 名 | 1 回の神経発達治療セッション : CP 児が非典型的な動作パターンを用いることなく、STS が可。 |
| | Immediate effects of quick trunk movement exercise on sit-to-stand movement in children with spastic cerebral palsy: a pilot study. | Abdolrahmani A et al. (2017) | ・痙性 CP 児 5 名 (片麻痺 3 名 ; 両麻痺 2 名 : 6~17 歳) | 座位体幹運動 : 痙性 CP 児の一時的な STS のパラメータは即時的に改善。 |
| | Effectiveness of loaded sit-to-stand resistance exercise for children with mild spastic diplegia: a randomized clinical trial. | Liao HF et al. (2007) | ・片麻痺 CP 児 20 名 (GMFCS レベル I・II : 5~12 歳) | STS 負荷運動 : 軽度痙性両麻痺 CP 児の基本運動能力、機能的筋力、歩行効率は改善。 |
| | Loaded sit-to-stand resistance exercise improves motor function in children with cerebral palsy. | Damiano D. (2007) | ・痙性片麻痺 CP 児 24 名 (GMFCS レベル I・II : 5~12 歳) | 低負荷の座位から立位までのレジスタンス運動による 6 週間の自宅運動プログラム : 一部の軽度の痙性片麻痺 CP 児において、基本的な運動能力と機能的筋力を有意に改善、歩行時のエネルギー消費が減少。 |
| | Adults with cerebral palsy benefit from participating in a strength training programme at a community gymnasium. | Taylor NF et al. (2004) | ・CP で要支援度の高い成人 10 名 (男性 7 名、女性 3 名、平均年齢 47.8 歳) | 筋力トレーニング : CP 患者にとって有効、加齢に伴う身体機能の低下を伴う CP 患者で要支援度の高い成人に対して有効。 |
| | Functional strength training in cerebral palsy: a pilot study of a group circuit training class for children aged 4-8 years. Clin Rehabil. | Blundell SW et al. (2003) | ・CP 児 8 名 (4~8 歳 : 7 名は痙性片麻痺、1 名は痙性・失調性四肢麻痺) | CP 児のための課題別強化運動とトレーニングの短期プログラムをグループサーキットクラスとして実施 : 筋力と機能的パフォーマンスが改善、長期にわたって維持。 |
| バランス | Age-related Changes in Postural Sway During Sit-to-stand in Typical Children and Children with Cerebral Palsy. | Pavao SL et al. (2019) | ・CP 児 23 名 ・TD 児 35 名 | 5~6 歳の TD 児 : 安定期の 10~12 歳よりも前後 CoP 変位と CoP 動揺面積が高い値を示した。CP 児 : 年齢による変化はみられなかった。 |
| | Hands Support and Postural Oscillation During Sit-to-Stand Movement in Children With Cerebral Palsy and Typical Children. | Pavao SL et al. (2018) | ・CP 児 20 名 (GMFCS レベル I・II) ・TD 児 35 名 | CP 児 : STS を行うために TD 児よりも多くの体重を手で支持。 |

| | タイトル | 著者 | 対象者 | 結果 |
|------|---|-----------------------------|--|--|
| バランス | Effects of Visual Manipulation in Sit-to-Stand Movement in Children With Cerebral Palsy. | Pavao SL et al. (2018) | ・ CP 児 21 名 ・ TD 児 42 名 | CP 児：TD 児よりも姿勢動揺が大きい、より大きな姿勢不安定性が観察。両群とも、視覚がない方が姿勢の不安定性が大きい。 |
| | Postural control during sit-to-stand movement and its relationship with upright position in children with hemiplegic spastic cerebral palsy and in typically developing children. | Pavao SL et al. (2015) | ・ 痙性片麻痺 CP 児 6 名 (GMFCS I・II) ・ TD 児 23 名 | 痙直型片麻痺 CP 児は：TD 児と比較して、STS 運動の開始時に大きな姿勢振動を示す。 |
| | Functionality level and its relation to postural control during sitting-to-stand movement in children with cerebral palsy. | Pavao SL et al. (2014) | ・ CP 児 10 名 (GMFCS I・II：5~12 歳) ・ TD 児 27 名 | CP 児：軽度から中等度の運動障害を有するものの、TD 児と比較して、機能的パフォーマンスと機能的バランスのレベルに障害を示す。 |
| | The influence of seat heights and foot placement positions on postural control in children with cerebral palsy during a sit-to-stand task. | Medeiros DL et al. (2015) | ・ CP 児 14 名 ・ TD 児 14 名 | ・ CP 児：TD 児に比べ STS を完了するのに多くの時間を要する。 ・ 座面の高さや足の配置：運動パラメータに関しては CP 児の姿勢制御に影響を与えない。 |
| 装具 | Effects of Hinged versus Floor-Reaction Ankle-Foot Orthoses on Standing Stability and Sit-to-Stand Performance in Children with Spastic Diplegic Cerebral Palsy. | Wang YL et al. (2022) | ・ 痙性両麻痺 CP 児 9 名 | FRAFO：HAFO に比べ、STS のパフォーマンスをより向上させる。 |
| | The effect of hinged ankle-foot orthoses on sit-to-stand transfer in children with spastic cerebral palsy. | Park ES et al. (2004) | ・ 痙性 CP 児 19 名 (2~6 歳) | CP 児のヒンジ付き AFO 装着：骨盤の傾きと股関節の屈曲を増加させると近位の代償戦略は変化なし。課題中の時間的、運動学的、および運動学的パラメータが改善。 |
| | Ankle-foot orthoses for preambulatory children with spastic diplegia. | Wilson H et al. (1997) | ・ 痙性片麻痺および動的尖足を有する 15 名 (2~5 歳) | 制御不能な動的尖足を有する痙直性片麻痺 CP 児：STS に関する式 AFO の使用が有益。 |
| | Effects of an underwear-type hip abduction orthosis on sitting balance and sit-to-stand activities in children with spastic cerebral palsy. | Kusumoto Y et al. (2018) | ・ 痙性 CP 児 8 名 (GMFCS レベル III・IV：6~18 歳) | 下着型股関節外転装具：痙直型 CP 児の座位バランスと STS 活動の促進に有効。 |
| | Effects of Kinesio taping in rectus femoris activity and sit-to-stand movement in children with unilateral cerebral palsy: placebo-controlled, repeated-measure design. | dos Santos AN et al. (2019) | ・ CP 児 11 名 (GMFCS レベル I・II：6~12 歳) | キネシオテーピングの貼付：片麻痺 CP 児の STS 中の身体構造と機能指標を修正したが、機能性は変化なし。 |
| | Pilot study: Investigating the effects of Kinesio Taping(R) on functional activities in children with cerebral palsy. | da Costa CS et al. (2013) | ・ 左片麻痺 CP 児 4 名 (GMFCS レベル I) | 神経筋テーピング：CP 児の動的活動には有効、静的活動では同様の効果は得られない。 |
| 環境 | Comparison of the effects of chair height and anterior seat inclination on sit-to-stand ability in children with spastic diplegic cerebral palsy. | Suriyaamarit D (2020) | ・ 痙性両麻痺 CP 児 12 名 | 椅子の高さと座面の前傾角：SDCP 児の STS 能力に良い影響を及ぼす。 |
| | Sit-to-stand movement in children with cerebral palsy and relationships with the International classification of functioning, disability and health: A systematic review. | Lima CRG et al. (2020) | ・ CP 児 (18 歳まで) | 文脈的要因と身体機能と構造：CP 児の STS に影響を与える。 |
| | Asymmetry in children with unilateral cerebral palsy during sit-to-stand movement: Cross-sectional, repeated-measures and comparative study. | dos Santos AN et al. (2020) | ・ 片麻痺 CP 児 11 名 ・ TD 児 20 名 | 片側性 CP 児：座面の高さを低くすることで適応的な運動戦略が得られる。 |
| | Comparison of center-of-pressure displacement during sit-to-stand according to chair height in children with cerebral palsy. | Lee HY et al. (2015) | ・ CP 児 9 名 | 椅子の高さが下肢の 120% の椅子から STS を行った場合の重心動揺は、下肢の 100% の椅子で STS を行った場合よりも小さい。 |
| | Effect of bench height on sit-to-stand in children without disabilities and children with cerebral palsy. | Hennington G et al. (2004) | ・ 軽度 CP 児 10 名 (平均年齢 10.9 ± 2.7 歳) ・ TD 児 10 名 (平均年齢 8.7 ± 2.4 歳) | CP 児：TD 児と同様に、座席の高さの変化に対応するために STS の運動プログラムを容易に修正可。重力に逆らって伸展する速度は遅い。 |

| | タイトル | 著者 | 対象者 | 結果 |
|-------|---|--------------------------------|--|--|
| 環境 | Modified desk height helps children with cerebral palsy perform sit-to-stand. Disabil Rehabil Assist Technol. | Lim HK et al. (2022) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 28名 (GMFCS レベル I・II : 平均年齢 10.3歳) TD児 17名 (平均年齢 9.7歳) | 手を机の上に置いた状態と腕を組んだ状態で STS : 肘を曲げた机の高さが STS にかかった時間が最も短い。STS にテーブルを使用した場合、全児童で動揺が有意に減少。 |
| 評価 | Five-times-sit-to-stand test in children with cerebral palsy: reliability and concurrent validity. | Kumban W et al. (2013) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 33名 (GMFCS レベル I~III : 6~18歳) | FTSST : 信頼性の高い評価ツール。軽度から中等度の CP 児における機能的バランス能力検査と相関。 |
| | Effects of task-specific training on functional ability in children with mild to moderate cerebral palsy. | Kumban W et al. (2013) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 21名 | FTSST : 軽度から中等度の CP 児における課題別訓練後の信頼性が高い。有効な機能的アウトカム指標。 |
| | Predictors of Independent Walking in Young Children With Cerebral Palsy. | Begnoche DM et al. (2016) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 80名 (2~6歳) | STS における機能的筋力および動的姿勢制御の測定 : 独立して 3 歩以上歩くことの唯一の有意な予測因子。 |
| | Sitting and standing performance in a total population of children with cerebral palsy: a cross-sectional study. | Rodby-Bousquet E et al. (2010) | 1990~2005 年生まれで 2008 年にスウェーデン南部に住んでいた CP 児 562 名 (3~18 歳) | GMFCS の分類システム : 座位と立位の能力を予測するのに適する。 |
| 筋シナジー | Number of synergies impacts sensitivity of gait to weakness and contracture. | Kuska EC et al. (2022) | 2 次元筋骨格モデル | 相乗効果の数を減らすと、特定の筋肉群の筋力低下や拘縮に対する感受性が高まることを示した。 |
| | Greater Reliance on Cerebral Palsy-Specific Muscle Synergies During Gait Relates to Poorer Temporal-Spatial Performance Measures. | Kim Y et al. (2021) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 10名 TD児 10名 | CP 児は TD 児と比較し、筋活性化の減少および複雑または非定型パターンを示した。 |
| | Neuromuscular Control before and after Independent Walking Onset in Children with Cerebral Palsy. | Bekius A et al. (2021) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 20名 (リスクの高い児を含む) TD児 20名 (生後 6.5~52.4 か月) | CP 児は、補助歩行を行った TD 児と比較して、シナジーを動員することが少なかった。 |
| | Children With Cerebral Palsy Have Greater Stride-to-Stride Variability of Muscle Synergies During Gait Than Typically Developing Children: Implications for Motor Control Complexity. | Kim Y et al. (2018) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 20名 (GMFCS I~II) TD児 8名 | 歩行中に展開されたシナジーの総数に対して、CP 児のシナジーは定型発達 (TD) 児よりも多くのクラスターに存在し、ストライド間の変動が有意に大きいことを示した。 |
| | Number of Synergies Is Dependent on Spasticity and Gait Kinetics in Children With Cerebral Palsy. | Hashiguchi Y et al. (2018) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 15名 TD児 10名 | CP 児は、TD 児よりもシナジーが大幅に少なかった。痙縮の程度と歩行運動は相乗効果の数に応じて異なった。 |
| | Muscle Synergies During Walking in Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review. | Bekius A et al. (2020) | レビュー | 多くの研究で CP の子供は TD の子供と比較して歩行中に動員される筋肉シナジーが少ないことが述べられており、いくつかの研究では筋シナジーの空間的または時間的構造のいずれかが CP 児と TD 児では異なっていた。 |
| | Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy. | Steele KM et al. (2015) | <ul style="list-style-type: none"> CP患者 549名 健常者 84名 (3.9~70歳) | CP 患者の歩行中の筋肉活動を説明するために必要なシナジーは、健常者と比較して少なかった。シナジーの変化は、機能障害と、選択的運動制御、筋力、痙縮などの臨床検査の尺度に関連していた。 |
| | Muscle synergy analysis in children with cerebral palsy. | Tang L et al. (2015) | <ul style="list-style-type: none"> CP児 12名 TD児 8名 健常成人 10名 | CP 児では成熟したシナジーがほとんどみられず、CP 児に特有の異常なシナジーが多数出現した。 |

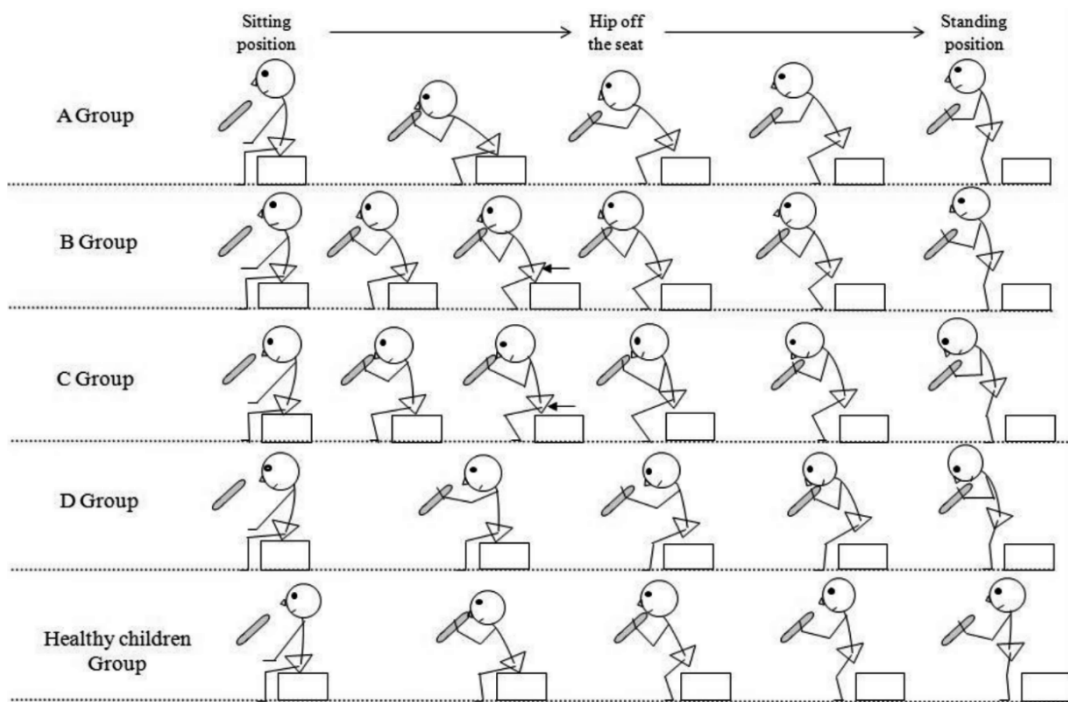


図2 文献分類の結果

STS) は、股関節よりも上半身と膝関節の最大の水平移動量の平均値が高かった。自立してSTSを獲得できなかったCP児 (Not an independent STS, D-STS) では、I-STS と同じような動作パターンであったが、膝を除き I-STS よりも体節の水平移動量が小さかった。D-STS から歩行器を使って STS を獲得できたCP児 (STS with the walker, W-STS) は、I-STS と比較的類似した動作パターンと体節の水平移動量を示したが、肘関節は I-STS よりも水平方向の平均最大位置が小さかった。さらに、I-STS は他と比較して、体節の水平方向および垂直方向の最大速度の平均値が最も高かった。W-STS では、すべての体節の水平および垂直方向の直線速度の平均最大値が D-STS に近い値を示した。

さらに、Dos Santos ら¹³⁾ によると、痙直型片麻痺 CP児は、TD児と比較して、患肢の膝伸展筋トルクが低く、微細運動制御や言語能力に関連する次元で社会参加が制限されていることが示された。前額面における足関節の可動域、横断面における足関節の可動域と角度を除けば、STS に採用されるストラテジーや、粗大運動機能に関連する参加の領域において、TD児と同様であった。さらに、CP児では、膝伸展筋トルクと下肢および体幹の角度の間に有意な非線形相関が認められた。

(2) 運動に関する介入

運動に関する介入に関する文献は、7件抽出された。

なお、ここでの「介入」は運動プログラムや筋力トレーニングなどによる介入とし、装具やテーピングなどは含まない。

まず、Spittle らなど¹⁴⁻²⁰⁾ 複数の文献で CP児に対して筋力トレーニングや STS プログラムなどの介入が行われていた。Spittle ら¹⁴⁾ や Chaovalit ら¹⁵⁾ によると、介入後の能力や STS のパフォーマンスが向上し、セルフケア、移動能力がわずかに改善した。また、介護者の負担が軽減された。

次に、Liao ら¹⁷⁾ Damiano ら¹⁸⁾ の研究によると、STS 負荷抵抗運動によって、軽度 CP児の基本的な運動能力、機能的筋力、歩行時のエネルギー消費の減少がみられた。

また、Taylor ら¹⁹⁾ の研究では、成人の CP患者に対する筋力トレーニングの効果について検証している。筋力トレーニングが CP患者にとって有益であるのに加え、加齢による身体機能の低下を伴う、要支援度の高い成人の CP患者に対する有益性が示された。また、Blundell ら²⁰⁾ によると、CP児の下肢筋力および機能的パフォーマンスに対する集中的な課題別筋力トレーニングを行い、筋力や機能的パフォーマンスが上昇した。

(3) バランス

バランスに関する文献は、6件抽出された。

まず、Pavao ら²¹⁻²⁵⁾ の文献をまとめる。CP児は TD児と比較して姿勢動揺が大きく、さらに開眼よりも閉眼で動揺が大きくなる²³⁾。また、STS時に手で体重支

持を行うと、CP児はTD児よりも多くの体重を手で支持しており、手での体重支持の強さがSTS開始時の姿勢動揺の大きさと関連していた²²⁾。また、静止時とSTS時に圧中心(center of pressure: CoP)を計測すると、STS開始時にCoP変数であるCoP変位の前後方向(anterior posterior: AP)と縦方向(medial lateral: ML)の振幅、CoP振動の面積と速度のすべての変数でTD児よりも高い値を示した。また、静的条件とSTS動作時におけるCoPは正の相関関係がみられた。これにより、Pavaoらは、STS遂行には静的姿勢での身体制御が重要である、と結論づけている²⁴⁾。さらに、Pediatric Evaluation of Disability Inventory (PEDI)と小児バランス尺度(PBS: Pediatric Balance Scale)を用いて、機能的パフォーマンス・機能的バランスを評価したところ、STS中の姿勢制御はPEDIの介護者による援助の移動の項目と相関がみられた²⁵⁾。また、STS中における姿勢動揺の加齢変化を調査した文献では、TD児は安定期となる10~12歳が5~6歳と比べCoPが小さく、姿勢動揺を年々変化させて動揺が減少していたのに対して、CP児では年齢による変化はみられなかった²¹⁾。

次に、Medeirosら²⁶⁾による研究では、自立してSTS課題を遂行できるCP児(Independent CP: ICP、GMFCSレベルI)と、STSの際にサポートが必要なCP児(Supported CP: SCP、GMFCSレベルII・III)、TD児の姿勢制御を、運動学および運動学的観点から分析した。この実験では、対照群とICP群においては自立してSTSを遂行し、SCP群はSTSを行うにあたり、評価者によって最小限の徒手によるサポートが行われた。SCP群はPBSによると有意にバランスが悪く、他の2群に比べCoPの前後方向(CoPAP)と縦方向(CoPML)の変位が小さかった。この結果は、評価者によるサポートの有無に関係していると考えられた。さらに、SCP群はSTS課題中の肩と膝の直線変位が他の群より小さく、高座位条件では、肩と膝の直線変位も減少した。また、ICPはTD児よりもCOPML振動が大きく、STS課題中に前頭面において異なる戦略を利用していることが示唆された。

(4) 装具

装具に関する文献は、6件抽出された。

Wangらなど²⁷⁻²⁹⁾はCP児のSTSにおける短下肢装具(ankle-foot orthosis: AFO)の効果について検証している。Parkら²⁸⁾とWilsonら²⁹⁾はCP児のSTS時にAFOを使用すると、裸足時と比較して動作遂行時間が短縮されるため、AFOは効果があるとしている。

また、Parkら²⁸⁾によると、AFOを使用することで遂行時間の短縮に加え、運動学的パラメータで改善がみられたが、骨盤の傾きや股関節の屈曲増大などの代償運動については効果がみられなかった。

次に、Kusumotoら³⁰⁾は股関節外転装具の座位バランスやSTS時の効果について検討している。痙直型CP児に股関節外転装具を着用することによって、Trunk Impairment Scaleや5回座位-立位テスト(five times sit to stand test: FTSST)の動的バランスの得点が改善し、安定性が向上した。したがって、STS時の股関節外転装具の装着は有効であることが示唆された。

さらに、Dos Santosらなど^{31,32)}はSTS時のキネシオテーピングの効果について検討している。Dos Santosら³¹⁾がCP児に対して麻痺側の大腿部にキネシオテーピングを施してSTSを行ったところ、対象児のライメントの改善と大腿直筋の筋活動活性化がみられたが、動作の遂行時間は変化しなかった。また、da Costaら³²⁾が片麻痺CP児に大腿四頭筋と前脛骨筋にキネシオテーピングを施してSTSを行ったところ、テーピングを使用していない時と比較してSTSの遂行時間やTime Up and Go Test (TUG)の改善、膝伸展の増加などがみられ、キネシオテーピングは動的活動には有効であったが、静的活動では同様の効果が得られなかった。

(5) 環境

環境に関する文献は、6件抽出された。そのうち、5件では椅子の高さについて言及している³³⁻³⁷⁾。Suriyaamaritら³³⁾によると、座面の高さを高くすることで、股関節・膝関節・足関節の関節可動域および股関節・膝関節の最大伸展モーメントが減少した。また、Dos Santosら³⁵⁾によると、座面の高さを低くした際に、TD児・CP児に関わらず、STS開始時の下肢・体幹屈曲角度の増加、体幹・股関節・膝関節の屈曲ピーク値の増加、膝関節・体幹の関節可動域の増加および動作遂行時間の延長がみられたのに加え、片麻痺CP児においては、骨盤後傾の増加、股関節屈曲の減少、非麻痺側を後方に引く様子がみられた。

次に、Leeら³⁶⁾による、座面の高さによってSTS時の圧中心(COP)の違いを調査した報告では、標準的な椅子の方が座面の高い椅子よりもCOPの前後方向の速度と範囲が大きかった。COPの縦方向速度、範囲、縦方向速度などの他のパラメータは差がなかった。また、Medeirosら²⁶⁾による研究では、座席の高さと足の配置は、少なくとも運動パラメータに関しては、CP児の姿勢制御に影響を与えなかった。座席の

高さは運動学的変数に影響を与え、高いベンチはCP児と対照児の両方で肩（垂直・水平）と膝（垂直）の直線変位を減少させた。さらに、Suriyaamaritら³³⁾はSTSの遂行時間は減少するとしているが、Henningtonら³⁷⁾は座面の高さを変えても、動作遂行時間に変化がない、としていることから、遂行時間に関しては議論が分かれる。

最後に、Limら³⁸⁾による、机上支持を用いたSTSの文献によると、TD児・CP児に関わらず、上肢を机上支持したときは動揺が減少し、動作遂行時間も減少した。

(6) 評価

評価に関する文献は、5件抽出された。

Kumbanらによると、FTSSTは軽度～中等度のCP児において、TUGおよびBerg Balance Scale (BBS)の機能的バランス能力検査と関連しており³⁹⁾、Motor Assessment Scale (MAS: sit-to-stand)、小児バランス尺度 (PBS: Pediatric Balance Scale)、Functional Reach Testとも関連していた⁴⁰⁾。

また、Begnocheら⁴¹⁾によると、STSにおける機能的筋力および動的姿勢制御の測定は、CPの幼児における自立歩行を予測した。また、Rodbyら⁴²⁾によると、GMFCSによって、座位と立位の能力を予測することが可能であった。

2) 筋シナジー

分析対象として得られた文献は8件であった。STSに関する文献は該当しなかったため、CP児の筋シナジーの特徴として結果を記述する。

抽出されたすべての文献は、歩行動作中や歩行動作開始前後についての研究である。その中でも筋シナジーの数による特徴を述べているKusukaら⁴³⁾の二次元骨格筋モデルを使用した研究によると、筋のシナジー数を減らすと、特定の筋肉群の筋力低下や拘縮に対する感受性が高まることを示していた。また、CP児では歩行中の筋シナジーが減少し、CP児に特異的なシナジーパターンがみられ、筋シナジーに大きなばらつきがみられたり、TD児よりも運動戦略の単純化がみられたり、障害の程度や個人によってパターンにばらつきがあるなどの特徴が記述されていた⁴⁴⁻⁵⁰⁾。

4. 考察

1) 運動学的特性

CP児のSTSにおける運動学的特徴としては、動作時間の延長、非効率的な動作の増加がみられ、STS開

始時にはTD児よりも体幹の屈曲と骨盤の後傾が、STS中はTD児よりも体幹・股関節・膝関節の屈曲がみられるなど、CP児のSTSには特徴があった^{9,10)}。また、バランス能力において、CP児はTD児よりも姿勢動揺が大きく、TD児の10～12歳が5～6歳と比べCoPが小さく、姿勢動揺を年々変化して姿勢動揺が減少していたのに対して、CP児では年齢による変化はみられなかったなどの特徴が示されていた²¹⁾。これは、CP児のSTSでTD児よりも動作の効率が悪い原因として、バランス能力の低下に加えて、STS時の運動パターンに違いがあることが示唆された。その運動パターンは複数存在し、単一の運動パターンではなく、その子どもの持っている病態によって異なる運動パターンが存在していることが考えられる¹¹⁾。

次に、運動に関する介入・装具・環境に関しては、それぞれ筋力トレーニング・AFOやテーピング・座面の高さなどの環境調整などがCP児におけるSTSの改善に効果があることが示されていた。そのため、CP児のSTSの特徴を理解して、これらの手法を工夫して適応すれば、CP児のSTSはより円滑になり、Activities of Daily Living (ADL) や Quality of Lifeが向上する可能性が考えられる。これは、STS負荷抵抗運動によって軽度CP児の基本的な運動能力、機能的筋力、歩行時のエネルギー消費の減少がみられ^{17,18)} STS時に座面の高さを変える³³⁾、上肢を机上支持する³⁸⁾などの環境調整を行うことで、CP児のバランス低下や重心移動の不足を補うことが考えられる。また、装具について、AFOの使用は、足関節や膝関節の角度を改善させることで股関節や膝関節のモーメントが改善する²⁸⁾ことから、動作の遂行時間の短縮が期待できる。ただし、骨盤傾斜や股関節屈曲の増加などの近位の代償パターンの改善は期待できない。

さらに、CP児におけるSTSはバランススケールと関連しており、GMFCSによって、座位と立位の能力を予測することが可能であることから、STSは評価指標としても使用が可能であることが示唆されていた^{40,42)}。

2) 筋シナジー

CP児によるSTSの筋シナジーに関する文献は見当たらなかった。

この結果を知識のギャップと捉えた上で、神経損傷疾患である脳卒中後のSTSの筋シナジーに関する文献を調べると、麻痺側は脳卒中後に筋シナジーの異常な変化を示すが、非麻痺側は脳卒中後の生体力学的逸脱に相乗的に適応できること⁵¹⁾、筋シナジーの時間的特徴に基づいて、脳卒中後遺症患者と健常者を区別す

ることができ、これらの時間的特徴は、脳卒中後遺症患者の運動障害と相関すること⁵²⁾が述べられていた。

CP児の歩行動作や脳卒中患者のSTSの筋シナジーに特徴がみられることから、CP児のSTSにも特徴がみられると考えられる。CP児のSTSの特徴の理解が深まり、筋シナジーの解析が進むことで、CP児へのSTSの効果的な改善アプローチにつながるものと考えられる。

5. 結論

CP児のSTSにはこれまでも多くの特徴が述べられてきており、運動学的特性やバランス能力、環境調整などによって運動パターンに特徴が現れることが分かった。しかし、今までCP児のSTSの筋シナジーに関する研究はなく、脳卒中患者のように筋シナジーのパターンが分かれば、今後の理学療法介入に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

6. 研究の限界

今回、CP児のSTSに関して文献検索を行ったが、本調査を結論付ける十分な数の研究が行われておらず、CP児の運動特性を十分に把握することができなかった。STSはADLの自立や介助量軽減を目指し、リハビリテーションのなかで実施される。STSの運動特徴を把握し、その立ち上がり方に応じた運動療法が今後重要であると考えられた。

倫理的配慮

人を対象とした研究ではないため倫理的配慮は生じないが、著作権、盗用、剽窃などの倫理問題（出版・公表に関する倫理）は生じるため、その点に関して配慮して文献をまとめた。

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) 近藤和泉:脳性麻痺の定義. 脳性麻痺リハビリテーションガイドライン第2版. 東京. 金原出版. 2014: 5.
- 2) 田原弘幸: 脳性麻痺総論. 小児理学療法学テキスト改定第3版. 東京. 南江堂. 2018: 73~79.
- 3) Attias M, Bonnefoy-Mazure A, Lempereur M, Lascombes P, De Coulon G, Armand S: Trunk movements during gait in cerebral palsy. *Clin Biomech.* 2015; 30: 28-32.
- 4) Celestino ML, Gama GL, Barela AM: Gait characteristics of children with cerebral palsy as they walk with body weight unloading on a treadmill and over the ground. *Res Dev Disabil.* 2014; 35: 3624-3631.
- 5) Szopa A, Domagalska-Szopa M, Czamara A: Gait pattern differences in children with unilateral cerebral palsy. *Res Dev Disabil.* 2014; 35: 2261-2266.
- 6) Stackhouse C, A Shewokis P, R Pierce S, Smith B, McCarthy J, Tucker C: Gait initiation in children with cerebral palsy. *Gait Posture.* 2007; 26: 301-308.
- 7) Iosa M, Marro T, Paolucci S, Morelli D: Stability and harmony of gait in children with cerebral palsy. *Res Dev Disabil.* 2012; 33: 129-135.
- 8) Zhao K, He C, Xiang W, Zhou Y, Zhang Z, Li, J et al: Evidence of synergy coordination patterns of upper-limb motor control in stroke patients with mild and moderate impairment. *Front Physiol.* 2023; 14: 1214995.
- 9) Suriyaamarit D, Boonyong S. Mechanical work, kinematics, and kinetics during sit-to-stand in children with and without spastic diplegic cerebral palsy. *Gait Posture.* 2019; 67: 85-90.
- 10) Park ES, Park CI, Lee HJ, Kim DY, Lee DS, Cho SR. The characteristics of sit-to-stand transfer in young children with spastic cerebral palsy based on kinematic and kinetic data. *Gait Posture.* 2003; 17: 43-49.
- 11) Yonetsu R, Nitta O, Surya J: "Patternizing" standards of sit-to-stand movements with support in cerebral palsy. *NeuroRehabilitation.* 2009; 25: 289-296.
- 12) Thanapan P, Prasertsukdee S, Vachalathiti R: Comparison of body segmental kinematic characteristics between children with cerebral palsy performing sit-to-stand with and without a walker. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2013; 8: 145-150.
- 13) Dos Santos AN, Pavao SL, Santiago PR, Salvini Tde F, Rocha NA: Sit-to-stand movement in children with hemiplegic cerebral palsy: relationship with knee extensor torque and social participation. *Res Dev Disabil.* 2013; 34: 2023-2032.
- 14) Spittle A: Critically appraised paper: A task-specific sit-to-stand training program for children with cerebral palsy improves mobility and self-care function [synopsis]. *J Physiother.* 2022; 68: 69.
- 15) Chaovalit S, Dodd KJ, Taylor NF: Sit-to-stand training for self-care and mobility in children with cerebral palsy: a randomized controlled trial. *Dev Med Child Neurol.* 2021; 63: 1476-1482.

- 16) Abdolrahmani A, Sakita H, Yonetsu R, Iwata A: Immediate effects of quick trunk movement exercise on sit-to-stand movement in children with spastic cerebral palsy: a pilot study. *J Phys Ther Sci.* 2017; 29: 905-909.
- 17) Liao HF, Liu YC, Liu WY, Lin YT: Effectiveness of loaded sit-to-stand resistance exercise for children with mild spastic diplegia: a randomized clinical trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2007; 88: 25-31.
- 18) Damiano D: Loaded sit-to-stand resistance exercise improves motor function in children with cerebral palsy. *Aust J Physiother.* 2007; 53: 201.
- 19) Taylor NF, Dodd KJ, Larkin H: Adults with cerebral palsy benefit from participating in a strength training programme at a community gymnasium. *Disabil Rehabil.* 2004; 26: 1128-1134.
- 20) Blundell SW, Shepherd RB, Dean CM, Adams RD, Cahill BM: Functional strength training in cerebral palsy: a pilot study of a group circuit training class for children aged 4-8 years. *Clin Rehabil.* 2003; 17: 48-57.
- 21) Pavao SL, de Campos AC, Rocha N: Age-related Changes in Postural Sway During Sit-to-stand in Typical Children and Children with Cerebral Palsy. *J Mot Behav.* 2019; 51: 185-192.
- 22) Pavao SL, Rocha N: Hands Support and Postural Oscillation During Sit-to-Stand Movement in Children With Cerebral Palsy and Typical Children. *J Mot Behav.* 2018; 50: 194-201.
- 23) Pavao SL, Arnoni JLB, Rocha N: Effects of Visual Manipulation in Sit-to-Stand Movement in Children With Cerebral Palsy. *J Mot Behav.* 2018; 50: 486-491.
- 24) Pavao SL, Santos AN, Oliveira AB, Rocha NA: Postural control during sit-to-stand movement and its relationship with upright position in children with hemiplegic spastic cerebral palsy and in typically developing children. *Braz J Phys Ther.* 2015; 19: 18-25.
- 25) Pavao SL, Dos Santos AN, de Oliveira AB, Rocha NA: Functionality level and its relation to postural control during sitting-to-stand movement in children with cerebral palsy. *Res Dev Disabil.* 2014; 35: 506-511.
- 26) Medeiros DL, Conceicao JS, Graciosa MD, Koch DB, Santos MJ, Ries LG: The influence of seat heights and foot placement positions on postural control in children with cerebral palsy during a sit-to-stand task. *Res Dev Disabil.* 2015; 43-44: 1-10.
- 27) Wang YL, Chi WC, Chen CL, Yang CH, Teng YL, Yeung KT: Effects of Hinged versus Floor-Reaction Ankle-Foot Orthoses on Standing Stability and Sit-to-Stand Performance in Children with Spastic Diplegic Cerebral Palsy. *Int J Environ Res Public Health.* 2022; 19.
- 28) Park ES, Park CI, Chang HJ, Choi JE, Lee DS: The effect of hinged ankle-foot orthoses on sit-to-stand transfer in children with spastic cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004; 85: 2053-2057.
- 29) Wilson H, Haideri N, Song K, Telford D: Ankle-foot orthoses for preambulatory children with spastic diplegia. *J Pediatr Orthop.* 1997; 17: 370-376.
- 30) Kusumoto Y, Matsuda T, Fujii K, Miyamoto K, Takaki K, Nitta O: Effects of an underwear-type hip abduction orthosis on sitting balance and sit-to-stand activities in children with spastic cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* 2018; 30: 1301-1304.
- 31) Dos Santos AN, Visicatto LP, de Oliveira AB, Rocha N: Effects of Kinesio taping in rectus femoris activity and sit-to-stand movement in children with unilateral cerebral palsy: placebo-controlled, repeated-measure design. *Disabil Rehabil.* 2019; 41: 2049-2059.
- 32) da Costa CS, Rodrigues FS, Leal FM, Rocha NA: Pilot study: Investigating the effects of Kinesio Taping(R) on functional activities in children with cerebral palsy. *Dev Neurorehabil.* 2013; 16: 121-128.
- 33) Suriyaamarit D, Boonyong S: Comparison of the effects of chair height and anterior seat inclination on sit-to-stand ability in children with spastic diplegic cerebral palsy. *J Biomech.* 2020; 113: 110098.
- 34) Lima CRG, Pavao SL, de Campos AC, Rocha N: Sit-to-stand movement in children with cerebral palsy and relationships with the International classification of functioning, disability and health: A systematic review. *Res Dev Disabil.* 2020; 107: 103804.
- 35) Dos Santos AN, Pena GM, Guilherme EM, Rocha N: Asymmetry in children with unilateral cerebral palsy during sit-to-stand movement: Cross-sectional, repeated-measures and comparative study. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2020; 71: 152-159.
- 36) Lee HY, Lee IH: Comparison of center-of-pressure displacement during sit-to-stand according to chair height in children with cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* 2015; 27: 2299-2301.
- 37) Hennington G, Johnson J, Penrose J, Barr K, McMulkin ML, Vander Linden DW: Effect of bench height on sit-

- to-stand in children without disabilities and children with cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil.* 2004; 85: 70-76.
- 38) Lim HK, Ko J, Lee D, Han DU: Modified desk height helps children with cerebral palsy perform sit-to-stand. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2022; 17: 221-227.
 - 39) Kumban W, Amatachaya S, Emasithi A, Siritaratiwat W: Five-times-sit-to-stand test in children with cerebral palsy: reliability and concurrent validity. *Neuro Rehabilitation.* 2013; 32: 9-15.
 - 40) Kumban W, Amatachaya S, Emasithi A, Siritaratiwat W: Effects of task-specific training on functional ability in children with mild to moderate cerebral palsy. *Dev Neurorehabil.* 2013; 16: 410-417.
 - 41) Begnoche DM, Chiarello LA, Palisano RJ, Gracely EJ, McCoy SW, Orlin MN: Predictors of Independent Walking in Young Children With Cerebral Palsy. *Phys Ther.* 2016; 96: 183-192.
 - 42) Rodby-Bousquet E, Hagglund G: Sitting and standing performance in a total population of children with cerebral palsy: a cross-sectional study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2010; 11: 131.
 - 43) Kuska EC, Mehrabi N, Schwartz MH, Steele KM: Number of synergies impacts sensitivity of gait to weakness and contracture. *J Biomech.* 2022; 134: 111012.
 - 44) Kim Y, Bulea TC, Damiano DL: Greater Reliance on Cerebral Palsy-Specific Muscle Synergies During Gait Relates to Poorer Temporal-Spatial Performance Measures. *Front Physiol.* 2021; 12: 630627.
 - 45) Bekius A, Zandvoort CS, Kerkman JN, van de Pol LA, Vermeulen RJ, Harlaar J, et al: Neuromuscular Control before and after Independent Walking Onset in Children with Cerebral Palsy. *Sensors (Basel).* 2021; 21.
 - 46) Kim Y, Bulea TC, Damiano DL: Children With Cerebral Palsy Have Greater Stride-to-Stride Variability of Muscle Synergies During Gait Than Typically Developing Children: Implications for Motor Control Complexity. *Neurorehabil Neural Repair.* 2018; 32: 834-844.
 - 47) Hashiguchi Y, Ohata K, Osako S, Kitatani R, Aga Y, Masaki M, et al: Number of Synergies Is Dependent on Spasticity and Gait Kinetics in Children With Cerebral Palsy. *Pediatr Phys Ther.* 2018; 30: 34-38.
 - 48) Bekius A, Bach MM, van der Krogt MM, de Vries R, Buizer AI, Dominici N: Muscle Synergies During Walking in Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review. *Front Physiol.* 2020; 11: 632.
 - 49) Steele KM, Rozumalski A, Schwartz MH: Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2015; 57: 1176-1182.
 - 50) Tang L, Li F, Cao S, Zhang X, Wu D, Chen X: Muscle synergy analysis in children with cerebral palsy. *J Neural Eng.* 2015; 12: 046017.
 - 51) Li YA, Chen ZJ, He C, Wei XP, Xia N, Gu MH, et al: Exoskeleton-Assisted Sit-to-Stand Training Improves Lower-Limb Function Through Modifications of Muscle Synergies in Subacute Stroke Survivors. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2023; 31: 3095-3105.
 - 52) Yang N, An Q, Kogami H, Yamakawa H, Tamura Y, Takahashi K, et al: Temporal Features of Muscle Synergies in Sit-to-Stand Motion Reflect the Motor Impairment of Post-Stroke Patients. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2019; 27: 2118-2127.

Abstract

A review of the literature on kinematic characteristics and muscle activity in children with cerebral palsy during sit-to-stand movement

Mamiko Kii, Tadamitsu Matsuda

Juntendo University Graduate school of Health Science

Introduction and Objectives: Although many studies have investigated walking in children with cerebral palsy (CP), few have focused on sit-to-stand (STS) movements in this population. The objectives of the present study were to clarify the kinematic characteristics and muscle activity of STS in children with CP reported in the literature, and consider implications for future physical therapy interventions and research issues for STS in children with CP.

Methods: An exhaustive search of articles about children with CP was conducted using the PubMed database. From articles found, duplicate and articles unrelated to the study aims were excluded. Information regarding STS movements in children with CP was examined.

Results: STS movements in children with CP are characterized by kinematic features and balance ability. It should be possible to improve STS movements through physical therapy intervention and environmental adjustments. Although no literature on muscle synergy in STS movements in children with CP was found, this population showed characteristic muscle synergy during walking, suggesting they may share characteristic muscle synergy in STS movements.

Conclusion: Various characteristics of STS movements in children with CP are described in the literature, suggesting this population shares particular kinematic characteristics and balance ability and that it is possible to improve their STS movements through physical therapy intervention and environmental adjustments. In addition, STS movements of children with CP might be distinguished by their muscle synergy.

Key Words: children with cerebral palsy, rising from a chair, kinematic characteristics, muscle synergy

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 53-64, 2025]

医用画像におけるデータ拡張の基礎と最近の動向

隈本神太郎、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

医用画像を用いた深層学習では、データの水増しを行うことにより過学習の抑制やモデルの堅牢性を高めるデータ拡張の役割が重要になっている。医用画像におけるデータ拡張はその特徴によりいくつかに分類される。現在、医療分野では実装が容易であるという理由から、幾何学的変換やカーネルフィルターといった既存の画像に変換を加える基本的なデータ拡張手法が頻繁に使用されている。これらのデータ拡張手法は医用画像のような複雑な画像には不十分であると考えられており、生成敵対ネットワークや変分オートエンコーダといったディープ生成モデルを用いた新たに画像を生成するデータ拡張手法も提案されている。データ拡張の最近の動向として、拡散モデルやハイブリッドモデルといった新たなディープ生成モデルの使用が増加傾向にあり、その有用性が様々な論文によって報告されている。これらのディープ生成モデルの発展により、将来的にディープ生成モデルを用いたデータ拡張がゴールドスタンダードになることが期待されている。

キーワード：深層学習、データ拡張、拡散モデル、ハイブリッドモデル、ディープ生成モデル

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 65-70頁, 2025年 (受付 2024.6.5.; 受理 2024.7.9.)

1. はじめに

近年、深層学習は医療分野を含む様々な分野で著しく進歩している。しかし、医用画像を用いた深層学習では、データ収集のコスト、プライバシーの規則や倫理的な問題等の課題があり、大量のデータを確保することが困難である。これに起因して、医用画像を用いた深層学習ではたびたび過学習が発生する (図1)。この過学習の対策として、学習データの水増しを行うデータ拡張といった手法が提案され、様々なタスクにおいてその有用性が示されている。

本論説では医用画像に使用されているデータ拡張手法に着目し、それらの種類や特徴、また最近の動向についてレビューすることを目的とした。本論説で使用する略語の一覧を表1に示す。

2. データ拡張の基礎

1) 医用画像におけるデータ拡張技術

データ拡張の手法は様々なものがあり、これらはいくつかの論文で分類が行われている¹⁻³⁾。データ拡張は大きく data warping augmentation と oversampling augmentation の2つに大別される。前者は、既存の画像に変換を加えることでデータの拡張を行う。これには、(1) 幾何学的変換や (2) カーネルフィルター、(3)

random erasing 等の手法が含まれる。一方、後者は人工的に新たに画像を生成することでデータの拡張を行う。これには、(4) mixing images や (5) ディープ生成モデル等の手法が含まれる。また、これらはさらにそれぞれの手法の特徴によっていくつかに細分化される。ここでは、これらのデータ拡張技術のうち医用画像に頻繁に利用されている代表的な手法を抜粋して説明を行う。

(1) 幾何学的変換

画像に幾何学的な変換を施すことでデータを拡張する手法である。代表的な変換法を以下に紹介する。

①反転

水平軸反転と垂直軸反転があり、モデルを画像の方向の変化に対してより堅牢にする目的で使用される。

②ランダムクロッピング

各画像に対して複数回ランダムな切り抜きを繰り返すことができ、モデルは画像全体の特徴やパターンを学習することが可能である。

③回転

モデルの回転や形状に対するロバスト性を高める目的で使用され、医用画像において頻繁に用いられる。

④水平移動

画像をスライドさせ、残りの空間をノイズまたは

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

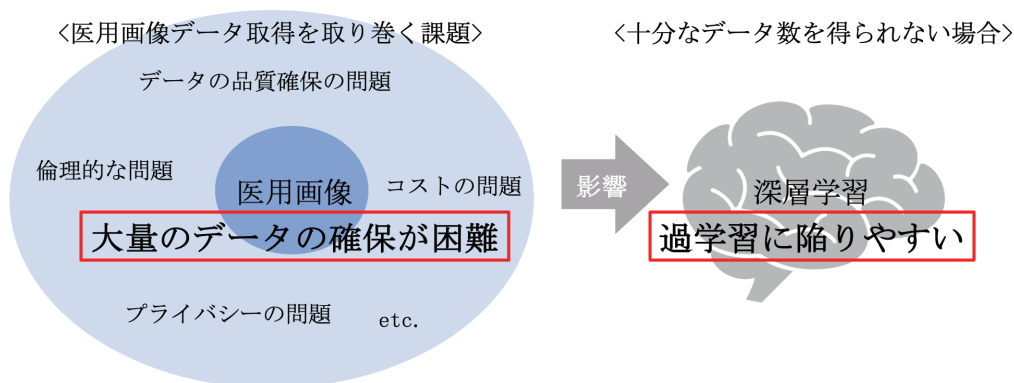


図1 深層学習における医用画像データ取得を取り巻く課題とその影響

表1 略語リスト

| | |
|------------|---|
| ALVAE | Adversarially Learned Variational Autoencoder |
| brainSPADE | brain SPatially-Adaptive DEnormalization |
| CAE-ACGAN | Conditional AutoEncoding, Auxiliary Classifier and Generative Adversarial Network |
| CDDPM | Conditional Denoising Diffusion Probabilistic Model |
| CGAN | Conditional Generative Adversarial Network |
| CLDM | Conditional Latent Diffusion Model |
| CVAE | Conditional Variational AutoEncoder |
| DCGAN | Deep Convolutional Generative Adversarial Network |
| DDIM | Denoising Diffusion Implicit Model |
| DDPM | Denoising Diffusion Probabilistic Model |
| FastDPM | Fast Diffusion Probabilistic Model |
| GAN | Generative Adversarial Network |
| ICVAE | Independently Conditional Variational AutoEncoder |
| LDM | Latent Diffusion Model |
| PAVAE | Progressive Adversarial Variational AutoEncoder |
| RICAP | Random Image Cropping And Patching |
| VAE | Variational AutoEncoder |
| WGAN | Wasserstein Generative Adversarial Network |

0.255といった数値で埋めることで、画像サイズを変化させずにデータの拡張を行う。これにより、モデルは画像の特定の位置に依存しない学習が可能となる。

⑤ノイズ注入

モデルが临床上画像に生じてしまうノイズに対して耐性を持つことが可能となる。適したノイズの種類や強さはモダリティや臨床タスクによって異なっているため、使用には注意が必要である。

(2) カーネルフィルター

画像のフィルタリングは、畳み込みフィルターにより畳み込みを行うことでデータを拡張する。フィルターには画像を鮮明にするアンシャープマスクやラブラシアンフィルター、画像をぼかすガウシアンフィルターやメディアンフィルターなどがある。

(3) Random erasing

画像のランダムに選択されたパッチの輝度値を0もしくは255に変換、もしくは、ごま塩雑音に置き換える手法である。この手法は病理画像でよく用いられる。

(4) Mixing images

画像を混ぜ合わせることで新たな画像を生成し、データの拡張を行う手法である。この手法には Mixup^{4,5)}、CutMix⁶⁾、CarveMix⁷⁾、RICAP⁸⁾ などがあるが、特に使用されているのは Mixup である。Mixup では、画像データだけでなくラベルも同様に混合されるため、モデルはラベル間で共通する特徴や、より抽象的な表現の学習が可能になる。

(5) ディープ生成モデル

深層学習を応用した新たな画像を生成するモデルで

あり、データ拡張としては主に GAN (生成敵対ネットワーク)⁹⁾ や VAE (変分オートエンコーダ)¹⁰⁾、拡散モデル¹¹⁾ ベースのものが使用されている。

GAN は VAE と比較してリアルな画像を生成することができ、ディープ生成モデルのなかで最も一般的なデータ拡張手法である。また、学習の安定性や効率、生成されるデータの質などの様々な問題に対処するため、多くのバリエーションが提案されている。例えば、WGAN¹²⁻¹⁴⁾ や CGAN^{15, 16)} は GAN でたびたび問題となるモード崩壊に対処するために提案されたモデルである。モード崩壊とは GAN が訓練データの分布全体を表現できずに訓練データの最頻値のみを学習してしまい、生成されるデータの多様性が欠如する現象である。WGAN は通常の GAN で使用されている Jensen-Shannon 発散を Wasserstein 距離という損失関数に置き換えたもので、実データと生成データの2つの確率分布間の距離を測り最小化するように学習が行われる。CGAN はジェネレーターの入力に条件変数を加えることで、条件変数に基づいた特定の特徴を持つデータを生成することが可能なモデルである。これらのアプローチによりモード崩壊に対処、もしくは部分的な緩和を可能としている。また、DCGAN^{13, 17)} では、ジェネレーターとディスクリミネーターに畳み込みニューラルネットワークを使用することで、画像データの生成を効率的に行うことが可能となった。Pix2Pix^{18, 19)} では CGAN が基盤となっており、U-Net を用いたジェネレーターと局所的なパッチごとに本物か偽物かを判別するディスクリミネーターを用いることで、よりリアルな対応するペア画像の変換が可能となった。その一方で、CycleGAN^{20, 21)} は2つのジェネレーターとディスクリミネーターで構成されており、サイクル一貫性損失を用いることでペア画像を必要とせず異なるドメイン間の画像変換が可能である。これらの GAN は、データ拡張として様々なモデルやデータセット、タスクに広く適応されている。現在、分類では WGAN や DCGAN が最も一般的であり、セグメンテーションや異なるモダリティ間の画像変換では CGAN や Pix2Pix、CycleGAN が有望視されている。

VAE は出力されるデータの多様性という観点では GAN を上回っているが、生成される画像がボケやすいという欠点がある。そのため、医用画像のデータ拡張においては VAE を使用している研究は比較的少ない。しかし、この欠点に対処するため、CVAE^{14, 22)} や ICVAE²³⁾ などの VAE の改良版、または PAVAE²⁴⁾ や ALVAE²⁵⁾ などのハイブリッドモデルがデータ拡張として使用されている研究がいくつか存在する。CVAE

は入力データと共にラベルや属性といった条件付き変数を与え、その条件に基づいてデータを生成するため、生成データの制御が可能なモデルである。これにより通常の VAE と比較して、ボケの少ないデータを生成することが可能である。しかし、CVAE では入力データと条件付け変数が同じ潜在空間にエンコードされるため、生成されるデータが条件付け変数に過剰に依存し、データの多様性が失われる可能性がある。ICVAE はこの問題に対処するために提案された CVAE の改良版である。ICVAE では入力データと条件付け変数が別々の潜在空間へエンコードされる。これにより、生成されたデータが条件付け変数の影響を受けないため、より多様性のあるデータを生成することが可能である。PAVAE は VAE と GAN の技術を組み合わせたモデルである。この PAVAE では CVAE によってセグメンテーションマスクを生成し、生成されたセグメンテーションマスクを条件として GAN に用いることで、よりリアルな脳病変画像を生成できることが報告されている²⁴⁾。また、GAN と VAE のハイブリッドモデルとして ALVAE も使用されている。ALVAE は、VAE のエンコーダにディスクリミネーターの機能を持たせ、エンコーダが潜在ベクトルを学習するだけでなく、本物と偽物を判別することが可能である。この時、デコーダはジェネレーターの役割を果たしており、エンコーダーとデコーダーが敵対的に動作することで、パラメータ数の大幅な増加を防ぎながら高品質な画像生成が可能となった。これらのアプローチを用いて VAE の問題点が改善されたことにより、医用画像のデータ拡張において VAE は有用な手段の一つとされている。

拡散モデルは、一般的に forward process と、reverse process の2つ過程が存在する。forward process は、元の画像に徐々にノイズを加えていき、reverse process でノイズだらけの画像からノイズを徐々に取り除く。ノイズのある画像から元の画像を復元する際の誤差を最小限に抑えることで学習が行われ、画像が生成される。生成されたデータは非常に高品質で多様であるため、GAN や VAE に変わる生成モデルになると期待されている。

3. 最近の動向

幾何学的変換のような基本的なデータ拡張手法は、医用画像などの複雑な画像を取り扱うには不十分である。この問題を解決するため、リアルで多様なデータを生成するモデルの開発が進んでいる。実際に2017～2022年にかけて、VAE を使用したデータ拡張に関す

る論文数は約81%増加し、拡散モデルを使用したデータ拡張の論文数は2022年から急激に増加している²⁶⁾。ここでは、データ拡張としての使用が増加しているVAEや拡散モデルなどのディープ生成モデルに焦点を当て、これらの最近の動向について述べる。

1) GAN および VAE

近年は複数の生成モデルを組み合わせたハイブリッドモデルをデータ拡張として使用した研究や、GANやVAEの改良版を提案する研究が増加傾向にある。例えば、2021年には異なるモダリティ間の画像変換において、GANとVAEのハイブリッドモデルであるCAE-ACGAN²⁷⁾が提案されている。さらに、2022年にはGAN・VAE・拡散モデルの3つの生成モデルを用いたbrainSPADEと呼ばれるハイブリッドモデルが提案され、脳のセグメンテーションにおいて、モデルの性能が大きく向上したことが報告された²⁸⁾。GANはすでに広く探求され、現在の手法を超えることが困難になりつつある。さらに、拡散モデルの誕生により、近年データ拡張としてGANを用いた論文数は比較的停滞傾向にある²⁶⁾。しかし、2023年にGigaGAN²⁹⁾やStyleGAN-T³⁰⁾といったGANの改良手法が提案され、画像生成において拡散モデルと同等以上の結果を示したことが報告された。このようなGANへの新たなアプローチがデータ拡張手法として応用されていくことで、GANは今後も医用画像におけるデータ拡張手法の一つとして重要な役割を担い続ける可能性がある。

2) 拡散モデル

2015年にSohl-Dickstein¹¹⁾らによって初めて提案され、さらに2020年にはHo³¹⁾らによってDDPMと呼ばれる改良版が提案された近年注目を集めている技術である。2022年にはGANやVAEに比べ、拡散モデルがデータ拡張として最も一般的に使用されたディープ生成モデルとなった²⁶⁾。いくつかあるデータ拡張手法の中でもDDPM^{31, 32)}やLDM^{33, 34)}といった拡散モデルが普及しており、これらの派生系であるCDDPM³⁵⁾やCLDM³⁶⁾といった拡散モデルも使用されている。DDPMは拡散モデルの中で最も代表的なモデルであり、前章で述べた拡散モデルの原理はこのDDPMに基づいている。DDPMの問題点は、画像を直接ピクセル空間で操作するため、学習と推論の際、画像の高次元空間で評価と勾配計算の繰り返しが必要となり、計算量が多くなってしまふ点である。LDMはこの問題に対処するため提案されたモデルである。LDMではオートエンコーダを用いて高次元空間から低次元の

潜在空間へマッピングすることで、潜在空間上で拡散モデルのforward processとreverse processを適用でき、計算コストの削減と高解像度の画像生成が可能となった。CDDPMとCLDMはDDPMとLDMの条件付きバージョンである。さらに、拡散モデルはGANやVAEよりサンプルを生成するまでの時間が長いという欠点がある。最近ではこれらの問題に対処するため、サンプリング時間の短縮が検討されており、FastDPM³⁷⁾やDDIM³⁸⁾を用いた研究が行われている。従来の拡散モデルが、ノイズの付加や除去を離散的なステップにより段階的に行なっていたのに対し、FastDPMでは連続的な時間の中でノイズの負荷や除去をなめらかに進行させる。これによりFastDPMでは、全体的なプロセスを効率化し、ステップ数の削減を行うことでサンプリング時間の短縮を行う。DDIMにおいても同様に、ステップ数の削減によりサンプリング時間の短縮を行うことを目的としている。DDPMがreverse processにおいてランダムにノイズを取り除いていくのに対し、DDIMはそのランダム性を除去し、固定された関数でノイズ除去を行うことで、reverse processの効率化が可能となる。また、brainSPADE²⁸⁾のようにハイブリッドモデルに拡散モデルを用いる研究も行われ始めており、今後よりリアルで高画質なデータを提供することが期待できる。

4. まとめ

本論説では、医用画像に使用されているデータ拡張手法に注目し、それらの種類や特徴、また最近の動向についてまとめた。現在、医療分野で使用されているデータ拡張は、実装が非常に簡単な幾何学的変換が最も多い。しかし、近い将来、よりリアルで高画質な画像を生成できるハイブリッドモデルなどのディープ生成モデルが容易に使用できるように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) Shorten C, Khoshgoftaar TM: A survey on image data augmentation for deep learning. Journal of big data. 2019; 6: 1-48.

- 2) Chlap P, Min H, Vandenberg N, Dowling J, Holloway L, Haworth A: A review of medical image data augmentation techniques for deep learning applications. *J Med Imaging Radiat Oncol.* 2021; 65: 545-563.
- 3) Garcea F, Serra A, Lamberti F, Morra L: Data augmentation for medical imaging: A systematic literature review. *Comput Biol Med.* 2023; 152: 106391
- 4) Zhang H, Cisse M, Dauphin YN, Lopez-Paz D: mixup: Beyond empirical risk minimization. *arXiv* 2017, *arXiv: 1710.09412.*
- 5) Zhao W, Yang J, Ni B, Bi D, Sun Y, Xu M, et al: Toward automatic prediction of EGFR mutation status in pulmonary adenocarcinoma with 3D deep learning. *Cancer Med.* 2019; 8: 3532-3543.
- 6) Hendrycks D, Mu N, Cubuk ED, Zoph B, Gilmer J, Lakshminarayanan B: Augmix: A simple data processing method to improve robustness and uncertainty. *arXiv* 2019, *arXiv:1912.02781.*
- 7) Zhang X, Liu C, Ou N, Zeng X, Zhuo Z, Duan Y, et al: CarveMix: A simple data augmentation method for brain lesion segmentation. *Neuroimage.* 2023; 271: 120041.
- 8) Takahashi R, Matsubara T, Uehara K: Data augmentation using random image cropping and patching for deep CNNs. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology.* 2019; 30: 2917-2931
- 9) Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, et al: Generative adversarial nets. *Advances in neural information processing systems.* 2014: 27.
- 10) Kingma DP, Welling M: Auto-encoding variational bayes. *arXiv* 2013, *arXiv:1312.6114.*
- 11) Sohl-Dickstein J, Weiss E, Maheswaranathan N, Ganguli S: Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics. In *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, PMLR. 2015: 37: 2256-2265.
- 12) Arjovsky M, Chintala S, Bottou L: Wasserstein generative adversarial networks. In *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, PMLR. 2017; 70: 214-223.
- 13) Han C, Hayashi H, Rundo L, Araki R, Shimoda W, Muramatsu S, et al: GAN-based synthetic brain MR image generation. In *Proceedings of the IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging.* 2018: 734-738.
- 14) Zhuang P, Schwing AG, Koyejo O: Fmri data augmentation via synthesis. In *Proceedings of the 2019 IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging.* 2019: 1783-1787.
- 15) Mirza M, Osindero S: Conditional generative adversarial nets. *arXiv* 2014, *arXiv:1411.1784.*
- 16) Guibas JT, Virdi TS, Li PS: Synthetic medical images from dual generative adversarial networks. *arXiv* 2017, *arXiv:1709.01872.*
- 17) Radford A, Metz L, Chintala S: Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. *arXiv* 2015, *arXiv:1511.06434.*
- 18) Isola P, Zhu JY, Zhou T, Efros AA: Image-to-image translation with conditional adversarial networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition.* 2017: 1125-1134.
- 19) Nie D, Trullo R, Lian J, Wang L, Petitjean C, Ruan S, et al: Medical image synthesis with deep convolutional adversarial networks. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2018: 65: 2720-2730.
- 20) Zhu JY, Park T, Isola P, Efros AA: Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision.* 2017: 2223-2232.
- 21) Chatsias A, Joyce T, Dharmakumar R, Tsaftaris SA: Adversarial image synthesis for unpaired multi-modal cardiac data. In *Proceedings of the International Workshop on Simulation and Synthesis in Medical Imaging.* 2017: 3-13.
- 22) Sohn K, Lee H, Yan X: Learning structured output representation using deep conditional generative models. In *Proceedings of the 28th International Conference on Neural Information Processing Systems.* 2015.
- 23) Pesteie M, Abolmaesumi P, Rohling RN: Adaptive Augmentation of Medical Data Using Independently Conditional Variational Auto-Encoders. *IEEE Trans Med Imaging.* 2019; 38: 2807-2820.
- 24) Huo J, Vakharia V, Wu C, Sharan A, Ko A, Ourselin S, et al: Brain lesion synthesis via progressive adversarial variational auto-encoder. In *Proceedings of the International Workshop on Simulation and Synthesis in Medical Imaging.* 2022: 101-111.
- 25) Gan M, Wang C: Esophageal optical coherence tomography image synthesis using an adversarially learned variational autoencoder. *Biomed Opt Express.*

- 2022: 13: 1188-1201.
- 26) Kebaili A, Lapuyade-Lahorgue J, Ruan S: Deep Learning Approaches for Data Augmentation in Medical Imaging: A Review. *J Imaging*. 2023; 9: 81.
- 27) Yang H, Lu X, Wang SH, Lu Z, Yao J, Jiang Y, et al: Synthesizing multi-contrast MR images via novel 3D conditional Variational auto-encoding GAN. *Mobile Networks and Applications*. 2021; 26: 415-424.
- 28) Fernandez V, Pinaya WHL, Borges P, Tudosiu PD, Graham MS, Vercauteren T, et al: Can segmentation models be trained with fully synthetically generated data?. In *Proceedings of the International Workshop on Simulation and Synthesis in Medical Imaging*. 2022: 79-90.
- 29) Kang M, Zhu JY, Zhang R, Park J, Shechtman E, Paris S, et al: Scaling up gans for text-to-image synthesis. *arXiv 2023*, arXiv:2303.05511.
- 30) Sauer A, Karras T, Laine S, Geiger A, Aila T: Stylegan-t: Unlocking the power of gans for fast large-scale text-to-image synthesis. *arXiv 2023*, arXiv:2301.09515.
- 31) Ho J, Jain A, Abbeel P: Denoising diffusion probabilistic models. *Advances in neural information processing systems*. 2020; 33: 6840-6851.
- 32) Dorjsembe Z, Odonchimed S, Xiao F: Three-dimensional medical image synthesis with denoising diffusion probabilistic models. In *Proceedings of the Medical Imaging with Deep Learning*. 2022: 1-3.
- 33) Rombach R, Blattmann A, Lorenz D, Esser P, Ommer B: High-resolution image synthesis with latent diffusion models. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2022: 10684-10695
- 34) Weber T, Ingrisch M, Bischl, Rugamer D: Cascaded Latent Diffusion Models for High-Resolution Chest X-ray Synthesis. *arXiv 2023*, arXiv:2303.11224.
- 35) Lyu Q, Wang G: Conversion between CT and MRI images using diffusion and score-matching models. *arXiv 2022*, arXiv:2209.12104.
- 36) Pinaya WH, Tudosiu PD, Dafflon J, Da Costa PF, Fernandez V, Nachev P, et al: Brain imaging generation with latent diffusion models. In *Proceedings of the MICCAI Workshop on Deep Generative Models*. 2022: 117-126.
- 37) Kong Z, Ping W: On fast sampling of diffusion probabilistic models. *arXiv 2021*, arXiv:2106.00132.
- 38) Song J, Meng C, Ermon S: Denoising diffusion implicit models. *arXiv 2020* arXiv:2010.02502.

Abstract

Fundamentals and recent trends in data augmentation for medical imaging

Jintaro Kumamoto, Masami Goto

Department of Diagnostic Radiology, Graduate School of Health Science, Juntendo University

In deep learning using medical imaging, data augmentation plays a crucial role in preventing overfitting and enhancing model robustness through data enrichment. Data augmentation in medical imaging can be categorized based on its characteristics. Currently in the medical field, basic data augmentation methods that involve transformations on existing images, such as geometric transformations and kernel filters, are frequently used due to their ease of implementation. These methods are often considered insufficient for complex images like medical imaging, leading to proposals for new data augmentation techniques that generate new images using deep generative models such as GANs and VAEs. Recent trends in data augmentation include the increasing use of novel deep generative models such as diffusion models and hybrid models, whose utility has been reported in various studies. With the advancement of these deep generative models, it is anticipated that their use in data augmentation may become the gold standard in the future.

Key Words: deep learning, data augmentation, diffusion models, hybrid models, deep generative models

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 65-70, 2025]

シェーグレン症候群の診断における MRI

小泉 達也^{1,2)}、後藤 政実²⁾¹⁾ 順天堂大学保健医療学研究科診療放射線学専攻²⁾ 順天堂大学医学部附属順天堂医院放射線部

要 旨

本邦のシェーグレン症候群 (Sjögren's syndrome: SS) における診断基準には X-ray sialography と唾液腺シンチグラフィが該当しているが、侵襲性などの問題から欧米の診断基準からは除外されている。そこで本論説では近年注目されている侵襲性の少ない magnetic resonance imaging (MRI) における診断法である MR sialography と MR 構造画像 (T1強調画像、T2強調画像) について概説し、診断基準に用いられている検査法との比較を行い、その特徴をまとめる。MR sialography は、診断基準に用いられている他の検査と相関があり、SS の診断指標として使用できるものの、ステージの低い軽症症例に関しては過小評価される場合があり、X-ray sialography や唾液腺シンチグラフィと比べると感度はやや劣るが、特異度は高い検査法である。唾液腺実質の脂肪変性に着目した MR 構造画像による評価は、耳下腺よりも顎下腺を対象とすることで、他の検査では評価が難しかった加齢の影響を軽減しながら唾液量の低下を評価することができ、さらに SS による形態的变化を高い特異度で拾い上げる有効な手法である。

キーワード: MR sialography、Sjögren's syndrome、MR 構造画像、唾液腺シンチグラフィ、X-ray sialography

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 71-76頁, 2025年 (受付 2024.12.24.; 受理 2025.1.22.)

1. はじめに

シェーグレン症候群 (Sjögren's syndrome: SS) は、2015年に指定難病に加わり、診断基準と重症度分類を満たす場合は医療費助成の対象となった。

本邦では1999年に診断基準が制定され、生検病理検査、口腔検査、眼科検査、血清検査のいずれか2項目が陽性であれば SS と診断する。

欧米では2016年に米国リウマチ学会 (American College of Rheumatology: ACR) とヨーロッパリウマチ連盟 (European League Against Rheumatism: EULAR) による新分類基準¹⁾ が発表されたが、本邦の診断基準とは異なり、口腔検査である唾液腺造影検査と唾液腺シンチグラフィが除外された。その要因の一つに、どちらも被ばくを伴う侵襲的な検査であることが指摘されており^{2,3)}、近年では放射線を用いない magnetic resonance imaging (MRI) による診断が注目されている。本稿では MRI を用いた SS の診断法について概説し、診断基準に用いられている検査法との比較を行い、その特徴をまとめる。

2. MRI による診断法

MRI における SS の診断には、X-ray sialography を

モデルとした MR sialography による評価法と MR 構造画像 (T1強調画像、T2強調画像) による評価法が主に用いられている (表1)。

1) MR sialography による評価法

MR sialography は magnetic resonance cholangiopancreatography (MRCP)^{4,5)} に代表される、水成分を強く強調した hydrography の一種である。この Hydrography は当初2D の30mm-40mm の厚いスライスで1枚のみ撮像する方法が報告され^{6,7)}、その後、2mm の薄い2D スライスを複数枚撮像する方法^{8,9)}、さらに3D で撮像する方法^{10,11)} が報告された。2D スライスではスライス方向の空間分解能が低く^{8,9)}、maximum intensity projection (MIP) した際の画質の低下が観察されるため¹²⁾、近年では SS におけるステージ1以上の異常所見 (高信号スポット) を検出する感度は3D 収集が最も優れている (3D: 78.6%、2D: 40.8%、 $p < 0.001$) とも報告されている¹³⁾。

André ら¹⁴⁾ は、3D MR sialography と MR 構造画像を合わせた評価が SS の耳下腺の特徴的な嚢胞拡張と導管異常を高い感度で検出でき (97%)、血清検査 (81%) や超音波検査 (73%)、口唇生検 (50%) よりも敏感であると報告した。口唇生検との大きな差の要因は、口

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

〒113-0034 東京都文京区湯島1-5-32

E-mail: m.goto.ql@juntendo.ac.jp

表 1 各検査法の特徴と利点、欠点

| 検査法 | 特徴 | 利点 | 欠点 |
|-------------------|---|--|--|
| X-ray sialography | <ul style="list-style-type: none"> ・耳下腺管を造影剤の外的な圧力をかけて管構造を可視化 ・apple tree 像を評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・軽度の管系異常も検出可能 ・高い空間分解能 | <ul style="list-style-type: none"> ・被ばくがある ・侵襲性が高い ・ヨードアレルギーでは不可 |
| 唾液腺シンチグラフィ | <ul style="list-style-type: none"> ・放射性同意元素を用いて唾液腺の機能を評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・唾液量の低下を評価可能 ・耳下腺と顎下腺を同時に評価できる | <ul style="list-style-type: none"> ・被ばくがある ・特異度が低い |
| MR sialography | <ul style="list-style-type: none"> ・MR hydrography にて水成分を強調し管構造を可視化 ・2D より 3D 収集の方が高感度 ・X-ray sialography と同様に評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・被ばくがない ・シンチグラフィよりも高い特異度 ・SS に関連する他の検査と相関あり | <ul style="list-style-type: none"> ・軽症症例では X-ray sialography よりも感度が低い |
| MR 構造画像 (耳下腺) | <ul style="list-style-type: none"> ・T1、T2 強調画像にて唾液腺の実質を評価 ・不均一な信号分布 (salt and pepper 像) からグレーディング | <ul style="list-style-type: none"> ・被ばくがない ・後期病変のびまん性脂肪浸潤に敏感 | <ul style="list-style-type: none"> ・脂肪変性は加齢により正常患者でも起こる ・MR sialography や顎下腺構造画像よりも感度が低い |
| MR 構造画像 (顎下腺) | <ul style="list-style-type: none"> ・T1、T2 強調画像にて唾液腺の実質を評価 ・体積の減少から機能低下を評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・被ばくがない ・加齢の影響を受けにくい ・唾液量の低下と相関 ・耳下腺よりも早期に機能低下を評価できる ・耳下腺、舌下腺よりも特異度が高い | <ul style="list-style-type: none"> ・組織病理所見との詳細な関連性はまだ検討されていない |

唇生検では高齢者で偽陽性が出やすいこと¹⁵⁾ や検体の数と質、オペレータの影響を受けやすいことであるとした。Swiecka ら²⁾ は、MR sialography が SS の進行を正確に反映している可能性があり、SS の診断指標として使用できるとしている。

武田ら⁹⁾ は、2D スライスで MIP した耳下腺 MR sialography を Rubin と Holt¹⁶⁾ の方法でステージ分類し、以下のように他の検査法との相関関係を報告した：耳下腺 X-ray sialography ($\rho=0.916$)、唾液腺シンチグラフィ ($\rho=0.610$)、口唇生検 ($\rho=0.726$)、抗 Ro/SS-A 抗体検査 ($\rho=0.672$)、抗 La/SS-B 抗体検査 ($\rho=0.293$)、ガムテスト ($\rho=-0.460$)、サクソソテスト ($\rho=-0.440$)、シルマーテスト ($\rho=-0.335$)。X-ray sialography との相関関係が観察されたものの感度は若干低く (X-ray sialography: 85.4%、MR sialography: 80.6%)、X-ray sialography で Stage 1 だった症例が MR sialography では Stage 0 となるのが数例見受けられた。この原因として、耳下腺管狭窄や腺房の萎縮が生じると、腺腔内の液体成分が減少するため、液体成分を信号として捉えている MR sialography では、わずかに感度が下がった可能性があると考えられている。Tomita ら¹⁷⁾ の検討においても、MR sialography と X-ray sialography との相関は示されたが ($p=0.005$, $r=0.85$)、X-ray sialography では軽度損傷を示すステージ1またはステージ2の症例が、MR sialography ではステージ0またはステージ1と評価された。この原因としては、自然な状態で撮像される MR sialography に対して、X-ray sialography では造影剤の外的な圧力により導管が拡張

されることや^{6, 18)}、空間分解能が高いことが影響し、全体的な感度は MR sialography の方が低くなると考察している。Kojima ら¹⁹⁾ は、耳下腺3D MR sialography と MR 構造画像を比較し、MR sialography を用いた高信号スポットの検出が SS の診断に対して高い感度と精度があることを報告したが (MR sialography: 感度 82%、精度 83%、MR 構造画像 (耳下腺) : 感度 54.8%、精度 70.0%、MR 構造画像 (顎下腺) : 感度 81.0%、精度 68.0%)、別の論文にて MR sialography のステージと排出される唾液量に相関は得られなかったと報告している²⁰⁾。また、武田ら⁹⁾ の報告では、シンチグラフィでは軽度、中程度機能低下であった症例が、MR sialography ではステージ0となるのが度々見られ、その原因は SS の初期変化が耳下腺よりも顎下腺から始まる傾向があるためと考察している。Tonami ら²²⁾ は、シンチグラフィは MR sialography よりも感度が高いが、特異度が低く (感度 86% 対 73% ; $p<0.05$ 、特異度 50% 対 100% ; $p<0.0001$)、全体的な診断精度は MR sialography の方が高いと報告している (シンチグラフィ : 72%、MR sialography: 83% ; $p<0.05$)。

sialography では耳下腺を対象とすることが一般的である。これまで顎下腺管を対象にした sialography も行われているが⁷⁾、混合腺であることなどが影響して apple tree 像が観察されにくいこと、Rubin と Holt¹⁶⁾ の病期分類と一致しないことを理由とし、耳下腺管を対象とするのが適当とされている²³⁾。

これらの報告から、MR sialography はその他の検査と相関があり、SS の診断指標として使用できるもの

の、ステージの低い軽症症例に関しては過小評価される場合もあり、X-ray sialography や唾液腺シンチグラフィと比べると感度はやや劣る。しかし、シンチグラフィよりも特異度が高く、診断精度が高い検査である。

2) MR 構造画像による評価法

SS における唾液腺の変性に着目し、T1強調画像や T2強調画像にて信号変化を評価する方法である。特徴的な画像所見としては、不均一な信号分布を示す“salt and pepper 像”がある^{24,25)}。Izumi ら²⁴⁾ は、T1強調画像と T2強調画像の耳下腺実質に region of interest (ROI) を設定し、SS 患者とボランティアにおける ROI 内信号値の standard deviation (SD) を比較すると、SS では有意に高く ($p < 0.001$ 、SS : 27.8 ± 7.8 、正常 : 12.1 ± 2.9)、X-ray sialography や口唇生検の結果と相関があったと報告した ($r = 0.936$ 、 $r = 0.834$)。また、別の論文において、唾液量との相関も報告し、この実質の信号変化が脂肪変性による影響であることを CT や生検病理の結果から結論づけている²⁶⁾。T1強調画像は脂肪変性に敏感であるが、T2強調画像に脂肪抑制を入れたシーケンスと合わせることでグレーディングがより正確になると言われている^{8,27)}。

Ren ら²⁷⁾ は、MR sialography と耳下腺の MR 構造画像を比較し、管系と実質の病的進行が並行しないことに起因する耳下腺脂肪変性のステージと MR sialography のステージとの不一致を明らかにし ($Kappa = 0.241$)、MR sialography では初期病変の耳下腺管の拡張に敏感である可能性が高く、MR 構造画像は後期病変のびまん性脂肪浸潤に対してより敏感であると結論づけた。Makula ら²⁸⁾ は、7人の SS 患者のうち半数以上で、生検によるグレードが MR 構造画像のグレードよりも高いことを報告し、この相違の原因は、MR 構造画像で検出される構造変化のレベルと生検 (顕微鏡) でのそのレベルの違いにあると考察した。

耳下腺の脂肪変性は加齢により正常患者でも起こると言われており³⁾、近年では耳下腺よりも年齢の影響を受けにくいとされる^{29,30)} 顎下腺実質に着目した研究が報告されている。Kojima ら¹⁹⁾ は、SS における実質の不均一な信号分布の検出は耳下腺や舌下腺よりも顎下腺で特異度が高いことを示した (耳下腺75%、舌下腺83%、顎下腺88%)。また、別の論文で、不均一な信号分布グレードと唾液量の関係における receiver operating characteristic (ROC) 曲線の area under the curve (AUC) は耳下腺よりも顎下腺で有意に高く (酸刺激後耳下腺 : AUC 0.786、刺激後顎下腺 : AUC 0.898、 $p = 0.05$)、さらに唾液腺実質体積の減少と唾液量の低

下にも相関があり (刺激後耳下腺 : $p = 0.32$ 、刺激後顎下腺 : $p = 0.57$)、顎下腺の不均一な信号分布と体積の減少は耳下腺よりも唾液量と密接に関連していると報告した²⁰⁾。Cho ら³¹⁾ の報告でも、SS 患者における顎下腺の脂肪変性は SS-A 抗体と強い相関が見られたが ($p < 0.01$)、耳下腺の脂肪変性には相関がなかったとしている ($p = 0.10$)。唾液腺シンチグラフィで SS 患者の唾液腺機能に焦点を当てた報告でも^{22,32)}、耳下腺よりも顎下腺の障害が大きいことが示されており、SS では耳下腺よりも先に顎下腺の機能が損なわれると考えられている^{20,33,34)}。そのほかには、耳下腺で見られた“salt and pepper 像”は顎下腺では現れにくく、萎縮が特異的な所見とも報告されている¹⁴⁾。

SS の診断ガイドラインに含まれる他の検査にも加齢が影響するものがあり、涙腺機能を診るシルマーテストは、60歳以上では信頼できる検査法ではないと考えられている。60歳以上の約1/3はドライアイの症状を持っており、原因は生理学的な腺萎縮のためと言われている³⁵⁾。また、病理検査である口唇生検は、侵襲性があるうえに高齢者では偽陽性が見られるため、感度に幅があると言われている (感度 : 65.3%-93.7%)¹⁵⁾。さらに、口唇生検では大唾液生検よりも病期を過小評価する傾向があり (1focus 以上のリンパ球浸潤頻度 : 顎下腺 78.2%、口唇腺 53.3%)、軽症であれば顎下腺生検の方が良いと報告されている²³⁾。しかし、大唾液生検は口唇生検よりも侵襲性が高く、技術も要するため、あまり用いられていないのが現状である。

これらの報告から、MR 構造画像による評価は、顎下腺を対象とすることで、加齢の影響を軽減しながら唾液量の低下を評価することができ、さらに SS による形態的变化を高い特異度で拾い上げる有効な手法であると考えられる。しかし、リンパ球浸潤、繊維化、脂肪変性の領域など、MRI 所見と組織病理所見の詳細な関連性はまだ検討されていない点³⁾ に注意する必要がある。

3. 結論

耳下腺 MR sialography による評価は、早期病変検出に課題があるものの、他の検査とも相関があり、SS に対する低侵襲な検査として有効な方法である。MR 構造画像による評価は、顎下腺を対象とすることで唾液量と相関し、萎縮の形態的变化を捉えることで SS の診断に有効な方法となる。また、加齢の影響により評価が難しかった患者にも効果的な手法である。管系評価に適している MR sialography と実質系評価に適している MR 構造画像を組み合わせて、異なる情報を

得ることにより、SS の評価精度を向上させることが重要である。

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) Shiboski CH, Shiboski SC, Seror R, Criswell LA, Labetoulle M, Lietman TM, et al: 2016 American college of rheumatology/European league against rheumatism classification criteria for primary Sjögren's syndrome: a consensus and data-driven methodology involving three international patient cohorts. *Arthritis Rheumatol.* 2017; 69: 35-45.
- 2) Swiecka M, Maślińska M, Paluch L, Zakrzewski J, Kwiatkowska B: Imaging methods in primary Sjögren's syndrome as potential tools of disease diagnostics and monitoring. *Reumatologia.* 2019; 57: 336-342.
- 3) van Ginkel MS, Glaudemans AWJM, van der Vegt B, Mossel E, Kroese FGM, Bootsma H, et al: Imaging in primary Sjögren's syndrome. *J Clin Med.* 2020; 9: 2492.
- 4) Wallner BK, Schumacher KA, Weidenmaier W, Friedrich JM: Dilated biliary tract: evaluation with MR cholangiography with a T2-weighted contrast-enhanced fast sequence. *Radiology.* 1991; 181: 805-808.
- 5) Fulcher AS, Turner MA, Capps GW, Zfass AM, Baker KM: Half-fourier RARE MR cholangiopancreatography: experience in 300 subjects. *Radiology.* 1998; 207: 21-32.
- 6) Lomas DJ, Carroll NR, Johnson G, Antoun NM, Freer CEL: MR sialography: work in progress. *Radiology.* 1996; 200: 129-133.
- 7) Erdoğan NK, Altay C, Özenler N, Bozkurt T, Uluç E, Mete BD, Özdemir I: Magnetic resonance sialography findings of submandibular ducts imaging. *Biomed Res Int.* 2013; 2013: 417052.
- 8) Tonami H, Ogawa Y, Matoba M, Kuginuki Y, Yokota H, Higashi K, et al: MR sialography in patients with Sjögren's syndrome. *Am J Neuroradiol.* 1998; 19: 1199-1203.
- 9) 武田真由美, 藤林孝司, 岡崎真大, 澁澤富喜子, 後藤聡, 渡邊八州郎: Sjögren 症候群の診断における MR-sialography – 他検査との比較検討 –. *日口粘膜.* 2003; 9: 56~64.
- 10) Becker M, Marchal F, Becker CD: Sialolithiasis and salivary ductal stenosis: diagnostic accuracy of MR sialography with a three-dimensional extended-phase conjugate-symmetry rapid spin-echo sequence. *Radiology.* 2000; 217: 347-358.
- 11) Ogura I, Sasaki Y, Oda T, Sue M, Hayama K: Magnetic resonance sialography and salivary gland scintigraphy of parotid glands in Sjögren's syndrome. *Chin J Dent Res.* 2018; 21: 63-68.
- 12) Bret PM, Reinhold C, Taourel P, Guibaud L, Atri M, Barkun AN: Pancreas divisum: evaluation with MR cholangiopancreatography. *Radiology.* 1996; 199: 99-103.
- 13) Shimada Y, Kojima I, Iikubo M: Comparative study of multiple high-signal-intensity spots on 3D and 2D magnetic resonance sialography for patients with Sjögren's syndrome. *Radiol Res Pract.* 2021; 2021: 5846637.
- 14) André R, Becker M, Lombardi T, Buchholzer S, Marchal F, Seebach JD: Comparison of clinical characteristics and magnetic resonance imaging of salivary glands with magnetic resonance sialography in Sjögren's syndrome. *Laryngoscope.* 2021; 131: E83-E89.
- 15) Guellec D, Cornec D, Jousse-Joulin S, Marthadour T, Marcorelles P, Pers JO, et al: Diagnostic value of labial minor salivary gland biopsy for Sjögren's syndrome: a systematic review. *Autoimmun Rev.* 2013; 12: 416-420.
- 16) Rubin P, Holt JF. Secretory sialography in diseases of the major salivary glands: *Am J Roentgenol Radium Ther Nucl Med.* 1957; 77: 575-598.
- 17) Tomiita M, Ueda T, Nagata H, Tanabe E, Shimojo N, Saito K, et al: Usefulness of magnetic resonance sialography in patients with juvenile Sjögren's syndrome. *Clin Exp Rheumatol.* 2005; 23: 540-544
- 18) Ohbayashi N, Yamada I, Yoshino N, Sasaki T: Sjögren's syndrome: comparison of assessments with MR sialography and conventional sialography. *Radiology.* 1998; 209: 683-688
- 19) Kojima I, Sakamoto M, Iikubo M, Kumamoto H, Muroi A, Sugawara Y, et al: Diagnostic performance of MR imaging of three major salivary glands for Sjögren's syndrome. *Oral Dis.* 2017; 23: 84-90.
- 20) Kojima I, Sakamoto M, Iikubo M, Shimada Y, Nishioka T, Sasano T: Relationship of MR imaging of subman-

- dibular glands to hyposalivation in Sjögren's syndrome. *Oral Dis.* 2019; 25: 117-125.
- 21) Niemela RK, Paakko E, Suramo I, Takalo R, Hakala M: Magnetic resonance imaging and magnetic resonance sialography of parotid glands in primary Sjögren's syndrome. *Arthritis Rheum*, 2001; 45: 512-518.
- 22) Tonami H, Higashi K, Matoba M, Yokota H, Yamamoto I, Sugai, S: A comparative study between MR sialography and salivary gland scintigraphy in the diagnosis of Sjögren's syndrome. *J Comput Assist Tomogr*, 2001; 25: 262-268.
- 23) 田中治 : Sjögren 症候群における診断および成因に関する臨床的研究 – 第1編唾液腺造影と唾液腺病理組織像の関係について –. *日耳鼻*. 1989; 92: 362~373.
- 24) Izumi M, Eguchi K, Ohki M, Uetani M, Hayashi K, Kita M, et al: MR imaging of the parotid gland in Sjögren's syndrome: a proposal for new diagnostic criteria. *AJR Am J Roentgenol.* 1996; 166: 1483-1487.
- 25) Vogl TJ, Dresel SH, Grevers G, Spath M, Bergman C, Balzer J, et al: Sjögren's syndrome: MR imaging of the parotid gland. *Eur Radiol.* 1996; 6: 46-51.
- 26) Izumi M, Eguchi K, Nakamura H, Nagataki S, Nakamura T: Premature fat deposition in the salivary glands associated with Sjögren syndrome: MR and CT evidence. *AJNR Am J Neuroradiol.* 1997; 18: 951-958.
- 27) Ren YD, Li XR, Zhang J, Long LL, Li WX, Han YQ: Conventional MRI techniques combined with MR sialography on T2-3D-DRIVE in Sjögren syndrome. *Int J Clin Exp Med.* 2015; 8: 3974-3982.
- 28) Makula E, Pokorny G, Kiss M, Voros E, Kovacs L, Kovacs A, et al: The place of magnetic resonance and ultrasonographic examinations of the parotid gland in the diagnosis and follow-up of primary Sjögren's syndrome. *Rheumatology.* 2000; 39: 97-104.
- 29) Sumi M, Izumi M, Yonetsu K, Nakamura T: Sublingual gland: MR features of normal and diseased states. *AJR Am J Roentgenol.* 1999; 172: 717-722.
- 30) 老木浩之, 山本悦生, 村田清高 : 加齢による唾液分泌能の変化. *日咽科*. 1995; 7: 139~144.
- 31) Cho A, Lee YR, Jeon YT, Chang SH, Park YM, Ahn SJ, et al: Correlations of MR sialographic gradings with the clinical measures of Sjögren's syndrome. *Laryngoscope.* 2023; 133: 307-316.
- 32) Aksoy T, Kiratli PO, Erbas B: Correlations between histopathologic and scintigraphic parameters of salivary glands in patients with Sjögren's syndrome. *Clin Rheumatol.* 2012; 31: 1365-1370.
- 33) Pijpe J, Kalk WWI, Bootsma H, Spijkervet FKL, Kallenberg CGM, Vissink A: Progression of salivary gland dysfunction in patients with Sjögren's syndrome. *Ann Rheum Dis.* 2007; 66: 107-112.
- 34) Atkinson JC, Travis WD, Pillemer SR, Bermudez D, Wolff A, Fox PC: Major salivary gland function in primary Sjögren's syndrome and its relationship to clinical features. *J Rheumatol.* 1990; 17: 318-322.
- 35) Witte T: Pathogenese und diagnostik des Sjögren-syndroms. *Z Rheumatol.* 2010; 69: 50-56.

Abstract

Magnetic resonance imaging for the diagnosis of Sjögren's syndrome

Koizumi Tatsuya^{1,2)}, Goto Masami¹⁾

¹⁾ Department of Diagnostic Radiology, Graduate School of Health Science, Juntendo University

²⁾ Department of Radiology, Juntendo University Hospital

The Japanese diagnostic criteria for Sjögren's syndrome (SS) include X-ray sialography and salivary gland scintigraphy. However, these modalities have been excluded from the diagnostic criteria in Europe and the United States due to concerns regarding their invasiveness. This review focuses on magnetic resonance imaging (MRI), a less invasive diagnostic method that has gained significant attention in recent years. We compare MRI with the examination methods outlined in the diagnostic criteria and summarize its key features. MR sialography correlates well with other examinations used in the diagnostic criteria for SS and can serve as a diagnostic indicator. However, it may underestimate findings in low-stage or mild cases. While it demonstrates high specificity, its sensitivity is somewhat lower compared to X-ray sialography and salivary gland scintigraphy. Evaluation using MR structural images (T1-weighted images, T2-weighted images) focusing on fatty degeneration of the salivary gland parenchyma can evaluate the decrease in salivary volume while reducing the effects of aging, which is difficult to evaluate with other examinations, by targeting the submandibular gland rather than the parotid gland. Additionally, it is an effective method for detecting morphological changes caused by SS with a high degree of specificity.

Key Words: MR sialography, Sjögren's syndrome, MR structural image, salivary gland scintigraphy, X-ray sialography

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 71-76, 2025]

小児がんの陽子線治療の現状

前原 栄一、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

小児がん治療の選択肢として、近年は陽子線治療が有効的な治療法として注目されている。従来のX線治療とは異なり、侵襲性が少なく、成長障害や二次発がんのリスクを最小限にすることができるためである。これは陽子線がX線と異なる物理学的性質であるブラッグピークを有し、ビーム入射表面の線量は低く保ちながら、特定の深さ（領域）に限定して高線量を投与することができるためである。また、生物学的効果はX線と同等であり、従来までの経験を活かすことができる。小児の陽子線治療は近年保険適応となり、また国の施策として、小児がん患者が適切な医療を受けられる体制を充実させることが推進されている。また、小児が安心して陽子線治療を受けられるように他職種の医療従事者が協力し、プレパレーションを実施している。プレパレーションを実施することで鎮静を行わずに治療を実施できる可能性があり、さらに侵襲性を低くして治療を行うことが小児の負担軽減につながっている。技術の進歩が進む中、陽子線治療は小児がん治療における重要な選択肢として、今後ますます活用されることが期待されている。

キーワード：陽子線治療、小児がん、プレパレーション

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 77-82頁, 2025年(受付 2025.1.16.; 受理 2025.2.18.)

緒 言

国際的ながん統計によると、2022年の世界のがんの罹患数は約2000万人、死亡数は約970万人と推定されている¹⁾。一方、日本におけるがんの罹患数と死亡数は約103万人と約38万人と推定されている。この罹患数および死亡数の中には小児も含まれており、毎年2000～2300人ほどが小児がんとして診断され、200～230人ほどが小児がんにより亡くなっている^{2,3)}。小児がん治療の選択肢として外科的治療、化学療法、放射線治療、免疫療法、分子標的療法が挙げられるが⁴⁾、近年は陽子線治療が小児がんの有効的な治療法として注目されてきている。小児の放射線治療では、将来的な成長障害や二次発がん、生殖機能不全が問題となるため⁵⁾、正常組織への線量を減らし、腫瘍部位に高線量を照射することのできる陽子線治療が推奨され始め、2016年4月より成人のがんに先行して小児がんの陽子線治療の保健収載が認められた⁶⁾。また、2023年3月に閣議決定された第4期がん対策推進基本計画において、小児がん患者が適切な医療を受けられる体制を充実させることが推進されている⁷⁾。そこで本稿では、X線と陽子線の違いを含めた陽子線治療の特徴、小児がんの陽子線治療の臨床例や最新の技術、保険収載の

問題点、陽子線治療を受ける小児の心理的ケアについて概説する。

1. 陽子線治療の特徴

1) 物理学的特性

陽子線は生体内を直線状に移動し、その過程で生体を構成する原子と相互作用を起こしながら、徐々にエネルギーを失っていく。エネルギー減衰が進むにつれ、陽子は最終的に全てのエネルギーを失い停止する。このエネルギーの損失は、*bethe-bloch* の方程式で示すことができる⁸⁾。式(1)に *bethe-bloch* の方程式を示す。

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z_1^2}{mv^2} N Z_2 \left\{ \ln \frac{2mv^2}{I} + \ln \frac{1}{1-\beta^2} - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} + \phi + Z_1 L_1 \right\} \quad (1)$$

ここで、 e は電気素量、 m は電子の質量、 Z_1 および v は入射粒子の原子番号および速さ、 Z_2 は阻止物質の原子番号、 N は 1cm^3 中の阻止物質の原子数、 I は阻止物質の平均励起ポテンシャル、 β は v/c (c は光の速さ)、 C/Z_2 は内殻補正項、 ϕ は Bloch の補正項を示している。

式(1)は1単位距離あたりの平均エネルギー損失を示し、この式より陽子の速度が低下するとエネルギー損失は増加することがわかる。この作用により陽子が体内を移動する飛程末端部で急激なエネルギー損失が発生する。これがブラッグピークが発生する理由である。

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

この性質により、陽子線治療は従来の X 線治療とは異なり、ビーム入射表面の線量を減らし、体内の一定の領域のみに限局して照射することが可能となる^{9,10)}。

2) 生物学的特性

陽子線は線エネルギー付与 (linear energy transfer: LET) が X 線と近いことから低 LET 放射線に分類され、X 線と同程度の生物学的特性を有するとされている¹¹⁾。陽子線治療における生物学的効果比 (relative biological effectiveness: RBE) は、X 線が1.0であるのに対して陽子線は1.1であることが、*in vitro* および動物実験にて推定されている¹²⁾。RBE は異なる放射線により同じ生物学的有効性を達成するために必要な線量の比率として定義されることから¹³⁾、陽子線の生物学的効果は X 線とほぼ同じであり、X 線の治療経験を活用できるといった利点があるとされている¹⁰⁾。

2. 陽子線治療の臨床例

陽子線治療が適応となる小児がんは数多く存在する。この章では具体的な適応臨床例を挙げ、陽子線治療を実施するメリットを紹介する。

1) 髄芽腫

小児で好発する疾患であり、小脳中部を原発として発生し、第四脳室や両側小脳半球に浸潤性に増殖し、髄膜播種を発生しやすい特性を有する¹⁴⁾。この髄膜播種を予防するために、全脳全脊髄照射 (craniospinal irradiation: CSI) が近年実施されている¹⁵⁾。CSI は広範な照射野であるため、正常組織に照射される線量が問題となってきた。CSI は、従来は X 線を用いた後方1門照射で実施されてきたが、近年欧米を中心に陽子線が使用されるようになってきた¹⁶⁾。陽子線で CSI を実施することで脊髄の線量を担保し、水晶体・蝸牛・側頭葉といったリスク臓器の線量を落とすことが可能となる¹⁷⁾。髄芽腫の治療での優先事項は、腫瘍制御を達成しながら、過度の副作用を減らすことであり、様々な集学的治療により、治癒の可能性が大幅に上昇してきた。しかし、髄芽腫患者の生存例が増えてくることで、二次発がんの問題も表在化されてきているのが実情である¹⁸⁾。Rui らは、CSI において X 線と陽子線での二次発がんの発生予測リスクの比較検討を行い、X 線は92%、陽子線は7.7%と顕著な差が生じることを明らかにした¹⁹⁾。副作用や正常組織への線量、二次発がんの発生リスクを減らせる点からみても、陽子線治療が髄芽腫治療の中核を担っていくと考えられる。

2) ユーイング肉腫

小児の腫瘍の中で攻撃的な悪性腫瘍であり、腫瘍増殖が早く、転移しやすい腫瘍である。男性の発症リスクが高く、女性の約1.5倍ほどであり、大腿骨や骨盤に発症しやすく、体の軸骨格に影響を与えるとされている²⁰⁾。ユーイング肉腫は放射線の感受性が非常に高く、ユーイング肉腫患者の約60%に放射線治療が使用されている²¹⁾。従来の放射線治療としては X 線を使用することが多かったが、近年腫瘍部の線量集中度を高め、周囲の正常組織の線量を限りなく減らすために陽子線治療が注目されるようになってきた²²⁾。上園らは、骨盤のユーイング肉腫に対して X 線と陽子線の治療結果を比較した²³⁾。陽子線施行下において局所制御率は放射線単独で91%、手術と放射線治療併用で100%であった。また、急性期障害の発生率は X 線と比べて低かった。このことから、より高い局所制御率かつ放射線毒性の低い陽子線治療は、骨盤発生ユーイング肉腫に対して有効であると言える。しかしながら、陽子線での実施件数がまだ少なく、調査が長期的でないことから、今後さらに研究が必要である。

また、複雑な部位に発生するユーイング肉腫に対して陽子線治療が使用される症例も増えてきた。Stacey らは、副鼻腔と頭蓋底に発生したユーイング肉腫に対して化学療法を併用した陽子線治療の2症例を報告した²⁴⁾。陽子線を使用することにより、眼球・視神経・頭蓋内腔への線量を減らすことができるため、陽子線実施下では、白内障のリスクが減少すると考えられる。白内障は加齢が原因であるとされている一方、放射線被ばくによる影響もあるとされている。国際放射線防護委員会では、放射線業務従事者の水晶体の線量限度をさらに減少させ、5年平均20mSv/年 (かつ単年で50mSv 未満) とした²⁵⁾。この点から放射線被ばくと白内障の関連は高いと言え、放射線治療時においても線量を低減させる必要がある。副作用を大幅に減らせる陽子線治療は、ユーイング肉腫の治療において重要な役割を担っていると言える。

3) 横紋筋肉腫

小児の軟部腫瘍の中で最も発生頻度が高く、高悪性度の新生物である²⁶⁾。現在の治癒率は70%ほどであり、化学療法・手術・放射線治療などの様々な治療法により、治癒率が向上してきている²⁷⁾。Dominic らは、陽子線治療のみで横紋筋肉腫を治療した小児と健康な小児の生活の質 (quality of life: QOL) の比較を実施した²⁸⁾。小児がんは身体的制約や認知機能、容姿の問題等により小児の QOL に影響を与えるとされている。

健康な小児に対して、陽子線実施前の小児の QOL は有意に低かった。しかし、陽子線試行後の QOL は同等であった。重篤な病歴を持つ小児の QOL は健康な小児と比較し、身体的な点と認知の点で低い傾向がある。陽子線治療はこの2点を下げることなく治療可能であるため、陽子線が副作用を限りなく少なくし、皮膚等に美容上の問題を引き起こしにくいということがわかる。このような点からみても、横紋筋肉腫において陽子線治療がこれから重要になってくる。

3. 保険収載と陽子線治療

陽子線治療の保険適応として、頭頸部悪性腫瘍（口腔・咽喉頭の扁平上皮がんを除く）・早期肺がん（Ⅰ～ⅡA 期）・肝細胞がん（直径4cm 以上）・肝内胆管がん・局所進行性膵がん・局所大腸がん（手術後に再発したもの）・限局性および局所進行性前立腺がん・限局性の骨軟部腫瘍・小児腫瘍（限局性の固形悪性腫瘍）が2024年6月時点で認められている²⁹。日本では、小児がんは2016年4月に保険適応が認められた⁶。出水らは、保険上の制約の課題についてまとめている³⁰。小児がんの陽子線治療が保険適応となるのは、20歳未満の時点で発症した場合であり、20歳を1日でも過ぎてしまうと保険適応から外れてしまう。また、小児がんの保険適応は限局性の固形悪性腫瘍とされている。小児がんは転移があったとしても根治治療が目指せるとされており、転移病巣を含め陽子線治療を実施することで二次発がん等のリスクを減らせると考えられる。しかし、この転移病巣を陽子線で治療する場合は、保険適応ではなくなり、高額な医療費を負担する必要がある。保険適応外の陽子線治療の費用は、約250万円と言われており、金銭的な負担が大きくなることが明らかである³¹。この場合は、国や都道府県の補助金等を活用していく必要があるが、手続きの煩雑さや心身の負担を考えると、保険適応の範囲を広げていくべきであると考えられる。

4. 小児の心理的ケアと陽子線治療

放射線治療の治療室は、狭く無機質な空間であることが多いため、小児にとっては怖いと感じる場所である。放射線治療を完遂することが困難である場合には鎮静が必要となる。陽子線治療は X 線治療に比べ、治療時間が長くなり、それに合わせて鎮静の必要性がさらに増加すると言われてしている³²。Buchsbaum らは、138 人の小児鎮静を追跡し、鎮静による合併症は0.0074%であったと報告している³³。鎮静は自然的な睡眠とは異なり、呼吸停止や心停止等のリスクを伴う³⁴。この

ため、できるだけ少ない鎮静用量であったり、無鎮静下で行うことが望ましい。小児の怖いという気持ちを少しでも減らし、小児が主体的に医療に参加することができるように手助けする方法として、プレパレーションというものが医師や看護師・メディカルスタッフを中心に実施されている。プレパレーションは、治療や検査を受ける小児に対し、認知発達に応じた方法で病気、手術、検査、その他の処置についての説明を行い、小児や親の対処能力を引き出すような環境および機会を与えることである³⁵。プレパレーションは5つに段階分けされており、病院に来る前に親が説明すること（第1段階）、入院・処置に対する説明や遊びの中での観察（第2段階）、プレパレーションの実施や説明（第3段階）、治療中・処置中の小児の気を紛らわせるような遊びの作成・ディストラクション（第4段階）、処置後・退院後の遊び（第5段階）があると言われている³⁶。診療放射線技師として関係するプレパレーションは、第3段階・第4段階・第5段階であると考えられる。第4段階の例としては、処置室や検査室に玩具やキャラクターを置いて環境を整えることや検査中に積極的にコミュニケーションをとることが挙げられる。第5段階の例としては、小児の頑張りを褒めたり、シールなどのご褒美を渡し、頑張りを認めたりすることが挙げられる³⁷。陽子線治療でのプレパレーションやディストラクションの方法については近年多く報告されており、日本だけでなくアメリカやドイツなどでも手法が考案されている。中地らは、モチベーションツールを用いて小児の陽子線治療を完遂させた³⁸。モチベーションツールとは、フレフレビーズといったものを使用し、各回治療終了後にビーズを増やしていくといった方法である。ビーズを糸に通していく、最終的にはネックレスのような形状となり、小児が陽子線治療を頑張ってきたことを可視化できる大変有用な方法である。石川らは、「はじめてのようしせんちりょう」という絵本を作成した³⁹。絵本でのプレパレーションは動機付けとしては良かったものの、それ単体でのプレパレーションとしての効果は弱いものであったと報告している。絵本と実際の環境が違くと、心の自己コントロールが難しくなり、小児が恐怖を感じるきっかけとなってしまうことから、治療室内の環境整備が非常に重要であると述べている。Leonardo らは、仮想現実（virtual reality: VR）ゲームを開発した⁴⁰。この VR ゲームは、ヒーローとともに秘密の研究所にある最新の装置（陽子線治療装置）を見学するところから始まる。ゲームを進めていくうちにガントリの回転の様子や音を体感することもできるように

なっている。このように仮想世界で体験することにより、実際の治療室内の恐怖を軽減することができるため、自分の置かれた状況を理解するためにも非常に良いツールであると考えられる。以上のようにプレパレーションを陽子線治療前後で実践することで、小児の治療への恐怖心を低減させ、無鎮静下や鎮静剤量を減少させるきっかけにつながると考えられる。

まとめ

小児がんの治療成績が向上し、がんサバイバーとなる患者が増えてきている。小児がんサバイバーの中長期的な副作用や心理的負担の軽減のために陽子線治療がさらに発展し、それらが保険収載となって恩恵を受けられるようになることを切実に望む。

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) Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, et al: Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* 2024; 74: 229-263.
- 2) がんの統計編集委員会：がんの統計〈2023年版〉。2023年版。東京。がん研究振興財団。2023: 14～15.
- 3) がんの統計編集委員会：がんの統計〈2024年版〉。2024年版。東京。がん研究振興財団。2024: 14～15.
- 4) Helms L, Guimera AE, Janeway KA, Bailey KM: Innovations in cancer treatment of children. *Pediatrics.* 2023; 152: e2023061539.
- 5) Oeffinger KC, Hudson MM: Long-term complications following childhood and adolescent cancer: foundations for providing risk-based health care for survivors. *CA Cancer J Clin.* 2004; 54: 208-236.
- 6) 橋本孝之, 森崇, 西岡健太郎, 打浪雄介, 安田耕一, 木下留美子, 他：小児がんに対する陽子線再照射。日本小児血液・がん学会雑誌。2021; 58: 89～93.
- 7) 厚生労働省：第4期がん対策推進基本計画について。 <https://www.mhlw.go.jp/content/10901000/001091843.pdf>, 2024年12月9日。
- 8) 石割隆太郎：陽子および α 粒子に対する物質の阻止能。応用物理。1982; 51: 286～292.
- 9) Wilson RR: Radiological use of fast protons. *Radiology.* 1946; 47: 487-491.
- 10) 高田義久：陽子線治療の歴史とその発展。応用物理。2012; 81: 918～923.
- 11) 辻井博彦：陽子線治療の進歩と展望。The Journal of JASTRO. 1994; 6: 63～76.
- 12) Mohan R, Grosshans D: Proton therapy - Present and future. *Adv Drug Deliv Rev.* 2017; 109: 26-44.
- 13) Haas-Kogan D, Indelicato D, Paganetti H, Esiashvili N, Mahajan A, Yock T, et al: National cancer institute workshop on proton therapy for children: considerations regarding brainstem injury. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2018; 101: 152-168.
- 14) 金村米博, 市村幸一, 正札智子, 山崎麻美, 渋谷壮一郎, 新井一, 他：髄芽腫の分子遺伝学的診断とその標準化。脳神経外科ジャーナル。2015; 24: 436～444.
- 15) Zhang Y, Huang Y, Lin J, Ding S, Gong X, Liu Q, et al: Multi-isocenter VMAT craniospinal irradiation using feasibility dose-volume histogram-guided auto-planning technique. *J Radiat Res.* 2023; 64: 612-621.
- 16) 加藤貴弘, 成田優輝, 小松俊介, 小森慎也, 新井一弘, 他：陽子線による全脳全脊髄照射法の有用性と課題。日本放射線技術学会東北支部会雑誌。2015; 24: 167.
- 17) Stoker JB, Grant J, Zhu XR, Pidikiti R, Mahajan A, Grosshans DR: Intensity modulated proton therapy for craniospinal irradiation: organ-at-risk exposure and a low-gradient junctioning technique. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2014; 90: 637-644.
- 18) Jiwei B, Abulimiti M, Yonglong J, Jie W, Shuyan Z, Chao L, et al: Proton beam therapy in a patient with secondary glioblastoma (32 years after postoperative irradiation of medulloblastoma): case report and literature review. *Radiat Oncol.* 2024; 19: 136.
- 19) Zhang R, Howell RM, Giebler A, Taddei PJ, Mahajan A, Newhauser WD: Comparison of risk of radiogenic second cancer following photon and proton craniospinal irradiation for a pediatric medulloblastoma patient. *Phys Med Biol.* 2013; 58: 807-823.
- 20) Tsubulnikov S, Fayzullina D, Karlina I, Schroeder BA, Karpova O, Timashev P, et al: Ewing sarcoma treatment:

- a gene therapy approach. *Cancer Gene Ther.* 2023; 30: 1066-1071.
- 21) Rombi B, DeLaney TF, MacDonald SM, Huang MS, Ebb DH, Liebsch NJ, et al: Proton radiotherapy for pediatric Ewing's sarcoma: initial clinical outcomes. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2012; 82: 1142-1148.
- 22) Zöllner SK, Amatruda JF, Bauer S, Collaud S, de Álava E, DuBois SG, et al: Ewing sarcoma-diagnosis, treatment, clinical challenges and future perspectives. *J Clin Med.* 2021; 10: 1685.
- 23) Uezono H, Indelicato DJ, Rotondo RL, Mailhot Vega RB, Bradfield SM, Morris CG, et al: Treatment outcomes after proton therapy for ewing sarcoma of the pelvis. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2020; 107: 974-981.
- 24) Gray ST, Chen YL, Lin DT: Efficacy of proton beam therapy in the treatment of ewing's sarcoma of the paranasal sinuses and anterior skull base. *Skull Base.* 2009; 19: 409-416.
- 25) 藤通有希, 小佐古敏荘, 吉田和生, 浜田信行: 放射線白内障に対するしきい線量の科学的根拠と課題. *保健物理.* 2013; 48: 97~103.
- 26) 大喜多肇: 小児横紋筋肉種の分子病理. *日本小児血液・がん学会雑誌.* 2019; 56: 136~140.
- 27) Gartrell J, Pappo A: Recent advances in understanding and managing pediatric rhabdomyosarcoma. *F1000Res.* 2020; 9: F1000.
- 28) Leiser D, Calaminus G, Malyapa R, Bojaxhiu B, Albertini F, Kliebsch U, et al: Tumour control and quality of life in children with rhabdomyosarcoma treated with pencil beam scanning proton therapy. *Radiother Oncol.* 2016; 120: 163-168.
- 29) 日本放射線腫瘍学会: 粒子線治療(陽子線治療, 重粒子線治療)の保険適応となる疾患. https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/particle_beam/2022/07/post10.html, 2024年10月7日.
- 30) 出水祐介, 美馬正幸, 福光延吉, 鈴木毅, 副島俊典: 神戸陽子線センターでの経験から見えてきた課題. *日本小児血液・がん学会雑誌.* 2022; 59: 363~365.
- 31) 静岡県立静岡がんセンター: 陽子線治療の費用. https://www.scchr.jp/division/rtp_center/guidance/cost2/cost.html, 2024年11月1日.
- 32) 鈴木弦, 山崎秀哉, 山田恵: 小児がん医療における放射線治療の役割. *京都府立医科大誌.* 2016; 125: 721~729.
- 33) Buchsbaum JC, McMullen KP, Douglas JG, Jackson JL, Simoneaux RV, Hines M, et al: Repetitive pediatric anesthesia in a non-hospital setting. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2013; 85: 1296-1300.
- 34) 糟谷周吾: 検査・処置における鎮静・鎮痛. *日本小児循環器学会雑誌.* 2014; 30: 612~623.
- 35) 宮内環, 寺井孝弘, 横田あゆみ: 小児に関わる看護師のプレパレーションに対する認識と実践の状況. *看護実践学会誌.* 2014; 27: 25~34.
- 36) 田中恭子: プレパレーションの5段階について. *小児保健研究.* 2009; 68: 173~176.
- 37) 神道那実, 大西文子, 岡田摩理, 遠藤幸子, 鳥居賀乃子: 小児看護におけるプレパレーションの実施状況と影響要因から考えられる課題. *日本小児看護学会誌.* 2022; 31: 169~177.
- 38) 中地ひかる, 小柳津真帆, 田中美奈子, 宮澤真由美, 白波瀬由美, 吉井瑞穂, 他: モチベーションツールを用いた小児が陽子線治療を完遂した事例報告. *京都府立医科大学附属病院看護部看護研究論文集.* 2024; 2022: 25~28.
- 39) 石井由美香, 鮎沢香, 古谷佳由理: 陽子線治療を受ける小児患者に対するプレパレーションの効果. *小児がん看護.* 2012; 7: 46~55.
- 40) Schenck L, Bäumer C, Ross B, Schäfer G, Stember N, Thomas H, et al: Development of a smartphone virtual reality game to support the radiation therapy of children and adolescents in proton centers. *Front Pediatrics.* 2023; 11: 1163022.

Abstract

The current status of proton therapy for pediatric cancer

Eiichi Maehara, Keisuke Usui

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

Proton therapy has emerged as a promising treatment for pediatric cancers. Proton therapy is different from traditional X-ray radiotherapy because it is less invasive and lowers the risk of long-term growth problems and subsequent cancers. This advantage is attributed to the unique properties of protons, particularly the Bragg peak, which allows for minimal radiation exposure to surrounding healthy tissues and precise delivery to targeted areas. Proton therapy has biological effects that are similar to X-rays, which means that the knowledge gained from traditional radiotherapy can be used. In recent years, proton therapy for children has been covered by insurance, facilitating broader access. The national policy prioritizes building a robust system to ensure pediatric cancer patients receive appropriate medical care. Proton therapy plays a critical role in achieving this goal by providing a safer and more targeted treatment option. To further enhance the experience for young patients, multidisciplinary teams of medical professionals have introduced preparation programs to help children undergo proton therapy without sedation. These programs aim to reduce the psychological and physical burden of treatment, making it more child-friendly. By eliminating the need for sedation, proton therapy becomes even less invasive, contributing to better overall outcomes and improved quality of life for pediatric cancer patients. As advancements in technology and medical collaboration continue, proton therapy is expected to become an integral component of pediatric cancer treatment, offering a safer, more precise, and less burdensome option for young patients and their families.

Key Words: proton therapy, pediatric cancer, preparation

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 77-82, 2025]

医用画像処理における深層学習の有用性と今後の展望

土屋 諒真、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

近年、人工知能 (artificial intelligence: AI) の急速な発展によって、医用画像分野では診断精度の向上や効率的な治療計画の支援が可能となり、特に深層学習技術は医用画像解析において重要な役割を果たしている。医用画像にはノイズやアーチファクトが生じることが課題であるが、U-Net や敵対的生成ネットワーク (generative adversarial network: GAN) などの深層学習モデルがこれらの問題解決に有用である。U-Net はエンコーダとデコーダのスキップ接続を活用した構造により、高精度な画像セグメンテーションを実現しており、一方、GAN は生成器と識別器の敵対関係を利用した学習により、ノイズ低減やマルチモダリティ間の画像変換の分野で良好な成果が報告されている。また、3D U-Net や SegAN、サイクル敵対的生成ネットワーク (cycle-consistent GAN: CycleGAN) などといった初期のネットワークを発展させたものが近年では多く開発されており、実用化へ向けてさらなる臨床的価値が高まっている。本稿では、主な深層学習ネットワークの概要とノイズ低減法、画像生成法、セグメンテーション法について紹介する。

キーワード：深層学習、医用画像、ノイズ低減、画像生成、セグメンテーション

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 83-92頁, 2025年 (受付 2025.1.30.; 受理 2025.3.17.)

緒 言

現代の医療分野では人工知能 (artificial intelligence: AI) の急速な発展により医療の質および検査・手技効率等が非常に向上している¹⁾。医用画像に着目すると、コンピュータ断層 (computed tomography: CT) 画像や磁気共鳴画像 (magnetic resonance imaging: MRI) などの医用画像に対する解析は、診断精度の向上や治療計画の支援において不可欠な役割を果たしている。しかし、取得される医用画像にはノイズやアーチファクトが多く生じ、これらの画像からの医学的解釈や分析を困難にする。また、異なるモダリティ間でのデータ融合等も、画像の取得される環境が様々であることからミスレジストレーション等の課題があることや、領域抽出においては画質やマニュアル操作による負担、抽出結果のばらつきが課題となっている。こうした課題を解決するために、撮像された画像の鮮明化を目指したノイズ除去法や、患者の体位の違いによるモダリティ間の画像位置ずれをなくす画像生成法、さらに腫瘍等の領域を抽出するためのセグメンテーション技術が注目されている。近年は深層学習分野の発展が著しく、ディープニューラルネットワーク (deep neural network: DNN) ベースのノイズ低減、マルチモダリティ

間の画像生成、セグメンテーションが多く報告されており、特に U-Net や敵対的生成ネットワーク (generative adversarial network: GAN) をはじめとする深層学習モデルは、医用画像分野において主流となっている。U-Net はそのエンコーダ-デコーダ構造を通じて、精度の高いセグメンテーション結果を提供する一方、GAN は生成タスクにおいてデータの多様性と品質を両立させる能力を持つことから、このようなモデルの導入は、従来の方法と比較して精度や効率性の向上をもたらす。これにより、医療現場における臨床的意義が高まり、近い未来での臨床応用が期待されている^{2,3)}。そこで本稿では、これらの深層学習ネットワークの概要と原理およびそれらの深層学習ネットワークを用いたノイズ低減法、画像生成法、セグメンテーション法についての研究動向を紹介する。

1. 医用画像処理に用いられる
主な深層学習ネットワーク

1) U-Net

構造を図1に示す。U-Net は2015年に Ronneberger らによって提案された画像間変換の DNN の一種であり、チャンネル数を増加させてダウンサンプリングを行うエンコーダと、チャンネル数を減少させてアップサンプリ

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

〒113-0034 東京都文京区湯島1-5-32

E-mail: k-usui@juntendo.ac.jp

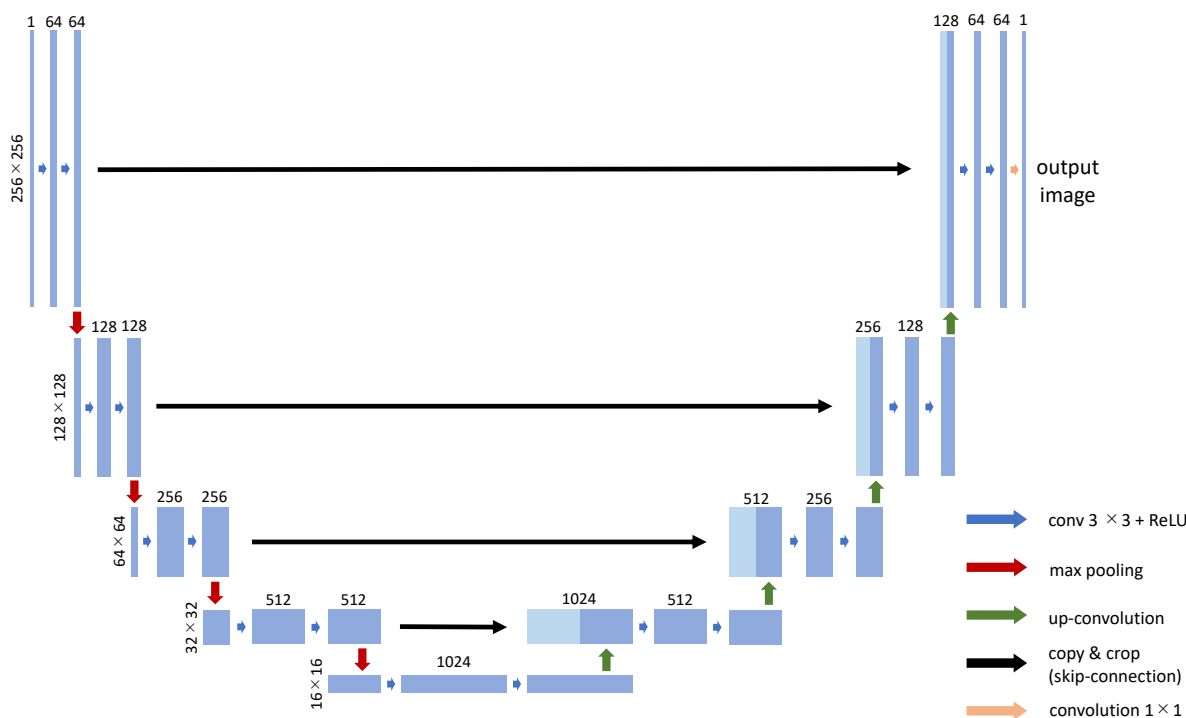


図1 U-Netの構造

ングを行うデコーダから構成されている⁴⁾。エンコーダでは、入力画像に対して 3×3 の畳み込みフィルタと整流化線形単位 (rectified linear unit: ReLU) の活性化関数を2回適用し、その後最大値プーリングにより画像サイズを $1/2$ にしている。最大値プーリングでは l 層目のチャンネル数 k の画像 $Z(x,y)_k^{(l)}$ を次の層へつながる $Z(i,j)_k^{(l+1)}$ に変換する。このとき、カーネルサイズ (i,j) のカーネル $R_{(i,j)}$ による局所位置 (x,y) におけるプーリング操作は以下の式により算出される。

$$Z(i,j)_k^{(l+1)} = \max_{(x,y) \in R_{(i,j)}} Z(x,y)_k^{(l)} \quad (1.1)$$

U-Netにおける最大値プーリングでは通常、 2×2 のカーネルサイズとストライド幅2によるプーリング操作が行われ、各位置のカーネル内の最大値が画素値として抽出される。結果的にエンコーダで行われる各ダウンサンプリング層では、すべての次元において最大値プーリングが行われ、画像全体のサイズが 4 分の 1 となる。また、畳み込みフィルタ処理によりチャンネル数は層への入力の 2 倍の値が選択されるため、総合的に画像情報が 2 分の 1 に圧縮されることになる。続いて、情報ボトルネックと呼ばれる空間サイズを変化させずに畳み込みを行う層により、入力から得られる情報を絞り込み特徴量を抽出する。その後、デコーダ部分であるアップサンプリング層で、 2×2 のカーネルサイズとストライド幅2の転置畳み込みフィルタおよび 2 回の 3×3 畳み込みフィルタによりエンコーダと逆の操作を行い、画像全体のサイズを 4 倍、チャンネル数を 2 分の 1 に

していくことで入力画像と同一サイズとなるよう画像を復元していく。さらに、U-Netはエンコーダで抽出した特徴マップをデコーダにコピーして結合するスキップ接続の構造を有している。これにより、抽出された特徴や位置情報が消されことなくデコーダへ受け渡すことが可能になり、後述するU-Netを用いたセグメンテーションにおいて、畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network: CNN) によりピクセルレベルのクラス識別ができ、高精度なセマンティックセグメンテーションを可能にした⁵⁾。

U-Netによるトレーニングでは、入力画像とそれに対応するラベル画像が用いられ、確率的勾配降下法による実装が行われる⁶⁾。最終層のエネルギー関数は、クロスエントロピー損失関数と組み合わせた最終特徴マップの各ピクセル単位のソフトマックス関数により算出される。ソフトマックス関数は分類の確率マップにおいて総和が 1 となるように出力され、以下の式により定義される。

$$p_k(x) = \frac{\exp(a_k(x))}{\sum_{k'=1}^K \exp(a_{k'}(x))} \quad (1.2)$$

ここで、 $a_k(x)$ はピクセル位置 $x \in \Omega$ と $\Omega \subset \mathbb{Z}^2$ における特徴チャンネル k の活性化、 K はクラス数、 $p_k(x)$ は近似的な最大関数を示している。最大活性化 $a_k(x)$ を持つ k に対しては、 $p_k(x) \approx 1$ 、それ以外のすべての k に対しては $p_k(x) \approx 0$ が出力される。それと組み合わせるクロスエントロピー損失関数は、各位置において $p_l(x)$ の 1 からの偏差をペナルティとして課しており、

以下の式により定義される。

$$E = \sum_{x \in \Omega} \omega(x) \log(p_{l(x)}(x)) \quad (1.3)$$

ここで、 $l: \Omega \rightarrow \{1, \dots, K\}$ は各ピクセルにおける真のラベルであり、 $\omega: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ はトレーニング時にあるピクセルの重要度を調節するための重みマップである。この重みマップは以下の式を使用し事前に算出され、算出させた重みを各ピクセルに対して補償することで接触するピクセル間の分離境界を学習する。

$$\omega(x) = \omega_c(x) + \omega_0 \cdot \exp\left(-\frac{(d_1(x) + d_2(x))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.4)$$

ここで、 $\omega_c: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ はクラス頻度のバランスを取るための重みマップ、 $d_1: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ はセルの境界までの最短距離、 $d_2: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ は2番目にセルの境界まで近い距離を示している。ピクセル間の距離やクラス頻度は実数値であり、 ω_c およびそこから算出される ω は実数値となる。また、勾配計算が連続的な値をとることから、重みの値が連続値である実数値 (\mathbb{R}) として定義されている。

以上により U-Net におけるトレーニングが実装され、ピクセルレベルのクラス識別が可能となる。しかし、低解像度の入力画像に対して畳み込みやプーリング等を深い層に渡って繰り返し行うことで、空間的情報が欠損し、細かい境界や物体の検出が困難になるこ

とや、対象が2次元画像であり、3次元画像に対応していないこと、局所的な特徴の抽出には優れているものの画像全体の情報を抽出することが困難といった課題が初期の U-Net では存在しており、これらに対して今日までにさまざまな改良がなされている。U-Net における時系列に沿った手法および改良点を表1に示す。

2) GAN

2014年に Goodfellow らにより提案された画像生成手法である¹⁸⁾。GAN では2つのニューラルネットワークが用いられ、1つ目のネットワークである生成器 (G) がノイズ $z \sim p_z(z)$ からデータ空間 $x = G(z)$ へマッピングを行い、画像を生成する。その後、2つ目のネットワークである識別器 (D) により、 G で生成されたデータ x が真のデータ $p_{real}(x)$ であればその確率を $p = D(x)$ として示し、生成されたデータ $p_g(x)$ であればその確率を $1-p$ として示す構造である。ここで、 G と D は以下の式により、Min-Max の目的関数で最適化が行われる。

$$\min_G \max_D V(D, G) = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x)] + \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [\log D(1 - D(G(z)))] \quad (1.5)$$

各ネットワークの最適化では、 G は目的関数の最小化を行うことで真のデータと区別できない、すなわち

表 1 U-Net の歴史と改良点

| 発表年 | U-Net の種類 | 課題および改良点 |
|--------|---|---|
| 2015 年 | U-Net ⁴⁾ (初期) | 対象が 2 次元画像 微細構造により境界等の検出が困難 画像全体の特徴を捉えにくい |
| 2016 年 | 3D U-Net ³⁴⁾ | 3 次元画像を対象として体積セグメンテーションが可能 |
| | V-Net ³⁵⁾ | 3 次元画像の体積セグメンテーションに対して、Dice 係数に基づく新たな損失関数を適用 |
| 2018 年 | Attention U-Net ³³⁾ | 注意ゲートを組み込み、重要な特徴を選択し強調する機能が追加 |
| | SegAN ³⁶⁾ | セグメンテーションを行う Segmentor と結果に対して批評を行う critic の 2 つのネットワークが敵対的に学習することで識別精度が向上 |
| | U-Net++ ⁷⁾ | より深いネットワーク構造を持ち、階層的にスキップ接続を改良することでそれぞれの階層での特徴を効果的に利用 |
| | Recurrent residual U-Net ⁸⁾ (R2U-Net) | 同じ層において畳み込みを繰り返し行い、長距離の依存関係を学習することが可能 |
| 2020 年 | ResUNet ⁹⁾ | U-Net に ResNet ¹⁰⁾ を組み合わせることで、ある層の最適な出力ではなく層の入力を参照した残差関数を学習し勾配消失問題を解決 |
| | DoubleU-Net ¹¹⁾ | 2 つの U-Net を連結することで、より複雑な特徴抽出が可能 |
| 2021 年 | Dense-UNet ¹²⁾ | U-Net と DenseNet ¹³⁾ を組み合わせ、各層の前の出力を次の層の入力として受け取ることで特徴を再利用し、詳細な特徴を学習可能 |
| | TransUNet ¹⁴⁾ | U-Net と Transformer ¹⁵⁾ の注意機構を利用して、局所特徴に加えて長距離依存性のある特徴の抽出も可能 |
| | Swin-Unet ¹⁶⁾ | CNN を用いずに SwinTransformer ¹⁷⁾ のみで U-Net を再構築したネットワーク ピクセルごとではなくパッチごとに注意機構を導入し、局所特徴と長距離依存性の特徴を高精度に抽出可能 |

D を騙しやすくなるように画像を生成し、一方 D では、目的関数の最大化を行うことで識別精度を高め、高い確率で G に騙されないように学習していく。この一連プロセスを繰り返し行うことで学習精度を高めており、 G と D の構造が敵対的であることから敵対的生成ネットワークと呼ばれる。最終的には G が生成した偽の画像を、真の画像であると D が判別することで学習は成功となる。しかし、初期のGANでは、学習プロセスにおいていくつかの問題点が存在する。1つは、生成される画像が特定の種類のみのデータに限られてしまう mode collapse である。これにより、生成されるデータの多様性が失われてしまい、本来の学習の目的を十分に達成できない可能性がある¹⁹⁾。また、GANのトレーニングでは2つのネットワークが敵対的に学習を進めるため、ネットワーク間に偏りが生じると、学習が不安定となりモデルが収束しなかったり、最適解から離れた状態で学習が停滞してしまう。こうした初期のGANの課題に対しても今日までに様々な改良がなされており、時系列に沿った改良点を表2に示す。なかでも、条件付き敵対的生成ネットワーク (conditional GAN: CGAN) とサイクル敵対的生成ネットワーク (cycle-consistent GAN: CycleGAN) は、医用画像間変換の分野において幅広い研究がなされており、特に CycleGAN は教師画像を必要としない相互画像間変換手法で、深層学習において難点となる教師画像の収集および構築を解決できる手法として近年注

目が高まっている。

(1) CGAN

2014年に Mirza らによって提案された手法であり、図2にその構造を示す。GANは生成器と識別器の双方に何らかの追加情報 (y) が条件付けされている場合、条件付きモデルに拡張することが可能である²⁰⁾。 y はクラスラベルや他のモダリティのデータなどのあらゆる種類の補助情報であり、双方に追加の入力層として y を入力することで CGAN として学習が実行される。そのため、事前の入力ノイズ $p_z(z)$ と y が結合されて学習プロセスへ入力される。CGANにおける Min-Max の目的関数は以下のように表される。

$$\min_G \max_D V(D, G) = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\log D(x|y)] + \mathbb{E}_{z \sim p_z(z)} [\log D(1 - D(G(z|y)))] \quad (1.6)$$

(2) CycleGAN

2020年に Zhu らによって提案された手法であり、図3にその構造を示す。CycleGANの最大の特徴は、ペアとなる教師画像を必要とせず相互画像変換を行う点である²¹⁾。教師あり学習では、入力画像に対してピクセル単位でペアとなる教師画像が必要であり、画像間の位置ずれは学習精度の低下の要因となりうる。しかし、CycleGANには、ピクセル単位のペアを必要とせずとも特徴量を抽出し、学習精度を高める機構が備

表2 GANの歴史と改良点

| 発表年 | GANの種類 | 課題および改良点 |
|-------|--|--|
| 2014年 | GAN ⁷⁾ (初期) | Mode collapse による多様性の低下 収束の不安定性 |
| | Conditional GAN ²⁰⁾ (CGAN) | 敵対的な構造に条件を付与することで学習精度を向上 |
| 2016年 | Deep convolutional GAN ²⁴⁾ (DCGAN) | CNNを導入し、画像生成における性能を大幅に向上 |
| 2017年 | Wasserstein GAN ²⁵⁾ (WGAN) | Wasserstein 距離を損失関数として採用し、収束の不安定性を軽減 勾配消失問題を緩和し、より滑らかな学習プロセスを実現 |
| | WGAN with gradient penalty ²⁶⁾ (WGAN-GP) | WGANに勾配ペナルティを追加。Lipschitz 連続性の制約を厳密に守ることで、学習の安定性をさらに向上 |
| 2018年 | Progressive growing GAN ²⁷⁾ (PGGAN) | 低解像度から高解像度へ段階的に学習。非常に高解像度な画像生成が可能 計算資源を効果的に活用 |
| 2019年 | Style GAN ²⁸⁾ | スタイル転送の概念を取り入れ、細部の制御と高い画像品質を両立 生成画像の多様性が向上 |
| | Big GAN ²⁹⁾ | より大規模なモデルとデータセットを用い、GANの生成性能を大幅に向上。 ImageNetでの高品質な画像生成を実現 |
| | Self-attention GAN ³⁰⁾ (SAGAN) | 自己注意機構を導入。生成画像の長距離依存関係をモデル化し、複雑なパターンを生成 |
| 2020年 | Cycle-consistent generative adversarial network ²¹⁾ (CycleGAN) | 教師画像を必要とせず、相互画像変換が可能 |

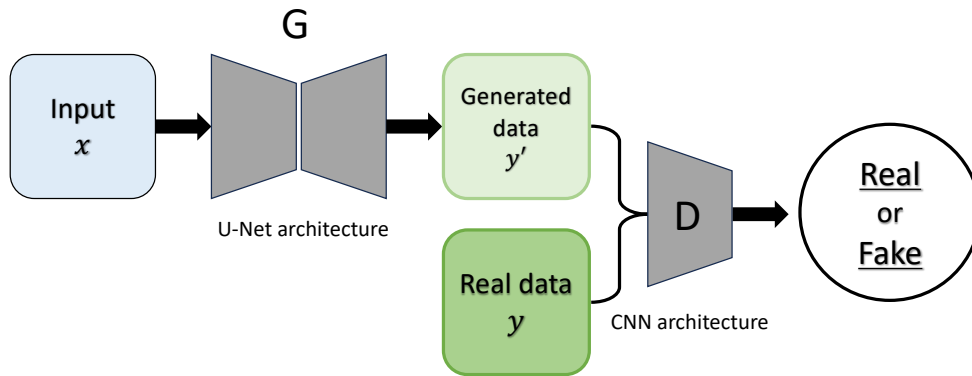


図2 CGANの構造

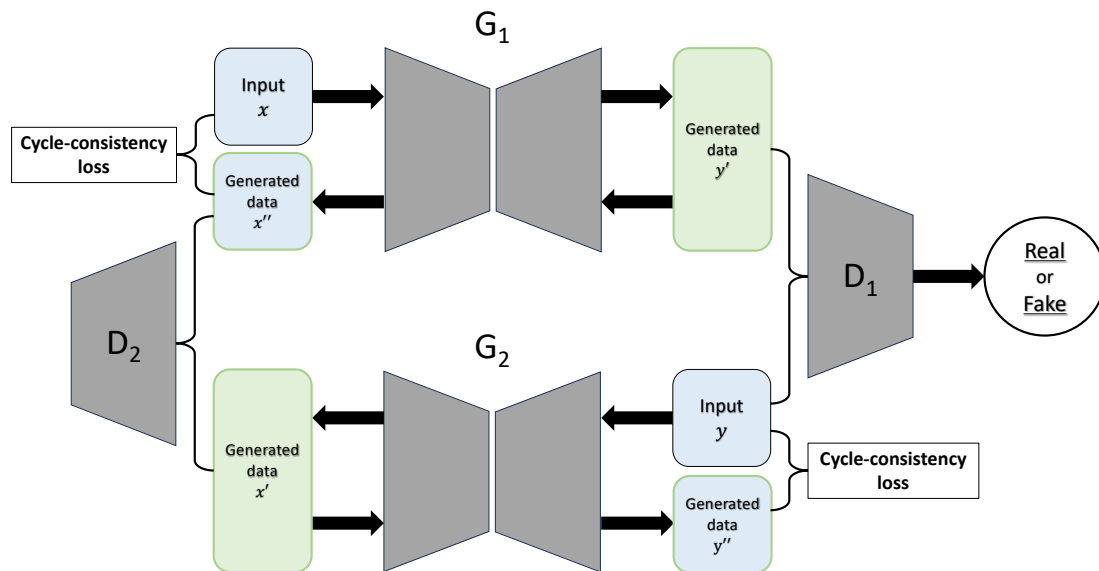


図3 CycleGANの構造

わっているため、大量の教師画像を集めることが困難な場合やデータ拡張の際に非常に有用である^{22,23)}。

CycleGANの学習では、学習データに与えられた2つのドメイン X と Y 間の目的関数を最適化することを最終目標としており、ネットワークは2つの生成器 $G_{X \rightarrow Y}$ と $G_{Y \rightarrow X}$ および2つの識別器 D_X と D_Y により構成されている。 $G_{X \rightarrow Y}$ は X から Y へのマッピングにより $G_{X \rightarrow Y}(X)$ を生成し、同様に $G_{Y \rightarrow X}$ は Y から X へマッピングにより $G_{Y \rightarrow X}(Y)$ を生成する。また、 D_X では真のデータである X と生成された $G_{Y \rightarrow X}(Y)$ 間の損失、 D_Y では真のデータである Y と生成された $G_{X \rightarrow Y}(X)$ 間の損失を算出している。損失関数は、生成された画像の分布をターゲットドメインのデータ分布に一致させるための敵対損失⁷⁾と、学習したマッピング $G_{X \rightarrow Y}(X)$ と $G_{Y \rightarrow X}(Y)$ が互いに矛盾するのを防ぐためのサイクル一貫性損失によって最適化が行われる。敵対損失は2つのマッピングに対して適用され、例として $G_{X \rightarrow Y}(X)$ と D_Y の敵対損失については以下の式で表される。

$$\mathcal{L}_{GAN}(G_{X \rightarrow Y}(X), D_Y, X, Y) = \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [\log D_Y(y)] + \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\log (1 - D_Y(G_{X \rightarrow Y}(X)))] \quad (1.7)$$

ここで、1.5の式で示したGAN同様、生成機と識別器はMin-Maxの目的関数で最適化が行われ、 $G_{Y \rightarrow X}(Y)$ と D_X の敵対損失に対しても $\mathcal{L}_{GAN}(G_{Y \rightarrow X}(Y), D_X, Y, X)$ の最適化が行われる。さらに、CycleGANのネットワークでは、2つのドメインに対して相互的にマッピングを生成し、判別を行なっているため、理想的にはドメイン X のデータ分布に関して $X \rightarrow G_{X \rightarrow Y}(X) \rightarrow G_{X \rightarrow Y}(G_{X \rightarrow Y}(X)) \approx X$ 、ドメイン Y のデータ分布に関して $G_{Y \rightarrow X}(Y) \rightarrow G_{X \rightarrow Y}(G_{Y \rightarrow X}(Y)) \approx Y$ となることで、それぞれのプロセスに矛盾が生じずに達成できていることが望ましい。こうしたプロセスの一貫性を評価するための損失関数としてサイクル一貫性損失が用いられており、以下の式により表される。

$$\mathcal{L}_{cyc}(G_{X \rightarrow Y}, G_{Y \rightarrow X}) = \mathbb{E}_{x \sim p_{data}(x)} [\|G_{Y \rightarrow X}(G_{X \rightarrow Y}(X)) - x\|_1] + \mathbb{E}_{y \sim p_{data}(y)} [\|G_{X \rightarrow Y}(G_{Y \rightarrow X}(Y)) - y\|_1] \quad (1.8)$$

以上2種の敵対損失とサイクル一貫性損失を組み合わせた総合的な損失関数は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(G_{X \rightarrow Y}, G_{Y \rightarrow X}, D_X, D_Y) \\ = \mathcal{L}_{GAN}(G_{X \rightarrow Y}(X), D_Y, X, Y) \\ + \mathcal{L}_{GAN}(G_{Y \rightarrow X}(Y), D_X, Y, X) \\ + \lambda \mathcal{L}_{cyc}(G_{X \rightarrow Y}, G_{Y \rightarrow X}) \end{aligned} \quad (1.9)$$

ここで、 λ は2つの目的の相対的な重要度を制御する値として定義される。さらに、この損失関数の最適化のための Min-Max 関数は以下の式で表される。

$$G_{X \rightarrow Y}^*, G_{Y \rightarrow X}^* = \arg \min_{G_{X \rightarrow Y}, G_{Y \rightarrow X}} \max_{D_X, D_Y} \mathcal{L}(G_{X \rightarrow Y}, G_{Y \rightarrow X}, D_X, D_Y) \quad (1.10)$$

2. 深層学習ネットワークを用いた画像処理法

1) ノイズ低減法

様々な医用画像モダリティで撮像された画像からノイズ成分を低減する手法であり、主に低線量で撮像された CT 画像に多く使用される。この手法は、撮像された画像から実際にノイズを低減しているわけではなく、ノイズを多く含む画像からノイズの少ない画像を生成するプロセスで成り立っている。これまでは空間分解能と画像コントラストを維持しつつ、ノイズやアーチファクトの低減を行う逐次近似再構成 (iterative reconstruction: IR) 法などによるノイズ低減が一般的であった³¹⁾。しかし、IR 法は再構成速度が遅く、出力される画像の過度に平滑化されるなど、臨床において多くの制限があった。そこで近年、DNN を使用したノイズ低減法に関する研究が多く行われている。DNN ベースのノイズ低減では、取得される生の投影データに対して処理を行わず、再構成後の画像に対して処理が行われることが多い。ここでは、低線量 CT 画像のノイズレベルから通常線量の CT 画像へとノイズを低減する例に焦点を当て紹介する。Chen らは通常線量 CT 画像に対してポアソンノイズを付加することで、ペアとなる低線量 CT 画像のデータを生成し、このデータセットを用いて U-Net によるノイズ低減法を提案した³²⁾。低線量 CT 画像から通常線量 CT 画像を生成するように学習を進め、モデルは低線量 CT 画像を入力し、通常線量 CT 画像を生成する。しかし、このネットワークの課題として低線量 CT 画像から通常線量 CT 画像を生成した場合に過度な平滑化が進み、画像の解剖学的情報などを失う可能性があった。この課題に対して、近年では U-Net の様々な改良がなされており、Xu らは心臓の CT 画像において投影角度を制限した際のノイズやアーチファクトに対して、

2021年に開発された Swin-UNet を適用し、投影角度に制限のある CT 画像から360°投影および通常線量レベルの画像の復元を実現し、従来の深層学習ベースの方法よりも優れていることを実証した³³⁾。そのほかに、U-Net による平滑化の課題を解決するには GAN ベースの学習ネットワークを使用し、ノイズ低減を行うことが望ましいと考えられる。ペアのデータセットが構築可能であれば CGAN が用いられ、生成器により低線量 CT 画像から通常線量画像に類似した画像を生成し、最適化関数を最適化していく。さらに、敵対的損失を最適化することで識別器を欺けるような画像を生成するように学習が進む。識別器では生成された画像と実際の原画像である通常線量 CT 画像を比較して損失を算出し、この2つを区別するように学習される。一般的に CGAN の最適化関数には、ピクセル単位の損失を算出した L2正則化による最適化が行われるが、これはペア画像の位置合わせ精度に依存しており、ピクセル単位の位置ずれにより学習精度が低下する危険性がある。ペア画像の生成には実際に通常線量 CT 画像と低線量 CT 画像を取得する方法と、通常線量 CT 画像から低線量画像をシミュレーションで作成する方法が考えられる。実際に画像を取得する方法では臨床上の画像のノイズレベルに対して学習を行うことができる利点があるが、2種類の画像取得時の体位・呼吸のずれが生じることや過剰な被ばくが問題点となる。一方、シミュレーションにより通常線量 CT 画像にノイズを付加する方法では、同一の画像を用いていることから位置ずれは生じないが、任意でノイズを付加しているため临床上起こりうるノイズレベルと完全に一致しない画像である問題点がある。こうした問題点を解決するためには、ペアの教師画像を必要としない CycleGAN による学習が理想的である。Yan らは、CycleGAN を適用し、肺結核評価のために低線量 CT 画像からのノイズ低減を報告しており、病変の変形や構造の損失を抑制しつつノイズを大幅に低減することに成功している³⁴⁾。

2) 画像生成

深層学習を用いた画像生成の目的は、ワークフローの改善や撮像時間、コストの削減、被ばく低減等のために DNN によって画像を生成し、臨床上有益な画像およびそれに伴う情報を得ることであり、特にクロスモダリティ間の画像生成に関する研究は現在でも多く行われている。各モダリティによって撮像された画像には様々な特徴があり、多くの医学的に有益な情報を提供している。しかし、有用な情報を提供する一方で、

デメリットも多く存在し、モダリティにより制限を受けるものがある。CT 画像は放射線による被ばくがあることや組織コントラストが低いといったデメリットがあり、MRI は金属に対する制限が多いことや撮像に時間を要するといったデメリットがある。DNN により画像生成を行うことで、こうした制限を相互的に解決することが可能になる。Li らは U-Net、CGAN、CycleGAN のネットワークによる頭部 CT-MRI 画像変換精度の比較を行い、U-Net による画像変換の精度が最も高く、他の CGAN や CycleGAN による画像変換においても高い変換精度を実現できたことを報告している³⁵⁾。教師あり学習を行う場合は、ペアとなる画像間の位置合わせが非常に重要であり、各モダリティ画像は異なる体位や時間で撮像されるため、画像間の位置ずれが学習精度低下を招く要因となりうる。特に腹部や骨盤部の領域を異なる時間帯に撮像した画像は、消化管の蠕動運動などの影響があるため、ピクセルレベルで完全なペアの画像を生成することは困難である。一方で教師なし学習を行う場合は、各モダリティ間の位置ずれの影響を考慮する必要がない。Jin らは、CycleGAN のネットワークを使用して頭部 MRI から頭部 CT 画像を生成し、教師あり学習によるピクセル単位の損失と GAN を組み合わせたモデルよりも CT 画像に類似しており、ボケが少ないことを報告している³⁶⁾。また、日浅らは、骨盤領域の MRI から CT への画像生成を行う際、構造の境界を保存するために元の画像と合成画像間の各ピクセルにおける画像勾配の一貫性を評価する勾配一貫性損失を CycleGAN に組み込むことで、大腿骨頭と内転筋付近の形状をよりよく保存できることを示した³⁷⁾。木田らも、CycleGAN を拡張し、コーンビーム CT 画像から治療計画 CT 画像への合成において、骨盤領域の構造の境界を再現性高く保存するためにいくつかの損失を組み込み、直腸や膀胱、小腸などに対して、境界を鮮明に復元することと構造が保存できることを報告している³⁸⁾。また、近年医用画像分野において diffusion-model の注目が高まっている。diffusion-model は、入力画像に対してノイズを付与していき、続いてノイズが付与された画像から本来の画像を生成するプロセスで学習を行うネットワークである。GAN で生じる mode collapse や、生成器と識別器のバランスによる学習の不安定性などの課題がなく、安定した学習を行うことが可能である。また、U-Net ではノイズの影響を受けやすく、大量の教師データを必要とするが、diffusion-model はデータのノイズを学習し、ノイズ除去とセグメンテーションを同時に行うことや、教師なし学習であることから

CGAN や U-Net 等の教師あり学習と比較してデータ収集が容易であるという利点が存在する。Gao らは、頭頸部における通常の CT 画像において diffusion-model を適用し、造影 dual-energy CT 画像を生成する手法を提案し、CNN と CGAN に比較して最も高い類似度の画像生成を実現した³⁹⁾。

3) セグメンテーション

医用画像上で腫瘍や臓器などの領域を定義する際、手作業により行うことは非常に困難で時間を要するのに加え、評価者によってばらつきが生じやすいタスクの1つである⁴⁰⁾。深層学習を用いた医用画像セグメンテーションは、様々なモダリティの入力画像から病変や臓器の領域をピクセルあるいはボクセル単位で識別し、ラベル付けを行う手法であり、手作業で行うタスクの負担軽減に役立つ。2015年に U-Net が開発されて以降、U-Net はセグメンテーションにおいて最も有名なアーキテクチャとなり、近年でも臨床応用に向けた多くの研究が行われている。

U-Net のエンコーダで学習される低レベルの特徴には、各ピクセルにどのクラスラベルを割り当てるかを決定する位置特定の情報が含まれており、これをスキップ接続により画像サイズや特徴を損失することなく異なるレベルで学習されたデコーダへ受け渡すことで、画像全体のセマンティックな分類を可能にしている。U-Net においても近年様々な改良や新たな手法の提案が行われており、Oktay らは、U-Net に注意ゲートを組み込むことでセグメンテーションに無関係となる余分な特徴を抑制し、スキップ接続によって受け渡される際のセグメンテーションに関わる重要な特徴を相対的に強調することで、優れたセグメンテーションの実装を報告している⁴¹⁾。また、初期の U-Net では 2D の顕微鏡画像を対象に生物学的なセグメンテーション法を紹介しているが、Çiçek らは、3次元画像を対象とするセグメンテーションを行うため、2D U-Net を 3D-U-Net に拡張し、体積セグメンテーションを可能にした⁴²⁾。さらに、Milletari らは、Dice 係数に基づいた新たな損失関数により、目的領域とその他の背景領域のボクセル数の不均衡を対処して前立腺の 3D 体積セグメンテーションを行う V-Net を提案した⁴³⁾。そのほかにも、GAN に類似した構造にセグメンテーションのネットワークを適用した手法が提案されており、Xue らは、脳腫瘍のセグメンテーションを行うため、敵対的なセグメンテーションネットワーク (SegAN) を開発した⁴⁴⁾。SegAN は、segmentor と呼ばれる U-Net 構造のセグメンテーションネットワーク

と、結果に対して批評を行う Critic の2つのネットワークにより構成されており、これらが敵対的に学習を行うことで学習精度を高める手法である。この研究においては脳腫瘍全体の Dice 係数は U-Net で0.80、SegAN で0.85となり、U-Net に比較して良好なセグメンテーション結果が得られている。また、脳内の特定病変のみを検出するセグメンテーション以外の研究において、Woo らは、アルツハイマー病の脳 MRI 画像に対して2D および3D U-Net におけるバックグラウンド、白質、灰白質、脳脊髄液の4クラスの識別によるセグメンテーションを行い、3D U-Net において高いセグメンテーション結果を示し、アルツハイマー病に対しての脳体積計測等への有用性を示唆している⁴⁵⁾。さらに、近年では transformer を組み合わせたネットワークや diffusion-model を適用したセグメンテーションも多く報告されており、Cai らは、超音波画像における腕神経叢と胎児頭のセグメンテーションで TransUNet に対して Dice loss と Top-K loss を組み合わせた joint loss を適用することで、他のセグメンテーションアルゴリズムと比較して高いセグメンテーション精度を実現した⁴⁶⁾。また、Xie らは、CT 画像における金属インプラントのセグメンテーションに対して diffusion-model を適用し、U-Net、Attention U-Net、R2U-Net、DeepLabV3+⁴⁷⁾ (Google が開発した広範囲コンテキストを効率よく収集できる設計のセマンティックセグメンテーション向け CNN 構造) と比較して最も良好な結果を報告している⁴⁸⁾。

3. まとめ

本稿では、深層学習を応用した医用画像分野におけるノイズ低減、マルチモダリティ間の画像生成、セグメンテーションに関する今日までの研究動向を紹介した。特に、U-Net や GAN といった代表的なモデルが、従来の手法に比べ良好な性能を実現し、臨床への応用に向けた可能性を大いに広げていることが示された。これらの手法は、ノイズ低減による画像品質の向上、異なるモダリティ間の画像生成、高度なセグメンテーションを通じて、診断や放射線治療計画の精度を向上させる可能性を秘めている。しかし、医療データの収集やラベリングにおける倫理的問題、深層学習モデルのブラックボックスな性質に起因する解釈可能性の不足、モデルの汎用性の低さなどといった臨床実用に向けた課題が依然として存在する。これらの課題に対処するためには、より大規模で多様なデータセットの構築やモデルの説明可能性を高める技術の開発、様々な機器やモダリティ間での汎用性の向上が必要であ

る。今後、深層学習技術のさらなる発展が予測され、本分野においても技術的な課題に対応するとともに、実臨床の環境における有用性と信頼性を高めるための継続的な研究と議論が不可欠である。

謝 辞

本稿の完成にあたり、多くの方々にご協力とご支援をいただきましたことに心より感謝申し上げます。

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) Mahmoudi T, Mehdizadeh A: Artificial intelligence in medicine. *J Biomed Phys Eng.* 2022; 12: 549-550.
- 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) Cui R, Yu H, Xu T, Xing X, Cao X, Yan K, et al: Deep learning in medical hyperspectral images: a review. *Sensors (Basel).* 2022; 22: 9790.
- 4) Ronneberger O, Fischer P, Brox T: U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *arXiv.* 2015: 1505.04597.
- 5) Long J, Shelhamer Eq, Darrell T: Fully convolutional networks for semantic segmentation. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell.* 2017; 39: 640-651.
- 6) Jia Y, Shelhamer E, Donahue J, Karayev S, Long J, Girshick R, et al: Caffe: convolutional architecture for fast feature embedding. *arXiv.* 2014: 1408.5093.
- 7) Zhou Z, Siddiquee MMR, Tajbakhsh N, Liang J: UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation. *arXiv.* 2018: 1807.10165.
- 8) Alom MZ, Hasan M, Yakopcic C, Taha TM, Asari VK: Recurrent Residual Convolutional Neural Network based on U-Net (R2U-Net) for Medical Image Segmentation. *arXiv.* 2018: 1802.06955.
- 9) Diakogiannis FI, Waldner F, Caccetta P, Wu C: ResUNet-a: A deep learning framework for semantic segmentation of remotely sensed data. *ISPRS J*

- Photogramm Remote Sens. 2020: 162: 94-114.
- 10) He K, Zhang X, Ren S, Sun J: Deep Residual Learning for Image Recognition. arXiv. 2015: 1512.03385.
 - 11) Jha D, Riegler MA, Johansen D, Halvorsen P, Johansen HD: DoubleU-Net: A Deep Convolutional Neural Network for Medical Image Segmentation. arXiv. 2020: 2006.04868.
 - 12) Cai S, Tian Y, Lui H, Zeng H, Wu Y, Chen G, et al: Dense-UNet: a novel multiphoton in vivo cellular image segmentation model based on a convolutional neural network. Quant Imaging Med Surg. 2020: 10: 1275-1285.
 - 13) Huang G, Liu Z, Maaten Lvd, Weinberger KQ: Densely Connected Convolutional Networks. arXiv. 2018: 1608.06993.
 - 14) Chen J, Lu Y, Yu Q, Luo X, Adeli E, Wang Y, et al: TransUNet: Transformers Make Strong Encoders for Medical Image Segmentation. arXiv. 2021: 2102.04306.
 - 15) Vaswani A, Shazeer N, Parmar N, Uszkoreit J, Jones L, Gomez AN, et al: Attention Is All You Need. arXiv. 2023: 1706.03762.
 - 16) Cao H, Wang Y, Chen J, Jiang D, Zhang X, Tian Q, et al: Swin-Unet: Unet-like Pure Transformer for Medical Image Segmentation. arXiv. 2021: 2105.05537.
 - 17) Liu Z, Lin Y, Cao Y, Hu H, Wei Y, Zhang Z, et al: Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows. arXiv. 2021: 2103.14030.
 - 18) Goodfellow I, Pouget-Abadie J, Mirza M, Xu B, Warde-Farley D, Ozair S, et al: Generative adversarial nets. arXiv. 2014: 1406.2661.
 - 19) Zhang Z, Li M, Yu J: On the convergence and mode collapse of GAN. SIGGRAPH Asia Technical Briefs. 2018: 1-4.
 - 20) Mirza M, Osindero S: Conditional generative adversarial nets. arXiv. 2014: 1411.1784.
 - 21) Zhu JY, Park T, Isola P, Efros A: Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks. arXiv. 2020: 1703.10593.
 - 22) 松岡拓未, 日朝祐太, 大竹義人, 高尾正樹, 高嶋和磨, 菅野伸彦, 他: Cycle GAN を用いた CT-マルチパラメトリック MR 画像変換. MED IMAG TECH. 2019: 37: 130~136.
 - 23) 北條雅矢, 吉田康太, 藤野毅: 温度変化に頑健な遠赤外線画像認識にむけた CycleGAN を用いたデータ拡張手法の検討. 第36回人工知能学会全国大会論文集. 2022.
 - 24) Radford A, Metz L, Chintala S: Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. arXiv. 2016: 1511.06434.
 - 25) Arjovsky M, Chintala S, Bottou L: Wasserstein GAN. arXiv. 2017: 1701.07875.
 - 26) Gulrajani I, Ahmed F, Arjovsky M, Dumoulin V, Courville A: Improved training of wasserstein GANs. arXiv. 2017: 1704.00028.
 - 27) Karras T, Aila T, Laine S, Lehtinen J: Progressive growing of GANs for improved quality, stability, and variation. arXiv. 2018: 1710.10196.
 - 28) Karras T, Laine S, Aila T: A style-based generator architecture for generative adversarial networks. arXiv. 2019: 1812.04948.
 - 29) Brock A, Donahue J, Simonyan K: Large scale GAN training for high fidelity natural image synthesis. arXiv. 2019: 1809.11096.
 - 30) Zhang H, Goodfellow I, Metaxas D, Odena A: Self-attention generative adversarial networks. arXiv. 2019: 1805.08318.
 - 31) Smith EA, Dillman JR, Goodsitt MM, Christodoulou EG, Keshavarzi N, Strouse PJ: Model-based iterative reconstruction: effect on patient radiation dose and image quality in pediatric body CT. Radiology. 2014: 270: 526-534.
 - 32) Chen H, Zhang Y, Zhang W, Liao P, Li K, Zhou J et al: Low-dose CT via convolutional neural network. Biomed Opt Express. 2017: 8: 679-694.
 - 33) Xu Y, Han S, Wang D, Wang G, Maltz JS, Yu H: Hybrid U-Net and Swin-transformer network for limited-angle cardiac computed tomography. Phys Med Biol. 2024: 69: 105012.
 - 34) Yan C, Lin J, Li H, Xu J, Zhang T, Chen H et al: Cycle-consistent generative adversarial network: effect on radiation dose reduction and image quality improvement in ultralow-dose CT for evaluation of pulmonary tuberculosis. Korean J Radiol. 2021: 22: 983-993.
 - 35) Li W, Li Y, Qin W, Liang X, Xu J, Xiong J, et al: Magnetic resonance image (MRI) synthesis from brain computed tomography (CT) images based on deep learning methods for magnetic resonance (MR)-guided radiotherapy. Quant Imaging Med Surg. 2020: 10: 1223-1236.
 - 36) Jin CB, Kim H, Liu M, Jung W, Joo S, Park E et al:

- Deep CT to MR synthesis using paired and unpaired data. *Sensors (Basel)*. 2019; 19: 2361.
- 37) Hiasa Y, Otake Y, Takao M, Matsuoka T, Takashima K, Jerry LP et al: Cross-modality image synthesis from unpaired data using CycleGAN: effects of gradient consistency loss and training data size. *arXiv*. 2018: 1803.06629.
- 38) Kida S, Kaji S, Nawa K, Imae T, Nakamoto T, Ozaki S et al: Cone-beam CT to planning CT synthesis using generative adversarial networks. *arXiv*. 2019: 1901.05773.
- 39) Gao Y, Qiu RLJ, Xie H, Chang CW, Wang T, Ghavidel B, et al: CT-based synthetic contrast-enhanced dual-energy CT generation using conditional denoising diffusion probabilistic model. *Phys Med Biol*. 2024: 69: 165015.
- 40) Menze BH, Jakab A, Bauer S, Kalpathy-Cramer J, Farahani K, Kirby J, et al: The multimodal brain tumor image segmentation benchmark (BRATS). *IEEE Trans Med Imaging*. 2015; 34: 1993-2024.
- 41) Oktay O, Schlemper J, Folgoc LL, Lee M, Heinrich M, Misawa K, et al: Attention U-Net: learning where to look for the pancreas. *arXiv*. 2018: 1804.03999.
- 42) Çiçek Ö, Abdulkadir A, Lienkamp SS, Brox T, Ronneberger O: 3D U-Net: learning dense volumetric segmentation from sparse annotation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2016*. 2016: 9901: 424-432.
- 43) Milletari F, Navab N, Ahmadi SA: V-Net: fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation. *arXiv*. 2016: 1606.04797.
- 44) Xue Y, Xu T, Zhang H, Long LR, Haung X: SegAN: adversarial network with multi-scale L1 loss for medical image segmentation. *Neuroinformatics*. 2018: 16: 383-392.
- 45) Woo B, Lee M: Comparison of tissue segmentation performance between 2D U-Net and 3D U-Net on brain MR images. *IEEE Conference Proceedings*. 2021: 2021: 1-4
- 46) Cai L, Li Q, Zhang J, Zhang Z, Yang R, Zhang L: Ultrasound image segmentation based on Transformer and U-Net with joint loss. *PeerJ Comput Sci*. 2023: 9: 1638.
- 47) Chen LC, Zhu Y, Papandreou G, Schroff F, Adam H: Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. *arXiv*. 2018: 1802.02611.
- 48) Xie K, Gao L, Zhang Y, Zhang H, Sun J, Lin T, et al: Metal implant segmentation in CT images based on diffusion model. *BMC Med Imaging*. 2024: 24: 204.

Abstract

The utility of deep learning in the medical image processing and future prospects

Ryoma Tsuchiya, Keisuke Usui

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

In recent years, the rapid advancement of artificial intelligence (AI) has enabled significant improvements in diagnostic accuracy and efficient treatment planning within the medical field, with deep learning technologies playing a crucial role in medical image analysis. While medical imaging often faces challenges such as image noise and artifacts, deep learning models like U-Net and generative adversarial network (GAN) are useful in solving these issues. U-Net achieves highly accurate image segmentation by utilizing a structure that incorporates skip connections between its encoder and decoder, whereas GANs, leveraging the adversarial relationship between generator and discriminator, have reported remarkable results in noise reduction and multi-modality image synthesis. Moreover, the development of advanced architectures, including 3D U-Net, SegAN, and cycle-consistent adversarial network (CycleGAN), has further enhanced the clinical value of these technologies, contributing to their potential for broader practical applications in the near future. In this paper, we will introduce an overview of the main deep learning networks as well as noise reduction, image generation, and segmentation methods.

Key Words: deep learning, medical image, noise reduction, image synthesis, segmentation

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 83-92, 2025]

fMRI を用いた偏頭痛患者の脳機能解析

加藤 倭、後藤 政実

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

偏頭痛は世界人口の約12%が罹患する一般的な神経疾患であり、日常生活に大きな支障をきたす。近年、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いた研究が進展し、偏頭痛患者の脳機能異常が明らかにされつつある。本研究では、fMRI の原理を概説し、偏頭痛の発生前後における脳の活動変化について論じる。特に視覚皮質、三叉神経血管系、視床といった脳領域の機能的異常、および感覚刺激への過敏性が注目される。さらに、fMRI を用いた既存研究を整理し、偏頭痛の病態解明と治療法開発における今後の展望を示す。

キーワード：fMRI、脳機能解析、BOLD 法、偏頭痛

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 93-97頁, 2025年 (受付 2025.2.10.; 受理 2025.4.18.)

1. はじめに

偏頭痛は世界人口の約12%が罹患する一般的な神経疾患であり、特に若年女性に多い¹⁾。World Health Organization (WHO) によると、偏頭痛は「最も障害をもたらす疾患の一つ」とされ、2019年の global burden of disease (GBD) の調査では、世界で2番目に有病率の高い疾患とされている²⁾。日本国内でも、約840万人が偏頭痛に苦しんでおり、その社会的コストは年間数千億円に達すると推定される³⁾。偏頭痛患者は強い頭痛だけでなく、光過敏症や音過敏症などの感覚過敏の随伴症状を伴い、これらが日常生活の質 (QOL) を著しく低下させる。さらに、症状が慢性化すると精神疾患や睡眠障害のリスクが高まることが報告されている⁴⁾。

偏頭痛は世界中の人々を苦しめている疾患であるが、未だに謎が多い疾患である。特に発症メカニズムが複雑で、現在の医学では偏頭痛を発症させる原因が完全には解明されていない。しかし、近年の研究により、脳内の神経活動や血流変化が重要なキーワードであることが分かってきた。偏頭痛における脳の異常を直接的に観察するためには、高度な画像診断技術が必要とされる。その中で、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) は脳内の血流変化をリアルタイムで捉える技術として注目されている⁵⁾。本論説では、fMRI の基本原理を概説し、偏頭痛について論じる。さらに、fMRI を用いた既存研究を整理し、偏頭痛の病態解明と治療法開

発における今後の展望を示す。

2. BOLD fMRI の原理

fMRI は主に blood oxygenation level dependent (BOLD) 信号を利用して脳の活動を間接的に測定する方法である。BOLD 信号は神経活動に伴う局所的な血流変化を反映している。神経細胞が活動すると、酸素を必要とするため局所的な血流が増加し、酸化ヘモグロビン (oxy-Hb) が増加、脱酸素ヘモグロビン (deoxy-Hb) が減少する。この酸素化の変化により、MRI 信号の強度が変化する^{6,7)}。酸化ヘモグロビンは磁氣的にはほぼ無磁性を示すが、脱酸素ヘモグロビンは常磁性を持ち、局所的な磁場の不均一性を引き起こす。これにより、局所的な酸素化状態に応じて MRI 信号が変化し、BOLD 信号が記録される。

fMRI において特に重要な撮像シーケンスとして、echo planar imaging (EPI) が使用される。EPI は非常に短時間で脳全体の画像を撮像でき、リアルタイムの脳活動の測定に適している。また、BOLD 信号を測定するために T2* 強調イメージングが用いられる。T2* は磁場不均一性に敏感であり、BOLD 効果により変化する局所的な磁場変化を捉えることができる^{8,9)}。

fMRI は数ミリメートルの空間分解能を持ち、活動している脳領域を詳細に特定できる。時間分解能は数秒単位であり、神経活動そのものに比べて遅れがあるものの、実際の脳活動の変化を追跡することができる。

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

初期のfMRIを用いた研究では、タスクベースfMRIが主流であったが、近年では安静時fMRIが注目されている。安静時fMRIは被験者が安静状態にある脳内ネットワークの活動を測定するもので、特定のタスクを必要としないため、偏頭痛患者の基礎的な脳機能異常を評価するのに適している。

そのほかにも、fMRIは特定の認知課題や刺激に応じた脳領域の活動を観察する脳機能マッピング、アルツハイマー病やてんかんなどの神経疾患の診断や研究、脳卒中後の機能回復などのリハビリテーションの評価などに応用されている。一方で、fMRIには限界も存在する。時間分解能が低いこと、BOLD信号が神経活動を間接的に反映する点、被験者の動きに敏感である点などが課題とされている。また、神経活動と血流変化の関係は完全には解明されておらず、データの解釈には注意が必要である^{8,9)}。

3. 偏頭痛

偏頭痛は神経学的な頭痛障害で、発作的に強い頭痛を発症させる。偏頭痛の特徴としては、通常片側に現れ、4〜72時間続くことがある¹⁰⁾。また、脈打つような痛みを伴い、身体活動によって症状が悪化したり、吐き気、嘔吐、光に対する過敏症が伴ったりすることが挙げられる。また、偏頭痛は「前兆を伴う偏頭痛」と「前兆を伴わない偏頭痛」に分類される。前兆は視覚的異常（閃輝暗点）、感覚異常、言語障害などが特徴であり、発作前に約25〜30%の患者で認められる。

偏頭痛には予兆期、オーラ期、頭痛期、回復期の4つの異なるフェーズがあり、それぞれに特有の症状があるとされている。予兆期は頭痛の発作が始まる前に現れる症状である。主な症状としては、あくび、気分の変化、集中力の低下、首のこり、疲労感などが見られることがある¹¹⁾。オーラ期は視覚にチカチカと光が見えるといった視覚的な異常や感覚の変化、言語障害などが現れるとされている¹²⁾。頭痛期は偏頭痛の主なフェーズで、こめかみや頭部の片側に脈打つような痛みが生じ、光や音に敏感になることが多く、吐き気や嘔吐を伴うこともある¹³⁾。回復期では発作が終わった後、疲労感や集中力の欠如、過敏性が残ることがあり、これは偏頭痛後遺症と呼ばれている^{14,15)}。

このような偏頭痛の発作は、遺伝的要因、環境的要因、神経生理学的変化など、複数の要因が組み合わさって引き起こされると考えられている。具体的な誘因には、ストレス、睡眠不足、ホルモンの変動、気圧や湿度の変化、感覚刺激（光、音、匂い）などがある⁴⁾。

4. 偏頭痛とfMRI

1) 無症候期における脳機能変化

偏頭痛の無症候期（発作間期）は、症状がないにもかかわらず、脳の機能的および構造的変化が観察される期間である。この時期は患者が症状を示さずにMRIスキャンに参加できるため、多くの研究がこの期間に焦点を当てている。この無症候期における脳の変化を明らかにすることは、偏頭痛の発症メカニズムの解明や予防法などに役立つと考えられる。

Arngriらは、前兆を伴う偏頭痛患者の低酸素環境下での脳機能変化を調査した¹⁶⁾。研究には15人の前兆を伴う偏頭痛患者と14人の健康な対照者が参加した。偏頭痛患者は少なくとも月に1回以上発作を経験しており、全員が典型的な視覚的前兆を報告していた。被験者が複数の条件をランダムに試すランダム化クロスオーバーデザインに基づき、低酸素環境（酸素飽和度70〜75%）および通常酸素環境（対照条件）のいずれかで実験を行った。この研究では、視覚刺激に対する脳の応答をBOLD fMRIを用いて測定し、視覚野（V1-V5）の信号変化を記録した。また、内頸動脈と脳底動脈の血流速度を測定し、全脳血流量（tCBF）を算出した。その結果、低酸素環境下では偏頭痛患者の視覚野（特にV1-V4領域）におけるBOLD信号が大幅に減少することが確認された。一方で、全脳血流量は患者群と健康な対照群の間で有意な違いは見られず、BOLD信号の減少は主に神経活動や酸素代謝の異常によるものと考えられた。さらに、患者群の52%が低酸素環境で偏頭痛様の発作を報告し、その中の3名は確実な視覚的前兆を経験し、研究者はこの結果が低酸素に対する偏頭痛患者の特異な感受性を示していると結論付けた。

また、別の研究では、オーラを伴わない偏頭痛患者1名を対象に、30日間、毎朝タスクベースfMRIを用いて、三叉神経の痛覚刺激に対する脳の反応を測定し、偏頭痛発作の周期的変化を解析した¹⁷⁾。この研究では、偏頭痛発症の24時間前に視床下部の活動が増加し、三叉神経核との機能的結びつきが強化されていたことが確認された。一方、発作中には視床下部が背側吻側橋（片頭痛ジェネレーター）と結びついていることが明らかとなった。この2つの結果から、偏頭痛発作の症状が出現する前段階に、視覚野や視床下部などの脳機能に変化が生じていることが分かった。

2) オーラ期の神経画像診断

fMRIを使用してオーラ症状が進行している間の機

能的变化を記録するには、患者がMRI撮像装置内で自然にオーラ症状を発症する必要がある。これまでにfMRIを使用して自然発生したオーラ症状を調査した例は少ないが、運動によって誘発された偏頭痛オーラをfMRIで調査した研究がある¹⁸⁾。この研究では、運動によって誘発されたオーラの発作が視覚野におけるBOLD信号の増加と関連していることが示された。また、視覚刺激に対するBOLD信号の変化が、最初に外側視覚野(V3A領域)で検出されたことから、皮質拡張抑制(CSD)の起源がこの領域にある可能性が示唆されている。

また、別の研究では、低酸素状態やちらつき光、偽刺激を使用してオーラを誘発し、5人の患者をスキャンした¹⁹⁾。オーラ症状を経験した3人の患者では、視覚皮質からのBOLD信号が低下していたが、正のオーラ症状(光のちらつき)を経験した2人の患者では、視覚皮質のBOLD信号が増加していた。また、両側のオーラ症状を経験した患者では、視覚皮質におけるBOLD信号の変化が両側にわたって観察された。これらのBOLD信号の変化は、最初に脳血流の増加が見られ、その後に減少することと一致しており、この発見はOlesenらによる1981年のsingle photon emission computed tomography (SPECT)研究でも確認された²⁰⁾。

3) 頭痛期の画像所見

偏頭痛発作は4～72時間にわたり中等度から重度の頭痛を引き起こす状態で、日常的な身体活動による痛みの増悪、吐き気、光過敏症が典型的な症状として知られている。Aminらは、オーラを伴わない偏頭痛患者17名を対象に、発作時と頭痛のない日(非発作時)の安静時fMRIを用いて、視床、橋、小脳ネットワークの機能的結合の違いを調査した²¹⁾。その結果、発作時には右視床と対側の上頭頂小葉、島皮質、一次運動皮質、補足運動野、眼窩前頭皮質の間で結合性が増加していることが示された。この視床活動の増加は、痛覚過敏の形成に関与している可能性があると考えられている。

さらに、安静時fMRIによる別の研究では、偏頭痛発作時に複数の皮質ネットワークに変化が見られることが示されている²²⁾。具体的には、実行制御ネットワークと背側注意ネットワークの接続が弱まる一方、default mode network (DMN) 内での前頭前皮質と後帯状皮質、および両側の島皮質との接続が強化されていた。これらの変化は、痛みの強さと相関していることが報告されている。

これらの研究結果は、偏頭痛発作時に三叉神経血管

系の上行性痛覚経路(橋、視床、感覚運動皮質、視覚皮質など)の機能的ネットワーク構造が乱れることを示しており、偏頭痛発作の神経基盤に関するさらなる発見が期待される。

4) 偏頭痛の回復期における神経画像診断

偏頭痛後に一部の患者では回復期(ポストドローム)症状が見られるが、すべての患者で現れるわけではない。回復期における主な症状は疲労感、集中力の欠如、首のこりなどだが、症状の程度は様々である。数少ないfMRI研究では、回復期にスキャンされた患者の症状は報告されていない。今後のfMRI研究では、回復期の症状を前向きに記録して、その神経学的な関連性を明らかにすることが求められる。

5. 偏頭痛の治療

「4. 偏頭痛とfMRI」において、fMRI解析から偏頭痛発作時に三叉神経系が過活動状態にあり、神経活動の亢進や中枢性の感作が誘発されることについて述べた。このような神経活動の変化は、偏頭痛の病態解明だけでなく、治療開発にも深く寄与している。Iyengarらの研究で、三叉神経から放出される神経ペプチドであるカルシトニン遺伝子関連ペプチド(CGRP)が、この過程において重要な因子であることが明らかとなった²³⁾。CGRPは末梢で血管拡張や神経炎症を引き起こし、これが偏頭痛の発症および進展に大きく関与していると考えられている。これらの知見から、近年ではCGRPやその受容体を標的とする治療法が注目されている。具体的には、エレナマブやフレマネズマブ、ガルカネズマブなどのCGRP阻害薬が、三叉神経からのCGRP放出をブロックすることで、末梢での神経感作およびそれに伴う中枢性の過活動を効果的に抑制することが報告されている。従来の偏頭痛治療は、主にトリプタン製剤を用いた急性期治療や予防的な内服療法が中心であったが、CGRPを標的とした治療では、三叉神経系の過活動を直接抑制することで、偏頭痛の発症そのものを軽減する可能性が示されている。

今後の課題としては、CGRP阻害薬の長期的な有効性や安全性の検討が挙げられる。現在の臨床試験は比較的短期間の観察に基づいたものであるため、長期使用による耐性や免疫系や心血管系への副作用の発現について検証が必要である²⁴⁾。

6. まとめ

偏頭痛の各段階に対して特有の脳機能障害が伴うことが一貫して示されている。また、頭痛期では特に三

又神経系の過活動が頭痛を引き起こしていることが分かってきた。さらに近年の研究により、三叉神経から放出される CGRP を標的とした新たな治療法が確立されつつある。2021年には日本でもガルカネズマブの偏頭痛治療が保険適用となり、臨床応用が進んでいる。

今後は CGRP を含む神経ペプチドの役割をさらに解明しつつ、fMRI を活用したさらなる研究が求められる。fMRI 研究では、データの質と臨床的な意義を高めるために、いくつかの方向性が提案される。まず、より大規模なサンプルサイズを用いた研究や、より厳密な統計解析、そして結果を再現する研究が、今後の研究結果の信頼性を高めるために必要だと考えられる。また、偏頭痛の頻度や偏頭痛を患っている年数の変化と、それに伴う fMRI での変化との関連を調査する大規模な多施設縦断研究も重要である。このような研究は、偏頭痛の悪化や改善のメカニズムを解明する助けとなり、さらなる予防法や治療法の確立が期待できる。

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

- Antonio LA, Javier AM, Javier D: Migraine review for general practice. *Aten Primaria*. 2022; 54: 102208.
- Denney DE, Lee J, Joshi S: Whether Weather Matters with Migraine. *Curr Pain Headache Rep*. 2024; 28: 181-187.
- 日本神経学会, 日本頭痛学会, 日本神経治療学会: 頭痛の診療ガイドライン2021. 東京. 医学書院. 2021: 1~473
- Ha H, Gonzalez A: Migraine Headache Prophylaxis. *Am Fam Physician*. 2019; 99: 17-24.
- Schwedt TJ, Chiang CC, Chong CD, Dodick DW: Functional MRI of migraine. *Lancet Neurol*. 2015; 14: 81-91.
- Ogawa S, Lee TM, Kay AR, Tank DW: Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1990; 87: 9868-9872.
- Logothetis NK: What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature*. 2008; 453: 869-878.
- Kundu P, Inati SJ, Evans JW, Luh WM, Bandettini PA: Differentiating BOLD and non-BOLD signals in fMRI time series using multi-echo EPI. *NeuroImage*. 2012; 60: 1759-1770.
- Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, et al: Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 1992; 89: 5675-5679.
- No authors listed: Headache Classification Committee of the International Headache Society (IHS). The International Classification of Headache Disorders, 3rd edition. *Cephalalgia*. 2018; 38: 1-211.
- Skorobogatykh K, van Hoogstraten WS, Degan D, Prischeva A, Savitskaya A, Ileen BM, et al: Functional connectivity studies in migraine: what have we learned? *J Headache Pain*. 2019; 20: 108.
- Hadjikhani N, Sanchez Del Rio M, Wu O, Schwartz D, Bakker D, Fischl B, et al: Mechanisms of migraine aura revealed by functional MRI in human visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2001; 98: 4687-4692.
- Ashina M, Katsarava Z, Do TP, Buse DC, Pozo-Rosich P, Özge A, et al: Migraine: epidemiology and systems of care. *Lancet*. 2021; 397: 1485-1495.
- Kelman L: The postdrome of the acute migraine attack. *Cephalalgia*. 2006; 26: 214-220.
- Giffin NJ, Lipton RB, Silberstein SD, Olesen J, Goadsby PJ: The migraine postdrome; an electronic diary study. *Neurology* 2016; 87: 309-313.
- Arnglim N, Hougaard A, Schytz HW, Vestergaard MB, Britze J, Amin FM, et al: Effect of hypoxia on BOLD fMRI response and total cerebral blood flow in migraine with aura patients. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2019; 39: 680-689.
- Schulte LH, May A: The migraine generator revisited: continuous scanning of the migraine cycle over 30 days and three spontaneous attacks. *Brain*. 2016; 139: 1987-1993.
- Hadjikhani N, Sanchez Del Rio M, Wu O, Schwartz D, Bakker D, Fischl B, et al: Mechanisms of migraine aura revealed by functional MRI in human visual cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2001; 98: 4687-4692.
- Arnglim N, Hougaard A, Ahmadi K, Vestergaard MB, Schytz HW, Amin FM, et al: Heterogenous migraine aura symptoms correlate with visual cortex functional

- magnetic resonance imaging responses. *Ann Neurol.* 2017; 82: 925-939.
- 20) Olesen J, Larsen B, Lauritzen M: Focal hyperemia followed by spreading oligemia and impaired activation of rCBF in classic migraine. *Ann Neurol.* 1981; 9: 344-352.
- 21) Amin FM, Hougaard A, Magon S, Sprenger T, Wolfram F, Rostrup E, et al: Altered thalamic connectivity during spontaneous attacks of migraine without aura: A resting-state fMRI study. *Cephalalgia.* 2018; 38: 1237-1244.
- 22) Coppola G, Parisi V, Di Renzo A, Pierelli F: Cortical pain processing in migraine. *J Neural Transm (Vienna).* 2020; 127: 551-566.
- 23) Iyengar S, Johnson K, Ossipov M, Aurora S: CGRP and the Trigeminal System in Migraine. *Headache.* 2019; 59: 659-681.
- 24) Rivera-Mancilla E, Villalón C, MaassenVanDenBrink A: CGRP inhibitors for migraine prophylaxis: a safety review. *Expert Opin Drug Saf.* 2020; 19: 1237-1250.

Abstract

Brain functional analysis of migraine patients using fMRI

Yamato Kato, Masami Goto

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

Migraine is a common neurological disorder that affects approximately 12% of the global population and significantly interferes with daily life. In recent years, research using functional magnetic resonance imaging (fMRI) has advanced, gradually revealing brain functional abnormalities in migraine patients. This study provides an overview of the principles of fMRI and discusses changes in brain activity before and after migraine attacks. In particular, attention is given to functional abnormalities in brain regions such as the visual cortex, the trigeminovascular system, and the thalamus, as well as hypersensitivity to sensory stimuli. Furthermore, existing studies using fMRI are reviewed, and future perspectives on elucidating the pathophysiology of migraine and developing treatment strategies are presented.

Key Words: fMRI, brain functional analysis, BOLD method, migraine

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 93-97, 2025]

The 4th Annual JUHS 2024 (Department of Physical Therapy)

Masakazu Saitoh, Ryuichi Sawa, Kotaro Iwatsu, Shunsuke Oji, Takayuki Miyamori, Toshiyuki Fujiwara

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

Abstract

The 4th Annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS) was held on May 19, 2024, celebrating the theme "Cutting Edge of Health Science." This report outlines the guest speakers' presentations in the field of physical therapy at the 4th Annual JUHS 2024, and the interactions between the guest speakers, faculty members, and graduate students during the laboratory tour and the welcome reception.

Key Words: the 4th Annual JUHS 2024, academic exchange, research collaboration

Juntendo Health Science Journal 6(1): 98-100, 2025 (Received Feb. 21, 2025 ; Accepted Mar. 24, 2025)

Introduction

The 4th Annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS) was held on May 19, 2024, celebrating the theme "Cutting Edge of Health Science."

In the Department of Physical Therapy, we had the honor of welcoming Dr. Dinesen from Denmark and Dr. Jeng from Taiwan as guest speakers (Fig.1). Following their insightful speeches, we organized a laboratory tour where graduate students presented

their research in their respective fields, fostering stimulating discussions.

During the welcome reception, faculty members, graduate students, and guest speakers actively engaged in meaningful academic exchanges about the future of physical therapy and paving the way for potential collaborative research.

1st part: Symposium with guest speaker

1) Guest speaker 1: Dr. Dinesen (Fig.2)

Dr. Dinesen provided insights into Denmark's digital health landscape and shared preliminary findings from their Future Patient Telerehabilitation



Fig.1 The 4th Annual JUHS 2024 program



Fig.2 Professor Birthe Dinesen

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

program for atrial fibrillation (AF) patients. Drawing from Denmark's position as a global leader in digital health, she described a comprehensive telerehabilitation program that has enrolled 155 out of 208 planned participants. Dr. Dinesen explained that their seven-week program utilizes home monitoring through wearables to track various health metrics, including blood pressure, pulse, sleep, weight, and electrocardiogram data. These measurements are integrated into the HeartPortal, a platform she developed that facilitates data sharing and communication between patients, relatives, and healthcare professionals. She emphasized how the program combines technology with in-person education at healthcare centers.

Based on qualitative interviews with ten participants (six men aged 58-93 years and four women aged 60-77 years), Dr. Dinesen reported encouraging preliminary findings. She highlighted that patients expressed increased feelings of security and knowledge about their condition. While some participants faced challenges in interpreting home monitoring data, she noted that most found the HeartPortal easy to navigate and the overall program supportive in managing their AF condition.

2) Guest speaker 2: Dr. Jeng (Fig.3)

Dr. Jeng highlighted significant advances in artificial intelligence applications for early identification of developmental disorders in infants. Her research team conducted a comprehensive study involving 84 infants (30 term, 54 preterm), demonstrating the effectiveness of AI-driven assessment tools in evaluating infant motor development.



Fig.3 Professor Suh-Fang Jeng

Dr. Jeng described how her team utilized the Alberta Infant Motor Scale to assess 58 distinct movements across various positions from 4 to 18 months of age. The AI algorithm she developed, which integrates a 17-point human pose estimation model with skeleton-based action recognition, achieved remarkable accuracy metrics of 0.91 across all key indicators, as published in the *Physical Therapy and Rehabilitation Journal* (2024).

In the concluding portion of her presentation, Dr. Jeng introduced "Baby Go," a mobile application her team developed for remote assessment. This innovation, as she emphasized, represents a significant shift from laboratory-based systems to accessible home-based assessment tools, potentially transforming early intervention strategies in infant development.

2nd part: Laboratory tour

During the laboratory tour, graduate students delivered presentations on their respective research topics within the fields of the nervous system, biomechanics, musculoskeletal and sports sciences, and cardiopulmonary research (Fig.4). They had the opportunity to consult with guest speakers about their research and received numerous valuable suggestions.

3rd part: Welcome reception

During the welcome reception, graduated students engaged in discussions and interactions with the guest speakers, focusing on the current state and future of physical therapy, as well as opportunities to research collaboration.

Conclusion

Through the 4th Annual JUHS 2024, the significance and potential of leveraging AI and digital devices in the field of physical therapy were underscored. Moreover, we believe that this event laid the groundwork for establishing an international network. Additionally, this event offered a valuable opportunity for both faculty members and graduate students to engage with guest speakers, fostering the cultivation of a global perspective.

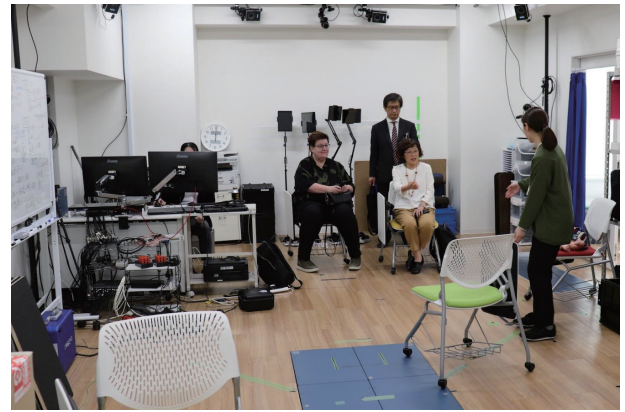


Fig.4 Laboratory tour

Acknowledgment

We would like to sincerely thank our esteemed faculty members and graduated students for their unwavering support throughout the planning and execution of the 4th Annual JUHS 2024.

Ethical approval

Not applicable.

Competing interests

Nothing to declare.

The 4th Annual JUHS 2024 (Department of Radiological Technology)

Kensuke Hori, Yuka Muranaka, Kazuya Koyama, Masaya Takahashi, Yasuaki Sakano, Shinsuke Kyogoku

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

Abstract

The 4th Annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium, held on May 19, 2024, focused on "Cutting Edge of Health Science." From the field of radiological technology, Dr. Kim and Dr. Kuo presented as guest speakers. In the first part of the symposium, Dr. Kim highlighted the role of artificial intelligence (AI) in radiation oncology, emphasizing enhanced precision and personalized treatments. Dr. Kuo discussed advancements in breast imaging techniques, explaining the importance of radiological technologists' skills. In the second part, the graduate students discussed the research paper, which they had read in advance with their supervisor, with the guest speakers, and gained valuable academic experience. The event ended with a reception fostering collaboration and global exchange.

Key Words: The 4th Annual JUHS 2024, academic exchange, research collaboration, radiological technology

Juntendo Health Science Journal 6(1): 101-103, 2025 (Received Feb. 13, 2025 ; Accepted Mar. 10, 2025)

Introduction

The 4th Annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS) was held on May 19, 2024, under the theme "Cutting Edge of Health Science" (Fig. 1). Another report written by physical therapy faculty members has also been published in this book, and we recommend reading it alongside this report. Focusing on the Department of Radiological Technology, we had the honor of welcoming

Dr. Kim from the Republic of Korea and Dr. Kuo from Taiwan as guest speakers. In the first part of this symposium, they gave insightful speeches to an audience of 231 students and 37 faculty members who attended in person and 284 online participants. Following the first part, we organized the second part when our graduate students discussed research papers in their respective fields with the guest speakers. During the welcome reception, faculty members and graduate students discussed the current state and future of radiological technology while engaging in informal conversations with guest speakers.

First part: Symposium with guest speakers

1) Guest speaker 1: Dr. Kuo (Fig. 2)

Dr. Kuo gave an inspiring speech entitled "Recent Trends in Breast Imaging Techniques in Breast Cancer Detection." In Japan and Taiwan, the incidence of breast cancer highlighted in this speech is the highest among all malignancies in women. To detect breast cancer early and treat it, radiological technologists take advantage of various imaging technologies



Fig.1 Group photo of the 4th Annual JUHS 2024 at Ogawa Hall

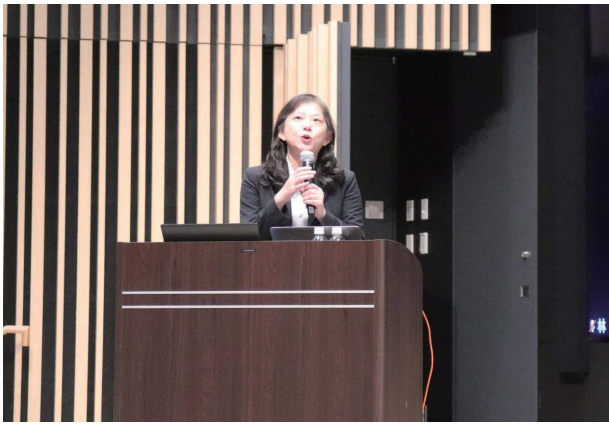


Fig.2 Professor Chiung-Wen Kuo from Yuanpei University

worldwide. Mammography, tomosynthesis, ultrasound, elastography, magnetic resonance imaging, and positron emission tomography are well-known modalities that our undergraduate students also study in their lectures. Dr. Kuo explained the characteristics and ways of proper utilization by summarizing the main advantages and disadvantages of these modalities. In the conclusion of this speech, Dr. Kuo told us that the skills a good radiological technologist should possess are attention to detail and decision-making regarding additional views that are appropriate for each case. These messages were especially inspiring for the faculties and our students.

2) Guest speaker 2: Dr. Kim (Fig. 3)

Dr. Kim gave us insights into the cutting-edge artificial intelligence (AI) in radiation oncology. Citing his speech, AI, which is an instrumental tool for radiation oncology, has transformed radiation therapy. In detail, enhancing precision efficiency and patient outcomes is the point of focus. Without the recent progress in AI, segmenting tumors and organs for the planning of



Fig.3 Professor Jing Sung Kim from Yonsei University

radiation therapy would have been based on medical images only. Recently, Dr. Kim has proposed methods where large language models make things easy for medical staff and patients by analyzing vast amounts of clinical data, predicting treatment responses, and personalizing therapy plans. According to recent research represented by Dr. Kim's papers, data recorded as words, for example, blood, gene, and other data, can also improve the accuracy of radiation therapy. At the end of his speech, the comment "Integration of all Data Promises to Revolutionize Cancer Treatment," as future insights of AI in radiation therapy, inspired us.

Second part:

Discussions on cutting-edge research

Our graduate students discussed cutting-edge research with guest speakers (Fig. 4). In the advanced preparations, our graduate students and their supervisors completely read through the research papers the guest speakers selected. After getting many insights and much knowledge from these papers, questions and comments were preliminary raised by



Fig.4 Photos in the 2nd part which discussed the cutting edge of research with guest speakers

students. The guest speakers gave us many suggestions from various viewpoints based on their wealth of experience and extensive knowledge. Through academic discussions with guest researchers in English, our graduate students gained valuable experience through this session.

Third part: Welcome reception

Faculty members and graduate students discussed the current state and future of radiological technology while engaging in informal conversations with the guest speakers. Owing to this session, we were able to extend the potential of collaborative research and continuous international exchanges.

Conclusion

Through the 4th Annual JUHS 2024, the potential of AI applications in the field of radiological technology and the importance of imaging diagnostics in breast cancer detection were adequately highlighted. From

the International Exchange Committee's point of view, we believe that this event provided an opportunity for establishing a continuous international exchange. Additionally, this event offered a valuable opportunity for faculty members and students to engage with guest speakers, fostering the cultivation of a global perspective.

Acknowledgments

We thank our faculty members and graduate students for their unwavering support throughout the planning and execution of the 4th Annual JUHS 2024. The authors would like to thank Enago (www.enago.jp) for the English language review.

Ethical approval

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

Competing interests

The authors have no conflicts of interest to declare.

The 4th Annual JUHS 2024 (Program)

Theme: Cutting Edge of Health Science

Hosted by: Faculty of Health Science, Juntendo University

Date: May 18, 2024

Venue: Ogawa Hall, Bldg. 7 (Part 1); Various locations (Part 2)

Overview

The 4th Annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS 2024) featured academic lectures, laboratory tours, group discussions, and networking sessions offering opportunities for academic exchange and fostering future international collaboration.

Juntendo Health Science Journal 6(1): 104-105, 2025

Part 1 — Ogawa Hall

| Time | Program | Speaker | Chair |
|-------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 09:30–09:35 | Opening Remarks | Prof. Hiroyuki Daida | |
| 09:35–09:40 | Introduction of JUHS | Prof. Shinsuke Kyogoku | |
| 09:40–10:25 | Lecture 1 (PT) | Prof. Birthe Dinesen | Prof. Tetsuya Takahashi |
| 10:25–11:10 | Lecture 2 (PT) | Prof. Suh-Fang Jeng | Prof. Tadamitsu Matsuda |
| 11:10–11:20 | Break | | |
| 11:20–12:05 | Lecture 3 (RT) | Dr. Chiung-Wen Kuo | Prof. Yasuaki Sakano |
| 12:05–12:50 | Lecture 4 (RT) | Dr. Jin Sung Kim | Dr. Chie Kurokawa |
| 12:50–13:00 | Group Photo | | |

PT: Physical Therapy; RT: Radiological Technology.

Lunch Break: 13:00–14:00

Part 2 — Afternoon Sessions by Department (from 14:00)

Department of Physical Therapy

Program: Hospital tour and laboratory talk

Venue: Juntendo Hospital & Ochanomizu Center Building

Department of Radiological Technology

Program: Group discussion

Venue: Building A, 10th Floor Conference Room

Closing Social Event

Networking

Time: 18:00–20:00

Venue: Building A, 2nd Floor Cafeteria

The abstracts on the following pages correspond to the academic lectures presented during Part 1 session of the symposium.

Digital health in Denmark & a digital heart: The path to tele-rehabilitation for atrial fibrillation in Denmark

Birthe Dinesen

Professor & Head of Laboratory for Welfare Technology - Digital Health & Rehabilitation, ExerciseTech,
Department of Health Science and Technology, Aalborg University

Background: Denmark is recognized globally as a leader in digital health. Digital health in Denmark integrates advanced technology such as electronic health records, telehealth services, and mobile health apps, all interconnected through a secure national health data network to enhance patient care, improve data accessibility, and support real-time health monitoring and personalized treatment strategies.

Atrial fibrillation (AF) is the most common cardiac arrhythmia and a significant cause of morbidity worldwide. In Denmark, digital health approaches, including tele-rehabilitation, have been pivotal in managing AF. Through co-creation the Future Patient Telerehabilitation program for patients with AF has been developed and is being tested in a randomized controlled trial. A total of 155 patients of 208 patients has been included so far. The program consists of home monitoring where patients use wearables to measure blood pressure, pulse, sleep, weight, and electrocardiogram. The data are sent to the Heartportal where patients, relatives and healthcare professionals can follow and share data, communicate via video and chat as well as find information on AF. AF patients and patients are offered education in living with AF at a healthcare center. The program last for seven weeks.

Aims: The aims of this presentation are to: 1) Give a short introduction to digital health in Denmark & 2) To present preliminary findings on how AF patients experience participating in the Future Patient Telerehabilitation Program.

Method: In a qualitative sub study semi structured interviews with randomly selected six men (58-93 years; mean 70,5 years) and four women (60-77 years; mean 68,75 years) has been conducted in patients homes.

Preliminary findings: The AF-patients express that they experience a feeling of security, increase knowledge, and that they have received useful new tools on how to live with AF. Few patients find it difficult to read data from home monitoring. The patients find the Heartportal easy to navigate and the Future Patient program supportive.

Conclusion: Denmark's digital health initiative, particularly the Future Patient Telerehabilitation program for atrial fibrillation (AF), demonstrates positive preliminary findings. Patients report increased security, knowledge, and useful tools for managing AF, with the Heartportal being praised for its ease of use. Despite some difficulties in interpreting data, the overall positive reception highlights the transformative potential of digital health in enhancing patient care and rehabilitation for patients with AF.

Application of artificial intelligence for infant motor assessment

Suh-Fang Jeng

Professor, School and Graduate Institute of Physical Therapy, National Taiwan University
Vice President, World Physiotherapy

Early identification of infants at risk of developmental disorders (such as infants born preterm) is an important global health policy and action. Early motor development is significant for developing abilities in other domains in children at an older age. Infant neuromotor assessments have evolved from a traditional focus on muscle tone, primitive reflexes, and milestones to the new addition of behavioral responses, motor performance, and spontaneous movements. Infant neuromotor assessments include neurobehavioral examination, general movement assessment, imaging motion analysis, and artificial intelligence (AI). AI employs machine learning with artificial deep neural networks that mimic the operation of the human brain using multiple layers of artificial neuronal links to generate automated predictions from training datasets. Although AI technology has enabled the tracking and recognition of adult movements in a standardized setup, the applicability of these AI algorithms for infant motor assessment is rare. Therefore, our research team has recently launched a series of studies to develop AI algorithms for early motor assessment in term and preterm infants and to examine the performance of the AI algorithms in movement tracking and classification in these infants. We have prospectively assessed 30 term infants and 54 preterm infants using the Alberta Infant Motor Scale (58 movements in prone, supine, sitting, and standing positions) from 4 to 18 months of age, and their movements were recorded by five video cameras simultaneously in a standardized clinical setup. Pediatric physical therapists annotated the movement videos for the start/end times and presence of movements. The annotated videos were used to develop and test an AI algorithm consisting of a 17-point human pose estimation model and a skeleton-based action recognition model. Using the annotated results as the standards, the AI algorithm showed satisfactory agreement in classifying the 31 movements (accuracy = 0.91, recall = 0.91, precision = 0.91, and F1 score = 0.91) (Lin et al. Application of artificial intelligence in infant movement classification: A reliability and validity study in infants who were full-term and preterm. *Physical Therapy and Rehabilitation Journal*. 2024;104:pzad176). We have also developed a mobile application (APP), "Baby Go," for remote video file uploading by the parents in the home setup. The APP is currently under revision to contain the features of age-based motor assessment with two to five movements at each age and education module. Our research is an incremental AI model advancement in tracking and recognizing infant movements from a laboratory-based classification system to a home-based assessment system. We hope the automatic AI-driven infant motor assessment via the APP provides parents and healthcare professionals with innovative, feasible, and valid developmental assessment resources in remote communities.

Recent trends in breast imaging techniques in breast cancer detection

Chiung-Wen Kuo

Department of Medical Imaging and Radiological Technology, Yuanpei University of Medical Technology

Breast cancer is the most common cancer and the leading cause of cancer-related death among women worldwide. Early detection of breast cancer plays an important role in the treatment and control of the disease. Various methods, including mammogram, (conventional, tomosynthesis, contrast-enhanced mammography), ultrasound (hand-held, automated breast ultrasound, elastography), MRI, and nuclear medicine, have been introduced to diagnose breast cancer with their clinical advantages and disadvantages. This presentation aims to provide an overview of contemporary breast imaging modalities, with a particular focus on mammography and ultrasound, elucidating their clinical benefits and limitations.

Keywords: breast cancer, mammography, ultrasound, MRI

AI in radiation oncology

Jin Sung Kim

Chief Medical Physicist, Director of Research Associate Professor,
Department of Radiation Oncology Yonsei University College of Medicine, Yonsei Cancer Center

Artificial intelligence (AI) is transforming radiation oncology by enhancing precision, efficiency, and patient outcomes. Machine learning algorithms are used to optimize treatment planning, ensuring accurate dose distribution while minimizing damage to healthy tissues. Deep learning models assist in segmenting tumors and organs at risk from medical images, improving diagnostic accuracy and workflow efficiency. Large Language Models (LLMs) contribute by analyzing vast amounts of clinical data, predicting treatment responses, and personalizing therapy plans. AI-driven predictive analytics enable early identification of complications, allowing for timely interventions. As AI continues to evolve, its integration into radiation oncology promises to revolutionize cancer treatment, offering more effective and tailored therapeutic options for patients.

臨床見学型短期留学（台湾）

内山翔太、米山 優、岩津弘太郎

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

2024年8月12日～8月23日の14日間、台北にて臨床見学型短期留学（台湾）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にて研修プログラムに参加した。現地では臨床見学に加えて、最終日にプレゼンテーションを行い、理学療法や医療制度における日本と台湾の相違点についてディスカッションをする機会も得た。今回の短期留学を通して、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。また、現地学生たちとの交流にて良き友人にも恵まれた。

キーワード：台湾、臨床見学、異文化交流、理学療法

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 110-113頁, 2025年（受付 2025.3.5.; 受理 2025.3.6.）

1. 海外研修プログラムの概要・研修の全体スケジュール

2024年8月12日～2024年8月23日の14日間、我々は臨床見学型短期留学（台湾）に参加する機会を得た。短期留学先は、台北に位置する国立台湾大学（National Taiwan University: NTU）（図1）であり、NTU 附属病院にて臨床見学や物理療法機器の体験、アジア理学療法学生連盟（Asia Physical Therapy Student Association: APTSA）に加入している学生との交流などを行った。同病院内の診療科を包括的に学ぶことが可能なスケジュールが組まれており、多くの学びを得ることができた（表1）。



図1 NTU 附属病院

2. 研修施設の概要と研修内容および所感

1) 1週目の臨床見学について

1週目は、NTU 附属病院内の PT センター（図2）で臨床見学を行う機会を得た。主に運動器疾患の外来、ベッドサイドでの理学療法の見学、および失禁外来の見学を行った。同病院は約2600床を有する台湾最大級の病院であり、台湾全土から患者が来院する。患者数が多いため、理学療法士が担当する患者数が日本の総合病院と比べて多い印象を受けた。また、医療保険の関係により、日本の総合病院と比較して入院期間が短いという説明を受けた。そのため、リハビリテーションでは最低限の機能回復を行い、家族への退院後指導に力を入れており、その点が日本の総合病院での理学療法との大きな違いであると感じた。また、退院後に長期間のリハビリテーションを受けたい患者向けに理学療法クリニックがある。台湾では、保険適用外であるが、理学療法士がクリニックを開業することができる。

PT センターでは、運動器疾患の理学療法のほかにウィメンズヘルス外来（図3）の見学を行う機会があった。主に骨盤底筋群の筋力評価、筋力トレーニングを行うことで、失禁の予防・改善を行っていた。バイオフィードバックを用いてゲーム感覚で筋力トレーニングを行っており、非常に興味深い見学となった。日本の総合病院では、ウィメンズヘルスを専門に行っていることが少なく、今後日本において発展していく分野

連絡先：岩津弘太郎
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: k.iwatsu.cz@juntendo.ac.jp

表 1 現地における全体の研修スケジュール

| | 午前 | 午後 |
|-------|--------------|--------------|
| 1 日目 | NTU および病院内見学 | 整形外科 (外来) |
| 2 日目 | 整形外科 (急性期) | 整形外科 (急性期) |
| 3 日目 | ウィメンズヘルス外来 | 整形外科 (急性期) |
| 4 日目 | 脳神経外科 (急性期) | ICU |
| 5 日目 | ウィメンズヘルス外来 | APTSA 学生活動交流 |
| 6 日目 | 観光 | |
| 7 日目 | 観光および自習 | |
| 8 日目 | 心肺科 (急性期) | 物理療法見学 / 体験 |
| 9 日目 | 脳神経科 (外来) | 小児科 (外来) |
| 10 日目 | 筋骨格系疾患外来 | 心肺科 (外来) |
| 11 日目 | 脳神経科 (外来) | 小児科 (外来) |
| 12 日目 | 脳神経科 (外来) | 最終プレゼンテーション |



図 2 PT センター



図 3 ウィメンズヘルス

の一つになると考えた。

2) 2週目の臨床見学について

2週目は、NTU 附属病院内にて主に心肺疾患術後急性期、小児科外来、筋骨格系外来、脳神経科外来の臨床見学を行った。特に心肺疾患術後急性期分野は、治療からリハビリテーションまでを1フロアで完結できるように設計されており、歩行訓練を行うことができる廊下もあった。この廊下はタイマーや心電図モニターなどが設置されており、急性期のリスクの高い患者の評価として6分間歩行試験を実施することが可能な設備であった。状態が変動するリスクの高い患者の術後リハビリテーション評価を行う上で、安全に客観的情報を収集しやすい環境であると考えた。また、小児科外来ではゲームを利用した重心移動訓練 (図4) や玩具を活用した療育訓練を実施しており、子ども達が積極的に理学療法に参加したくなる工夫がされていた。

3. 学生交流の概要および所感

本研修中では、NTU の学生との交流の機会が多く設けられていた。(図5) その中で、日本と台湾の教育制度の違い、臨床現場の違いについてのディスカッションを行うことができた。現地の学生と交流する中で、特に学生の英語力の高さを感じた。どの学生も基本的な会話を英語で行うことができ、カルテ、症例報告スライドを英語で作成していた。また、英語論文を読む機会も多く、日常的に英語に触れる時間が多い印象を受けた。実習の症例報告では、一人45分間の時間が設けられ、担当患者についての報告を行っていた。発表スライドは、担当患者について詳細に記載されており、質疑応答も活発に行われていた。日本とは異なる環境で研修を行うことができ、多くの刺激、モチベーションを得ることができた。

4. 日本と台湾の相違点 (教育、臨床)

教育において、卒業までの最大年数が日本と台湾の



図4 小児理学療法における重心移動訓練の体験

大きな違いであると感じた。日本の理学療法養成校は最大4年制である。台湾では、基本的に4年制であることが多いが、今回研修を行った NTU では6年制の教育が実施されていた。4年間は座学を中心に行い、残りの2年間は実習を行う十分な教育期間が設けられていた。実習は6週間ごとに各分野をローテーションする制度があり、より多くの疾患に触れる環境があった。また、使用される言語にも違いがあった。日本では、日本語での授業、教科書の使用、カルテ記載を行っている。一方、台湾では、授業は中国語を使用して行われるが、教科書、カルテ記載は英語が使用されることが多い。日本と比較して英語に触れる機会が多く、どの学生、理学療法士も英語を用いてディスカッションを行うことができる能力があった。

臨床では、理学療法目的に大きな違いがみられた。日本では、基本的な動作能力の向上を目的としているため、ADL 練習に時間を費やすが、台湾では、家族に対する理学療法指導に時間を費やしていた。NTU 附属病院は患者数が非常に多く、一人の理学療法士が担当する患者数も多い。そのため、患者一人に対する介入時間が少ない。また、理学療法士が介助者へ動作、介助の指導を行い、介助者にも入院期間に介助を経験



図5 最終プレゼンテーション

してもらい退院後の生活を想定した指導が行われていた。基本的動作能力の回復がみられても、退院後に能力低下、介助負担の増加が起きてしまう可能性があるため、家族や介助者に対する指導の大切さを改めて考える機会となった。

学生との交流や研修を通して、文化の違いからもたらされる臨床の2か国間での違いを学んだ。加えて、研修に参加することで多くの学びを得ることができ、この貴重な体験は卒業後のキャリア形成に大きく関連していくと考える。

5. 海外研修プログラムに興味を持つ 後輩への言葉

2週間の研修プログラムでは、語学だけでなく現地の医療、文化の違いを学ぶことができた。特に学生との交流では、語学力によって意思疎通に苦労する場面があったが、失敗を恐れずに積極的に交流することの重要性を強く感じた。また、異文化を経験することで日本の良いところ、悪いところを再認識することができ、自身の視野を広げることができる良い機会になったと考えている。ぜひ後輩たちにも積極的に参加してもらい、多くの学びを得てほしいと願っている。

Abstract

Participation in short-term study abroad for clinical observation in Taipei, Taiwan

Shota Uchiyama, Yu Yoneyama, Kotaro Iwatsu

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

We participated in a 14-day clinical observation-based short-term study abroad program in Taipei, Taiwan, from August 12 to August 23, 2024. We took part in a training program at National Taiwan University. In addition to clinical observation, we had the opportunity to deliver a presentation on the final day, highlighting the differences between Japanese and Taiwanese physical therapy practices and healthcare systems. This short-term study abroad experience deepened our interest in international physical therapy and provided valuable insight for future professional development. Furthermore, we were fortunate to form strong friendships with local students through cultural exchange.

Key Words: Taiwan, clinical observation, international interaction, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 110-113, 2025]

臨床実習型短期留学（台湾）

小山 珠、宮下茉代、福島由芽、岩津弘太郎

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

2024年8月18日～8月31日の14日間、我々は臨床実習型短期留学（台中、台湾）に参加する機会を得た。短期留学前半は台中にある亜州大学を訪問し、主に附属病院での入院患者や医療従事者との関わり方を学んだ。後半は同じく台中にある中国医薬大学を訪問し、附属病院での心臓リハビリテーションや、地域の整形外科クリニックや障害者施設など、様々な場所で活躍する理学療法士について学んだ。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霧峰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、台湾の温かい国民性や文化に触れ、多角的な視点から理学療法士の役割について考えることができた。

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6巻, 第1号, 114-117頁, 2025年 (受付 2025.2.13.; 受理 2025.3.6.)

1. 海外研修プログラムの概要・研修の全体スケジュール

2024年8月18日から31日までの間、我々は臨床実習型短期留学に参加する機会を得た。留学期間中、前半は台中にある亜州大学を訪問し、主に附属病院での入院患者に対する理学療法について学んだ。後半は同じく台中にある中国医薬大学を訪問し、附属病院だけでなく、地域の整形外科クリニックや障害者施設など、様々な施設での理学療法について学んだ。各大学で見学した病院・施設を表1にまとめた。

2. 研修施設の概要と研修内容および所感

各施設における理学療法の特徴や日本との違いについて学んだ点を整理し、研修を通じて得た知見を述べる。

1) 1週目の臨床参加について（図1）

1週目は亜州大学附属病院で、2グループに分かれ、曜日ごとに運動器や小児、神経など様々な分野を見学した。同病院は台湾の台中市にある総合病院で、地域医療を支える重要な役割を果たしており、医療・教育・

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 | 亜州大学附属病院 | 亜州大学附属病院 |
| 2日目 | 亜州大学附属病院 | 亜州大学附属病院 |
| 3日目 | 亜州大学附属病院 | 亜州大学附属病院 |
| 4日目 | 亜州大学附属病院 | 亜州大学附属病院 |
| 5日目 | 亜州大学附属病院 | 霧峰見学ツアー |
| 6日目 | 九份・十分観光 | |
| 7日目 | 台北観光 | |
| 8日目 | 中国医薬大学附属病院 | 中国医薬大学附属病院 |
| 9日目 | 中国医薬大学附属病院 | 中国医薬大学附属病院 |
| 10日目 | 中国医薬大学附属病院 | 中国医薬大学附属病院 |
| 11日目 | Taichung City Love Home | BOMT Physical Therapy Clinic |
| 12日目 | AiCare Wenxin branch group-manage PT clinic | Campus tour and final presentation |

連絡先：岩津弘太郎

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: k.iwatsu.cz@juntendo.ac.jp

研究の3本柱を掲げている。我々は外来患者に対する徒手療法や物理療法、ベッドサイドでの理学療法の見学を行うことができた。台湾の病院では、ケアギバーと呼ばれる入院患者と共に病室に滞在する役割の家族や職業としている方がいた。日本の多くの総合病院では看護師が患者のケアも担うが、台湾では看護師が不足しているため、入院期間中の患者の食事や入浴などの身の回りの世話をを行う役割があった。

また、同病院がある台中市霧峰区は、豊かな歴史と文化を持つ地域であり、ツアーを企画していただいた。特に、霧峰林家は台湾有数の名門家で、その邸宅は伝統的な中国建築と西洋建築が融合した美しい庭園として知られている（図2）。

2) 2週目の臨床参加について（図3）

2週目は中国医薬大学附属病院で、主に心臓リハビリテーション分野の理学療法を見学した。同病院は台中に位置し、台湾中部の医療センターの役割を担っている。我々は心臓疾患の患者に対する様々な理学療法

や治療法を見学した。また、同病院の附設医院急診部では、事故や自殺未遂による重症患者に対する理学療法を見学した。同病院では患者の家族も一緒に入院することが可能であり、理学療法士が家族と接することも多いため、家族への教育を理学療法士が行うことも非常に大切であることを学んだ。

地域の整形外科クリニック（図4）や障害者施設も見学し、様々な物理療法を体験した。また、台湾の理学療法協会の理事長と面談し、日本と台湾の理学療法の相違点や開業権について、今後の展望をディスカッションした（図5）。

3. 学生交流の概要および所感

本研修中では、台湾の理学療法を学ぶ学生との交流の機会が多く設けられていた。臨床実習中の学生に台湾での学校生活や臨床実習の内容を聞き、日本と台湾の理学療法を学ぶ学生生活の違い、台湾での留学生生活をより充実させるために必要な生活様式を学ぶ機会になった。



図1 亜州大学附属病院で小児理学療法を担当されている理学療法士（写真前列中央）と現地実習生（前列左右）との集合写真



図2 霧峰見学ツアー（霧峰林家花園）



図3 中国医薬大学にて Yu-Jung Cheng 先生との集合写真



図4 BOMT クリニックでの物理療法の様子
ショックウェーブを体験



図5 台湾理学療法士協会理事長のWendy TJ Wang先生(写真左)とのディスカッションの様子

特に、臨床実習の形態に大きな違いがあった。台湾では運動器、神経、内部障害、小児の4つの分野で臨床実習を行うことが必須とされており、各6週間、計24週間の実習を行う。一方、日本では分野、期間は固定されておらず、合計約18週間と台湾と比較すると短期間である。

さらに、中国医薬大学には様々な国からの留学生が在籍しており、その留学生とも文化の違いなどをディスカッションする機会があった。その国の文化により行う理学療法も異なることを学び、海外で働く場合や日本で理学療法を提供する場合にも、患者の文化に合わせた理学療法を提供する必要があると感じた。

4. 日本と台湾の理学療法士の相違点

臨床現場における相違点として、台湾では入院患者を家族などのケアギバーと呼ばれる介護者がサポートすること、入院期間が短いこと、患者が自由に外出できることが挙げられる。日本では看護師が患者の世話をするのにに対し、台湾ではキーパーソンである家族や

ヘルパーが患者に付き添い、一緒に理学療法に取り組むスタイルであった。また、台湾の入院患者は病院外で買い物をしたり、煙草を吸っていたりする様子を見て大変驚いた。

台湾の外来患者は、診断ごとに6回程度の理学療法セッションを行うことができるシステムであった。日本では理学療法士が1対1で患者を担当することが多いのに対し、台湾では一人の理学療法士が複数の患者を担当していた。さらに、台湾の理学療法士は日本と異なり開業権があり、自費診療のクリニックも多くあった。自費診療の整形外科クリニックでは、地域の病院と連携を取りながら、初期評価から治療までの役割を理学療法士が担っていた。

今回の研修を通して、医療従事者の役割の違いや理学療法のシステムの違いを学ぶことができた。

5. 後輩へのメッセージ

2週間の海外研修プログラムは、日本と台湾の理学療法の相違点や、現地の教員や学生との交流を通じて、日本の医療を客観視する非常に有意義な経験となった。単なる語学目的の研修や異国の文化を堪能できる海外旅行と異なり、現地の大学での寮生活や臨床実習を通して、今後の勉学や自身のキャリア形成につながる知識や経験を得ることができた。

台湾の学生は日本と同じで非母国語でありながら、流暢に英語を話すことができる学生が多く、大変驚いた。ディスカッションの場では意思疎通に苦労する場面もあったが、積極的に意見交換に参加する姿勢を積み重ねることで、多くの友人ができ、学びを深めていけると実感した。こうした経験は、今後社会に出た際も大いに役立つと考える。自身の視野を広げる絶好の機会であるため、ぜひ次年度以降、後輩たちにも積極的に参加してほしいと願っている。

Abstract

Participation in short-term study abroad for clinical observation in Taichung, Taiwan

Tamaki Koyama, Mayo Miyashita, Yume Fukushima, Kotaro Iwatsu

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

From 18 August to 31 August 2024, we participated in a 14-day short-term study abroad program focused on clinical observation in Taichung, Taiwan. During the first half of the program, we visited Asia University in Taichung, where we studied physical therapy practices for inpatients at the university's affiliated hospital. In the second half of the program, we visited China Medical University, also in Taichung, where we learned about physical therapy practices in various settings, including the affiliated hospital, local orthopedic clinics, and facilities for individuals with disabilities. Additionally, a university campus tour and a visit to Wu-Feng allowed us to explore Taiwan's rich history. Through interactions with Taiwanese students and participation in the training program, we developed an appreciation for Taiwanese culture and the warm character of its people.

Key Words: Taiwan, Taichung, clinical observation, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 114-117, 2025]

語学教育型海外短期留学（カナダ）

高木 亜季

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

今回、順天堂大学保健医療学部理学療法学科が提供する語学教育型海外短期留学（カナダ）に参加した。研修では英語学習のみならず、スポーツクリニックの見学や、カナダにおける理学療法士の働き方などを学習した。日本では体験することのできない数多くの経験をすることができた。英語での異文化交流を通じて、自分自身の視野を広げることができ、将来は理学療法士として国際的に活躍していきたいと考えた。新たな価値観や考え方を得ることができたカナダでの2週間の海外研修について報告する。

キーワード：カナダ、英語教育、異文化交流、理学療法

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 118-121頁, 2025年 (受付 2025.1.14.; 受理 2025.1.22.)

研修プログラムの概要

2024年9月7日から9月21日まで、保健医療学部理学療法学科が提供する語学教育型海外短期留学に参加する機会を得た。留学先はカナダのブリティッシュコロンビア州にあるビクトリアで、滞在中はホストファミリーの家にホームステイをした。

研修の全体スケジュール

現地における研修スケジュールとして、平日は朝から昼過ぎまで語学学校に通い英語学習をし、放課後は学校で提供されている課外活動への参加や自由時間を過ごした（表1）。また、休日は市街地散策や、研修プログラムに参加した。他にもホストファミリーとハイキングをしたり（図1）、誕生日をお祝いしていただいたり（図2）、現地でできた友人とショッピングをし

表1 現地における研修の全体スケジュール

| 日程 | 曜日 | 9時から14時 | 放課後アクティビティ |
|-------|----|--------------------------------|---------------------------|
| 9月7日 | 土 | | ビクトリア到着 |
| 9月8日 | 日 | | フリータイム |
| 9月9日 | 月 | 語学学校 | Camosun College & PISE 見学 |
| 9月10日 | 火 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月11日 | 水 | 語学学校 | 語学学校アクティビティ |
| 9月12日 | 木 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月13日 | 金 | 語学学校 | ビクトリア大学キャンパス見学 |
| 9月14日 | 土 | Pacific FC ゲーム観戦 & 現地理学療法士との交流 | |
| 9月15日 | 日 | | フリータイム |
| 9月16日 | 月 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月17日 | 火 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月18日 | 水 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月19日 | 木 | 語学学校 | Re Balance（理学療法医院）見学 |
| 9月20日 | 金 | 語学学校 | フリータイム |
| 9月21日 | 土 | | 日本へ帰国 |

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

たりと積極的にコミュニケーションを取り、有意義な時間を過ごした。

研修施設の概要と研修内容および所感

研修プログラムの中で、医師と理学療法士が在籍している ReBalance という複合リハビリテーション施設を見学した (図3)。この施設には、急性期から慢性期の筋骨格系およびスポーツ外傷・障害の診断と治療を専門とする医療チームがある。このチームはスポーツ内科医、整形外科医、理学療法士で構成されており、これらの医療専門家が連携をしながら総合的な診断と治療計画を提供していた。医師と理学療法士がチームとして共同し、それぞれの知識や技術、経験を補完し合える環境であると伺った。それにより、あらゆる年代や疾患の患者様に最善の医療を提供していくことができると考えた。

日本では気軽に病院へかかることができるが、カナダでは日本とは病院を受診する際のシステムが異なるとの話も伺った。「日本には総合病院のようにいくつもの診療科が一つの病院にまとまっている病院が数多

くあるが、カナダにはそれぞれのクリニックしか以前はなかった。そこで、理学療法士が開業し、医師を一つの場所へ集め、患者様が別の病院へ移る必要がないような病院としてつくられたのが ReBalance だ」と現地スタッフが話されていた。

日本では理学療法士が開業することはできないが、その意味を今回の経験から考えた。理学療法士が開業することで、他職種とのより対等な関係を築くことができるのではないかと考えた。

学生交流の概要および所感

平日は朝から昼過ぎまで語学学校に通った (図4)。語学学校には、世界各国からの留学生が集まっていた。様々な国の人々と交流することで異なる文化や価値観を知り、自分自身の考え方や将来の可能性を広げることができた。英語でのコミュニケーションは慣れるまでに時間を要したが、英語を学ぶことの楽しさを感じた。フランスやメキシコ、韓国など母国語が異なる人々と話す上で、それぞれの母国語は話すこともできなければ理解することもできない。しかし、英語であれば



図1 ハイキングでの景色



図2 ホストファミリーに誕生日を祝ってもらっている様子



図3 ReBalance の見学



図4 語学学校修了時

会話が可能であり、コミュニケーションを取ることができるということに感銘を受けた。非常に短い期間ではあるが、英語での生活を送ることで段々と自分に自信をつけることができた。ときには自分の伝えたいことを伝えることができないもどかしさもあったが、徐々に自分の意見を伝えることができるようになった。

カナダと日本の理学療法士の相違点

カナダの理学療法士と日本の理学療法士の大きな違いは、開業権があり医師と同じように診断できることである。カナダにおける理学療法士の社会的な認知度や信頼度は高い。カナダでは、理学療法は保険の対象外であり、患者様が理学療法を受ける際にはどの理学療法士の治療を受けるか選択できる。そのため、患者様からの信頼を得るには、より確かな技術力が必要となる。

また、医師の診断がないことで理学療法を実施する前に診断・治療方針の決定をしなければいけない点も日本とは異なる。そのため、患者急変時の対応や治療方針決定などのあらゆる状況に対応できるよう幅広い知識や技術が必要だと考えた。これらのことはもちろん日本においても必要なことではあるが、カナダではより重要視されていると考えた。国際的に活躍するためには、その国で働くために何が必要であるのかをよく理解し、その力を身につけることが重要である。

後輩へのメッセージ

海外研修プログラムは、旅行とは異なり語学学校や現地で働く理学療法士の方との交流（図5）、クリニック見学などが含まれる。そのため、英語でのコミュニケーションに加えて海外での理学療法士の働き方などを学ぶことができる。年齢も国籍も違う多くの人と出会い、私はこの経験を通して海外研修に参加して心か



図5 カナダで働く理学療法士との交流

ら良かったと感じている。少しでも興味があれば、英語力に不安があったとしても海外研修に参加すべきである。参加することに意味があり、この貴重な機会をどのように活かしていくかは自分次第であると考え

最後に

2週間の海外研修プログラムであるカナダ留学は、とても貴重な経験であった。語学学校や研修プログラムを通して価値観や将来の選択肢が増えた。また、研修プログラムの中ではカナダで働く理学療法士の方から話を聞くことができ、海外で働くためには何が必要であるのかを明確にすることができた。今まで海外で働くことは漠然とした憧れであったが、やるべきことが明確になったことで今の自分の立ち位置を明確にすることができた。理学療法士として国際的に活躍するべく自己研鑽を重ねていきたい。

利益相反

本報告における利益相反はない。

Abstract

Participation in short-term study abroad for language education in Canada

Aki Takagi

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

I participated in a short-term study abroad program for language education in Canada offered by the Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University. During the training, I not only received English language education but also observed a sports clinic and learned about the working style of physical therapists in Canada. Through cross-cultural exchange in English, I was able to broaden my horizons and decided that I would like to work internationally as a physical therapist in the future. I would like to report on the two-week overseas training program in Canada, which gave me new values and ways of thinking.

Key Words: Canada, English language education, cross-cultural exchange, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 118-121, 2025]

令和3年厚生労働省告示第273号研修における実技研修

室井健三、坂本 肇、中西 淳、家崎貴文、芳士戸治義、後藤政実、佐藤英介、津田啓介、中世古和真、臼井桂介、小山和也、渋川周平、福永一星、堀 拳輔、村中由佳、木暮陽介、坂野康昌、京極伸介

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

令和3年7月9日、医政発0709第7号「臨床検査技師等に関する法律施行令の一部を改正する政令等の公布について」が厚生労働省医政局長より発出され、診療放射線技師の業務が一部追加された。令和6年度の4年生は追加された業務に関する教育が当該学生のカリキュラムに設定されていないため、各養成校で国家試験受験までに告示研修と同様な教育を実施することが義務付けられた。本学科での告示研修は、令和6年9月12日、9月13日、9月17日の3日間、順天堂大学保健医療学部診療放射線学科実習棟で行われた。受講生は令和6年度4年生124名と卒業生1名である。他養成校の学生2名を加えた合計127名が研修を行った。受講生は実習前の基礎研修として、同年6月末までに700分の e-learning による研修を受講した。告示研修当日の午前は実習内容に関する動画を視聴し、午後は日本診療放射線技師会主催の告示研修に準じた実技研修が行われた。研修後の学生のコメントでは、技術の習得を実感するとともに、臨床で業務に取り組む前には告示研修で学んだ内容の再確認を行う必要性を感じているとの意見があった。学生は自分の力量を冷静に判断し、未熟な面をさらなる研修で補おうと認識している様子が垣間見られた。

キーワード：告示研修、業務追加、実技研修

順天堂保健医療学雑誌，第6巻，第1号，122-126頁，2025年（受付 2025.1.20.；受理 2025.2.21.）

はじめに

令和3年7月9日、医政発0709第7号「臨床検査技師等に関する法律施行令の一部を改正する政令等の公布について」¹⁾が厚生労働省医政局長より発出され、診療放射線技師の業務について下記の行為が追加された。

(1) 核医学検査のために静脈路に放射性医薬品を投与するための装置を接続する行為、当該放射性医薬品を投与するために当該装置を操作する行為並びに当該放射性医薬品の投与が終了した後に抜針及び止血を行う行為（静脈路に放射性医薬品を投与するための装置を接続するために静脈路を確保する行為についても、「静脈路に放射性医薬品を投与するための装置を接続する行為」に含まれる。）

(2) 静脈路に造影剤注入装置を接続する際に静脈路を確保する行為

(3) 動脈路に造影剤注入装置を接続する行為（動脈路確保のためのものを除く。）及び造影剤を投与するために当該造影剤注入装置を操作する行為

(4) 下部消化管検査のために肛門に挿入されたカテーテルから注入した造影剤及び空気を吸入する行為

(5) 上部消化管検査のために鼻腔に挿入されたカ

テーテルから造影剤を注入する行為及び当該造影剤の注入が終了した後に当該カテーテルを抜去する行為

これに伴い、令和6年4月1日前に診療放射線技師の免許を受けた者、および同日前に診療放射線技師国家試験に合格した者であって同日以降に診療放射線技師の免許を受けた者は、上記の追加された行為を行おうとするときは、あらかじめ、厚生労働大臣が指定する研修（公益社団法人日本診療放射線技師会主催の告示研修）の受講が義務付けられた。

診療放射線技師養成校の令和6年度の4年生は、上記の告示研修対象者ではないが、新たに追加された業務に関する教育が当該学生のカリキュラムに設定されていないため、令和7年2月20日に開催される第77回診療放射線技師国家試験受験までに各養成校で告示研修と同様な教育を実施することが義務付けられた。このため、令和6年に学内での告示研修を実施することになった。なお、3年生より下位の学年は告示研修内容を含むカリキュラムが制定されているため、本研修の対象外となる。

連絡先：室井健三

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: k.muroi.xs@juntendo.ac.jp

本学科での告示研修について

本学科での告示研修は、令和6年9月12日、9月13日、9月17日の3日間、順天堂大学保健医療学部診療放射線学科実習棟で行われた。実施内容は日本診療放射線技師会告示研修実施運営委員会作成の「令和3年厚生労働省省告示第273号研修における実技研修の地域開催要綱（手引き）」²⁾に準じた。受講生は令和6年度4年生124名と卒業生1名である。他養成校の学生2名を加えた合計127名が本学で研修を行った。

実習1日あたりのスタッフは、開催責任者1名（東京都診療放射線技師会理事）、監督者1名（本学科所属の医師）、ファシリテータ6名（本学科所属の診療放射線技師で日本診療放射線技師会主催の告示研修修了者）、動画視聴監督者1名、運営担当2名であり、実習3日間

の本学所属スタッフの延べ人数は30名であった。

1日6グループを編成し、1グループ6～8名として実習を行った。受講生は基礎研修として同年6月末までに700分の基礎研修（e-learning）を受講してから実習に臨んだ。

告示研修当日のプログラムを図1に示す。午前は実習内容に関する210分の動画を視聴した（図2）。午後には以下の6テーマについて実技研修を実施した。

静脈実習：静脈路を確保する行為の実技研修、50分（図3）

動脈実習：動脈路に造影剤注入装置を接続する行為の実技研修及び動脈に造影剤を投与するために当該造影剤注入装置を操作する行為の実技研修、50分（図4）

静脈 RI 実習：核医学検査手技の実技研修、30分

プログラム

| 時刻 | グループ1 | | グループ2 | | グループ3 | |
|-------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 8:50 | 開講式、研修内容の説明（放射実習棟 8階） | | | | | |
| 9:00 | 動画の視聴（210分 ※休憩含む） | | | | | |
| 12:30 | 休憩（60分） | | | | | |
| 13:30 | 下部実技 (30分) | 上部実技 (30分) | 動脈実技 (50分) 9階右 | 動脈実技 (50分) 9階右 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 静脈実技 (50分) 9階左 |
| 13:40 | 5階奥 | 5階手前 | | | | |
| 13:50 | | | | | | |
| 14:00 | 上部実技 (30分) | 下部実技 (30分) | 休憩 | 休憩 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 静脈 (CT) (40分) 6階 |
| 14:10 | 5階手前 | 5階奥 | | | | |
| 14:20 | 休憩 | | 下部実技 (30分) 5階奥 | 上部実技 (30分) 5階手前 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 |
| 14:30 | 休憩 | | | | | |
| 14:40 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 上部実技 (30分) 5階手前 | 下部実技 (30分) 5階奥 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 |
| 14:50 | | | | | | |
| 15:00 | | | 静脈実技 (50分) 9階左 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 |
| 15:10 | | | | | | |
| 15:20 | 休憩 | | 休憩 | | 休憩 | |
| 15:30 | 休憩 | | 休憩 | | 休憩 | |
| 15:40 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 静脈実技 (50分) 9階左 | 動脈実技 (50分) 9階右 | 動脈実技 (50分) 9階右 |
| 15:50 | | | | | | |
| 16:00 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 休憩 | | 休憩 | |
| 16:10 | | | | | | |
| 16:20 | 休憩 | | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 下部実技 (30分) 5階奥 | 上部実技 (30分) 5階手前 |
| 16:30 | 休憩 | | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 上部実技 (30分) 5階手前 | 下部実技 (30分) 5階奥 |
| 16:40 | 休憩 | | | | | |
| 16:50 | 休憩 | | 休憩 | | 休憩 | |
| 17:00 | 動脈実技 (50分) 9階右 | 動脈実技 (50分) 9階右 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 上部実技 (30分) 5階手前 | 下部実技 (30分) 5階奥 |
| 17:10 | | | | | | |
| 17:20 | | | 静脈 (CT) (40分) 6階 | 静脈 (RI) RI 実技 (30分) 4階 | 上部実技 (30分) 5階手前 | 下部実技 (30分) 5階奥 |
| 17:30 | | | | | | |
| 17:40 | | | 休憩 | | 休憩 | |
| 17:50 | 休憩 | | 休憩 | | 休憩 | |
| 18:00 | 閉講式 | | | | | |

図1 告示研修プログラム

(図5)

静脈 CT 実習：CT 及び MRI 造影検査手技の実技研修、40分 (図6)

上部消化管実習：上部消化管検査のために挿入した鼻腔カテーテルから造影剤を注入する行為の実技研修及び造影剤の投与が終了した後に鼻腔カテーテルを抜去する行為の実技研修、30分 (図7)

下部消化管実習：CT コロノグラフィ検査におけるカテーテル挿入に関する行為の実技研修及び下部消化管検査 (CT コロノグラフィ検査含む) で注入した造影剤及び空気を吸引する行為、30分 (図8)

静脈路確保や消化管へのカテーテル挿入などの実技研修を行うにあたり、人体模型ファントム、装着式採



図 2 動画視聴の様子



図 3 静脈研修の様子



図 4 動脈研修の様子



図 5 静脈 RI 実習の様子



図 6 静脈 CT 実習の様子



図 7 上部消化管実習の様子



図8 下部消化管実習の様子

血静注キット15セット、鼻腔カテーテル造影剤注入シミュレータ4セット、注腸カテーテル挿入シミュレータ4セットを用意した。また、穿刺針、造影カテーテル、滅菌ガウン、滅菌シート等、多数の消耗品を準備した。

実習実施にあたり、学生は基礎研修（e-learning）と研修前の動画にて研修内容をある程度理解して参加したが、実際に穿刺針をシミュレータに穿刺する実技では、初めはうまく実施できないケースが見受けられた。研修では、実技を何度も繰り返して行い、適宜監督者やファシリテータからのアドバイスを受け、手技の向上が図られていった。

告示研修後の学生のコメントでは、「難しいと感じたが、実際の現場で働く意識というものが強くなったと感じた」「実践することで正しい知識と技術が身についたと感じた。臨床に出る前に研修で行ったことをもう一度確認しようと思う」など、技術の習得を実感するとともに、臨床で業務に取り組む前には告示研修

で学んだ内容の再確認を行う必要性を感じているとの意見があった。学生は自分の力量を冷静に判断し、未熟な面をさらなる研修で補おうと認識している様子が垣間見られた。

前述のとおり、3年生からは今回のような特定日での研修ではなく、カリキュラム内の教育として告示研修の内容が行われる。基礎研修（e-learning）については、2学年後期時の必修科目【臨床画像学概論：1単位】時に座学を行い、3学年前期の必修科目【臨床画像学実習Ⅱ：2単位】で実技研修を行う。今年度実施した告示研修内容をさらにブラッシュアップして、今後の教育に生かすべく、カリキュラム構成と講義、実習内容の検討を進める。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

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。

参考資料

- 1) 厚生労働省医政局長：医政発0709第7号 臨床検査技師等に関する法律施行令の一部を改正する政令等の公布について、令和3年7月9日。
- 2) 公益社団法人日本診療放射線技師会告示研修実施運営委員会：令和3年厚生労働省告示第273号研修における実技研修の地域開催要綱（手引き）、2023年4月1日。

Abstract

Practical training based on Ministry of Health, Labour and Welfare Notice No. 273 (2021)

Kenzo Muroi, Hajime Sakamoto, Atsushi Nakanishi, Takafumi Iesaki, Haruyoshi Hoshito, Masami Goto, Eisuke Sato, Keisuke Tsuda, Kazuma Nakazeko, Keisuke Usui, Kazuya Koyama, Shuhei Shibukawa, Issei Fukunaga, Kensuke Hori, Yuka Muranaka, Yosuke Kogure, Yasuaki Sakano, Shinsuke Kyogoku

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

On July 9th, 2021, the Director of the Medical Administration Bureau of the Ministry of Health, Labour, and Welfare issued a notice (No. 7 of the Medical Administration Bureau, 0709) regarding the publication of a Cabinet Order to amend the Order for Enforcement of the Act on Medical Technologists, and so on, and some of the duties of radiological technologists were added. As the education regarding the additional duties was not set in the curriculum of the students who will graduate in 2024, the mandate requires that each training school provides education similar to that of the official announcement training before the national examination. The official announcement training in our department was held for three days, on September 12th, 13th, and 17th 2024, at the practice building of the Department of Radiological Sciences, Faculty of Health Sciences, Juntendo University. The class of 2024 is comprised of 124 fourth-year students and one graduate student. In addition, two students from other training schools also participated (127 students in total). Before the training, the students completed 700 minutes of basic training (e-learning) by the end of June of the same year. On the day of the official training, they watched videos related to the training content in the morning, and received practical training similar to that of the official training run by the Japan Radiological Technologists Association in the afternoon. After the training, some students commented that they felt they had really learned some skills and felt the need to check things again before they started working in a clinical setting. The students were clearly able to calmly assess their own abilities and recognized that they needed to supplement their weaker points with further training.

Key Words: notice training, additional duties, practical training

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 122-126, 2025]

2024年度春季保健医療学部市民公開講座の実践

福永一星

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要旨

令和6年4月17日（水）から保健医療学部の市民公開講座「人間ドックと画像検査」をオンデマンド配信で開催した。市民公開講座の概要や参加者の特性を踏まえ、市民公開講座の実践内容を報告する。

キーワード：市民公開講座、人間ドック、検診、画像検査

順天堂保健医療学雑誌，第6巻，第1号，127-129頁，2025年（受付 2024.11.12.；受理 2024.11.20.）

開催方法と参加者

本市民公開講座はオンデマンド配信で開催され、本学教職員や学部生、高校生だけでなく、文京区の内外を問わず多くの一般市民の方にも登録いただき、計87回の視聴となった（2024年11月11日現在）（図1）。

1. 人間ドックとは

船の点検や修理をするドック（dock）から人間ドックと呼ばれるようになったと言われている¹⁾。長い航

海を終えた後でドックに入って点検・修理する船のように、人間も定期的にドックで点検することが必要だという思いから名付けられたと考えられている。

人間ドックの目的として自覚症状のない病気の早期発見がある。多くの病気はある程度進行しないと自覚症状として現れないことがほとんどであるが、人間ドックで生活習慣病をはじめとする体の異常を早期に発見することができる。また、定期的な体の総点検として人間ドックを継続して受診することで、もし病気になってしまった場合も早期に治療を開始することが期待できる。

健康診断とがん検診は国が受診を義務または努力義務としているが、人間ドックの受診は任意となる。また、健康診断とがん検診は検査項目が指定されているが、人間ドックは自身の希望や担当医などと相談することで自由に検査項目を選択できる。受診対象に関しては、健康診断とがん検診は受診できる年齢が決まっているが、人間ドックは特に決まっていない。自己負担額に関しては、公的資金を利用する健康診断とがん検診は比較的安価であるが、人間ドックは一部補助が出る場合もあるが、全額自己負担となるため高い費用がかかる。

2. 画像検査とは

図2の左は脳梗塞の病巣や、脳室と呼ばれる脳脊髄液が存在する部位の周囲の病巣がよりはっきりわかるようにした「フレアー」と呼ばれる画像の例である。右のMagnetic resonance angiography（MRA）では、脳全体に張り巡らされている血管だけを写し出すことが



図1 2024年度市民公開講座「人間ドックと画像検査」の案内

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

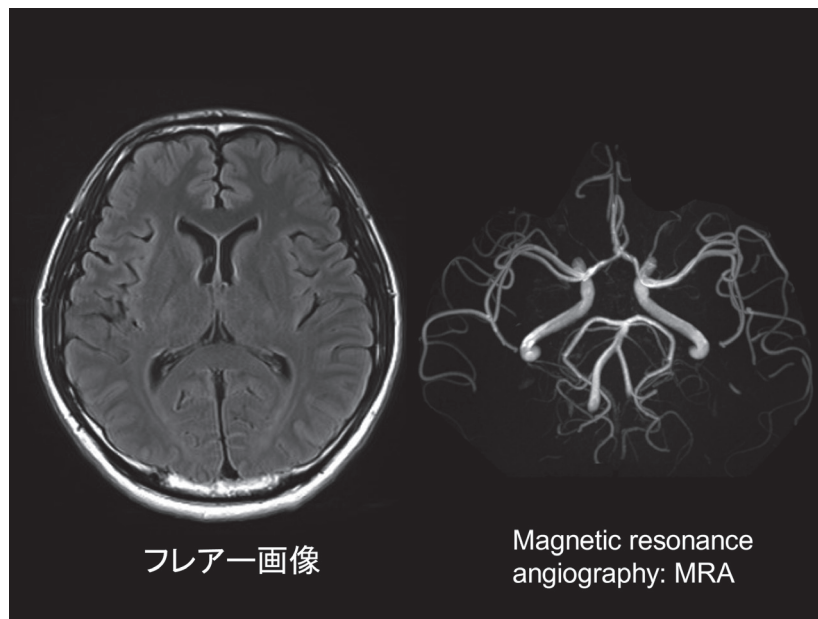


図2 筆者の頭のMRI画像

できる。血管の一部が瘤（こぶ）状に盛り上がった脳動脈瘤や、毛細血管が正常に形成されずに動脈と静脈が直接つながってしまう動静脈奇形などを早期に発見することができる。脳動脈瘤はくも膜下出血を、動静脈奇形は出血や脳梗塞を引き起こすリスクがあることから、早期発見が重要となる²⁾。

3. 大腸がん和大腸CT検査

毎年10万人ほどが罹患し、そのうち3万人ほどが死亡しているというデータもある。大腸癌は現在も増加中であり、年齢別にみると男女ともに50歳台から増加し始める^{3,4)}。

大腸CT検査（CT colonography: CTC）は、内視鏡を使わずにX線CT装置を利用する新しい検査である。前処置で大腸の中をきれいにした後、大腸を炭酸ガスで膨らませ、マルチスライスCT装置を用いて撮影する。マルチスライスCT装置とは、X線の検出器を複数用いることで、短時間で多くの断面（画像）を撮影できる最新のCTスキャナーのことである。撮影した断層画像（輪切りの画像）を再構成して、あたかも大腸内視鏡検査（大腸3次元画像）のように大腸内を観察することができる²⁾。

便潜血や腫瘍マーカーは大腸がんの早期発見の感度が低いと言われており、大腸内視鏡検査より比較的楽にできる大腸がんのスクリーニング検査としての大腸CT検査が注目されている。

4. まとめ

人間ドックは、健康診断やがん検診に加えて、自身

の健康状態や希望に合わせた各自の検査を追加した詳細な健康診断である。大腸がんなどに特化した人間ドックの検査方法もあり、画像検査の果たす役割も大きくなっている。

謝辞

動画をご覧いただいた皆様、ホームページの内容などを参考にさせていただいた医療機関の皆さまに心より感謝いたします。

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) 稲城市立病院 健診センター：人間ドックとは。 <https://www.hospital.inagi.tokyo.jp/health/docs/outline/index.html>（2024年11月11日閲覧）。
- 2) 健診会 東京メディカルクリニック。 <https://www.c-takinogawa.jp/feature/mri.html>（2024年11月11日閲覧）。
- 3) 厚生労働省：人口動態統計。 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/81-1a.html>（2024年11月11日閲覧）。
- 4) 日本対がん協会：がんの部位別統計。 https://www.jcancer.jp/about_cancer_and_knowledge（2024年11月11日閲覧）。

Abstract

Public lectures at the Faculty of Health Science in 2024 Spring

Issei Fukunaga

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

On April 17, 2024, a public lecture entitled “Comprehensive Medical Check-ups and Imaging Examinations” was held in an on-demand streaming. This report details the content and implementation of the lecture, taking into account the overview and characteristics of the participants.

Key Words: public lecture, medical check-up, health screening, imaging examination

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 127-129, 2025]

順天堂大学保健医療学部市民公開講座「放射線の基礎知識」

村中由佳

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

令和6年4月17日より順天堂大学保健医療学部市民公開講座「放射線の基礎知識」をオンデマンド方式で開催した。診療放射線技師としての視点から講演した内容について報告する。

キーワード：市民公開講座、放射線、被ばく、画像検査

順天堂保健医療学雑誌, 第6巻, 第1号, 130-132頁, 2025年 (受付 2025.2.12.; 受理 2025.3.3.)

緒 言

順天堂大学保健医療学部市民公開講座「放射線の基礎知識」を令和6年4月17日よりオンデマンド方式で開催した。(図1) 講演では、診療放射線技師としての視点から、放射線の基本的な性質や日常生活における放射線の存在、医療や産業分野での応用、さらに放射線防護の基本について解説した。本稿では、講演の内容について報告する。

1. 放射線とは

放射線は高いエネルギーを持った高速の粒子(粒子線)や電磁波であり、代表的なものとして α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線などが挙げられる。それぞれの

放射線が持つ物質を透過する能力は、放射線の種類によって違い、 α 線は紙1枚、 β 線はアルミニウム板(厚さ2~4 mm程度)、 γ 線やX線は鉛板、中性子線は水などで遮蔽できる^{1,2)}。

放射線は目に見えず、音も匂いもないため、私たちは五感で直接感じ取ることができない。そのため、人類は長らく自然放射線の存在に気づかなかったと言われている³⁾。放射線を測定する際は専用の装置(GM計数管など)を用いて計測する。放射線を測定する際は、対象や目的に合った放射線測定器を選ぶ必要がある。

2. 身の回りの放射線

放射線は私たちの身の回りに常に存在している。自然界に存在するウラン・トリウムなどから放出される放射線、地球外から降り注ぐ宇宙線などの自然放射線である。また、乾燥昆布や乾燥しいたけなどの食物には放射性物質(カリウム40)が含まれている。

このように、日常生活のさまざまな場面で放射線にさらされているが、通常の生活で受ける放射線量は人体に大きな影響を与えるレベルではない。

3. 放射線の利用

放射線は医療・工業・農業など多岐にわたる分野で利用されており、その恩恵は非常に大きい。

1) 医療分野

医療分野において、放射線はX線撮影やCTスキャ



図1 2024年度市民公開講座の案内

連絡先：村中由佳
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: y.muranaka.vt@juntendo.ac.jp

ンといった画像診断、また放射線治療に用いられる。X線撮影は体内の様子を迅速に調べるために不可欠であり、CTスキャンでは人体の周りをX線管と検出器が回転することで全方位からX線を当て、詳細な形態情報を得ることができる。また、核医学検査では放射性医薬品を用いることで、がんの早期発見や脳機能の評価が可能となる。放射線治療ではがん細胞に対して高エネルギーの放射線を照射し、正常組織への影響を最小限に抑えながら治療を行う。

2) 工業・農業分野

工業分野では、非破壊検査として放射線が活用されている。例えば、航空機や橋梁などの金属部品の内部に欠陥がないかを確認する際、放射線透過試験が行われる。また、食品分野では放射線を用いた殺菌やジャガイモの発芽防止処理が実施されており、これにより食品の安全性が向上する。農業では、放射線育種と呼ばれる技術があり、放射線を照射することで作物の品種改良を行うこともある。

このように、放射線は医療や産業の分野で広く活用されており、私たちの生活の質の向上に寄与している。

4. 放射線の安全管理

放射線を適切に管理し、安全に利用するためには、放射線防護の三原則である「遮蔽・距離・時間」を念頭において行動することが重要である。

遮蔽を利用する：鉛やコンクリートなどの遮蔽材を用いて放射線を遮ることで、作業環境の線量率を下げることができる。

距離をとる：放射線源から離れることで被ばくを減らすことができる。

時間を短縮する：放射線を浴びる時間を短くするこ

とで、被ばく線量を抑えることが可能である。

放射線の利用にあたっては、リスクとベネフィットのバランスを考慮し、適切な管理が求められる。

まとめ

本講座では、市民に向けて放射線の基本的な知識を提供し、放射線の特性や身の回りの放射線、医療や産業分野での活用、そして放射線の安全管理について解説した。

放射線は適切に管理すれば、医療や科学技術の発展に大きく貢献するものであり、過度に恐れる必要はない。一方で、無防備に大量の放射線を浴びることは健康リスクにつながるため、正しい知識を持ち、適切な防護策を講じることが重要である。

本講座を通じて、受講者が放射線についての理解を深め、日常生活や医療現場における放射線利用について適切に判断できるようになることを期待する。

謝辞

順天堂大学保健医療学部市民公開講座にご参加頂いた皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 文部科学省：知ることから始めよう放射線のいろいろ。 https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1314159.htm, 2025年2月6日。
- 2) 環境省：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h28kisoshiryo/h28kiso-01-03-08.html>, 2025年2月17日。
- 3) 日本アイソトープ協会：5版 やさしい放射線とアイソトープ。東京。丸善出版。2014: 1.

Abstract

Practice of public lecture in Faculty of Health Sciences: Basic Knowledge of Radiation

Yuka Muranaka

Department of Radiological Technology, Juntendo University Faculty of Health Science

Starting from April 17, 2024, the Juntendo University Faculty of Health Sciences held the public lecture "Basic Knowledge of Radiation" in an on-demand format. This report summarizes the content of the lecture presented from the perspective of a radiological technologist.

Key Words: public outreach seminar, radiation, radiation exposure, diagnostic imaging

[Juntendo Health Science Journal 6(1): 130-132, 2025]

2023年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録

前十字靭帯損傷・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⁾、高野このか²⁾、桑野 駿²⁾、野澤友哉²⁾、池田 浩¹⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

²⁾ 順天堂大学医学部附属順天堂医院リハビリテーション室

目的：前十字靭帯 (anterior cruciate ligament: ACL) 再建後にスポーツ復帰を目指して理学療法を受けている者を対象として、症状・身体機能に加えて、スポーツ復帰に向けた心理要素の回復過程を明らかにする。

方法：医学カルテ、画像所見、手術記録から対象者リストを作成しつつ、術後3か月と6か月のデータを前向きに収集した。属性、手術情報、競技レベル、受傷機序を医学カルテより調査した。等尺性膝伸展筋力、下肢前方リーチ距離、片脚ホップ距離、自覚的走行能力を計測した。膝に関連する主観的な症状、機能、スポーツ活動を International Knee Documentation Committee Subjective Knee Evaluation Form (IKDC-SKF) と Japanese anterior cruciate ligament injury questionnaire 25 (JACL-25) で数値化した。スポーツ復帰に向けた心理的準備の状態は Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury scale (ACL-RSI) で数値化した。術後各時期の値の正規性を確認し、記述統計値を算出した。術後経過時期による値の差を対応のある *t* 検定で分析した。

結果：IKDC-SKF スコア ($P < .001$)、JACL-25 スコア ($P < .001$) は術後6か月で有意に改善していた。術後6か月の ACL-RSI スコアは平均値で約10点の増加を認めしたが、差は有意ではなかった ($P < .151$)。等尺性膝伸展筋力 ($P = .741$) と下肢前方リーチ距離 ($P = .085$) の下肢対称性指数 (非術側値に対する術側値の割合) に有意差はなかった。術後6か月における片脚ホップ距離の下肢対称性指数は平均で84-90%であった。術後6か月の自覚的走行能力の平均値は76%であった。

考察：ACL 再建後3か月から6か月にかけては、主観的膝機能や他の心理要素よりもスポーツ復帰に向けた心理的準備は改善しにくいことが示唆された。過去研究で心理的準備に関連しやすくと報告されている膝筋力、下肢リーチ距離も改善に時間を要することが示唆された。片脚ホップ能力や自覚的走行能力も術後6か

月では非術側や受傷前のレベルに到達しにくいことが示唆された。

フレイルを呈する地域在住高齢者の起立性低血圧と転倒の関連性の検討

齊藤正和、澤 龍一、森沢知之、高橋哲也

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：本研究は、地域在住高齢者における起立性低血圧や目眩、立ち眩みなどの自覚症状と転倒の関連を明らかにすることを目的とする。

方法：2022年に実施した地域在住高齢者 (文京区シルバー人材センター登録者) を対象とした身体機能測定会参加者のうち経過観察が可能な85例を対象とした。身体機能測定会参加者をフレイルおよび起立性低血圧 (OH) の有無で4群 (non-frail/non-OH、frail/non-OH、non-frail/OH、frail/OH) に分類し、2年間の転倒イベント、転倒未遂、外傷、入院歴を評価した。起立性低血圧は、安静座位時に比べて、立位直後または3分後の収縮期血圧の20mmHg以上の低下、あるいは拡張期血圧の10mmHg以上の低下が見られた場合と定義した。統計学的解析方法として、2年間の経過観察期間中の転倒未遂、転倒率、転倒に伴う外傷受傷率、何らかの理由での入院率の4群間の比較をカイ二乗検定にて解析した。有意水準は5%とした。

結果：対象者85名の4群の内訳は、non-frail/non-OH 群 39%、frail/non-OH 群 31%、non-frail/OH 群 20%、frail/OH 群 10%であった。転倒未遂は4群間で有意差がなく、frail/non-OH 群が最も高い傾向を示した (89%)。転倒発生率も有意差は認められなかった (non-frail/non-OH 群 33%、frail/non-OH 群 44%、non-frail/OH 群 24% および frail/OH 群 19%; $p = 0.149$)。また、転倒により何らかの外傷を受傷した割合は、統計学的有意差は認めなかったが、non-frail/non-OH 群 24%、frail/non-OH 群 27%、non-frail/OH 群 12% に対して、frail/OH 群 56% と高値を示した ($p = 0.1114$)。フォローアップ期間中のあらゆる理由による入院イベントを調査すると、non-frail/non-OH 群 15%、frail/non-OH 群 15%、non-frail/OH 群 12% に対して、frail/OH 群 33% と2倍の入院イベント発症率を示した ($p = 0.532$)。

結論：起立性低血圧とフレイルを併せ持つ地域在住高

齢者は、外傷や入院リスクが高い傾向にあることが示唆された。

単離筋標本による構造・機能解析に基づいた各部位の骨格筋と運動の特性比較研究

坂井建雄¹⁾、市村浩一郎²⁾、加藤公太²⁾、姉帯飛高²⁾、藤井陽介²⁾、石井益子²⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部

²⁾ 順天堂大学大学院医学研究科解剖学・生体構造科学

目的：人体の各種骨格筋の機能的構築を、原位置での解剖と単離筋標本の解析により明らかにする。

方法：17個体の顔面筋を原位置で解剖し、単離筋標本を作成した。顔面骨格の pantomography 像に筋を重ねて機能を評価した。

結果：頬筋は、起始領域と筋線維の配置から3部に区別され、2層に配置されていた。浅層の①上斜走部（起始：上顎骨領域）と②下斜走部（起始：下顎骨領域）、深層の③中位横走部（起始：翼突下顎縫線）。口輪筋 OOr は上唇部と下唇部に分けられ、それぞれ筋束の配置から2部に分けられた。①内縁部 IM（口唇縁を走行）、②外唇部 OL（口唇壁を走行）。口角のやや外側下方に筋束が集中する結合組織塊（モダイオラス）があり、口輪筋の筋束の多くはモダイオラスから起こり、また口周囲の他の表情筋の多くがモダイオラスに停止していたが、頬筋の筋束の一部は口輪筋にそのまま移行していた。これらの筋束は3層に配置していた。①口角下制筋～上 OOr/OL がモダイオラスで縦方向に結合。②頬筋 / 上下斜走部～下 OOr/OL がモダイオラスで横方向に結合。③頬筋 / 中横走部～上下 OOr/IM+ 下 OOr/OL の筋束が連続。この配置を pantomography 像を重ねて、筋の機能を評価することができた。

結論：モダイオラス周囲の3層の口周囲筋の配置から、口裂の開閉や口唇幅の拡大・縮小を行う際の口唇とモダイオラスの動きを予測できる。頬筋・口輪筋は、従来考えられているように口角のモダイオラスに完全に終始するのではなく、大半において筋線維が連続し、機能的複合体を作ることを明らかにした。

地域在住高齢者における身体能力認識誤差と身体活動量・生活活動範囲の関連について

澤 龍一、齊藤正和

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：本研究の目的は、地域在住高齢者を対象に、身体能力認識誤差と身体活動量・生活活動範囲の関連性を検討することである。

方法：自治体が主催する介護予防事業で実施した体力

測定会の参加者45名が本研究に参加した。身体能力認識誤差は先行研究で実施されている方法に準じて、最大一步幅を用いて評価した。対象者に最大一步幅を予測させ（予測値）、その後、実際に最大一步幅の測定を行う（実測値）。予測値と実測値の差分を身体能力認識誤差と定義した。身体活動量は世界標準化身体活動質問票（GPAQ）を用いて評価した。統計解析は一元配置分散分析を用いて実施し、統計学的有意水準は5%未満とした。

結果：自治体が開催する介護予防事業に参加する65歳以上の高齢者の内、データ欠損のない41名（平均年齢73.9±5.2歳）を解析対象とした。参加者の内、女性が33名（80.5%）であった。歩行速度は1.5±0.3m/秒、5回立ち座りテストは8.4±2.4秒、過去6か月の転倒経験割合が17.0%と、身体機能の高い集団であった。

身体能力認識誤差は0.5±15.0cm、身体活動量はそれぞれ中等強度が492.4±714.9分/週、高強度が115.5±427.1分/週であった。身体能力認識誤差は正規分布を示したが、身体活動量の指標は正規分布ではなかったため、世界保健機関のガイドラインに基づいて中等強度は3群（実施していない、150分/週未満、150分/週以上）に分類し、身体能力認識誤差を3群間で比較した。3群間で身体能力認識誤差に有意差は認められなかった（実施していない：10.6±16.5cm、150分/週未満：-3.2±14.6cm、150分/週以上：-1.9±13.3cm、 $p = .068$ ）。

結論：地域在住の身体機能が高い水準の高齢者において、身体活動量と身体能力認識誤差は関連性が認められなかった。

オーバーヘッドアスリートにおける胸郭可動性と投球肩肘障害発生との関連

中村絵美¹⁾、染谷由希²⁾、塩田有規²⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部

²⁾ 順天堂大学スポーツ健康科学部

目的：本研究は、オーバーヘッドアスリートにおける肩肘所見の有無と胸郭可動性の特徴について検討することを目的とした。

方法：リトルリーグに所属する硬式野球選手246名（4～12歳）を対象とした。胸椎および胸郭のアライメントと可動性の評価として、胸椎後弯角（第1-2胸椎棘突起と第11-12胸椎棘突起レベルにおける傾斜角の合計）、胸郭拡張差（剣状突起レベルにおける最大吸気と最大呼気周径の差）、胸椎回旋角（第1-2胸椎レベルにおける体幹回旋時の床面からの傾斜角、Lumber Locked Rotation Test: LLRT）の測定を行った。また、肩肘の超音波画像および理学所見の評価を行った。測

定したデータは、超音波画像および理学所見において肩や肘に異常所見の認められたものを所見あり群とし、所見の有無による各測定項目について Mann-Whitney の U- 検定を用いて比較検討した。有意水準は5%とした。

結果：メディカルチェック時に、肩肘に異常所見が認められた選手は72名（29.0%）であった。所見あり群は所見なし群に比べ、年齢が高く、体格（身長・体重共に有意）の大きい選手であった。また、胸椎後弯角および胸郭拡張差に両群間に有意な差は認められなかったが（ $p=0.14$ 、 $p=0.28$ ）、投球側方向への LLRT は所見あり群において有意に小さく（所見あり群 45.8° 、所見なし群 56.4° ； $p<0.05$ ）、胸椎の回旋可動性が少ないことが示された。

考察：肩や肘の障害既往のある選手は、コッキング相において骨盤帯と胸郭との捻転差が生じにくく、肩最大外旋出現時に肩・肘への負担が増大している可能性が考えられた。一方、所見あり群は年齢が高く、体格が大きい選手が多く、発育発達の違いが影響している可能性も示された。

姿勢変位や関節可動域の簡易計測を可能とするスマートデバイスの開発と実証研究

春山幸志郎、松田雅弘

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：臨床現場における姿勢運動計測（特に関節角度測定）の課題解決のために、デジタルゴニオメーターを徒手計測に適合させた形で改良し、単一関節角度計測において、既存のデバイスと比較した改良型角度計測の有用性を明らかにすることを目的とした。

方法：順天堂大学保健医療学部理学療法学科4年生21名を検査者とした。被測定者は4年生1名と設定し、背臥位での右側膝関節屈曲角度の角度測定の単一課題を実施した。この際に、測定機器としてユニバーサルゴニオメーター（以下、東大式）、デジタルゴニオメーター（以下、Easyangle[®]）、改良型デジタルゴニオメーター（以下、改良型）の3種を使用し、アウトカムとして測定角度、測定時間を条件間で比較した。また、測定角度の繰り返し測定による再現性を Bland-Altman plot で評価し、ユーザビリティ評価として Net promotor score を比較した。

結果：測定角度は、東大式と比較し、有意に改良型で高値を示し、関節角度のより最終域まで計測可能であることが確認できた。再現性の検証としては、有意な角度の差異は生じなかったが、すべての機器で測定誤差が大きく、今回の検査者においては一般的に許容さ

れる誤差を逸脱していた。測定時間の比較では、Easyangle[®] および改良型において東大式よりも有意に測定時間の短縮が見られ、効率的な運用が可能であった。ユーザビリティの比較としての Net promotor score の素点では、Easyangle[®] が東大式よりも有意に評価が高く、スコアは改良型で最も高い評価を得た。

結論：改良型ゴニオメーターは、測定精度にまだ向上の余地があり、機器およびインターフェースの改善が必要である。一方で、測定時間やユーザビリティの面で他の機器よりも優位性を認め、コンセプトの有用性が確認できた。測定精度の検証のために検査者をさらに拡張し、臨床経験の幅広い検査者での検討が必要である。

パーキンソン病患者におけるペダリング運動前後の歩行筋シナジー変化—予備的検討—

山口智史¹⁾、渡部幸司²⁾、土屋順子³⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

²⁾ 順天堂大学医学部附属順天堂医院リハビリテーション室

³⁾ 東京工科大学保健医療学部理学療法学科

目的：ペダリング運動によって異常な歩行筋シナジーが改善されるかを明らかにすることを目的に、ペダリング運動前後の歩行時筋シナジー変化について予備的研究を実施した。

方法：対象は深部脳刺激手術目的で入院した60歳台男性3名。Hohen Yahr stage II で、計測は on 時に行った。ペダリング運動は、背もたれ付きエルゴメーター（ストレンクスエルゴ240、三菱電機エンジニアリング社製）を使用した。運動様式はアイソトニックモードで5N とし、分速70回転、適宜休憩を設け10分間実施した。

歩行筋シナジーの変化を検討することを目的に、ペダリング運動前後で歩行中の下肢表面筋電図を計測した。筋電図は、重症側下肢の前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋外側頭、大腿直筋、内側広筋、外側広筋、半腱様筋、大腿二頭筋、中殿筋、大殿筋の10筋から、サンプリング周波数2k Hz で記録した。解析は、安定した筋電図が得られた連続6歩行周期分の筋電図信号について、非負値行列因子分解解析を実施し、筋シナジー数を抽出し、その重みづけと活動度を算出した。

結果：筋シナジーのモジュール数は、実施前の至適速度で5個、実施後は4個であった。実施前の立脚期で大腿四頭筋とハムストリングスの同時収縮のモジュールが認められたが、実施後にはハムストリングスの活動度が減少した。

考察：ペダリング運動前後で筋シナジーモジュール数

が減り、大腿筋の同時収縮が減少した。このモジュール数と同時収縮の減少は、立脚期の安定性向上を示すと考えられる。今後は症例数を増やし、長期効果についての検討を行う必要がある。

小児・AYA 世代の全脳全脊髄照射における妊孕性温存を目指した X 線・陽子線治療計画法の検討

白井桂介^{1,2)}、鹿間直人¹⁾、斎藤アンネ優子^{1,2)}、井上達也¹⁾、橘 英伸³⁾、馬場大海³⁾、須賀健太¹⁾、足立大翔¹⁾

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放射線治療品質管理室

目的：全脳全脊髄照射 (craniospinal irradiation: CSI) は小児の髄芽腫に対する髄膜播種への予防照射として有用である。妊孕性温存には子宮と卵巣の線量を約1.5 Gy 以下にする必要があり、広範な照射野の CSI は将来的な不妊リスクとなることが課題である。本研究では、小児・AYA (adolescent and young adult) 世代の CSI の子宮・卵巣線量を評価し、X 線を用いた後方1門照射、強度変調回転照射法 (volumetric modulation arc therapy: VMAT) および陽子線を用いた強度変調陽子線治療 (intensity modulated proton therapy: IMPT) における妊孕性温存を目指した治療計画法を比較検討した。

方法：公開データベース (The Cancer Imaging Archive) より取得した20例 (9~16才：中央値12才) の小児・AYA 世代の CT 画像を放射線治療計画に用いた。治療計画装置 (Eclipse Ver. 16.0, Varian 社) を使用し、23.4 Gy/13分割で後方1門照射、VMAT および IMPT を作成した。脊椎の発育障害を考慮し、S3までを臨床標的体積 (clinical target volume: CTV) とした。計画標的体積 (planning target volume: PTV) は CTV に5 mm のマージンを加えて作成した。各治療計画において、PTV の D99、D95、最大線量、また子宮・卵巣の最大・平均線量を求め比較検討した。

結果：いずれの照射法においても PTV の線量指標には有意差がなく、標的線量を十分にカバーできていた。一方で、IMPT は後方1門照射法と比較して子宮および卵巣の平均線量が82%および90%減少し、VMAT と比較して74%および61%減少した。これより、IMPT は小児・AYA 世代の CSI において、妊孕性温存を目指した線量分布を作成できることが明らかになった。

骨シンチグラフィ検査における新たな撮像技術の確立

小山和也¹⁾、堀 拳輔¹⁾、津田啓介¹⁾、竹元省太²⁾、原田智也³⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

²⁾ 順天堂医院

³⁾ LSI 札幌クリニック

目的：標準的なガンマカメラを用いた骨シンチグラフィの撮像では、全身像 (20分) に加えて spot 像 (10分) や断層像 (15分) を追加撮像する場合、1検査あたり30分以上の長時間を要するため、短時間で撮像できる技術が必要とされている。骨シンチグラフィの撮像に、限られた投影数のデータから三次元的な分布 (腹背方向の分離) を取得できるトモシンセシスの画像技術を応用できれば、spot 像や断層像に代わって、診断精度を維持したまま、短時間での検査を実現できる可能性が高い。そこで、トモシンセシス技術を応用した短時間断層撮像プロトコルの確立を目指し、ファントムによる基礎実験を実施した。

方法：NEMA IEC body ファントムに6つの球体 (直径10, 13, 17, 22, 28, 37 mm) を装着し、ファントム内には18.0 kBq/mL、球体にはその8倍濃度の^{99m}Tc 溶液を封入した。GE 社製のガンマカメラ INFINIA II 3/8 HAWKEYE を用いて画像データを取得した。収集条件は、サンプリング角度および投影あたりの収集時間は共通で4度および10秒とし、収集角度を360度 (90投影、従来条件)、184度 (46投影、収集時間約1/2)、128度 (32投影、収集時間約1/3)、56度 (14投影、収集時間約1/6) の4通りとした。取得データを画像再構成し、axial 断面および coronal 断面を取得した。取得した画像からバックグラウンド領域の変動係数、vertical/horizontal 比 (垂直方向と水平方向における直径の比) を算出した。さらに、4名の診療放射線技師による順位法を用いた視覚評価を実施し、順位尺度を距離尺度に変換することで各条件画像の画質の差を評価した。

結果：収集角度の異なる4条件で変動係数の有意な差は認められなかった。Axial 断面の vertical/horizontal 比は、収集角度が360度、184度、128度、56度条件で、それぞれ1.00、0.38、0.40、0.10となり、大きな歪みが発生していることが示されたが、coronal 断面では、0.80、1.00、1.25、1.00となり、歪みが小さいことが示された。Axial 断面の視覚評価でも、従来条件と短縮条件の画質に有意な差が認められたのに対し、coronal 断面では、56度条件を除く3条件間に有意な差は認められなかった。

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⁾、渋川周平¹⁾、小島裕輔²⁾、小山和也¹⁾、津田啓介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年度に独自で開発した診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリ「RT Drills (Prototype)」は、文章だけで出題されている問題には対応できているものの、診療放射線技師国家試験に特有の数式や画像を反映させるには高度な技術が必要であった。これらの課題をクリアするため、2023年度はDB(データベース)を最適化するとともに、UI(ユーザインターフェース)を改修し、確認用デバイス(iOS・Android)で機能と性能を十分に検証することを目的とした。

方法: 診療放射線技師国家試験に特有の数式や上付き文字・下付き文字に関して文書処理システム(MathJax)を用いてデータを入力するとともに、画像問題に対応できるようDBを改修した。改修したDBを開発プラットフォーム(Monaca)に取り込み、DBおよびUIを最適化した。

結果: 「RT Drills (Prototype)」は、問題の表示(ランダムでの出題が可能)、解答、正否の判定、正答率の表示、誤答した問題の解き直しなどの機能を搭載し、確認用デバイス(iOS・Android)で問題なく動作することを確認した。

結論: 「RT Drills (Prototype)」の改良に成功したことから、今後は過去問10年分のDB構築に取り組むとともに、アプリリリースに向けた手続きを進める予定である。

機械学習によるシータバースト刺激の効果予測モデル

渋川周平¹⁾、片桐夏樹^{2,3)}、佐保辰典⁴⁾、山口智史^{5,6)}

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

²⁾ 順天堂大学大学院医学研究科リハビリテーション医学

³⁾ 日本学術振興会特別研究員 DC1

⁴⁾ 小倉記念病院放射線技師部

⁵⁾ 京都大学大学院医学研究科先端理学療法学講座

⁶⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的: シータバースト刺激(TBS)は、パターン化された磁気刺激によって非侵襲的に皮質興奮性を変調し、下肢運動機能を改善することが知られている。一方で、その効果には個人差があり、臨床応用を妨げる要因となっている。この個人差をより精確に予測する方法の確立が求められている。本研究では、TBSに

よる皮質興奮性への変調効果を予測するために、既存データを基に機械学習を用いたモデルを構築し、その性能を検証することを目的とした。

方法: 先行研究(Katagiri, 2020)のデータを使用し、健常者48名(女性24名、19~27歳)を対象とした。左下肢一次運動野に対して、間欠的TBS(iTBS)および連続的TBS(cTBS)を実施し、TBS直後の運動誘発電位(MEP)変化率を指標とした。効果を予測する介入前の神経生理学的指標として、経頭蓋磁気刺激法(TMS)によるMEPの振幅値、2連発TMSによる皮質内抑制と皮質内促進、MEPのrecruitment curveの傾き、MEPの変動係数、TBSの刺激強度のデータを利用した。さらに、対象の基本特性として性別、国際標準化身体活動質問票、実験開始時間のデータを利用した。データ解析は、TBSによる皮質興奮性の変調効果を予測するために、Extra Treesによる機械学習を行った。モデルはテストデータを用いて曲線下面積(AUC)、的中率、適合率、再現率、F1スコアを算出し、性能を検証した。

結果: iTBSのAUCは0.85、cTBSは0.69であり、陽性的中率はそれぞれ77.7%と70.0%、陰性的中率は共に75.5%であった。精度はiTBSで0.76、cTBSで0.72であり、適合率と再現率はいずれもiTBSが0.82、cTBSが0.67であった。最も重要な予測因子は、iTBSではMEP振幅、cTBSでは皮質内促進であった。

考察: iTBSの効果予測には介入前のMEP振幅が、cTBSの効果予測には皮質内促進が重要であることが示された。これにより、TBSのパターンごとに異なる皮質介在ニューロンが関与する可能性が考えられる。

結論: TBSの効果は、介入前の神経生理学的指標を基に予測可能であり、個別化治療の実現に向けた知見が得られた。

深層学習を用いた単純撮影における撮影補助プログラムの開発

中世古和真¹⁾、梶原宏則²⁾、福永一星¹⁾

¹⁾ 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

目的: 診療放射線技師が行う単純撮影では、1回の撮影で複数の方向から撮影する。その際、正面(0°)や側面(90°)といった角度では患者角度の設定に誤りは生じにくい、斜位における撮影では患者の解剖学的な構造の個人差により患者角度のエラーによる再撮影が多い。再撮影は検査時間の延長や被ばくの増加といった患者に対する不利益となる。そこで、本研究では一般的に斜位像を撮影する前に撮影を終えている正

画像と側面像の画像を使用し、患者に合わせた斜位撮影の患者体位を推定する手法を深層学習を用いて提案する。提案する手法は、患者角度による再撮影の多い頸椎撮影を対象とした。

方法：単純撮影における実際の撮影画像と患者角度を組み合わせた画像データベースは存在しないため、独自のデータベースを構築する。単純撮影画像は3次元CT画像に対するコーンビームを用いた2次元投影像によりシミュレーションで作成した。CT画像はTCIA (The Cancer Image Archive) で公開されている複数のデータベースから頸椎が撮影されている画像を446症例抽出し、正面像と側面像を作成した。次に各患者に対する斜位の角度は、各患者の第4頸椎部分を抽出してパラレルビームを用いた投影像を基に3名の診療放射線技師が角度(実数値)を設定した。これらのシミュレーション画像と患者角度を用いて、2枚(正面像と側面像)の画像を入力として、斜位の角度を出力する学習モデルを構築し、推定を行う。

結果：作成したデータベースを基に学習モデルResNet-RSを用いて解析を行った。角度を出力するモデルの場合、推定誤差が大きくなる傾向があるため、今後は画像分類のモデルとして角度に範囲を設けた分類結果を得る。

結論：頸椎斜位撮影時の体位を推定するために、データベースを今後検討する必要がある。

宇宙での食糧生産における未来を考える：中性子線の影響比較によるビーガン肉と食肉の可能性

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⁾、鎌田弥生²⁾、松本(重永)綾子³⁾、川崎広明⁴⁾、大竹淑恵⁵⁾、竹谷 篤⁵⁾、高梨宇宙⁵⁾、若林泰生⁵⁾、池田啓一⁶⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部

²⁾ 順天堂大学大学院医学研究科環境医学研究所

³⁾ 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

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

目的：人間の活動領域が月へ広がる今、宇宙での食糧生産は重要な課題である。月や火星などの深宇宙では、銀河宇宙線と宇宙船の壁や月面のレゴリスとの相互作用で中性子線などの二次放射線が発生する。それらが食糧資源に与える影響については未解明の部分が多い。本研究では、主要なタンパク源であるビーガン肉(大豆)と食肉(豚肩肉)に注目し、中性子線による

放射化および生化学的変化を実験および解析により評価した。これは月における大豆生産あるいは畜産という食糧生産の検討につながる。また、凍結乾燥サンプルを用いた比較実験を行い、放射線影響における水分の役割の解明を目指した。

方法：理研小型中性子発生装置RANSを使用し、大豆と食肉サンプルに中性子線を照射した。大豆は乾燥大豆を水で戻したサンプルと、それを凍結乾燥したサンプルに中性子線を照射した。その後、放射化分析としてGM管によるβ線計測およびGe検出器によるγ線スペクトル測定を行った。さらに、生化学分析においては、ウェスタンブロッティング法を用いて酸化・窒素化修飾されたタンパク質を検出するとともに、LC-MS/MS質量分析によって修飾の具体的な分子部位を特定した。また、生サンプルと凍結乾燥サンプルを比較することで、水分が放射線影響の発現に及ぼすメカニズムを検討した。

結果：放射化分析の結果、大豆は食肉よりも放射化されやすいことが明らかとなり、生成された放射性核種は大豆では⁵⁶Mnや⁴²K、肉では²⁴Na、⁴²K、³⁶Clであった。凍結乾燥サンプルの方が生サンプルよりも放射化が大きかった。生化学分析の結果、食肉生サンプルの場合は中性子線照射量の増加に伴いタンパク質の酸化・ニトロ化修飾が増加し、1Gy辺りで飽和したが、食肉凍結乾燥サンプル、大豆生サンプル、大豆凍結乾燥サンプルの場合はタンパク質中にニトロ化修飾が生じているものの、修飾量の中性子線照射量依存性は顕著ではなかった。水分の有無がラジカル生成および修飾プロセスに大きく関与する可能性が示唆された。

結論：深宇宙の宇宙船内および月面を想定した高速中性子線4Gy以下を高フラックスで食糧資源に照射することにより、生化学的および放射化の影響を及ぼすことが確認された。特に、大豆と肉では放射線に対する生化学的および放射化反応が異なることが明らかとなった。また、水分の有無が放射化や生化学的修飾に与える影響の大きさが示され、凍結乾燥技術の生化学的修飾低減の有効性が示された。今後は、魚類や乳製品など他の食材への影響を評価し、宇宙環境下での食糧生産に向けた基盤構築を進める予定である。

深層学習を用いた新しい断層画像計算法の開発

堀 拳輔¹⁾、津田啓介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：Computed tomography (CT) は身体の断面画像

を取得できる装置であり、現在臨床で広く活用されている。一般的な CT 装置では、身体の周囲を X 線管と検出器のペアが360度の範囲で回転して収集する投影データから、画像再構成アルゴリズムにより断面画像を計算する。検査時間の短縮や被ばく線量の低減を目的として、収集する角度範囲を制限すると、断面画像の分解能が劣化する。本研究では、教師なし深層学習技術である Deep image prior (DIP) をベースとして独自のアルゴリズムを構築し、性能を評価した。

方法：数値ファントムを利用したシミュレーションにより、従来法 (FBP 法および ML-EM 法) および提案するアルゴリズムで再構成された断面画像を定性および定量評価した。本研究ではアルゴリズムの性能を評

価するため、光子量に依存するノイズや散乱に起因するボケを考慮せず、理想的な投影データを用いた。

結果：従来法と比較して、提案法は角度制限による分解能劣化を改善し、解剖学的構造をより高精度に復元した断面画像を再構成できた。リファレンスデータとの誤差を評価する Normalized root mean squared error (NRMSE) は、従来法の FBP 法および ML-EM 法でそれぞれ0.16および0.023であったのに対して、提案法では0.014となった。NRMSE が約1/10 ~ 1/2程度に減少したことから、飛躍的な精度向上が示された。

結論：DIP をベースとして新たに構築した提案法は、角度制限による分解能劣化を飛躍的に改善できることが示唆された。

2024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 学部長

Morimoto Y, et al. Health literacy in medical imaging: a scoping review of current evidence and future directions. *Public Health. Public Health.* 2024; 234: 84-90.

藤原 俊之 (ふじわら としゆき)
保健医療学部理学療法学科 学科長

Takano K, et al. Transcutaneous spinal cord stimulation phase-dependently modulates spinal reciprocal inhibition induced by pedaling in healthy individuals. *Exp Brain Res.* 2024; 242(11): 2645-2652.

坂野 康昌 (さかの やすあき)
保健医療学部診療放射線学科 学科長

Sakano Y and Morimoto Y. Third Annual JUHS 2023. 順天堂保健医療学雑誌. 2024; 5: 93~95.

高橋 哲也 (たかはし てつや)
保健医療学部理学療法学科 副学科長

Takahashi T, et al. Incidence of Hospitalization-Associated Disability in Older Patients With Heart Failure. *Circ J.* 2024; 88(5): 672-679.

坂本 肇 (さかもと はじめ)
保健医療学部診療放射線学科 副学科長
大澤 充晴, 他 東海地区における IVR の線量管理に関するアンケート調査. *日本放射線技術学会雑誌.* 2024; 80(1): 66~76.

池田 浩 (いけだ ひろし)
保健医療学部理学療法学科 教授
香川真司 (池田浩). *NumberTV # 6 香川真司「W杯での絶望、勝利への渴望」.*

坂井 建雄 (さかい たつお)
保健医療学部理学療法学科 特任教授

Sakai T, Fukushima M. Manners of terminology and description in Galen's anatomy in the ancient Rome and their historical consequences up to the modern time. *Anat Sci Int.* 2024; 99(4): 348-356.

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, 他. *The Online Child Time: Language and Sports Exercise Exchange Program.* Tokyo & California, Online, 2024 年 4 月, 11 月.

相澤 純也 (あいざわ じゅんや)
保健医療学部理学療法学科 先任准教授

Aizawa JY, et al. Anterior Cruciate Ligament-Return to Sport after Injury (ACL-RSI) Subcategories are Affected by Subjective Running Ability and Medial Single-leg Hop Distance in Post-Reconstruction Patients at 6 Months. *J Exp Orthop.* 2024; 11(1): e12004.

松田 雅弘 (まつだ ただみつ)
保健医療学部理学療法学科 先任准教授

Tadamitsu Matsuda, et al. Validity Verification of Human Pose-Tracking Algorithms for Gait Analysis Capability. *Sensors (Basel).* 2024; 24(8): 2516.

齊藤 正和 (さいとう まさかず)
保健医療学部理学療法学科 准教授
Shirai N, et al. Relationship Among Falls, Fear of Falling, and Physical Activity Level in Patients on Hemodialysis. *Phys Ther.* 2024; 104(7): pzae064.

飛山 義憲 (ひやま よしのり)
保健医療学部理学療法学科 准教授

Hiyama Y, et al. Quality indicators for the rehabilitation before and after total knee arthroplasty in Japan: A modified Delphi method and practice test. *Arthroplasty.* In press.

森沢 知之 (もりさわ ともゆき)
保健医療学部理学療法学科 准教授

Matsuo T, et al. Improving Respiratory Muscle Strength and Overall Function in Patients With Cardiovascular Disease Through Rehabilitation Hospitals. *Cardiol Res.* 2024; 15(1): 56-66.

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. Association between falls and social frailty in community-dwelling older Japanese adults. *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci.* 2024; 79(9): gbae127.

高橋 容子 (たかはし ようこ)
保健医療学部理学療法学科 准教授

Yoko Takahashi. English symposium: Neurophysiology and treatment of spasticity. "The relationship between spasticity and spinal pathways: current status". 第54回日本臨床神経生理学会学術大会, 2024年10月26日.

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

Okada K, et al. Categorizing knee hyperextension patterns in hemiparetic gait and examining associated impairments in patients with chronic stroke. *Gait Posture.* 2024; 113: 18-25.

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

Soeda R, et al. Trajectories of Activities of Daily Living in the Last Eight Weeks of Life Among Patients With Terminal Cancer in a Palliative Care Unit: A Retrospective Study. *Palliat Med Rep.* 2024; 5(1): 63-69.

藤野 雄次 (ふじの ゆうじ)
保健医療学部理学療法学科 講師

Sato H, et al. Factors influencing the prognosis of patients with acute cerebral infarction who received usual care: a multicenter prospective cohort study. *J Phys Ther Sci.* 2024; 36(6): 352-358.

宮森 隆行 (みやもり たかゆき)
保健医療学部理学療法学科 講師

Miyamori T, et al. Effects of high-frequency hyperthermia on the elastic modulus of the lumbar muscle in female athletes with low back pain: A randomized crossover trial. *Medicine (Baltimore).* 2024; 103(17): e38011.

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 助教

Hanada S, et al. Changes in walking speed 6 months after discharge may be more sensitive to subsequent prognosis than handgrip strength in patients hospitalized for heart failure. *Int J Cardiol.* 2024; 400: 131778.

中村 絵美 (なかむら えみ)
保健医療学部理学療法学科 助教

中村絵美, 森川大智. 女子野球選手における外傷・障害発生に関する大規模疫学調査および危険因子の解明. 日本学術振興会, 2024年2月採択.

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

Yokoyama, M, et al. Effects of sampling frequency and interpolation preprocessing on inter-and intra-study comparability of stabilometric variables. *Biomed Signal Process Control.* 2024; 90: 105841.

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. 認定理学療法士(補装具)臨床認定カリキュラム「自立支援ロボット(歩行補助ロボット等)」講師. 東京湾岸リハビリテーション病院, 2024年7月~12月.

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. Relationship Between Single-Leg Vertical Jump and Drop Jump Performance, and Return to Sports After Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Using Hamstring Graft. *Int J Sports Phys Ther.* 2024; 19(10): 1204-1215.

高橋 昌哉 (たかはし まさや)
保健医療学部診療放射線学科 教授

Ishimatsu K, et al. Evaluation of renal perfusion: A comparative study between intravoxel incoherent motion (IVIM) imaging and arterial spin labeling (ASL) to assess renal blood flow in rodents. *Magn Reson Med Sci*. 2024. Online ahead of print.

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

村上康二, 他. Flutemetamol-PET における 60 分後撮像と 90 分後撮像の比較. *核医学*. 2024; 61(Suppl): S151.

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

Hatsud M, et al. Strings and membranes from A-theory five brane. *arXiv*: 2410.11197.

芳士戸 治義 (ほうしと はるよし)
保健医療学部診療放射線学科 特任教授

芳士戸治義. 経営者から見た放射線検査と患者から見た放射線検査の役割. *名古屋ガーデンパレス*.

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

Kato M, et al. Vascular endothelial dysfunction in emerin deficient mice. *J Physiol Sci*. 2024; 74(suppl 2): 272.

後藤 政実 (ごとう まさみ)
保健医療学部診療放射線学科 先任准教授

Goto M, et al. Deep Learning-based Hierarchical Brain Segmentation with Preliminary Analysis of the Repeatability and Reproducibility. *Magn Reson Med Sci*. 2024. Online ahead of print.

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

Muroi K, et al. An analysis of the effectiveness of reflective learning through watching videos recorded with smart glasses-With multiple views (student, patient, and overall) in radiography education. *PLoS One*. 2024; 19(1): e0296417.

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

Kurokawa C, et al. The Breathing Mode of the Hoyle State in ^{12}C . *Eur Phys J A*, 2024; 60: 56.

佐藤 英介 (さとう えいすけ)
保健医療学部診療放射線学科 准教授

佐藤英介. What Shaped My Journey into Academia? 第 8 回研究発表トレーニングキャンプ, 三浦, 2024 年 9 月 27 日.

津田 啓介 (つだ けいすけ)
保健医療学部診療放射線学科 准教授

津田啓介, 他. PET 撮像施設認証制度について. *臨床放射線*. 2024; 69(2): 155~164.

臼井 桂介 (うすい けいすけ)
保健医療学部診療放射線学科 講師

Usui K, et al. Reducing image artifacts in sparse projection CT using conditional generative adversarial networks. *Sci Rep*. 2024; 14(1): 3917.

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 講師

中世古和真. 深層学習を用いた頭部 X 線画像の撮影角度推定と撮影支援への応用. 筑波大学 (学位論文).

小山 和也 (こやま かずや)

保健医療学部診療放射線学科 講師

Shuto M et al. Evaluation of the usefulness of Brain-Age-Gap as a biomarker for brain dementia diagnosis. The 10th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics, Nagoya, 2024年9月.

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 講師

Shibukawa S, et al. Alterations in subcortical magnetic susceptibility and disease-specific relationship with brain volume in major depressive disorder and schizophrenia. *Transl Psychiatry*. 2024; 14(1): 164.

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

Fujita S, et al. Cross-vendor multiparametric mapping of the human brain using 3D-QALAS: A multicenter and multivendor study. *Magn Reson Med*. 2024; 91(5): 1863-1875.

堀 拳輔 (ほり けんすけ)

保健医療学部診療放射線学科 助教

Shinohara H, et al. Best Paper Hisada Prize. *Ann Nucl Med*. 2024.

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

村中由佳. 正確かつ簡便に抗菌剤治療効果を判定する核医学画像診断法の開発. 科学研究費助成事業, 若手研究, 2024~2026年度.

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" x 11" 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6巻をお届けする運びとなりました。第6巻は論説14編、実践報告9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14編の研究抄録で構成されております。なかでも論説の投稿数が増加しており、これは一昨年度からスタートした大学院保健医療学研究科の大学院生の投稿によるものです。大学院で行う自身の研究テーマについて深くレビューを行い、研究者の第一歩として論説をまとめることを目標としております。大学院生は（おそらく初めて）指導教員の指導を受けながら論説を執筆し、投稿してくれました。ご指導いただいた大学院教員の先生には深く感謝申し上げます。

残念ながら本巻では原著論文の投稿がありませんでしたが、保健医療学雑誌編集委員会では今後、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、お忙しい中、原稿をお寄せいただいた諸先生方や学生諸君に深く感謝申し上げます。また今回の発刊に際し、ご尽力いただいた事務や校正会社の方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、ご叱正をいただくようお願い申し上げます。

2025年6月

前図書・紀要委員会委員長
森沢知之

編集委員

委員長 森沢 知之
副委員長 家崎 貴文
委員 高橋 昌哉
宮森 隆行
澤 龍一
福永 一星
森本 ゆふ
(事務)

順天堂保健医療学雑誌

JUNTENDO HEALTH SCIENCE JOURNAL

第6巻 第1号

2025年7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 Jul. 2025 vol.6