



Juntendo Health Science Journal

順天堂保健医療学雑誌

vol.
5

順天堂大学保健医療学雑誌第5巻第1号

目 次

巻頭言

順天堂保健医療学雑誌第5巻発行にあたって.....	京極 伸介.....	1
---------------------------	------------	---

原著

Characteristics of muscle morphology and elastic modulus of the patellar tendon with a previous history of rectus femoris muscle strains.....	Mie Fujimaki, et al.....	2
小児・AYA 世代の全脳全脊髄照射における妊孕性温存を目的とした VMAT と IMPT の治療計画検証.....	前原 栄一 他.....	12
深層学習による PET/CT 画像の低酸素領域抽出のための データオーギュメンテーション効果.....	赤沼 優文 他.....	19

論説

Use of the phase angle in clinical practice.....	Urara Chiba, et al.....	26
高度救命救急センターにおけるリハビリテーション.....	齊藤 彬 他.....	33
消防団員の演習訓練中における外傷・障害予防を目的とした 運動プログラムの開発.....	宮森 隆行 他.....	40
肺癌における放射線治療法と H-VMAT.....	須賀 健太、臼井 桂介.....	46
X 線 CT のモーションアーチファクト低減技術の変遷と臨床への応用.....	鈴木 拓哉 他.....	54
X 線 CT 検査における医療被ばく低減への取り組み.....	神山 彩絵、臼井 桂介.....	62
頭部 MRI モーションアーチファクトに対する各種補正法と 今後の展望.....	有田 晃大、臼井 桂介.....	68
PET 画像における統計雑音低減処理法.....	鈴木 淳平、津田 啓介.....	74
fMRI による脳機能解析：てんかんへの臨床応用.....	佐々木香乃、後藤 政実.....	80

研究報告

Activation of meat by neutron irradiation and biokinetics of radionuclide from ingested activated meat.....	Maria Yoshida, et al.....	85
--	---------------------------	----

実践報告・その他

Third Annual JUHS 2023.....	Yasuaki Sakano, Yuh Morimoto.....	93
-----------------------------	-----------------------------------	----

国際シンポジウム抄録

Research activities at Department of Radiological Technology,

Mahidol University, Thailand	Napapong Pongnapang	96
Reproducibility and the future of MRI research	Nikola Stikov	97
Functional electrical stimulation therapy for lower limb motor function in individuals with incomplete spinal cord injury	Kei Masani	98
Non-invasive and non-pharmacological therapies for muscles: Pulsed electromagnetic field and photobiomodulation therapy	Yu-Jung Cheng	99

市民公開講座「がんの放射線治療－放射線で“がん”を治す！－」.....	佐藤 英介.....	100
2023 年度保健医療学部市民公開講座の実践.....	飛山 義憲.....	103
順天堂大学保健医療学部市民公開講座.....	齊藤 正和.....	105
臨床実験型短期留学（台湾）.....	新城 碧 他....	109
語学教育型海外短期留学（カナダ）.....	竹越 慎吾 他....	113
専門教育型短期留学（台湾）.....	飯野 秀慶 他....	116

2022 年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録.....		118
-------------------------------	--	-----

2023 年版 保健医療学部教員の代表的な研究・教育活動.....		125
-----------------------------------	--	-----

投稿規程.....		129
-----------	--	-----

編集後記.....		132
-----------	--	-----

順天堂保健医療学雑誌第5巻発行にあたって

このたび、順天堂保健医療学雑誌第5巻を発行する運びとなりましたことを非常に嬉しく思います。本雑誌は、理学療法学や診療放射線学の分野における最新の研究成果や実践的な知見を広く発信する場として、日々発展を遂げています。本巻においても、多岐にわたるテーマの論文が集まり、研究者、教育者、そして実践者の皆様にとって貴重な情報源となることを期待しています。前巻にも大学院生の投稿が数件認められましたが、本巻ではその投稿数が格段に増加しました。このように若手研究者が増えることは頼もしく、今後の彼らの活躍が楽しみです。その修士課程が完成年度を迎えると同時に博士課程がスタートできるのは、まさに皆様の努力の賜といえるでしょう。

理学療法学や診療放射線学は、時代とともにその重要性を増しており、特に現代社会においては、健康維持や医療技術の進歩が求められる中で、その役割はますます大きくなっています。本雑誌が発信する情報が、学問的探求だけでなく、実際の医療現場での改善や新たなアプローチの発見につながることを願っています。

本巻の発行に際して、論文を寄稿いただいた研究者の皆様、査読にご協力いただいた方々、そして発行に携わったすべてのスタッフの方々に深く感謝申し上げます。皆様のご尽力によって、このような質の高い学術雑誌が発行できることを誇りに思います。

最後に、本雑誌が今後も順天堂大学保健医療学部の発展とともに理学療法学や診療放射線学の発展に寄与し続け、学問と実践の橋渡しとしての役割を果たしていくことを心より祈念しております。皆様におかれましても、引き続きのご支援とご指導を賜りますようお願い申し上げます。

2024年9月 吉日
保健医療学部長
京極伸介

Characteristics of muscle morphology and elastic modulus of the patellar tendon with a previous history of rectus femoris muscle strains

Mie Fujimaki¹⁾, Takayuki Miyamori²⁻⁴⁾, Masashi Aoyagi⁵⁾, Haruka Kadoya^{4, 6, 7)},
Yu Shimasaki⁷⁾, Masafumi Yoshimura^{4, 7)}

¹⁾ JEF United Ichihara Chiba Ladies

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

³⁾ Graduate School of Health Science, Juntendo University

⁴⁾ Graduate School of Health and Sports Science, Juntendo University

⁵⁾ Juntendo Administration for Sports, Health Science and Medical Science, Juntendo University

⁶⁾ Department of Clinical Engineering, Faculty of Medical Science, Juntendo University

⁷⁾ Department of Health and Sports Science, Faculty of Health and Sports Science, Juntendo University

Abstract

The purpose of this study was to determine whether a limb with a previously strained rectus femoris injury displays different architecture and patellar tendon elasticity than an uninjured limb.

We conducted a case-control study on 20 active female university students (10 with a rectus femoris strain injury within the last 18 months and 10 controls). All examinations were performed in a university laboratory at room temperature of 25-degree Celsius. We determined muscle architecture from B-mode ultrasound images and patellar tendon stiffness using shear wave ultrasound. Ultrasound assessments were performed with participants in a supine position with a neutral hip posture in a stretched position with 90° knee flexion. We compared assessment data between injured and uninjured limbs and the test and control groups.

The result showed that the previously injured group had significantly higher asymmetry of patellar tendon elasticity in a stretched position than the control group. In the supine position, muscle architecture was not significantly different. No difference in muscle architecture and patellar tendon elasticity existed between limbs in the previously injured group.

In conclusion, a previously strained quadriceps muscle is associated with higher asymmetry of patellar tendon elasticity when stretching. Further evaluation of the tendon's tissue elastic modulus will help prevent muscle strain recurrence and assist in planned training.

Key Words: strain, quadriceps muscle, rectus femoris muscle, female soccer player

Juntendo Health Science Journal 5(1): 2-11, 2024 (Received Jan. 26, 2024 ; Accepted Jun. 11, 2024)

Introduction

A muscle strain is a source of numerous injuries in sports. A quadriceps muscle strain occurs at a lower rate than hamstring strain¹⁾. However, it occurs in various types of sports such as soccer, indoor track and field, and softball^{2, 3)}. Another severe problem is that muscle strain re-injury rates are high^{1, 2, 4)}. Epidemiological studies have shown that re-injury rates of hamstring and quadriceps strains are 16% and 17%, respectively, and can be higher than the first injury rate¹⁾. Notably, the Rugby World Cup 2015

injury survey indicated that quadriceps muscle strains contributed to 168 days of absence, which is more prolonged than that due to hamstring strains⁵⁾. Thus, because of the high recurrence rate and severity of quadriceps muscle strains, it is necessary to clarify the risk factors contributing to their occurrence to prevent re-injuries.

Muscle strains occur more frequently in biarticular muscles³⁾. Previous research reported that among quadricep muscle strains, those of the rectus femoris (RF), a biarticular muscle, accounted for approximately 60%, with the proximal one-third being predominantly

Corresponding author: Takayuki Miyamori
Graduate School of Health Science, Juntendo University
2-1-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8421
E-mail: t.miyamori.hi@juntendo.ac.jp

affected⁶⁾. In addition, both the quadriceps and hamstring muscles have been reported to have high re-injury rates at the same injury site, and a history of strain has been reported to be a risk factor. Since a history of previous injury is a risk factor, a study investigating the characteristics of the limb with a history of hamstring strain also reported that the muscle fascicle length was shorter and the pennation angle was larger than the contralateral uninjured limb⁷⁾. In a prospective study of the risk of developing hamstring strains, it was found that athletes who developed strains had shorter muscle fascicle length, weaker eccentric contractile muscle strength, and greater interlimb differences in muscle fascicle length and eccentric contractile muscle strength than those who did not develop strains, which were associated with an increased risk of future development of strains⁸⁾. Interlimb difference refers to the asymmetry between the right and left legs.

Another characteristic of a limb with an injury is the shortening of its optimal length⁴⁾. A muscle strain occurs during an eccentric contraction when extension stress is applied beyond the optimal length of the limb^{3, 4, 9)}. The descending region of the length-force relationship beyond the optimal length is an area where sarcomeres are vulnerable, and repetitive loading tends to cause microscopic damage to muscle fibers^{4, 7)}. Therefore, shortening of the optimal length increases activity in the region where muscle fibers are vulnerable to damage and is thought to be related to the occurrence of muscle strains. It has also been speculated that shortening of the optimal length of an injured limb is related to the presence of fibrotic tissue produced during the healing process⁴⁾. In severe cases, the damaged muscle may not regenerate, and fibrosis of the tissues may occur¹⁰⁾. Fibrotic tissue is dense and fibrous, and it has been shown that overgrowth of this tissue leads to incomplete functional recovery¹¹⁾.

Furthermore, previous studies have reported that the fascia of the limb with a history of hamstring injury is stiffer than that of the uninjured limb¹²⁾. The rate of fascia shortening depends on the force applied to the muscle-tendon complex, which is caused by stretching of the tendon tissue¹³⁾. Therefore, passive tension, such as tendon action, may compensate for

the reduction in active tension of the muscle as a whole due to fibrotic tissue. To verify this, it is first necessary to evaluate the stiffness of the tendons of the limb with previous muscle strains.

However, the abovementioned characteristics of the limb with a history of a muscle strain are all reasons for the occurrence of hamstring strains. However, similar reports on RF muscle strains, which have a similar recurrence rate and are prone to severe recurrence, are limited. Therefore, this study aimed to evaluate muscle morphology (muscle thickness, pennation angle, and muscle fascicle length) and tendon stiffness (patellar tendon tissue elasticity modulus) of limbs with previous RF muscle strains. This study hypothesized that limbs with pre-existing RF muscle strains (pre-injured limb) would have a shorter muscle fascicle length and greater pennation angle than uninjured limbs and that the injured group would have more significant interlimb differences than the control group. We believe that examining the characteristics of those with a history of strain will prevent re-injury, especially recurrence, at the same site.

Materials and methods

The study design was a case-control study. The participants were 20 female university students (mean age 19.8 ± 1.2 years) involved in daily sports activities. Among them, 18 played soccer and 2 played soft ball. The participants were classified into two groups: the pre-injured group included 10 participants who had been diagnosed with RF strain within the past 18 months⁷⁾ and were currently returning to their pre-injury competitive level and the control group included 10 participants who had no previous history of RF strain (control group).

The exclusion criteria included any injuries that limited activity at the time of measurement and the history of injuries related to the patella tendon, including Osgood-Schlatter disease and patella tendinopathies.

This study was approved by the appropriate Research Ethics Committee, and the participants were fully informed of the study content and gave their written informed consent.

The 20 participants' height, weight, body mass index (BMI), other medical history, sports activity, practice

time per practice session, and practice frequency per week and in the case of those with a history of an RF muscle strain, site of injury were surveyed at the time of measurement using a questionnaire.

The muscle fascicle length, pennation angle, and muscle thickness, which are believed to influence RF muscle function, were measured using B mode (frequency=12 MHz, depth=3 cm, and field of view =26 rps) on an ultrasound imaging system (Applio 300, Canon, Tochigi, Japan). Since strains of the proximal one-third of the RF muscle account for 60% of injuries⁶⁾, the measurement site was set at 66% of the length of the line connecting the anterior superior iliac spine to the bottom of the patella. To maintain measurement reproducibility, the measurement site was marked on the skin, and the probe's center was placed in contact. Following a previous study, the angle of the probe was adjusted to scan the lateral region of the RF muscle from the medial side of the thigh rather than the side perpendicular to the muscle belly¹⁴⁾. Care was

taken to ensure that the image showed multiple muscle fascicles without interruption and that pressure on the skin was minimal. The two measurement positions were the resting (the hip joint in the neutral rotation and the knee joint at 0 degrees) (Fig.1) and stretched positions (the knee joint flexion was 90° in the leg to be measured, while the hip flexion was 60° and knee flexion was 70° in the opposite leg) (Fig.2).

Image analysis was performed using Image J (National Institute of Health, Bethesda, MD, USA). Muscle thickness was defined as the distance between the superficial and deep aponeuroses, and the pennation angle was defined as the angle between the muscle fascicle and deep aponeuroses that appeared uninterrupted¹⁵⁾ (Fig.3). Since the muscle fascicle length is not visible in the image, we used the extension method to extend the muscle fascicle to the point where it meets the superficial and deep aponeuroses. This method is more accurate than the Blazeovich estimation formula as the muscle fascicle length is not visible in



Fig.1 Posture in the resting position



Fig.2 Posture in the stretching position

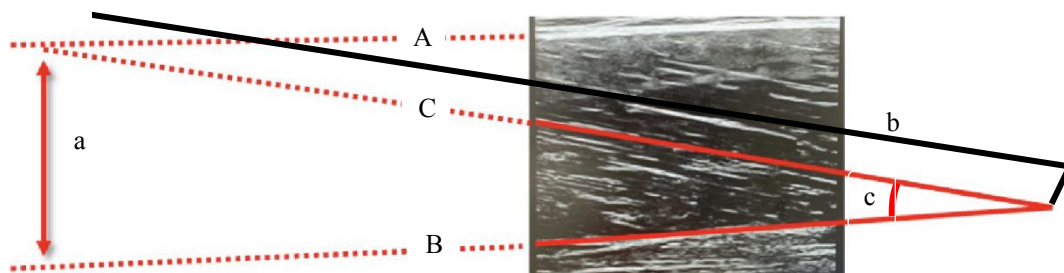


Fig.3 Ultrasound image of RF

Muscle thickness (a) was the distance between the superficial (line A) and deep aponeuroses (line B). Muscle fascicle length (b) was estimated by linear extrapolation of both superficial (line A) and deep aponeuroses (line B). Pennation angle (c) was the angle between the muscle fascicle (line C) and deep aponeuroses (line B).

the image. Measurements were taken five times per leg, and the average of the three values, excluding the maximum and minimum values, was used for statistical analysis.

The patellar tendon tissue elastic modulus was measured using shear wave elastography (frequency =10 MHz, depth=1.5 cm, and field of view=44 rps; Applio 300). To evaluate the patellar tendon, a 20×20-mm box was placed between the distal femur and proximal tibia as the region of interest (ROI) of the tendon of interest. Circular ROIs with a diameter of 5 mm were placed proximal, central, and distal to the patellar tendon parenchyma within the box (Fig.4). The measurement positions were resting and stretched positions (Fig.1 and 2). The average of three measurements was used for statistical analysis.

The statistical software EZR was used for statistical processing, with a significance level of $p < 0.05$. Unpaired t-tests were used to compare muscle morphology and patellar tendon tissue elastic modulus between the pre-injured and uninjured limbs. Comparisons were made with the pre-injured limb versus the uninjured limb in the resting position and the pre-injured limb versus the uninjured limb in the stretched position.

Unpaired t-test was performed for age, height, weight, and BMI and Fisher's exact probability test was conducted for sports activities to compare the attributes of the pre-injured and control groups. Welch's t-test was used to compare muscle morphology and patellar tendon tissue elastic modulus between the

pre-injured and control groups. In this study, Welch's t-test, which does not consider whether the samples are equally distributed, was used to avoid the "multiplicity problem" that occurs with repeated testing. Comparisons between the pre-injured and control groups were made as previously described⁷⁾ in which the structure of the limb with previous hamstring strains is investigated. The absolute values and the rate of changes between positions (=values in the stretched position / those in the resting position) of interlimb differences were used to compare the uninjured limb minus the pre-injured limb of the pre-injured group. Similarly, in the control group, differences in the right leg minus the left leg were assessed in the resting and stretched positions. Post hoc power analysis was undertaken using G*power 3.1.9.7 software¹⁶⁾. Effect size (d) was also calculated.

Results

Overall, this study included 20 female university students mean age 19.8 ± 1.2 years who were involved in sports activities daily, divided into pre-injured group and control group. Table 1 shows the mean (95% confidence interval) age, height, weight, BMI, and training time and frequency in both the groups.

The morphological data of RF and tissue elasticity of PT were measured in pre-injured and uninjured limbs in the pre-injured group. There were no significant differences between pre-injured and uninjured limbs in the resting position (muscle thickness $p=0.70$, pennation angle $p=0.28$, muscle fascicle length $p=0.25$, and patellar tendon tissue elastic modulus $p=0.64$). In the stretched position, although the morphological data of RF and tissue elasticity of PT changed compared to those in the resting position, there were also no significant differences (muscle thickness $p=0.74$, pennation angle $p=0.80$, muscle fascicle length $p=0.63$, and patellar tendon tissue elasticity $p=0.44$; Table 2). Even when the rate of changes were analyzed, there were no significant differences in all analyses (muscle thickness $p=0.75$, pennation angle $p=0.45$, muscle fascicle length $p=0.32$, and patellar tendon tissue elastic modulus $p=0.63$) (Table 3).

The interlimb difference or the morphological data of RF and tissue elasticity of PT were calculated both

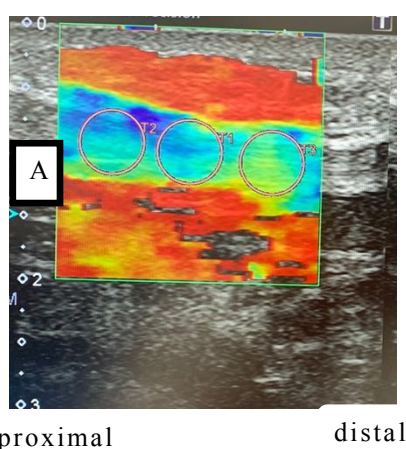


Fig.4 Share wave elastography image of PT
The shear wave elastography box (20mm × 20mm) was set at the patellar tendon (A). Areas of high stiffness were shown in blue and that of low stiffness were shown in red.

Table 1 Physical characteristics of the pre-injured and control groups

	Pre-injured group (n=10)	Control group (n=10)	p
Age (years)	19.3 (18.6-20.0)	20.3 (19.4-21.2)	0.06
Height (cm)	160.7 (155.7-165.6)	160.0 (155.8-164.4)	0.82
Weight (kg)	54.3 (50.0-58.7)	52.6 (49.0-56.1)	0.48
BMI	21.0 (19.8-22.3)	20.6 (19.3-21.9)	0.55
Training Time (h)	2.2 (1.9-2.5)	2.0*	0.15
Training Frequency (per week)	5.8 (5.5-6.1)	6.0*	0.15
Sports	Soccer (n=8) Soft ball (n=2)	Soccer (n=10)	0.47

Mean (95% confidence interval)

BMI: Body mass index

*As there were no differences between subjects, 95%CI was not obtained.

Table 2 Morphological data of RF and tissue elasticity of PT of pre-injured and uninjured limbs of pre-injured individuals, both in the resting position and the stretched position with the absolute value

	Pre-injured	Uninjured	P-value	Effect size	Power
Resting position					
MT (cm)	2.1 (1.9-2.4)	2.1 (1.9-2.2)	0.70	0	0.05
PA (°)	12.0 (9.7-14.3)	13.8 (11.0-16.5)	0.28	0.50	0.19
FL (cm)	11.2 (9.2-13.1)	9.9 (8.4-11.4)	0.25	0.56	0.22
PT stiffness (kPa)	19.7 (13.6-25.9)	21.9 (13.5-30.3)	0.64	0.21	0.07
Stretched position					
MT (cm)	2.1 (1.9-2.2)	2.1 (1.9-2.3)	0.74	0	0.05
PA (°)	8.4 (6.3-10.6)	8.8 (6.8-10.8)	0.80	0.14	0.06
FL (cm)	13.5 (11.7-15.4)	13.0 (11.4-14.6)	0.63	0.22	0.08
PT stiffness (kPa)	109.3 (88.4-130.2)	98.6 (76.1-121.1)	0.44	0.35	0.11

Mean (95% confidence interval)

MT, Muscle thickness; PA, Pennation angle; FL, Fascicle length; PT, Patella tendon

Table 3 Morphological data of RF and tissue elasticity of PT of pre-injured and uninjured limbs of pre-injured individuals, both in the resting position and the stretched position with the rate of changes

	Pre-injured	Uninjured	P-value	Effect size	Power
Stretched position/ Resting position					
MT	1.0 (0.9-1.1)	1.0 (0.9-1.1)	0.75	0	0.05
PA	0.7 (0.5-0.9)	0.7 (0.5-0.8)	0.45	0	0.05
FL	1.2 (1.1-1.4)	1.4 (1.1-1.6)	0.32	0.78	0.38
PT stiffness	6.6 (4.2-9.0)	5.9 (3.2-8.5)	0.63	0.20	0.07

MT, Muscle thickness; PA, Pennation angle; FL, Fascicle length; PT, Patella tendon

in the pre-injured group and control group. The means of the interlimb difference in the patellar tendon tissue elastic modulus in the resting position were 30.1 (95%CI, 11.4-48.8) in the pre-injured group and 9.7 (95%CI, 2.6-16.7) in the control group. They were significantly greater in the pre-injured group than in the control group in the stretched position ($p=0.04$, effect size=1.03, power=0.59). There were no statistically significant differences in the patellar

tendon tissue modulus, muscle thickness, pennation angle, or muscle fascicle length in the resting position (Table 4).

Discussion

In this study, we hypothesized that the muscle morphology (muscle thickness, pennation angle, and muscle fascicle length) and patellar tendon tissue modulus of the limbs with previous RF muscle strains

Table 4 Interlimb differences of morphological data of RF and tissue elasticity of PT in the pre-injured and control groups, both in the resting and stretched position

	Pre-injured group (n=10)	Control group (n=10)	p-value	Effect size	Power
Resting position					
MT	0.3 (0.08-0.4)	0.3 (0.2-0.4)	0.69	0	0.05
PA	2.2 (0.3-4.1)	2.2 (0.8-3.7)	0.97	0	0.05
FL	1.8 (0.8-2.7)	0.9 (0.5-1.3)	0.07	0.89	0.47
PT stiffness	7.1 (1.8-12.3)	8.2 (1.0-15.4)	0.77	0.13	0.06
Stretched position					
MT	0.2 (0.08-0.3)	0.3 (0.2-0.4)	0.19	0.50	0.19
PA	1.6 (0.4-2.8)	3.1 (1.4-4.7)	0.12	0.74	0.35
FL	2.8 (1.2-4.4)	2.5 (0.4-4.6)	0.77	0.12	0.06
PT stiffness	30.1 (11.4-48.8)	9.7 (2.6-16.7)	0.04*	1.03	0.59

Mean (95% confidence interval); *p<0.05

MT, Muscle thickness; PA, Pennation angle; FL, Fascicle length; PT, Patella tendon

would be shorter and that the pennation angle would be larger in the pre-injured limbs compared with those in the uninjured limbs. Furthermore, we hypothesized that the pre-injured limbs would have greater asymmetry (interlimb differences) in the muscle morphology and patellar tendon tissue modulus than the uninjured control limbs. Accordingly, we examined 20 female university students using an ultrasound imaging system. The results showed no statistically significant differences in the muscle morphology and patellar tendon tissue modulus between the pre-injured and uninjured limbs of those who had experienced a previous RF muscle strain. However, the interlimb differences in the patellar tendon tissue modulus were significantly greater during stretching in the pre-injured group than in the control group.

Background characteristics of the participants

The results of the questionnaire to investigate the background characteristics (age, height, weight, or BMI) of the participants showed no significant differences between the injury and control groups. Although many studies have investigated the relationship between muscle swelling and background characteristics, no statistically significant direct correlation has been found.

Comparison between previously injured and uninjured limbs of patients with a previous strain injury

Muscle thickness, pennation angle, and muscle

fascicle length of the RF muscle in the resting position obtained in this study were comparable to those reported in previous studies^{14, 15)}. There were no statistically significant differences between the pre-injured and uninjured limbs of the RF muscle. It is thought that after returning to play and training, the muscle morphology of the pre-injured side became similar to that of the uninjured side in muscle fascicle length, pennation angle, and muscle thickness. Soda et al.¹⁷⁾ stated that although there was no change in the muscle thickness, the pennation angle and muscle fascicle length changed structurally with training; Blazeovich et al.¹⁸⁾ reported that pennation angle changes continue linearly for several months after the start of training, while the muscle fascicle length changes rapidly. Therefore, since the muscle fascicle length and pennation angle change with training, athletes who have a history of a previous muscle strain but return to work may show no difference in muscle morphology between their pre-injured and uninjured limbs. However, in a study by Timmins et al.⁷⁾ who investigated hamstring muscle morphology, the limbs of athletes who had a hamstring strain in the past 18 months had a larger pennation angle and shorter muscle fascicle length compared with uninjured limbs. This difference could be because the muscle measured in this study was the hamstring, which differs from RF⁷⁾. Timmins et al.⁸⁾ stated that short muscle fascicles with fewer sarcomeres in series are more sensitive to tensile stress due to fast and powerful centrifugal contractile

movements. A hamstring strain often occurs during high-speed running. However, an RF muscle strain is often caused by non-contact injuries or overuse²⁾. In other words, a short muscle fascicle length is a risk factor for hamstring strains⁸⁾, while changes in muscle morphology are unlikely to be a risk factor for RF strains, which have different injury mechanisms.

Furthermore, in this study, muscle morphology was measured only in the proximal one-third of the RF muscle, which was not necessarily the site of the muscle strain injury. In the future, new insights into muscle morphology may be obtained by identifying the site of the flesh injury and then measuring it.

The patellar tendon tissue elastic modulus of the pre-injured limb was not significantly different from that of the uninjured limb. Freitas et al.¹⁹⁾ stated that muscle-tendon complexes do not change in tension for a given length and that it is due to the decrease in tissue stiffness. In addition, they stated that mechanical properties, such as a decrease in tissue stiffness, and morphological properties, such as an increase in the muscle fascicle length, may influence changes in tension. This study also found no significant changes in muscle morphology between the pre-injured and uninjured limbs. This result suggests that the differences in the measurement limb position were insufficient to change the tension in the muscle-tendon complex, including the quadriceps and patellar tendons.

Comparison of the group with previous muscle strains and control group

Interlimb differences between the two legs were compared between the patients with previous injuries and the control group, referring to previous studies⁸⁾.

No significant interlimb differences in muscle thickness, pennation angle, and muscle fascicle length were found in the resting position. This could be because most of the participants in this study were a homogeneous sample belonging to the same club. Ema et al.¹⁴⁾ measured muscle morphology with an ultrasound imaging device after a 12-week training intervention and reported an increase in the pennation angle in their participants. Soda et al.¹⁷⁾ also reported a similar trend of increased pennation angle and shortened muscle fascicle length in participants during

and after performing fatigue tasks. Therefore, it is possible that after returning from the strain and participating in the same training as the control group, the previously trained group showed no difference in muscle morphology in the resting position.

Additionally, there were no significant differences in muscle thickness, pennation angle, or muscle fascicle length between limbs during stretching. We believe that this indicates that muscle morphology does not change when the muscle-tendon complex is stretched. It was explained that changes in muscle morphology during muscle contraction are closely related to tendon tissue characteristics^{13, 20, 21)}. Experiments conducted on extracted animal muscle and tendon showed that the muscle bundle length shortens or does not change when the muscle-tendon complex is stretched^{22, 23)}. This suggests that stretching the muscle-tendon complex during tensile contraction mainly depends on the tendon and that the tendon tissue serves as a mechanical buffer to prevent damage to the muscle fibers. Therefore, we believe there may be no change in muscle morphology even under tensile stress.

On the other hand, interlimb differences in the patellar tendon tissue elastic modulus in the stretched position were significantly greater in the pre-injured group. This means that the difference in the patellar tendon tissue modulus between the pre-injured and uninjured limbs during stretching significantly differed in the group with a previous strain injury. Although there was no difference in the mean values between the pre-injured and uninjured limbs in the pre-injured group, many of them tended to have a greater patellar tendon tissue modulus in the pre-injured limb. In the resting position, there were no significant interlimb differences between the groups. The pre-injured limbs may have been affected by mechanical stiffness due to scar tissue during the recovery process when subjected to stretching stress. Turrina et al.²⁴⁾ stated that scar tissue alters force transmission in the muscle-tendon complex and influences fascial stiffness. Therefore, we believe that the pre-injured group may have suffered from stiffness of the muscle-tendon complex, including fascia, due to fibrotic tissue formation.

Furthermore, the extracellular matrix (ECM) in tendon tissue and skeletal muscle is rich in collagen and extremely important for force transmission in muscle tissue²⁵). There is a linear relationship between tissue modulus and passive tension²⁶). An increase in the patellar tendon tissue modulus is associated with changes in the ECM, such as changes in collagen cross-linking, reflecting an increase in passive tension throughout the patellar tendon and quadriceps muscle-tendon complex²⁵). Passive tension is the tension produced by otherwise induced stretching and is influenced by the stretching of extracellular connective tissue. Therefore, the increase in the patellar tendon tissue elastic modulus may be due to the influence of material changes such as the effect of the ECM. This suggests that the large limb-to-limb difference in the patellar tendon tissue modulus during stretching, a situation in which stretching stress is applied, such as eccentric contraction, which can easily cause extensibility, is a situation in which the tendon tissue is less stretchable and less able to serve as a mechanical cushioning device.

To prevent quadriceps strain injury or its recurrence, it is necessary to prospectively investigate the relationship between the improvement of tendon tissue elastic modulus and extensibility. It has been shown that tendon tissue extensibility decreases with age and that metabolic factors are said to be involved²⁷). Since plyometric training has been reported to increase tendon extensibility, it is also expected that plyometric training will be performed in patients with previous strain injury; however, that research will involve the tissue elastic modulus of the tendon and the recurrence of muscle strain²⁸).

Limitations

To the authors' knowledge, this is the first study that examined quadriceps muscle morphology and patellar tendon tissue elastic modulus in the stretched limb position. However, this study had several limitations. First, although we excluded the participants with a history of patella tendon diseases, we did not examine the degeneration of the tendon. Previous studies reported that athletes, especially soccer players, can experience asymptomatic degenerative changes in

their patella tendons^{29, 30}). Although degeneration's impact on the elastic modulus in the tendon is unknown, current results may include those with asymptomatic degenerative changes. Second, although we investigated the morphology of quadriceps with ultrasound, the place where we measured was not the exact place where the previous quadriceps strain occurred. In addition, the severity of the previous strain was unknown. However, a previous study reported that within the same muscle, the morphology of the muscle can change regardless of the injury site⁷). Therefore, we decided to measure the morphology at one-third of the thigh to compare the uninjured limb. The impact of the previous muscle injury on the whole muscle morphology may require further investigation. Finally, the power in the interlimb difference in the patellar tendon tissue elastic modulus was at 0.59, so a type 2 error might be contained. Therefore, caution should be taken when interpreting the current results. In the future, studies with a larger number of participants and investigating the effects of the degeneration on the elastic modulus in the patella tendon are necessary.

Conclusion

In this study, there were no significant differences in the muscle morphology or patellar tendon tissue elastic modulus between the previously injured and uninjured limbs of individuals with a history of RF muscle strain. On the other hand, the patellar tendon elastic modulus of the injured limb tended to be larger, and the interlimb differences were greater when stretching stress was applied to the injured limb than to the control limb.

This result supports that during centrifugal contraction, which is prone to fleshing out, the RF muscle does not change its morphology much, indicating that patella tendon extensibility is a mechanical buffer to prevent muscle damage. In the future, evaluation focusing on muscle morphology and the tendon may be useful in preventing the recurrence of RF muscle bruising and in planning training programs. Regarding the quadriceps muscle, the muscle is large, and we believe that measuring tendon stiffness may be clinically valuable if it can reduce the risk of flesh bruising. In addition, we

would expect to investigate whether plyometric training to increase tendon extensibility in patients with a history of flesh bruising would lead to the recurrence of flesh bruising.

Acknowledgements

We would like to thank the Institute of Health and Sports Science & Medicine at the Juntendo University for their valuable help in conducting this study.

Ethical approval

This study was approved by the Ethics Committee of Juntendo University (No.2022-14). All participants were informed of the purpose and methodology of the current study before they voluntarily provided written informed consent.

Competing interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Ekstrand J, Hägglund M, Waldén M: Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am J Sports Med.* 2011; 39: 1226-1232.
- Eckard TG, Kerr ZY, Padua DA, Djoko A, Dompier TP: Epidemiology of Quadriceps Strains in National Collegiate Athletic Association Athletes, 2009-2010 Through 2014-2015. *J Athl Train.* 2017; 52: 474-481.
- Mendiguchia J, Alentorn-Geli E, Idoate F, Myer GD: Rectus femoris muscle injuries in football: a clinically relevant review of mechanisms of injury, risk factors and preventive strategies. *Br J Sports Med.* 2013; 47: 359-366.
- Brockett CL, Morgan DL, Proske U: Predicting hamstring strain injury in elite athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2004; 36: 379-387.
- Fuller CW, Taylor A, Kemp SP, Raftery M: Rugby World Cup 2015: World Rugby injury surveillance study. *Br J Sports Med.* 2017; 51: 51-57.
- Pasta G, Nanni G, Molini L, Bianchi S: Sonography of the quadriceps muscle: Examination technique, normal anatomy, and traumatic lesions. *J Ultrasound.* 2010; 13: 76-84.
- Timmins RG, Shield AJ, Williams MD, Lorenzen C, Opar DA: Biceps femoris long head architecture: a reliability and retrospective injury study. *Med Sci Sports Exerc.* 2015; 47: 905-913.
- Timmins RG, Bourne MN, Shield AJ, Williams MD, Lorenzen C, Opar DA: Short biceps femoris fascicles and eccentric knee flexor weakness increase the risk of hamstring injury in elite football (soccer): a prospective cohort study. *Br J Sports Med.* 2016; 50: 1524-1535.
- O'Brien TD, Reeves ND, Baltzopoulos V, Jones DA, Maganaris CN: Muscle-tendon structure and dimensions in adults and children. *J Anat.* 2010; 216: 631-642.
- Lieber RL, Ward SR: Cellular mechanisms of tissue fibrosis. 4. Structural and functional consequences of skeletal muscle fibrosis. *Am J Physiol Cell Physiol.* 2013; 305: C241-252.
- Hwang JH, Ra YJ, Lee KM, Lee JY, Ghil SH: Therapeutic effect of passive mobilization exercise on improvement of muscle regeneration and prevention of fibrosis after laceration injury of rat. *Arch Phys Med Rehabil.* 2006; 87: 20-26.
- Kawai T, Takahashi M, Takamoto K, Bito I: Hamstring strains in professional rugby players result in increased fascial stiffness without muscle quality changes as assessed using shear wave elastography. *J Bodyw Mov Ther.* 2021; 27: 34-41.
- Ichinose Y, Kawakami Y, Ito M, Kanehisa H, Fukunaga T: In vivo estimation of contraction velocity of human vastus lateralis muscle during "isokinetic" action. *J Appl Physiol (1985).* 2000; 88: 851-856.
- Ema R, Wakahara T, Mogi Y, Miyamoto N, Komatsu T, Kanehisa H, et al: In vivo measurement of human rectus femoris architecture by ultrasonography: validity and applicability. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2013; 33: 267-273.
- Blazevich AJ, Gill ND, Zhou S: Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. *J Anat.* 2006; 209: 289-310.
- Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A:

- G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods*. 2007; 39: 175-191.
- 17) Soda N, Ishida, H., Ikedo, Y: Changes in muscle architecture of vastus lateralis muscle during fatiguing contractions. *Rigakuryoho Kagaku*. 2011; 26: 781-784.
 - 18) Blazeovich AJ, Cannavan D, Coleman DR, Horne S: Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* (1985). 2007; 103: 1565-1575.
 - 19) Freitas SR, Mendes B, Le Sant G, Andrade RJ, Nordez A, Milanovic Z: Can chronic stretching change the muscle-tendon mechanical properties? A review. *Scand J Med Sci Sports*. 2018; 28: 794-806.
 - 20) Hicks KM, Onambele-Pearson GL, Winwood K, Morse CI: Gender differences in fascicular lengthening during eccentric contractions: the role of the patella tendon stiffness. *Acta Physiol (Oxf)*. 2013; 209: 235-244.
 - 21) Wakahara T, Kanehisa H, Kawakami Y, Fukunaga T: Effects of knee joint angle on the fascicle behavior of the gastrocnemius muscle during eccentric plantar flexions. *J Electromyogr Kinesiol*. 2009; 19: 980-987.
 - 22) Azizi E, Roberts TJ: Geared up to stretch: pennate muscle behavior during active lengthening. *J Exp Biol*. 2014; 217: 376-381.
 - 23) Roberts TJ, Azizi E: The series-elastic shock absorber: tendons attenuate muscle power during eccentric actions. *J Appl Physiol* (1985). 2010; 109: 396-404.
 - 24) Turrina A, Martínez-González MA, Stecco C: The muscular force transmission system: role of the intramuscular connective tissue. *J Bodyw Mov Ther*. 2013; 17: 95-102.
 - 25) Heales LJ, Badya R, Ziegenfuss B, Hug F, Coombes JS, van den Hoorn W, et al.: Shear-wave velocity of the patellar tendon and quadriceps muscle is increased immediately after maximal eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol*. 2018; 118: 1715-1724.
 - 26) Koo TK, Guo JY, Cohen JH, Parker KJ: Relationship between shear elastic modulus and passive muscle force: an ex-vivo study. *J Biomech*. 2013; 46: 2053-2059.
 - 27) Kubo K, Morimoto M, Komuro T, Tsunoda N, Kanehisa H, Fukunaga T: Age-related differences in the properties of the plantar flexor muscles and tendons. *Med Sci Sports Exerc*. 2007; 39: 541-547.
 - 28) Kubo K, Ishigaki T, Ikebukuro T: Effects of plyometric and isometric training on muscle and tendon stiffness in vivo. *Physiol Rep*. 2017; 5.
 - 29) Fredberg U, Bolvig L: Significance of ultrasonographically detected asymptomatic tendinosis in the patellar and achilles tendons of elite soccer players: a longitudinal study. *Am J Sports Med*. 2002; 30: 488-491.
 - 30) Fredberg U, Bolvig L, Andersen NT: Prophylactic training in asymptomatic soccer players with ultrasonographic abnormalities in Achilles and patellar tendons: the Danish Super League Study. *Am J Sports Med*. 2008; 36: 451-460.

小児・AYA 世代の全脳全脊髄照射における妊孕性温存を目的とした VMAT と IMPT の治療計画検証

前原栄一、臼井桂介、馬場大海、橘 英伸、坂本 肇、坂野康昌、京極伸介、代田浩之

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

全脳全脊髄照射 (craniospinal irradiation; CSI) は、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1.5Gy 以下にする必要があり、CSI は不妊リスクが課題である。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、後方1門照射、強度変調回転照射法 (volumetric modulation arc therapy; VMAT) および強度変調陽子線治療 (intensity modulated proton therapy; IMPT) における妊孕性温存に向けた治療計画法を検討した。公開データベースより取得した10例の小児・AYA 世代の CT 画像を用いて、後方1門照射、VMAT および IMPT を作成した。PTV の D99、D95、Dmax、また子宮・卵巣の Dmax、Dmean を求め比較検討した。IMPT は、後方1門照射法と比較して子宮および卵巣の最大線量が82%および90%減少し、VMAT と比較して74% および61% 減少した。よって、IMPT は小児・AYA 世代の CSI において、妊孕性温存を実現することのできる有効な照射法であるといえる。

キーワード：全脳全脊髄照射、妊孕性温存、VMAT、IMPT

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 12-18頁, 2024年 (受付 2024.1.29.; 受理 2024.5.13.)

緒言 (背景と目的)

全脳全脊髄照射 (craniospinal irradiation; CSI) は、小児の髄芽腫や上衣腫の髄膜播種への予防照射として大変有用である¹⁾。しかし、CSI は広範な照射野のため、成長障害、二次発がんおよび不妊リスクの増大が問題視されている²⁾。近年、若年者のがん罹患者に対する妊孕性温存療法が注目されはじめた。2018年の第3期がん対策推進基本計画において、小児・AYA (adolescent and young adult) 世代のがん患者に対する医療提供が推進され、2023年からは厚生労働省の「小児・AYA 世代のがん患者等の妊孕性温存療法研究促進事業」³⁾により、がん治療と並行して妊孕性温存療法が推進されるようになった。

従来、CSI の照射方法は X 線を用いた患者の背側から照射する後方1門照射法であったが、近年、欧米を中心として強度変調回転照射法 (volumetric modulated arc therapy: VMAT) を用いて、脊髄領域に極めて収束した線量分布を作成し、治療が行われるようになってきた⁴⁾。また、陽子線は飛程末端部でブラックピークを形成することから、標的領域の線量収束性を高めると同時に、周囲正常臓器へ照射される線量の広がりを

著しく低減することができる。そのため、陽子線は特に小児での有効性が認められており⁵⁾、成長障害や2次発がんのリスクを限りなく減らせる点から、CSI においても強度変調陽子線治療法 (intensity modulated proton therapy; IMPT) で治療されることが増えてきた⁶⁾。一方で、CSI の照射では、広範な照射野であることから、子宮・卵巣に一定の線量が照射されてしまう可能性があり、妊孕性温存を目的とする場合には照射される線量を極めて低減させる必要がある。先行研究において、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るが⁷⁾、現在までに CSI での妊孕性温存を目的とした放射線治療計画法の検討は行われていない。本研究では、小児・AYA 世代の CSI における子宮・卵巣線量を評価し、妊孕性温存を達成することのできる線量分布に関して、X 線および陽子線による放射線治療計画法を検討することを目的とする。

方 法

1. 放射線治療計画の作成方法

公開データベース (The Cancer Imaging Archive)⁸⁾ より取得した10例 (9 ~ 15才: 中央値12才) の CT 画像を放射線治療計画に用いた。治療計画装置は Eclipse

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

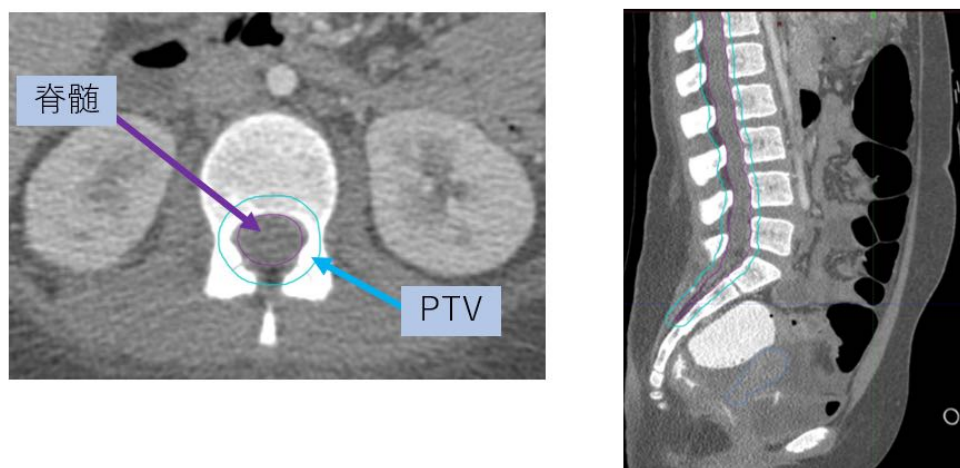


図1 脊髄と PTV の描出方法

Ver. 16.0 (バリアンメディカルシステムズ) を使用し、後方1門照射法、VMAT および IMPT の治療計画を作成した。図1に脊髄の輪郭描出および計画標的体積 (planning target volume: PTV) の作成方法を示す。脊髄は、骨格が未成熟な患者に対して急激な線量勾配での照射による椎体の非対称な成長リスクを軽減するために、S3までを臨床標的体積 (clinical target volume: CTV) とした⁹⁾。PTV は CTV に5 mm のマージンを加えて作成した。卵巣、子宮、膀胱、大腸および腎臓の領域は、公開データ内で既に輪郭作成済のものを利用した。なお、すべての輪郭領域において放射線腫瘍医による確認と修正を行った。

放射線治療計画は、X 線を用いた後方1門照射法および VMAT と陽子線を用いた IMPT を作成した。後方1門照射法および VMAT では、エネルギーを6 MV とし計算グリッド2.5 mm にて、線量計算アルゴリズムには anisotropic analytical algorithm 法を用いて作成した。なお、VMAT は360° 方向から2回転照射する計画を作成した⁵⁾。IMPT は、計算グリッド2.5 mm にて、線量計算アルゴリズムは proton convolution super position 法を用いて作成した。処方線量と分割回数は23.4 GyRBE/13 分割とし、陽子線治療計画では生物学的効果比 (RBE) を1.1として計算をした。後方1門照射ではアイソセンタを処方点とした。また VMAT および IMPT では、PTV の95% が照射される線量 (D95) を23.4 Gy とし、子宮および卵巣の最大線量 (Dmax) を3.4および3.8 Gy 以下、平均線量 (Dmean) を1.1および1.7 Gy 以下になるよう治療計画の最適化を行った。表1に線量最適化計算に用いた各輪郭臓器の線量限度を示す。

表1 VMAT および IMPT の治療計画のための制約条件¹⁰⁻¹⁵⁾

Structure	Dose criteria	
PTV	D95	23.4 Gy
OARs		
Gonads	Max dose	< 3.8 Gy
	Mean dose	< 1.7 Gy
Uterus	Max dose	< 3.4 Gy
	Mean dose	< 1.1 Gy
Right & Left kidney	Mean dose	< 6.0 Gy
Colon	D50	< 31.6 Gy
	Mean dose	< 5.2 Gy
Spleen	Mean dose	< 5.12 Gy

2. 線量分布の評価方法

各治療計画において、標的体積への線量評価として、PTV の99% が照射される線量 (D99) および D95 と Dmax を求めた。また、リスク臓器への線量評価として、子宮および卵巣の Dmax および Dmean を求め、有意水準を0.05として2標本 t 検定を行い、各治療計画法の標的線量およびリスク臓器線量を比較検討した。

結 果

1. PTV の線量指標

PTV の D95、D99および Dmax を図2～4に示す。

PTV の D95と D99は、後方1門照射法と VMAT および IMPT との間で有意差があり、VMAT および IMPT では PTV へより均一に処方線量が照射されている。また、Dmax は、後方1門照射法と VMAT、VMAT と IMPT および後方1門照射法と IMPT との間に有意差があり、後方1門照射では Dmax が処方線量を大きく超えている。

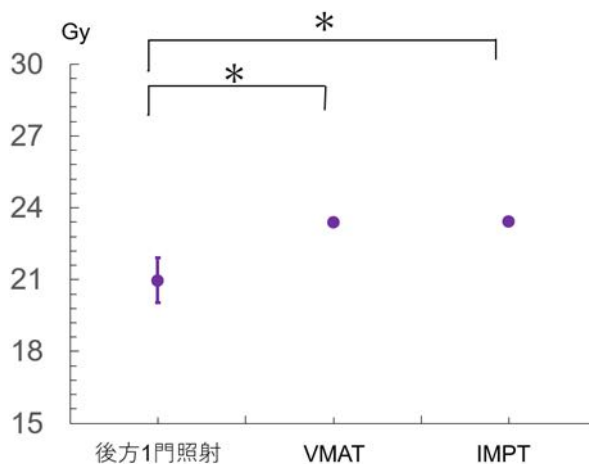


図2 PTVのD95の結果 * $p < 0.05$

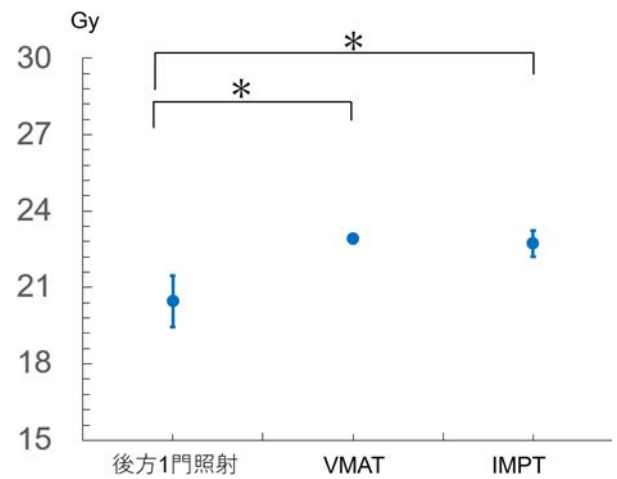


図3 PTVのD99の結果 * $p < 0.05$

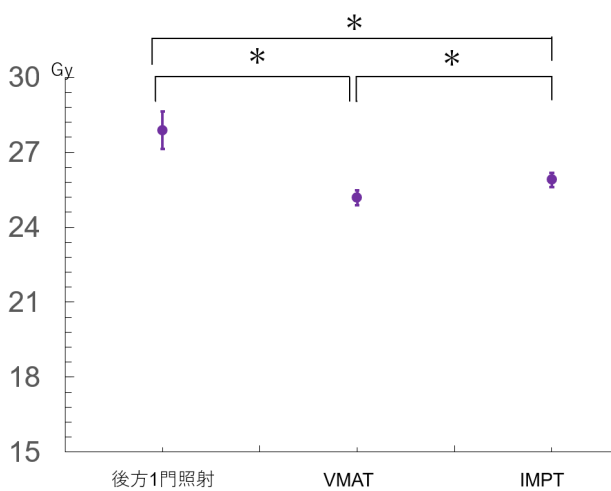


図4 PTVのDmaxの結果 * $p < 0.05$

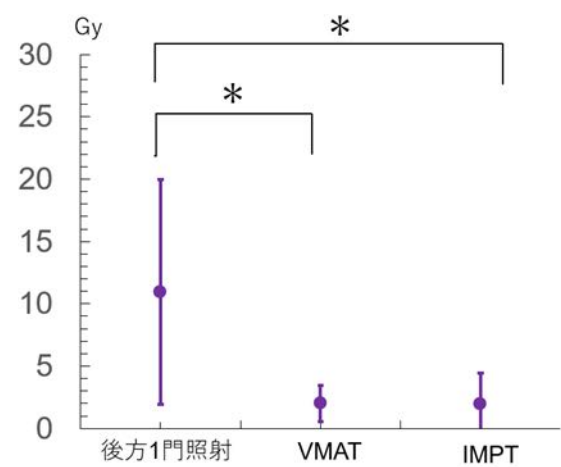


図5 子宮のDmaxの結果 * $p < 0.05$

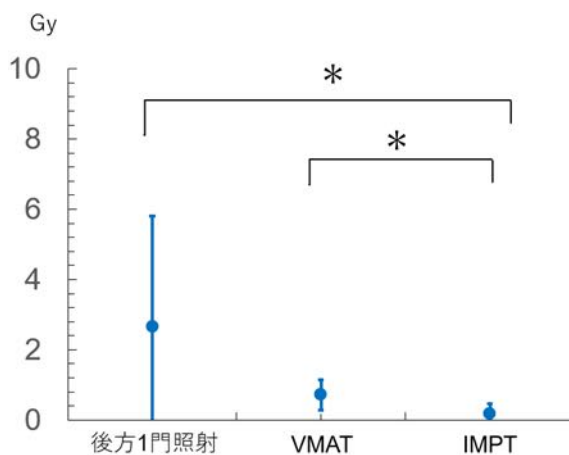


図6 子宮のDmeanの結果 * $p < 0.05$

2. 子宮線量の比較

子宮線量の Dmax と Dmean を図5、6に示す。

子宮線量の Dmax は、後方1門照射法と VMAT および後方1門照射法と IMPT との間で有意差があり、VMAT は後方1門照射法と比べて、Dmax が82%減少した。IMPT は後方1門照射法と比べて、Dmax が82%減少した。また、子宮線量の Dmean は後方1門照射法と IMPT および VMAT と IMPT との間で有意差があり、IMPT は後方1門照射法と比べて、Dmean が93%減少し、IMPT は VMAT に比べて Dmean が75%減少した。

3. 卵巣線量の比較

卵巣線量の Dmax と Dmean を図7、8に示す。

卵巣線量の Dmax は、後方1門照射法と VMAT、後方1門照射法と IMPT および VMAT と IMPT との間で有意差があり、VMAT は後方1門照射と比べて Dmax が75%減少し、IMPT は後方1門照射法と比べて Dmax が90%減少し、IMPT は VMAT と比べて Dmax が61%減少した。また、卵巣線量の Dmean は、後方1門照射法と IMPT および VMAT と IMPT との間で有意差があり、IMPT は後方1門照射に比べて Dmean が87%減少し、IMPT は VMAT に比べて Dmean が85%減少した。

4. 15才の症例での線量分布の結果

図9に15才の症例の線量分布を示す。後方1門照射法では、子宮・卵巣に大線量が照射されている。VMAT

では、低線量域が腹側方向に広がっていることから、子宮・卵巣にも1.4～2.4 Gy の線量域が照射されている。一方で IMPT は、標的領域への線量収束性に優れており、子宮・卵巣へ照射される線量を著しく低減することができている。

5. 9才の症例での線量分布の結果

図10に9才の症例の線量分布を示す。後方1門照射法では、子宮・卵巣に大線量が照射される。VMAT では、低線量域が広域に広がることで、子宮・卵巣の大部分に1.4～2.4 Gy の線量が照射されている。本症例は、膀胱容量が小さいため、子宮と卵巣が足側に存在する。そのため、子宮と卵巣の位置が CSI の照射野から離れ、IMPT において子宮・卵巣に照射される線量を著しく低減することができている。

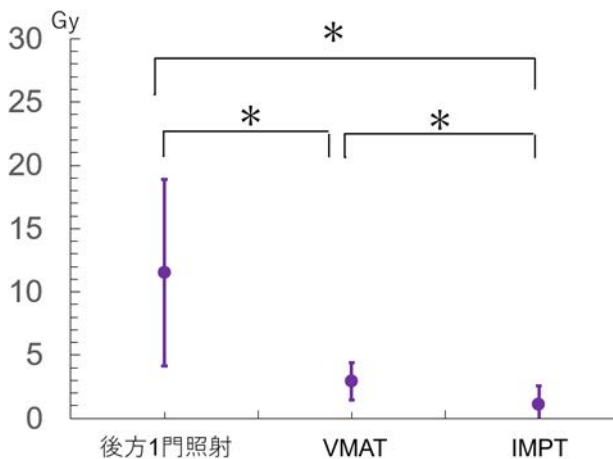


図7 卵巣の Dmax の結果 *p < 0.05

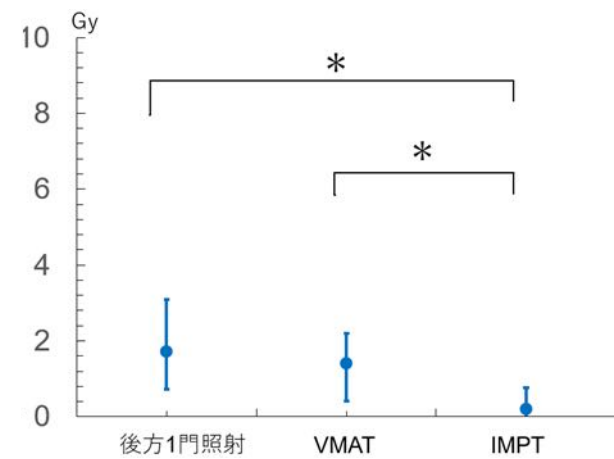


図8 卵巣の Dmean の結果 *p < 0.05

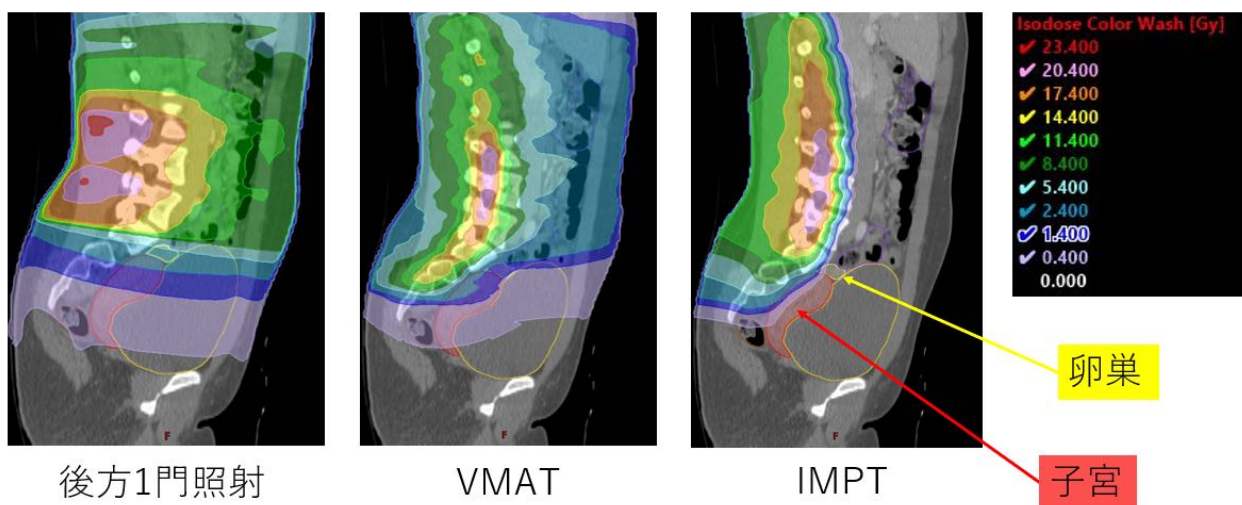


図9 15 歳の症例の線量分布

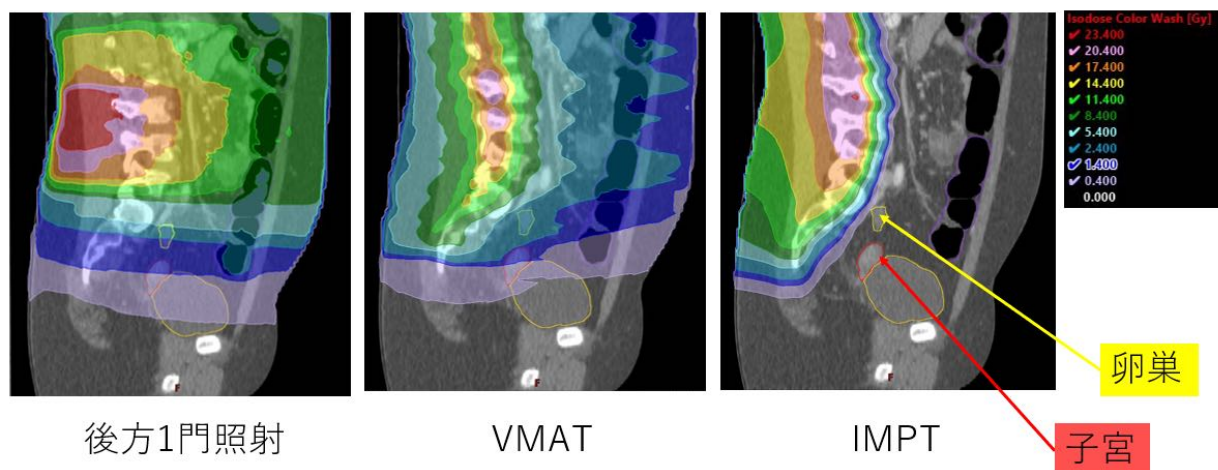


図 10 9 歳の症例での線量分布結果

考 察

本研究では、小児・AYA 世代の患者の CSI における妊孕性温存を目的として、子宮・卵巢線量の低減を目指し、X 線による後方1門照射法と VMAT、陽子線による IMPT の線量分布の比較を行った。

Wallace らの研究¹⁵⁾ では、小児がんの患者の追跡調査を行い、卵巢機能不全を引き起こす可能性のある卵母細胞の50% 致死線量は2 Gy であると推定されている。また副島らの研究⁷⁾ によると、卵巢に照射される線量を1.5 Gy 以下にすることで、大部分の女性に卵巢機能障害の有害事象は発生しなかった。小児・AYA 世代の患者の CSI では、PTV の処方線量は一般的に23.4 Gy である¹⁷⁾。後方1門照射法では、子宮と卵巢へ照射される線量が、妊孕性低下を招く線量限度以上の照射線量となった。これは、後方1門照射法では背側から単一強度の X 線を1方向のみから照射するため、X 線は体内で指数関数的に減衰することから、PTV への線量均一性は低下し、腹側へも高い線量域が広がる線量分布となった。そのため、後方1門照射法では子宮と卵巢が過大線量になったと考えられる。VMAT では、後方1門照射法と比較し、子宮と卵巢の Dmax と Dmean は低下したが、妊孕性低下の線量限度である1.5 Gy 以上が照射される症例が10例中8例と多かった。VMAT では強度変調を加えた X 線を360° 方向から2回転の照射を行っているため、PTV により均一に処方線量が照射され、子宮と卵巢に高線量が照射されることを避けることができている。しかしながら、VMAT は360° 方向からの回転照射により低線量域が広範に分布することから、子宮・卵巢に一定の線量が照射され、妊孕性低下の線量限度を超過する症例が多かったと考えられる。IMPT では、後方1門照射法や

VMAT と比較し、子宮と卵巢の Dmax と Dmean を更に低減させることができ、妊孕性低下の線量限度である1.5 Gy 以上が照射される症例が10例中3例と少なかった。これは、陽子線はブラックピークを有するため、標的領域への線量収束性が非常に優れていると同時に、周囲の正常臓器への低線量域の広がりを極めて抑えることができたと考えられる。さらに、VMAT と異なり、CSI の照射で用いる IMPT は回転照射でなく背側からの1門照射であるため、腹側に広がる線量域を著しく低減することができたと考えられる。

図9、10の結果から、膀胱容量が小さいことで、子宮と卵巢へ照射される線量が低下する可能性が考えられる。すなわち、膀胱容量が小さくなることによって、子宮と卵巢の位置が足側へ押し下げられ、CSI の照射範囲から子宮と卵巢が離れることから、照射される線量をさらに低減できる可能性がある。今後は CSI の子宮・卵巢線量において膀胱容積が与える影響に関して、さらなる詳細な解析が必要であると考えられる。

結 論

IMPT は後方1門照射法と比較して、子宮および卵巢の最大線量が82% および90% 減少し、平均線量が93% および87% 減少した。IMPT は VMAT と比較して、卵巢の最大線量が61% 減少し、子宮および卵巢の平均線量が74% および84% 減少した。よって、IMPT は小児・AYA 世代の CSI において、妊孕性温存の実現することのできる有効な照射法であるといえる。

謝 辞

本論文を執筆するにあたり協力してくださった国立がん研究センター東病院放射線品質管理室の方々を始め、すべての皆様に感謝いたします。

倫理的配慮

本研究は、公開データベースの画像データを使用した研究であるため、倫理審査およびインフォームドコンセントを必要とするものではない。

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) 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.
- 2) 福村直樹：小児・AYA 世代の腫瘍に対する陽子線治療診療ガイドライン。2019年版。東京。金原出版。2019: 23～43.
- 3) 厚生労働省：小児・AYA 世代のがん患者等の妊孕性温存療法研究促進事業実施要綱 2023。
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/kenkou/gan/gan_byoin_00010.html, 2024年1月27日.
- 4) Ziemann C, Cremers F, Motisi L, Albers D, MacPherson M, Rades D: Novel hybrid treatment planning approach for irradiation a pediatric craniospinal axis. *Med Dosim*. 2024; 49: 93-101.
- 5) 相部則博, 鈴木弦, 山崎秀哉：小児がんに対する陽子線治療一当院における初期経験を踏まえて一。京都府立医科大学誌。2019: 128: 12.
- 6) 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.
- 7) 副島俊典：AYA 世代の腫瘍に対する放射線治療の合併症。日本小児血液-がん学会雑誌。2017: 54: 114～119.
- 8) Clark K, Vendt B, Smith K, et al: The Cancer Imaging Archive (TCIA): main taining and operating a public information repository. *J Digit Imaging*. 2013; 26: 1045-1057.
- 9) Howell RM, Giebler A, Koontz-Raisig W, Mahajan A, Etzel CJ, D'Amelio AM Jr, et al: Comparison of therapeutic dosimetric data from passively scattered proton and photon craniospinal irradiations for medulloblastoma. *Radiat Oncol*. 2012; 7: 116.
- 10) Zhou Y, Ai Y, Han C, Zheng X, Yi J, Xie C, et al: Impact of setup errors on multi-isocenter volumetric modulated arc therapy for craniospinal irradiation. *J Appl Clin Med Phys*. 2020; 21: 115-123.
- 11) 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。2020: 77～83.
- 12) Lester-Coll NH, Morse CB, Zhai HA, Both S, Ginsberg JP, Gracia CR, et al: Preserving Fertility in Adolescent Girls and Young Women Requiring Craniospinal Irradiation: A Case Report and Discussion of Options to Be Considered Prior to Treatment. *J Adolesc Young Adult Oncol*. 2014; 3: 96-99.
- 13) Sun Y, Liu G, Chen W, Chen T, Liu P, Zeng Q, et al: Dosimetric comparisons of craniospinal axis irradiation using helical tomotherapy, volume-modulated arc therapy and intensity-modulated radiotherapy for medulloblastoma. *Transl Cancer Res*. 2019; 8: 191-202.
- 14) Wang Z, Jiang W, Feng Y, Guo Y, Cong Z, Song B, et al: A simple approach of three-isocenter IMRT planning for craniospinal irradiation. *Radiat Oncol*. 2013; 8: 217.
- 15) McVicar N: Improved Volumetric Modulated Arc Therapy Field Junctions Using In Silico Base Plans: Application to Craniospinal Irradiation. *J Med Imaging Radiat Sci*. 2018; 49: 301-308.
- 16) Wallace WH, Thomson AB, Kelsey TW: The radiosensitivity of the human oocyte. *Hum Reprod*. 2003; 18: 117-121.
- 17) Nguyen M, Dang T, Deegan L, Henry K, Jones S, Pullar A, et al: Modified volumetric modulated arc therapy technique with reduced planning and treatment time for craniospinal irradiation utilising two isocentres. *J Med Radiat Sci*. 2022; 69: 357-366.

Abstract

Verification of treatment planning for preserving fertility in pediatric and AYA patients treated with craniospinal irradiation using VMAT and IMPT

Eiichi Maehara, Keisuke Usui, Hiromi Baba, Hidenobu Tachibana, Hajime Sakamoto,
Yasuaki Sakano, Shinsuke Kyogoku, Hiroyuki Daida

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

Craniospinal irradiation (CSI) is valuable as a prophylactic irradiation for preventing leptomeningeal dissemination. However, preserving fertility requires limiting the irradiation dose to the uterus and ovaries to approximately 1.5 Gy, posing a challenge in CSI due to the risk of infertility. This study aimed to evaluate the uterine and ovarian doses of pediatric and adolescent and young adult (AYA) patients undergoing CSI. We explored treatment planning methods for fertility preservation by the posterior one field irradiation, volumetric modulation arc therapy (VMAT), and intensity-modulated proton therapy (IMPT). Using CT images obtained from a public database for 10 pediatric and AYA patients, we generated treatment plans employing 1 field irradiation, VMAT and IMPT. For each treatment plan, we calculated and compared the dose index of D99, D95 and Dmax in planning target volume (PTV), and the Dmax and Dmean in the uterus and ovaries. The IMPT demonstrated an approximately 14% increase in Dmax for the uterus and decrease of about 77% in Dmean compared to VMAT. Additionally, both Dmax and Dmean for the ovaries decreased by approximately 65% and 97%, respectively. Moreover, there were no significant differences in dose metrics for the PTV. Therefore, IMPT can create a dose distribution aimed at preserving fertility in CSI for the adolescent and AYA patients undergoing CSI.

Key Words: craniospinal irradiation (CSI), fertility preservation, VMAT, IMPT

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 12-18, 2024]

深層学習による PET/CT 画像の低酸素領域抽出のためのデータオーギュメンテーション効果

赤沼優文、臼井桂介、前原栄一、坂本 肇、坂野康昌、京極伸介、代田浩之

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

^{18}F -fluoromisonidazole (FMISO) を用いた腫瘍の低酸素領域の可視化は、放射線治療時の有用な情報になり得る。深層学習を用いて CT から PET/CT を生成すれば、被ばく低減などにつながる。過学習を防ぐため、データオーギュメントにより精度の向上が期待されるが、FMISO の生成において有効な手法は明らかでない。そこで、コントラスト調整による効果を検証した。公開画像データベースより取得した頭部 CT 画像11例（478枚）に対し、ダイナミックレンジ圧縮処理、鮮鋭化フィルタ、局所ラプラシアンフィルタ処理の3つの処理で調整した画像を各4780枚作成した。作成した画像を合わせた5258枚において、PET/CT の原画像を制約条件として、深層学習を行った。画質評価には、構造的類似度（SSIM）とピーク信号雑音比（PSNR）を求め、交差検証を行った。また、一元配置分散分析にて有意差検定を行った。各処理の合成画像の平均 SSIM は0.978、0.972、0.976、PSNR は35.9、34.2、35.5[dB] となった。交差検証の結果、p 値が0.9243 および0.1904 となり有意差はなく、使用した3つのコントラスト調整によるデータオーギュメントは、FMISO を用いた PET/CT 画像の合成画像の精度に影響を与えないことが示された。

キーワード：PET/CT、Data augmentation、コントラスト調整、 ^{18}F -fluoromisonidazole

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，19-25頁，2024年（受付 2024.1.29.；受理 2024.6.17.）

緒言（背景と目的）

^{18}F fluoromisonidazole (FMISO) を用いた腫瘍内の低酸素領域の抽出は、強度変調放射線治療（intensity-modulated radiation therapy: IMRT）や適応放射線治療（adaptive radiation therapy）を行う際に、放射線感受性の低い低酸素領域に高線量を照射する治療計画を作成でき、効率的な治療を実現できる可能性がある¹⁾。そのため深層学習を用いて、computed tomography (CT) 画像のみから腫瘍内の低酸素領域を抽出した positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) 画像を生成するモデルを開発できれば、PET/CT 画像を取得することなく CT 画像のみで治療計画を作成するため、検査時間の短縮や被ばくの低減に貢献することができる。しかし、深層学習を行うには十分な数の学習データが必要であり、少ない学習データでは過学習が発生する恐れがある²⁾。この問題に対処するために、データオーギュメント法が有用である²⁾。データオーギュメントは、画像に対して拡大や縮小、回転、ノイズ付与などの処理を行うことで、学習データを増やし、学習モデルの性能を向上させる手法である。Evgin Gocer らは、データオーギュメントがデータセッ

トの偏り、過学習の予防、学習精度の向上において、最も一般的な解決方法であると述べている。FMISO を使用した症例の学習データ数には限りがあるため、データオーギュメントの利用が期待されるが、どのようなオーギュメント法が FMISO PET/CT 画像の生成にとって有効であるかは明らかでない。先行研究では、画像回転によるデータオーギュメントの検証が実施されたが、回転の影響により集積領域が本来のものよりも狭く抽出され、精度よく生成することができなかった³⁾。そこでコントラスト調整した画像を使用し、腫瘍部分の特徴を際立たせることで、FMISO の集積と腫瘍との関係がより明確になり、データオーギュメントが可能になるのではないかと考えた。

本研究では、腫瘍領域を強調したコントラスト調整によるデータオーギュメントの効果について着目した⁴⁾。3つのコントラスト調整方法で腫瘍部分を強調した CT 画像を作成し、条件付き敵対生成ネットワーク（conditional generative adversarial network: CGAN）のひとつである Pix2Pix を使用して⁵⁾、選択した3つのコントラスト調整によるデータオーギュメントのうち、FMISO の PET/CT 画像の生成において効果的な方法を明らかにする。

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

方 法

1. 使用機器

公開画像データベースである TCIA (The Cancer Imaging Archive) から、FMISO が使われている11例の頭部 PET/CT 画像と CT 画像（各478枚）を取得し、画像処理に用いた^{6,7)}。年齢は、30歳から78歳までの範囲で、平均年齢は56.64歳、性別は男性が6人、女性が5人であった⁷⁾。

学習データの画像処理、深層学習の実装および画質評価には MATLAB R2022a を使用し、統計解析には Microsoft Excel を用いた。使用したハードウェアは OMEN by HP Laptop 16-b0、メモリは16GB、graphics processing unit (GPU) は NVIDIA GeForce RTX 3070 Laptop GPU、OS は Windows 11 home を使用した。

2. コントラスト調整を行った CT 画像の生成

画像内の腫瘍領域を強調するためのコントラスト調整法として、ダイナミックレンジ圧縮処理、鮮鋭化フィルタ、局所ラプラシアンフィルタ処理の3つの手法を使用し、それぞれの手法でコントラスト強調の強さを調整するパラメータを10段階に変更し、コントラスト強調処理法毎に4780枚の画像を作成した。以下にそれぞれのコントラスト調整方法の詳細を示す。

1) ダイナミックレンジ圧縮処理

本研究で実施したダイナミックレンジ圧縮処理では、処理する画素値の上限値と下限値の範囲を設定し、その範囲の画素値を線形直線で新たに決めなおすという処理を行った。上限値と下限値は手動で設定し、腫瘍部分が強調される範囲を使用した。図1に原画像と調整後のヒストグラムを示す。

2) 鮮鋭化フィルタ

鮮鋭化フィルタは、 $g(x,y)$ を出力画像、 $f(x,y)$ を原

画像、 k を高周波数成分の強調係数、 $f_u(x,y)$ を原画像が平滑化された画像とすると、式 (1) より構成した⁸⁾。

$$g(x,y) = f(x,y) + k \times (f(x,y) - f_u(x,y)) \quad (1)$$

鮮鋭化フィルタ処理では、式 (1) の k の値を変化させ、各症例において腫瘍領域が強く強調されるように k 値を調節した。

3) 局所ラプラシアンフィルタ処理

局所ラプラシアンフィルタは、ラプラシアンピラミッドを利用した処理方法である^{9,10)}。局所ラプラシアンフィルタの処理方法を以下に示す。

① ガウシアンピラミッドを使ってガウシアン係数 g_0 を算出する。

② すべての位置 (x, y) について、式 (2) に示すリマッピング関数 $r(i)$ を使って処理する。この処理は RGB 画像に対して行われる。ここで α は細部を制御し、 β はダイナミックレンジを制御し、 σ_r は細部とエッジを分離する強度の閾値を設定するパラメータである。

$$r(i) = \begin{cases} g_0 + \text{unit}(i - g_0)\sigma_r \left(\frac{\|i - g_0\|}{\sigma_r} \right)^\alpha & i \leq \sigma_r \\ g_0 + \text{unit}(i - g_0)[\beta(\|i - g_0\| - \sigma_r)] & i > \sigma_r \end{cases} \quad (2)$$

③ リマッピング関数で処理した画像に対し、ラプラシアンピラミッドを構築して画像強調を行う。

④ 出力したピラミッドを折りたたみ、出力画像とする。 α, β, σ_r を任意で設定しコントラスト調整を行った。

原画像と各コントラスト調整処理後の CT 画像の一例を図2に示す。

また、図3に各コントラスト強調による画素値のヒ

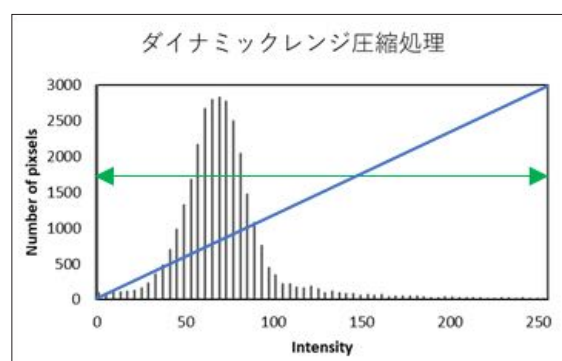
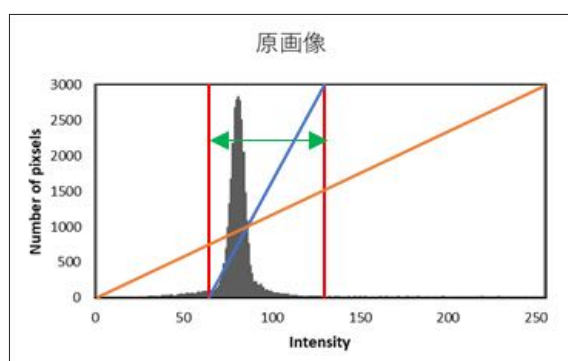


図1 原画像のヒストグラム（左）と調整後のヒストグラム（右）

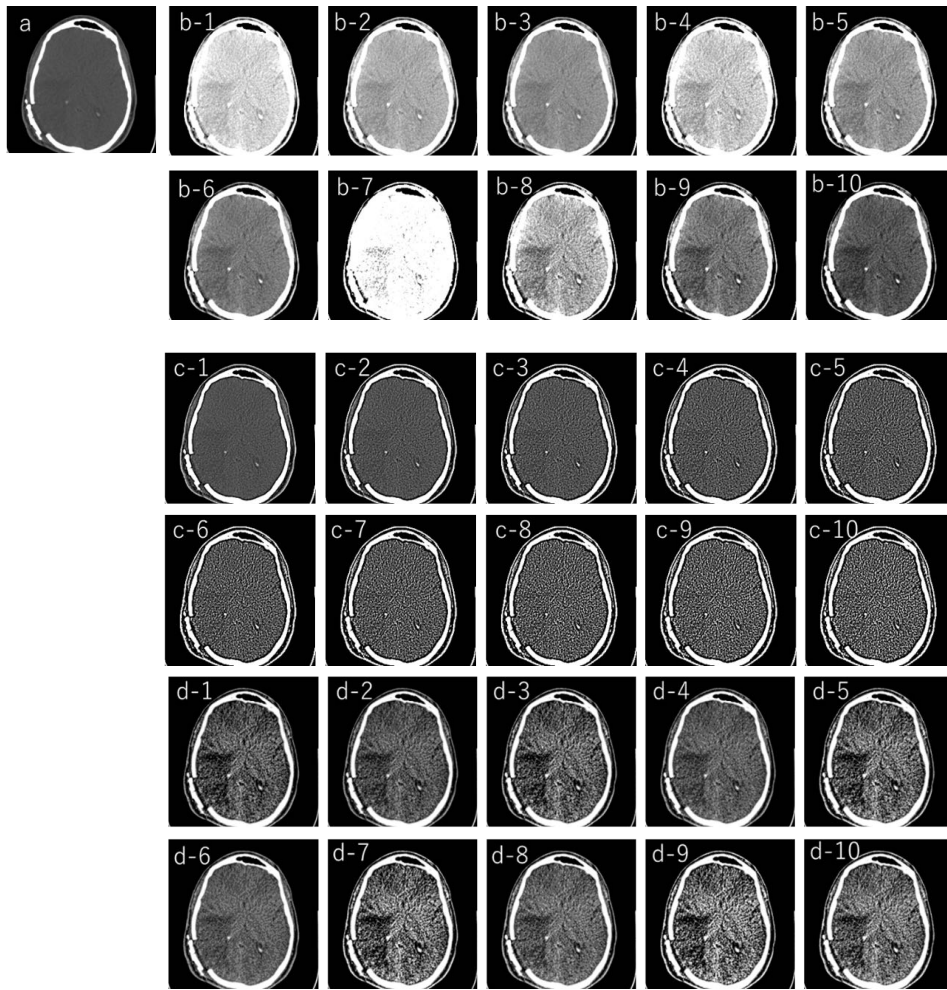


図2 原画像と各コントラスト調整後の画像の一例

コントラスト強調処理は強度を変更するパラメータを10段階に変更し、それぞれ作成している。使用したパラメータの詳細を以下に示す。

a : 原画像

b : ダイナミックレンジ圧縮処理 (下限_上限, 1 : 0.15_0.35, 2 : 0.15_0.40, 3 : 0.15_0.45, 4 : 0.20_0.35, 5 : 0.20_0.40, 6 : 0.20_0.45, 7 : 0.25_0.30, 8 : 0.25_0.35, 9 : 0.25_0.40, 10 : 0.25_0.45)

c : 鮮鋭化フィルタ (k, 1 : 5, 2 : 10, 3 : 15, 4 : 20, 5 : 25, 6 : 30, 7 : 35, 8 : 40, 9 : 45, 10 : 50)

d : 局所ラプラシアンフィルタ処理 (σ , α , 1 : 0.5_0.1, 2 : 0.5_0.2, 3 : 0.6_0.1, 4 : 0.6_0.3, 5 : 0.7_0.1, 6 : 0.7_0.4, 7 : 0.8_0.1, 8 : 0.8_0.3, 9 : 0.9_0.1, 10 : 0.9_0.2)

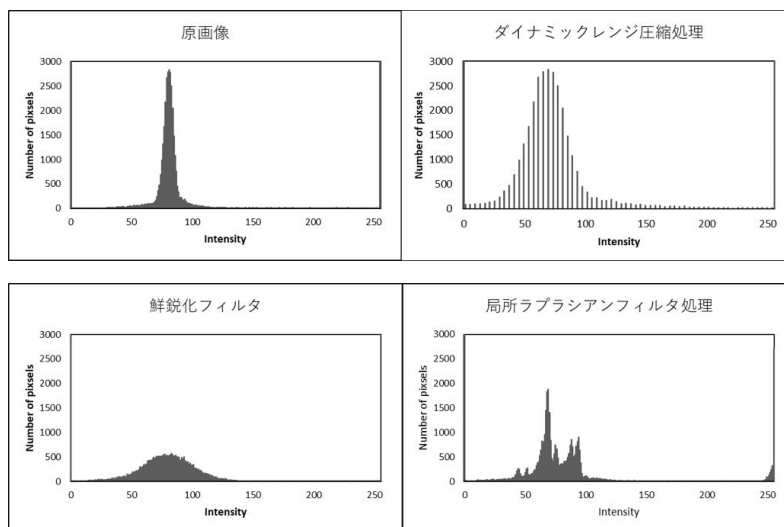


図3 各コントラスト強調における画素値のヒストグラム

各ヒストグラムは最大カウント数を3000で固定している。

ストグラムを示す。

3. Pix2Pix による FMISO の PET/CT 画像の生成

図4および5に Pix2Pix による FMISO の PET/CT 画像の生成方法を示す。Pix2Pix はジェネレーターとディスクリミネーターに条件を与え、生成画像の精度を高めていく方法である。ジェネレーターは U-net 構造であり、ディスクリミネーターは4層の CNN (convolutional neural network) 構造になっており、Patch GAN を採用した。コントラスト調整毎に、5258枚の CT 画像（原画像と調整した画像）と、それに対応する原画像の PET/CT 画像を条件として、学習モデルを作成した。

4. 画質評価の方法

画質評価には、原画像との構造的類似度 (structural similarity: SSIM) とピーク信号雑音比 (peak signal-to-noise ratio: PSNR) を用い、原画像の PET/CT 画像を基準に、評価用の全画像に対してスライス毎に値を算出し、その平均値を求めた。その後、交差検証を行い、優位水準を0.05として一元配置分散分析 (Microsoft Excel) を用いた結果の比較をした¹¹⁾。 μ_x 、 μ_y を画像の平均信号値、 σ_x 、 σ_y を画像の標準偏差、 σ_{xy} を共分散とすると、SSIM は式 (3) で表すことができる。

$$\text{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (3)$$

C_1 、 C_2 は補正係数で、MAX を画像内の最大信号値とすると式 (4)、(5) で表すことができる¹²⁾。

$$C_1 = K_1 \times \text{MAX}^2 \quad (4)$$

$$C_2 = K_2 \times \text{MAX}^2 \quad (5)$$

K_1 、 K_2 はそれぞれ0.01、0.03とした。SSIM は $0 \leq \text{SSIM} \leq 1$ の範囲の値を取り、1に近いほど画像が原画像と類似していることを示す。次に PSNR は、MAX を画像内の最大信号値、MSE (mean square error) を平均二乗誤差とすると、式 (6) で表すことができる。

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}} \quad (6)$$

単位は [dB] で、PSNR は値が大きいほど画像が類似していることを示す。

交差検証では、コントラスト調整法によるデータオーギュメント効果を検証するため、モデル作成時に使用した全データ5258枚 (CT 画像4780枚と PET/CT 画像478枚の合算) を患者一例毎に学習データと検証データのセットに分割化し、計11回の交差検証を行った。

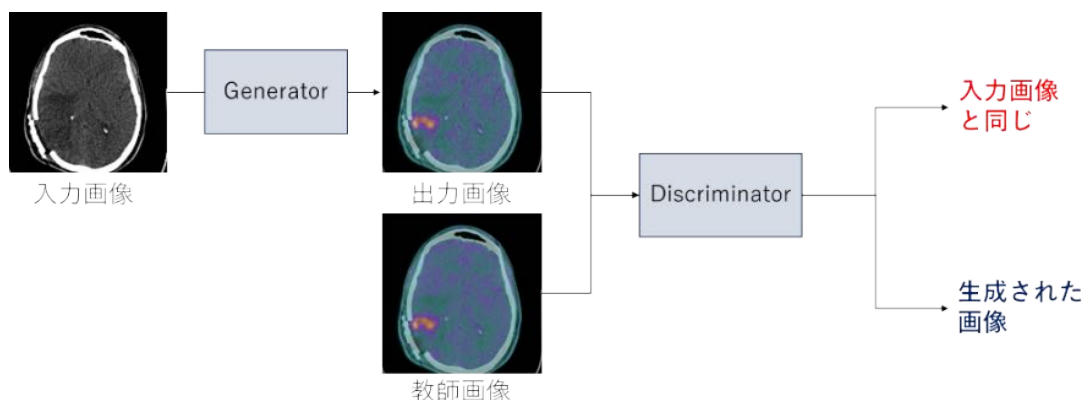


図4 Pix2Pix のフレームワーク

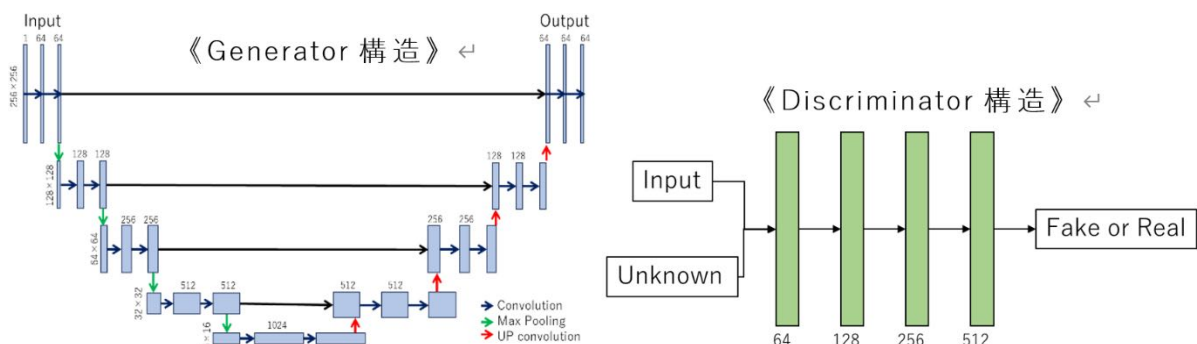


図5 Pix2Pix のアーキテクチャ

結 果

1. 視覚的評価

Pix2Pix によって生成した PET/CT 画像の一例を図6に示す。原画像と比較し、ダイナミックレンジ圧縮処理では PET/CT 画像の輝度が高くなった。また、鮮鋭化フィルタや局所ラプラシアンフィルタ処理では高周波成分が強調された画像が生成された。しかし、3つの処理による生成画像と原画像との間に、腫瘍領域の生成における大きな差は見られなかった。

2. SSIM および PSNR の結果

表1に各データオーギュメンテーションを併用して

生成した PET/CT 画像の SSIM および PSNR の結果を示す。いずれのデータオーギュメンテーションにおいても SSIM と PSNR の結果に大きな差は生じず、ほぼ同じ値を示した。以下の結果を一元配置分散分析で解析したところ、SSIM の p 値は0.9243であり、PSNR は0.1904となった。よって、3つのコントラスト強調法の間で学習精度に有意差は生じなかった。

考 察

本研究では、深層学習を用いて CT 画像から FMISO を用いた PET/CT 画像を生成する際、学習データへの各コントラスト調整法がデータオーギュメントに与える有効性を検証した。3つのコントラスト調整間の

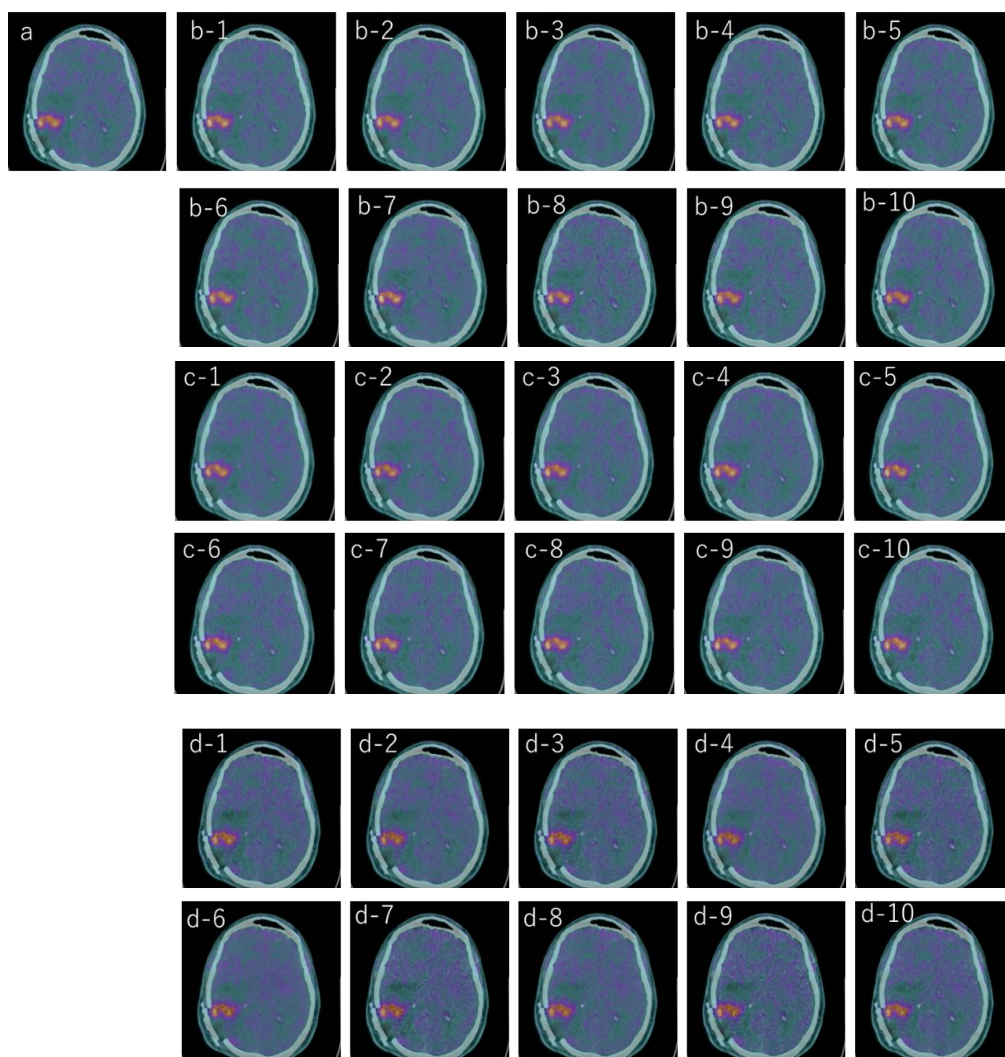


図6 原画像とデータオーギュメンテーションを併用し生成した PET/CT 画像
コントラスト強調処理の強度を 10 段階に変更した CT 画像を使用し、それぞれ作成している。使用したパラメータの詳細を以下に示す。

a: 原画像

b: ダイナミックレンジ圧縮処理(下限_上限,1:0.15_0.35,2:0.15_0.40,3:0.15_0.45,4:0.20_0.35,5:0.20_0.40,6:0.20_0.45,7:0.25_0.30,8:0.25_0.35,9:0.25_0.40,10:0.25_0.45)

c: 鮮鋭化フィルタ (k,1:5,2:10,3:15,4:20,5:25,6:30,7:35,8:40,9:45,10:50)

d: 局所ラプラシアンフィルタ処理 (σ , α ,1:0.5_0.1,2:0.5_0.2,3:0.6_0.1,4:0.6_0.3,5:0.7_0.1,6:0.7_0.4,7:0.8_0.1,8:0.8_0.3,9:0.9_0.1,10:0.9_0.2)

表 1 生成した PET/CT 画像の SSIM および PSNR

	ダイナミック レンジ圧縮	鮮鋭化フィルタ	局所ラプラシアン フィルタ	p 値
SSIM	0.978 ± 0.0171	0.972 ± 0.0209	0.976 ± 0.0194	0.9243*
PSNR [dB]	35.9 ± 1.26	34.2 ± 2.10	35.5 ± 1.73	0.1904*

* $p > 0.05$ を示し、3 つのコントラスト調整間によるデータオーギュメンテーション法に有意差がないことを示す。

SSIM および PSNR の平均値の有意差を検定するため、11回の交差検証による結果を一元配置分散分析によって評価したところ、コントラスト調整法による効果に有意差は生じなかった。これらの要因として、二つの理由が考えられる。

一つ目は、各コントラスト調整法で得られる CT 画像の特徴量が増えなかったためと考えられる。原画像と比較し、コントラスト調整後の画像は腫瘍部分が明確になったが、各コントラスト調整法での腫瘍領域への強調において、大きな差が生じるものを作成できなかった。本研究で使用了コントラスト調整法は、画像のエッジ成分が強調されるものが多く、いずれも腫瘍の輪郭を強調している。よって、コントラスト調整後の情報量に大きな差が生じなかった可能性が考えられる。この腫瘍領域への画像コントラスト強調は、主観的に調整を行っているため、偏りのある特徴が反映され、各コントラスト強調法での結果に有意差が生じなかったと考えられる。一方で、図6の結果からは、各コントラスト調整法の学習データの特徴量を反映した画像が生成される傾向があった。そのため、腫瘍の輪郭のみならず、腫瘍内部等のコントラストを強調することができれば、細かな特徴を生成画像に反映できる可能性がある。

二つ目は、学習データにおいて、FMISO 集積の位置の差が腫瘍の特徴量の不一致を生む要因になった可能性である。FMISO の集積には、腫瘍内部の低酸素領域を反映したものや、腫瘍輪郭に沿って高集積が生じたものがあり、学習データには FMISO の集積領域に差が生じていた。このような学習データにおける FMISO の集積領域の差は、コントラスト調整を行ったとしても、学習データの精度の向上には寄与しないと考えられる。よって、各コントラスト調整法における生成精度には差が生じなかったと考えられる。

本研究では、データオーギュメント法としてコントラスト調整のみを実施しており、画像の平行移動、左右反転などの手法は検討できていない。そのため、本研究で用いた画像コントラストの調整以外のデータオーギュメントを実施することや、FMISO の高集積部分の違いで学習データを分類し、段階的に学習させ

ることで、生成画像の精度を向上できる可能性がある。本研究成果を治療時に取得するコーンビーム CT へと応用し、治療時に腫瘍の低酸素領域を可視化することができれば、新しい画像誘導放射線治療法の実現につながると考えられる。

結 論

Pix2Pix を用いた FMISO PET/CT 画像の生成において、腫瘍領域を強調したコントラスト調整によるデータオーギュメント法は、生成画像の SSIM と PSNR の改善効果に影響しないことがわかった。

謝 辞

本論文を執筆するにあたり、協力してくださった皆様に感謝いたします。

倫理的配慮

公開画像データベースで取得した試料を用いて実施した。

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) 島野 靖正：18F- fluoromisonidazole (FMISO) PET/CT による低酸素イメージングの定量法の検討. 埼玉医科大学雑誌. 2013; 40: T21～T28.
- 2) Goceri E: Medical image data augmentation: techniques, comparisons and interpretations. Artif Intell Rev. 2023; 56: 12561-12605.
- 3) 本郷 雷良：データオーギュメントによる FMISO PET/CT 画像の生成精度向上の試み. 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科卒業論文. 2023.
- 4) Shorten C, Khoshgoftaar TM: A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. J Big Data. 2019; 6: 60.
- 5) Isola P, Zhu JY, Zhou T, Efros AA: Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and

- Pattern Recognition (CVPR). Honolulu. HI. USA. 2017: 5967-5976.
- 6) Clark K, Vendt B, Smith K, et al.: The Cancer Imaging Archive (TCIA). maintaining and operating a public information repository. J Digit Imaging. 2013: 26: 1045-1057.
 - 7) Kinahan P, Muzi M, Bialecki B, Coombs L: Data from ACRIN-FMISO-Brain (Version 2) [Dataset]. The Cancer Imaging Archive. 2018.
 - 8) 石田隆行：よくわかる医用画像情報学. 第1版. 東京. オーム社. 2020: 120~126.
 - 9) Paris S, Hasinoff SW, Kautz J: Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid, ACM Trans Graph. 2011: 68.
 - 10) Aubry M, Paris S, Hasinoff SW, Kautz J, Durand F: Fast local laplacian filters: Theory and applications. ACM Trans Graph. 2014: 167.
 - 11) Bewick V, Cheek L, Ball J. Statistics review 9: one-way analysis of variance. Crit Care. 2004; 8: 130-136.
 - 12) Wang Z, Bovik AC, Sheikh HR, Simoncelli EP: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Trans Image Process. 2004: 13: 600-612.

Abstract

Effect of data augmentation of deep learning for extracting the hypoxic regions in PET/CT images

Masafumi Akanuma, Keisuke Usui, Eiichi Maehara, Hajime Sakamoto,
Yasuaki Sakano, Shinsuke Kyogoku, Hiroyuki Daida

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

¹⁸F-fluoromisonidazole (FMISO) Visualization of hypoxic areas of tumors can be useful information during radiation therapy. Using deep learning to generate PET/CT from CT will lead to a reduction in radiation exposure. In order to prevent overfitting, data augmentation is expected to improve accuracy, but it is not clear which method is effective in generating FMISO. Therefore, we verified the effect of contrast adjustment.

For 11 head CT images (478 images) acquired from a public image database, 4,780 images were created by three processes: dynamic range compression, sharpening filter, and local Laplacian filtering. A total of 5,258 images were subjected to deep learning using the original PET/CT images as constraints. For image quality evaluation, structural similarity (SSIM) and peak signal-to-noise ratio (PSNR) were determined, and cross-validation was performed. In addition, a significance test was performed by one-way analysis of variance.

The average SSIM of the composite images for each treatment was 0.978, 0.972, and 0.976, and the PSNR was 35.9, 34.2, and 35.5 [dB]. As a result of cross-validation, the p-values were 0.9243 and 0.1904, which were not significant, indicating that the data augmentation by the three contrast adjustments used did not make a difference in the accuracy of the composite image of the PET/CT image using FMISO.

Key Words: PET/CT, data augmentation, contrast adjustment, ¹⁸F-fluoromisonidazole

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 19-25, 2024]

Use of the phase angle in clinical practice

Urara Chiba¹⁾, 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

Bioelectrical impedance analysis (BIA) is a noninvasive, safe, and reproducible technique that measures body composition via impedance. BIA is considered an alternative to expensive imaging methods for body composition assessment. However, the accuracy of BIA can be affected by body mass index extremes or abnormal hydration levels. The phase angle (PhA), a raw parameter derived from BIA, has gained attention as an alternative to the conventional error-prone calculation of body composition in diseases, and it indicates cell membrane health. PhA is calculated as the ratio of reactance to resistance. PhA is considered useful because of its ease of measurement and relative accuracy, but it remains under debate as a treatment effectiveness indicator. Although PhA serves as a potential marker in assessing various health aspects and diseases, further research is needed regarding its application in certain areas.

Key Words: phase angle, bioelectrical impedance analysis

Juntendo Health Science Journal 5(1): 26-32, 2024 (Received Feb. 6, 2024 ; Accepted Apr. 12, 2024)

Introduction

Bioelectrical impedance analysis (BIA) is a method that measures body composition by passing a weak electric current via the body and measuring a resistance value called impedance¹⁾.

BIA is a noninvasive, safe, rapid, simple, and reproducible technique that is often incorporated in daily clinical practice to assess skeletal muscle mass as a measure of sarcopenia²⁾. The sarcopenia reference values of BIA in Asia are <7.0 kg/m² for men and <5.7 kg/m² for women³⁾.

BIA has long been considered an attractive alternative to cumbersome and expensive imaging methods, such as dual X-ray absorptiometry (DXA) and computed tomography (CT), for body composition assessment⁴⁾.

However, BIA is not a direct method for assessing body composition. Conventional BIA parameters, including total body water and muscle mass, are calculated using regression equations for each population studied and should be interpreted cautiously

in some clinical situations. The reason is that the BIA algorithm is inaccurate in participants with extremely low or high body mass index (BMI) values or abnormal hydration levels⁵⁾.

Therefore, the phase angle (PhA), a raw parameter derived from BIA, has gained attention as an alternative to conventional error-prone calculation of body composition in various diseases⁶⁾.

PhA is an indicator of cell membrane health and integrity, and it is used as a prognostic predictor of various diseases and an indicator of disease severity⁷⁾.

This paper outlines the basic principles of PhA and its relationship with different diseases.

PhA measurement principle

BIA measures whole-body impedance (Z), which is the opposition of the body to an alternating current comprising the following two components: resistance (R) and reactance (Xc). Impedance is measured as follows: $Z^2 = R^2 + Xc^2$.

Healthy cell membranes behave as good capacitors, which store the current and consequently cause a

Corresponding author: Tomoyuki Morisawa

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

3-2-12 Hongo Bunkyo-ku Tokyo Japan, 113-033

E-mail: t.morisawa.ul@juntendo.ac.jp

delay in its flow. The phase difference between the voltage and current, which is attributable to the lag of the current penetrating the cell membranes and tissue interfaces, is expressed as PhA. PhA is calculated using the arc tangent value of the directly measured ratio of X_c to R ⁸⁾ (Fig. 1).

PhA ranges from 0° to 90°.

As reactance increases, PhA increases, and as reactance decreases, PhA decreases.

Characteristics

1. Reference value for PhA

The overall mean PhA was $6.93^\circ \pm 1.15^\circ$, with a mean PhA of $7.48^\circ \pm 1.10^\circ$ in men and $6.53^\circ \pm 1.01^\circ$ in women.

Of the subjects, 46% were white, 22% were African American, 14% were Asian, and 18% were Hispanic or of another race.

A comparison of PhA by race revealed a significant difference in the crude analysis ($P < 0.001$), including values of $6.82^\circ \pm 1.13^\circ$ for white individuals, $7.00^\circ \pm 1.01^\circ$ for multiracial subjects, $7.21^\circ \pm 1.19^\circ$ for African Americans, $7.33^\circ \pm 1.13^\circ$ for Hispanics.

PhA for Asians is $6.55^\circ \pm 1.10^\circ$; it is significantly higher in men than in women and decreases with increasing age¹⁰⁾.

In Japan, lower PhA independently predicts incident disability, separately from known risk factors. PhA can be used as a valuable and simple prognostic

tool to identify older subjects at risk of disability as targets of preventive treatment. The cutoff is $\leq 4.95^\circ$ in men and $\leq 4.35^\circ$ in women⁸⁾.

2. PhA as an indicator

1) Nutrition

The association between an impaired nutritional status and a low PhA is well established.

The Mini Nutritional Assessment, Nutritional Risk Score (NRS-2002), Geriatric Nutritional Risk Index, and Subjective Global Assessment have been used to assess nutritional status, and studies have demonstrated their associations with PhA⁴⁾.

PhA, a superior prognostic marker, should be considered a screening tool for identifying patients at risk for impaired nutritional and functional statuses⁶⁾.

2) Physical function

PhA is also used as a parameter of physical function.

In a previous study, PhA was associated with the results of the timed up and go test, 6-min walk test, and 30-s chair stand test as well as handgrip strength and gait speed¹¹⁾.

Higher PhA indicates better physical function¹²⁾.

3) Physical activity

One study found that PhA can be influenced by the level of physical activity as it is higher in active subjects than in sedentary people¹³⁾.

A study of the association of 24-h movement behaviors with PhA in community-dwelling older adults identified relationships with more time spent performing moderate to vigorous-intensity physical activity (MVPA). In addition, reallocating 30 min of other behaviors (sedentary behavior, light-intensity physical activity, and sleep) per day to MVPA was predicted to increase PhA by 0.12°.

This observation suggests that increasing or maintaining the daily time spent performing MVPA might be important for PhA in older adults¹⁴⁾.

4) Mortality

PhA is correlated with mortality¹⁵⁾.

In a study assessing the association between PhA and mortality in geriatric patients, PhA (50 kHz)

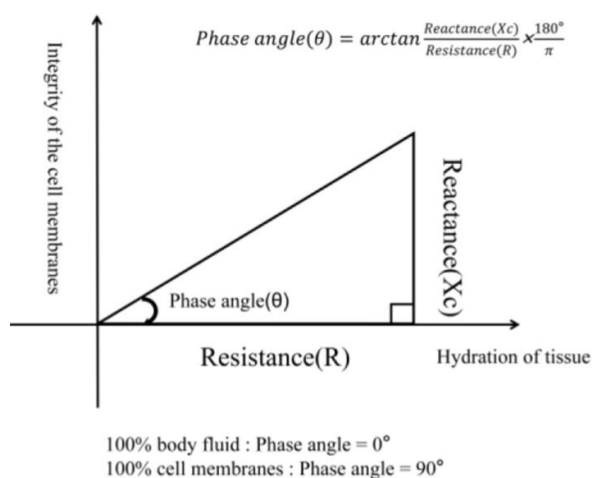


Fig.1 The definition of PhA⁹⁾

Vertical axis: Reactance(X_c)

Horizontal axis: Resistance(R)

Impedance is the sum of the squares of reactance and resistance.

significantly differed between survivors ($4.2^\circ \pm 1.1^\circ$) and nonsurvivors ($3.6^\circ \pm 1.2^\circ$) during hospital stay. Subjects with PhA $<3.5^\circ$ exhibited a significant 4-fold higher risk of hospital mortality (20%) than all other subjects¹⁶⁾.

The aforementioned findings have drawn attention to PhA as a comprehensive indicator of physical health, including nutrition, physical function, activity level, mortality, and fall risk.

In addition, PhA is related to various diseases and their prognosis. In the following sections, It will discuss the relationships between each disease and various indicators.

Relationships between PhA and various diseases

1. Geriatric syndromes

Relationships have been reported between PhA and Geriatric syndromes such as sarcopenia and frailty.

PhA is reportedly useful as an indicator of sarcopenia with cutoffs of 4.05° – 5.00° ¹⁷⁾. It is also related to dynapenia¹⁸⁾. The cutoffs are 4.05° for men and 3.55° for women. Therefore, PhA is related to muscle mass and quality.

Some reports found an association between PhA and frailty. In one study of 4667 older adults, PhA below the first quintile was associated with a 3-fold higher risk of frailty in men and a 4-fold higher risk in women¹⁹⁾. A Japanese study reported that PhA was associated with frailty and Locomotive syndrome²⁰⁾.

2. Cardiovascular disease

PhA decreases with increasing severity of heart failure in both men and women²¹⁾.

Decreased PhA is associated with decreased survival in patients with heart failure²²⁾.

Morisawa et al. reported that PhA is probably a comprehensive indicator of physical health, indicating nutritional status, physical function, and geriatric syndromes, and an important predictor of hospitalization-associated disability (HAD) in older patients undergoing surgery²³⁾.

PhA is correlated with the nutritional status and physical function in patients with cardiovascular disease, and it is a useful marker of sarcopenia and

cachexia²⁴⁾.

3. Cancer

PhA has a positive and significant correlation with cancer survival.

A systematic review indicated that patients with low PhA were 23% less likely to survive than those with high PhA²⁵⁾. Thus, PhA may be a prognostic factor for cancer survival.

Low PhA is associated with malnutrition and sarcopenia in patients with cancer.

Malnutrition and sarcopenia impact the survival of patients with cancer, therefore PhA could potentially serve as a prognostic tool to identify patients at risk of complications from cancer treatments and overall mortality²⁶⁾.

However, studies on the association between PhA and cancer are lacking. Thus, PhA is yet to be routinely incorporated into clinical practice for patients with cancer. Therefore, further research is warranted in this area.

4. Metabolic syndromes

Concerning metabolic diseases, many studies on diabetes and obesity have been reported.

In a report on diabetes mellitus, male participants with PhA within the lowest quartile ($\text{PhA} \leq 4.9^\circ$) were significantly more likely to have diabetes mellitus. In particular, men taking oral hypoglycemic agents had significantly reduced PhA. However, no significant relationship between PhA and diabetes existed in women²⁷⁾.

PhA at 100 kHz is a promising indicator of the catabolic state in people with diabetes, discriminating more strongly between patients with type 2 diabetes and control subjects than PhA at 50 kHz. Compared with control subjects, patients with Type 2 diabetes had a lower PhA, which was inversely correlated with the duration of the disease and HbA1c level at 100 kHz²⁸⁾.

A cross-sectional study of obese adults recorded a low PhA in 30.5% of the 141 enrolled patients, and an association was found between low PhA and the presence of hyperuricemia²⁹⁾.

5. Respiratory disease

PhA is used to assess malnutrition in many diseases, including respiratory diseases such as chronic obstructive pulmonary disease (COPD).

Patients with COPD and reduced PhA are older and more likely to be hypoxic and hypercapnic. Patients with more severe COPD have reduced cell mass, evident skeletal muscle depletion, and worsening gas exchange³⁰⁾.

A report by de Blasio demonstrated the significance of PhA in the estimation of handgrip strength and respiratory muscle variables (maximal inspiratory pressure/maximal expiratory pressure ratio)³¹⁾.

Furthermore, PhA is an independent and powerful predictor of all-cause mortality in COPD³²⁾.

Recent findings demonstrated the value of PhA in research involving patients with idiopathic pulmonary fibrosis (IPF)³³⁾.

Patients with IPF and low PhA were characterized by worse lung function, exercise capacity, and Health-Related QOL (HRQOL) compared with the findings in patients with normal PhA.

In conclusion, PhA is a novel biomarker of morbidity and mortality in patients with severe respiratory diseases³³⁾.

6. Kidney disease

In a report on the involvement of chronic kidney disease, low PhA was associated with sarcopenia and HRQOL; therefore, PhA appears to be a reliable marker of muscle health and HRQOL in patients with chronic kidney disease (CKD)³⁴⁾.

It is also important to regularly monitor the nutritional status of patients with diabetic CKD (DMCKD). It was reported that patients with stage 5 (DMCKD5) subjects with PhA < 4.17° exhibited Geriatric Nutritional Risk Index-assessed malnutrition and low albumin levels (3.13 ± 0.52 g/dL) than those with PhA $\geq 4.17^\circ$. This observation suggests that PhA could be used as a marker to reflect the nutritional status in patients with DMCKD5³⁵⁾.

7. Stroke

An observational cohort study by Abe et al. investigated whether PhA is associated with improved

physical function at discharge.

An independent association was reported between low PhA (<5.62° in men and <4.54° in women) and functional independence measure motor (FIM-motor) in patients with acute stroke.

Therefore, PhA at the onset of stroke is an independent predictor of physical function at discharge in the acute phase³⁶⁾.

Intervention

Resistance training promoted increases in PhA, which resulted from an increase in Xc concomitant with a reduction in R³⁷⁾.

However, it has been reported that PhA does not change at low intensities and that it improves with high-intensity or combined training and protein and vitamin supplementation³⁸⁾.

PhA as a result of physical therapy evaluation and treatment

Although its usefulness as a physical therapy assessment is not clear, it has been reported that low preoperative PhA in fragile hip fracture patients is associated with poorer functional outcomes after rehabilitation³⁹⁾ and that poor muscle quality, as estimated by PhA, is associated with reduced ADL capacity in elderly patients undergoing rehabilitation and physical function⁴⁰⁾. Several papers have also reported on treatment effects. PhA increased after 12 weeks of resistance training in community-dwelling elderly women⁴¹⁾, and PhA improved significantly after implementation of a cancer rehabilitation program in breast cancer survivors⁴²⁾. Furthermore, a 4-month on-dialysis exercise program (aerobic and resistance training) for kidney transplant candidates has been reported to increase PhA by 13.3% compared to controls⁴³⁾. However, there are not enough reports showing longitudinal or intervention studies in each disease, and this is an issue for the future.

Conclusion

Although there are reports of PhA as an indicator of physical health and its relationship with various diseases has been described (fig.2), the factors that influence PhA and whether it can be used as an

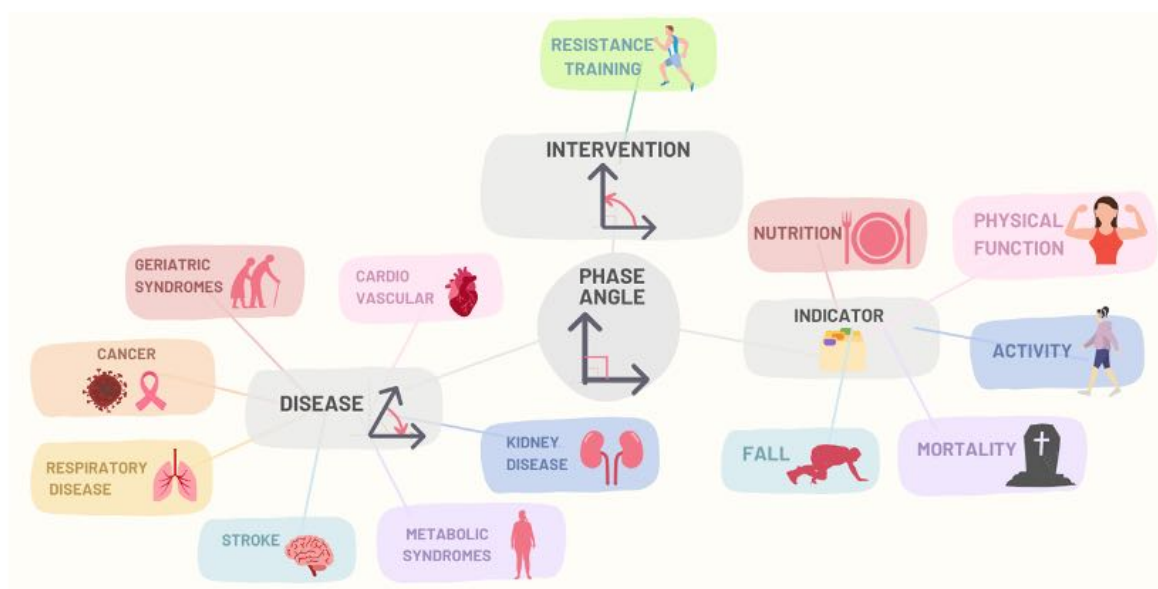


Fig.2 The relationship between PhA and indicators, each diseases
This diagram shows the overall picture of PhA, summarizing overall indicators^{6, 12, 14, 15)},
associated diseases^{17, 20, 22, 25, 28, 32, 34, 36)}, and effective interventions³⁷⁾.

indicator to determine the effectiveness of treatment remain debatable.

Nonetheless, as PhA can be easily measured and is more accurate than BIA with less measurement error, it is considered useful in clinical practice.

Ethical approval

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

Competing interests

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

References

- 1) Kyle UG, Bosaeus I, De Lorenzo AD, Deurenberg P, Elia M, Gómez JM, et al: Bioelectrical impedance analysis–part I: review of principles and methods. Clin Nutr. 2004; 23: 1226-1243.
- 2) Lukaski HC, Vega Diaz N, Talluri A, Nescolarde L: Classification of Hydration in Clinical Conditions: Indirect and Direct Approaches Using Bioimpedance. Nutrients. 2019; 11: 809.
- 3) Chen LK, Woo J, Assantachai P, Auyeung TW, Chou MY, Iijima K, et al: Asian Working Group for Sarcopenia: 2019 Consensus Update on Sarcopenia Diagnosis and Treatment. J Am Med
- 4) Norman K, Herpich C, Müller-Werdan U: Role of phase angle in older adults with focus on the geriatric syndromes sarcopenia and frailty. Rev Endocr Metab Disord. 2023; 24: 429-437.
- 5) Ursula G Kyle IB, Antonio D De Lorenzo, Paul Deurenberg, Marinos Elia, José Manuel Gómez, Berit Lilienthal Heitmann. et al: Bioelectrical impedance analysis-part II: utilization in clinical practice. Clin Nutr. 2004; 23: 1430-1453.
- 6) Norman K, Stobäus N, Pirlich M, Bosy-Westphal A: Bioelectrical phase angle and impedance vector analysis--clinical relevance and applicability of impedance parameters. Clin Nutr. 2012; 31: 854-861.
- 7) Henry C Lukaski UGK, Jens Kondrup: Assessment of adult malnutrition and prognosis with bioelectrical impedance analysis: phase angle and impedance ratio. Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2017; 20: 330-339.
- 8) Uemura K, Doi T, Tsutsumimoto K, Nakakubo S, Kim MJ, Kurita S, et al: Predictivity of bioimpedance phase angle for incident disability in older adults. J Cachexia Sarcopenia Muscle. 2020; 11: 46-54.
- 9) Wu H, Ding P, Wu J, Yang P, Tian Y, Zhao Q. Phase angle derived from bioelectrical impedance

- analysis as a marker for predicting sarcopenia. *Front Nutr.* 2022; 9: 1060224.
- 10) Barbosa-Silva MC, Barros AJ, Wang J, Heymsfield SB, Pierson RN Jr.: Bioelectrical impedance analysis: population reference values for phase angle by age and sex. *Am J Clin Nutr.* 2005; 82: 49-52.
 - 11) Unterberger S, Aschauer R, Zöhrer PA, Draxler A, Aschauer M, Kager B, et al: Association of Bioelectrical Impedance Phase Angle with Physical Performance and Nutrient Intake of Older Adults. *Nutrients.* 2023; 15: 1458.
 - 12) Matias CN, Nunes CL, Francisco S, Tomeleri CM, Cyrino ES, Sardinha LB, et al: Phase angle predicts physical function in older adults. *Arch Gerontol Geriatr.* 2020; 90: 104151.
 - 13) Mundstock E, Amaral MA, Baptista RR, Sarria EE, Dos Santos RRG, Filho AD, et al: Association between phase angle from bioelectrical impedance analysis and level of physical activity: Systematic review and meta-analysis. *Clin Nutr.* 2019; 38: 1504-1510.
 - 14) Asano Y, Nagata K, Shibuya K, Fujii Y, Kitano N, Okura T: Association of 24-h movement behaviors with phase angle in community-dwelling older adults: a compositional data analysis. *Aging Clin Exp Res.* 2023; 35: 1469-1476.
 - 15) Garlini LM, Alves FD, Ceretta LB, Perry IS, Souza GC, Clausell NO: Phase angle and mortality: a systematic review. *Eur J Clin Nutr.* 2019; 73: 495-508.
 - 16) Wirth R, Volkert D, Rösler A, Sieber CC, Bauer JM: Bioelectric impedance phase angle is associated with hospital mortality of geriatric patients. *Arch Gerontol Geriatr.* 2010; 51: 290-294.
 - 17) Di Vincenzo O, Marra M, Di Gregorio A, Pasanisi F, Scalfi L: Bioelectrical impedance analysis (BIA) -derived phase angle in sarcopenia: A systematic review. *Clin Nutr.* 2021; 40: 3052-3061.
 - 18) Yamada M, Kimura Y, Ishiyama D, Nishio N, Otake Y, Tanaka T, et al: Phase Angle Is a Useful indicator for Muscle Function in Older Adults. *J Nutr Health Aging.* 2019; 23(3): 251-255.
 - 19) Wilhelm-Leen ER, Hall YN, Horwitz RI, Chertow GM: Phase angle, frailty and mortality in older adults. *J Gen Intern Med.* 2014; 29: 147-154.
 - 20) Tanaka S, Ando K, Kobayashi K, Seki T, Hamada T, Machino M, et al: Low Bioelectrical Impedance Phase Angle Is a Significant Risk Factor for Frailty. *Biomed Res Int.* 2019; 2019: 6283153.
 - 21) Castillo Martínez L, Colín Ramírez E, Orea Tejeda A, Asensio Lafuente E, Bernal Rosales LP, Rebollar González V, et al: Bioelectrical impedance and strength measurements in patients with heart failure: comparison with functional class. *Nutrition.* 2007; 23: 412-418.
 - 22) Colín-Ramírez E, Castillo-Martínez L, Orea-Tejeda A, Vázquez-Durán M, Rodríguez AE, Keirns-Davis C: Bioelectrical impedance phase angle as a prognostic marker in chronic heart failure. *Nutrition.* 2012; 28: 901-905.
 - 23) Morisawa T, Saitoh M, Takahashi T, Watanabe H, Mochizuki M, Kitahara E, et al: Association of phase angle with hospital-acquired functional decline in older patients undergoing cardiovascular surgery. *Nutrition.* 2021; 91-92: 111402.
 - 24) Hirose S, Nakajima T, Nozawa N, Katayanagi S, Ishizaka H, Mizushima Y, et al: Phase Angle as an Indicator of Sarcopenia, Malnutrition, and Cachexia in Inpatients with Cardiovascular Diseases. *J Clin Med.* 2020; 9: 2554.
 - 25) Arab A, Karimi E, Vingrys K, Shirani F: Is phase angle a valuable prognostic tool in cancer patients' survival? A systematic review and meta-analysis of available literature. *Clin Nutr.* 2021; 40: 3182-3190.
 - 26) Amano K, Bruera E, Hui D: Diagnostic and prognostic utility of phase angle in patients with cancer. *Rev Endocr Metab Disord.* 2023; 24: 479-489.
 - 27) Mat S, Tan MP, Mohktar MS, Kamaruzzaman SB, Ibrahim F: Phase angle and diabetes in community-dwelling older adults: cross-sectional analysis from the Malaysian elders longitudinal research (MELoR) study. *Eur J Clin Nutr.* 2022; 76: 680-684.
 - 28) Dittmar M, Reber H, Kahaly GJ: Bioimpedance phase angle indicates catabolism in Type 2 diabetes. *Diabet Med.* 2015; 32: 1177-1185.

- 29) Curvello-Silva K, Ramos LB, Sousa C, Daltro C: Phase angle and metabolic parameters in severely obese patients. *Nutr Hosp*. 2020; 37: 1130-1134.
- 30) De Benedetto F, Marinari S, De Blasio F: Phase angle in assessment and monitoring treatment of individuals with respiratory disease. *Rev Endocr Metab Disord*. 2023; 24: 491-502.
- 31) De Blasio F, Santaniello MG, Mazzarella G, Bianco A, Lionetti L, Franssen F, et al: Raw BIA variables are predictors of muscle strength in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2017; 71: 1336-1340.
- 32) de Blasio F, Scalfi L, Di Gregorio A, Alicante P, Bianco A, Tantucci C, et al: Raw Bioelectrical Impedance Analysis Variables Are Independent Predictors of Early All-Cause Mortality in Patients With COPD. *Chest*. 2019; 155: 1148-1157.
- 33) Machado FVC, Bloem AEM, Schneeberger T, Jarosch I, Gloeckl R, Winterkamp S, et al: Relationship between body composition, exercise capacity and health-related quality of life in idiopathic pulmonary fibrosis. *BMJ Open Respir Res*. 2021; 8: e001039.
- 34) Shin J, Hwang JH, Han M, Cha RH, Kang SH, An WS, et al: Phase angle as a marker for muscle health and quality of life in patients with chronic kidney disease. *Clin Nutr*. 2022; 41: 1651-1659.
- 35) Han BG, Lee JY, Kim JS, Yang JW: Decreased Bioimpedance Phase Angle in Patients with Diabetic Chronic Kidney Disease Stage 5. *Nutrients*. 2019; 11: 2874.
- 36) Abe T, Yoshimura Y, Imai R, Yoneoka Y, Tsubaki A, Sato Y: Impact of Phase Angle on Physical Function in Patients with Acute Stroke. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2021; 30: 105941.
- 37) Campa F, Colognesi LA, Moro T, Paoli A, Casolo A, Santos L, et al: Effect of resistance training on bioelectrical phase angle in older adults: a systematic review with Meta-analysis of randomized controlled trials. *Rev Endocr Metab Disord*. 2023; 24: 439-449.
- 38) Sardinha LB, Rosa GB: Phase angle, muscle tissue, and resistance training. *Rev Endocr Metab Disord*. 2023; 24: 393-414.
- 39) Lim SK, Lim JY: Phase angle as a predictor of functional outcomes in patients undergoing in-hospital rehabilitation after hip fracture surgery. *Arch Gerontol Geriatr*. 2020; 89: 104060.
- 40) Ohtsubo T, Nozoe M, Kanai M, Ueno K, Nakayama M: Effects of muscle mass and muscle quality estimated by phase angle on functional outcomes in older patients undergoing rehabilitation: A prospective cohort study. *Nutr Clin Pract*. 2023; 38: 148-156.
- 41) Souza MF, Tomeleri CM, Ribeiro AS, Schoenfeld BJ, Silva AM, Sardinha LB, et al: Effect of resistance training on phase angle in older women: A randomized controlled trial. *Scand J Med Sci Sports*. 2017; 27: 1308-1316.
- 42) Short T, Teranishi-Hashimoto C, Yamada P: Exercise-Based Cancer Rehabilitation Program Improves Phase Angle in Breast Cancer Survivors. *International Journal of Exercise Science* 2022; 15: 1444-56.
- 43) Michou V, Davioti M, Syrakou N, Liakopoulos V, Deligiannis A, Kouidi E: Effects of a Combined Intradialytic Exercise Training Program on Functional Capacity and Body Composition in Kidney Transplant Candidates. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2023; 8: 9.

高度救命救急センターにおけるリハビリテーション

齊藤 彬^{1,2)}、高橋哲也³⁾、藤原俊之^{1,3)}

¹⁾ 順天堂大学大学院医学研究科リハビリテーション医学

²⁾ 日本医科大学付属病院リハビリテーション科

³⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

近年、集中治療室では早期離床を含む早期リハビリテーション治療が積極的に行われている。救命率が向上した結果として、集中治療後症候群が注目され、世界中で問題になっている。集中治療後症候群とは、身体機能障害や認知機能障害、精神機能障害を引き起こし、日常生活活動や Quality of Life の低下を襲来する。また、患者本人に限らずその家族にも精神機能障害を引き起こすことが知られている。集中治療後症候群の予防、是正を目的として、様々な医療・ケアを束ねた ABCDEFGH バンドルが提唱されている。その中には、早期離床や早期からの運動があり、リハビリテーション治療が担う役割も大きい。そこで、高度救命救急センターのリハビリテーション治療について概説し、今後の理学療法士に求められる役割を論述する。

キーワード：早期離床・リハビリテーション治療、高度救命救急センター、集中治療後症候群、ABCDEFGH バンドル

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，33-39頁，2024年（受付 2023.5.25.；受理 2023.7.4.）

緒 言

近年、集中治療室（Intensive Care Unit：ICU）では、早期リハビリテーション治療が標準的な医療となり、リハビリテーション専門職の理学療法士（Physical Therapist：PT）のみならず、医師や看護師などの多職種にもその意義は浸透している。世界中で救命救急・集中医療の分野は「救命」と同等に「社会復帰」も課題として注目され、ICU 内でのリハビリテーション治療が担う役割は大きくなっている¹⁾。ICU と高度救命救急センターの特徴について表1^{2,3)}に示し、本稿では、高度救命救急センターのリハビリテーション治療について解説していく。

PICS とバンドル治療

急性期医療の発展に伴い救命率は向上しているが、新たな問題として、ICU 退室後にみられる集中治療後症候群（Post Intensive Care Syndrome：PICS）が注目されるようになった。PICS とは「ICU 患者が、急性重症疾患から回復後、ICU 在室・退室後、さらに退院後に持続して生じる身体面、認知面、精神面における機能不全の総称」と定義されている⁴⁾。PICS の長期予後は死亡率、再入院率の上昇^{5,6)}や日常生活活動（Activities of Daily Living：ADL）の低下が長期に残存⁷⁾し、そ

の影響は患者本人に留まらず、家族の精神機能の障害を引き起こすことが知られており PICS-Family（PICS-F）と呼ばれている。

PICS の具体的な内容として、身体機能障害には重症疾患に起因するびまん性の筋力低下症候群があり、ICU-Acquired Weakness（ICU-AW）と呼ぶ。認知機能障害はせん妄や認知症の増悪があり、精神機能障害にはうつ病、不安、Posttraumatic Stress Disorder（PTSD）がある。患者、その家族の PICS 発症率は報告によってばらつきがあり、身体機能障害は30～80%、認知機能障害が30～80%、精神機能障害は10～60%、そして PICS-F は10～70%である^{4,8-10)}。

PICS の発症因子は多岐にわたり、不動や敗血症、急性呼吸窮迫症候群（Acute Respiratory Distress Syndrome：ARDS）などの病態の他に、薬剤、人工呼吸器装着期間、喀痰吸引などの治療やケアなどの介入も PICS の発症因子となることが知られている。

人工呼吸患者に対する PICS 予防の方略には、各治療要素の頭文字をとり ABCDEFGH バンドル¹⁾と呼ばれる指標がある。各治療要素が揃うと生存率や人工呼吸器装着期間、ICU 在室期間、入院期間が短縮され、せん妄や睡眠に好影響があるとの報告^{11,12)}がある。その他にも PADIS ガイドライン¹³⁾があり、どちらの方略でも、「ICU 内では、早期から痛みやせん妄を評価、

責任著者：齊藤 彬

日本医科大学付属病院リハビリテーション科

〒113-8603 東京都文京区千駄木1-1-5

E-mail: a.saito.mm@juntendo.ac.jp

表 1 重症ユニットの特徴

	救命救急センター	集中治療室
特定入院料	救命救急入院料	特定集中治療室管理料
分類	ER+Emergency ICU	ICU：内科系・外科系問わず Surgical ICU：外科系 疾患別ICU＊1
入室患者経路	救急搬送	予定手術後、院内急変
備考	・必要に応じてヘリポート、ドクターカーなどの確保が必要 ・高度救命救急センター：＊2	

＊1 疾患別集中治療室：心臓集中治療室(CCU)、脳卒中集中治療室(SCU)、小児集中治療室(PICU)など

＊2 広範囲熱傷や指肢切断、急性中毒等の特殊疾病患者も受け入れられる施設

ER：Emergency Room（初療室）、ICU：Intensive Care Unit(集中治療室)、Emergency ICU：救命救急集中治療室、Surgical ICU：外科系集中治療室

管理し、適切な鎮静薬の選択を行い、人工呼吸器からの離脱を常に検討しながら、早期よりリハビリテーション治療を行うこと」が重要視されている。

ICU における リハビリテーション治療の変化

ここ10年でICUのリハビリテーション治療を取り巻く環境は大きく変動し、「安静」から「動かす」へ治療戦略が移行している。このきっかけになったのが、Schweickert WD ら¹⁴⁾ や Morris PE ら¹⁵⁾ が、人工呼吸器患者を対象に早期リハビリテーション治療や離床プロトコルを導入し、人工呼吸器装着期間やせん妄発症率、ICU 滞在期間、ICU-AW の発症率、退院時 ADL 自立者の割合を改善すると報告したことである。また、Hodgson CL らは、ICU 内の Mobility Level を評価するのに ICU Mobility Scale を報告し¹⁶⁾、それを元に早期の目標指向の離床プロトコルを作成した¹⁷⁾。Tipping CJ ら¹⁸⁾ は4編の RCT から、ICU での早期からの低用量リハビリテーション治療は、ICU 退出後から始める高用量リハビリテーション治療よりも生存日数や退院日数を改善することを報告している。Anekwe DE ら¹⁹⁾ は9編の RCT から、早期リハビリテーション治療は通常ケアと比べて、ICU-AW の発症予防に効果があると報告している。また、Mayer KP ら²⁰⁾ は、最重症の呼吸不全や循環不全に用いられる体外式膜型人工肺(Extracorporeal Membrane Oxygenation：ECMO)患者を対象に、身体的リハビリテーション治療を伴う離床を実施し、機能転帰を報告した。

このように、ICU の早期リハビリテーション治療は標準化され、現在は「最適な運動量をどのように設定するか」に課題は移行している。ここまでは、早期離

床を中心に全身運動が ICU-AW の予防や ADL 改善に効果的であることを示した。しかし、Fuke R ら²¹⁾ は、早期リハビリテーション治療は ICU-AW を改善させるものの、せん妄や抑うつ改善効果は認めなかったと報告している。

早期離床の障壁として、PT の ICU 滞在時間の少なさ、肥満患者、看護師 - 患者配置比が挙げられる²²⁾。2022年に改訂された ARDS 診療ガイドライン2021²³⁾ では、早期リハビリテーション治療の実行は、早期リハビリテーション治療実施に慣れた施設で、ICU 担当の PT が配置された施設でなら可能と条件付きで弱く推奨されている。その他にも、神経筋電気刺激やベッド上サイクルエルゴメーターを用いたリハビリテーション治療の方法もあるが、現状では ICU-AW の発症予防に効果はなく、エビデンスが乏しい^{24, 25)}。

超急性期における理学療法士の役割

1. 腹臥位療法

高度救命救急センターでは病態が不安定な患者が多く、入室中のリハビリテーション治療内容は患者の病態によって変わり、その時期は超急性期、急性期、回復期に分けることができる(図1)。超急性期では、ECMO や人工呼吸器、補助循環ポンプカテーテル(IMPELLA[®]) や大動脈内バルーンパンピング術(IABP) など機械的循環補助(Mechanical Circulatory Support：MCS)、持続的血液濾過透析が使用されることが多い。急性呼吸不全患者には早期離床や早期からの運動だけでなく、腹臥位療法を含む体位管理や排痰援助などの呼吸理学療法も PT に求められる。

ARDS に対する腹臥位療法の効果としては、2013年に PROSEVA study²⁶⁾ が発表され、重症 ARDS 患者の

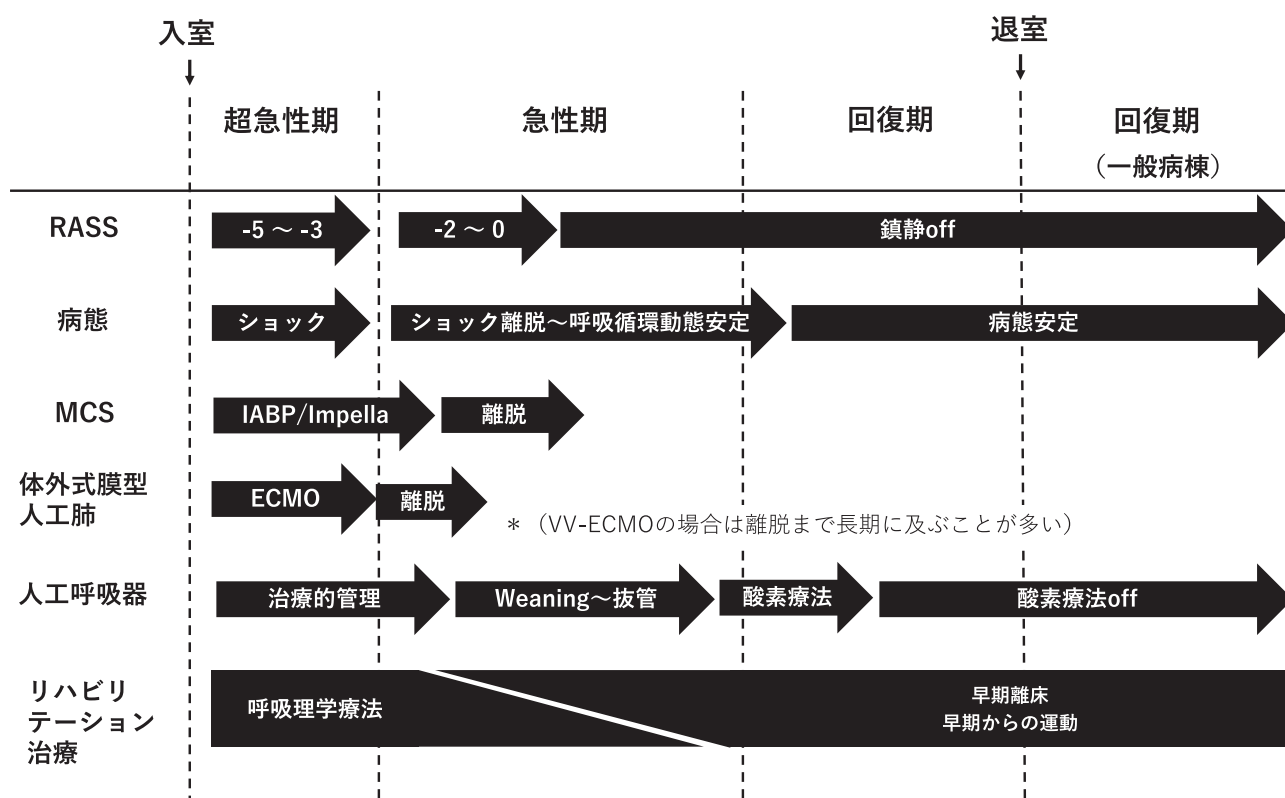


図1 高度救命救急センターにおけるリハビリテーション治療の概略

予後を改善することが示され注目されている。この研究は、ICU入室12～24時間以内に吸入酸素濃度 (Fraction of Inspired Oxygen : FiO_2) 0.6以上、呼気終末陽圧 (Positive End-Expiratory Pressure : PEEP) $5\text{cmH}_2\text{O}$ 以上、1回換気量 (Tidal Volume : V_T) 6mL/kg (予測体重) の人工呼吸器設定で管理しても、酸素化係数 ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$: P/F 比) が150未満の中等度～重症のARDS患者を対象に、16時間/日の腹臥位群と仰臥位群に分け比較検討された。結果は、28日死亡率は腹臥位群で16.0%、仰臥位群で32.8%と有意に腹臥位群で死亡率が改善したと報告している。腹臥位療法の持続

時間は長い方がよいとしている報告が多いが、Lee JMら²⁷⁾は10時間/日以上、Sub Sら²⁸⁾は12時間/日以上 の持続で死亡率が低下していると報告している。

ARDSにおける腹臥位療法単独では死亡率を改善しないため、肺保護戦略を用いた呼吸管理を組み合わせることが重要である²⁹⁾。2020年から猛威を振るったCOVID-19肺炎でも中等症～重症患者に早期から腹臥位療法を実施し院内死亡率が低下した報告^{30, 31)}もあり、ARDS患者同様に、COVID-19肺炎でも重症患者に対して腹臥位療法を実施することが望ましい。腹臥位療法の導入基準と施行方法を表2に示す。最重症

表2 腹臥位療法導入基準と施行方法²⁴⁾

腹臥位療法導入基準

- ①挿管下人工呼吸管理開始から36時間以内の患者
 - ②肺保護戦略に基づいて呼吸管理を継続している患者
 - ③仰臥位で12～24時間呼吸管理を施行したが反応のない患者
 - ④ $\text{FiO}_2 > 0.6$ かつ $\text{PEEP} > 5\text{cmH}_2\text{O}$ かつP/F比 $< 150\text{mmHg}$ の患者
- 上記4点が揃っている場合、できるだけすみやかに腹臥位療法を導入

急性呼吸不全に対する腹臥位療法の施行方法

- ①肺保護的換気を維持する(1回換気量 $6\sim 8\text{mL/kg}$)
- ②少なくとも連続10～12時間/日以上 の腹臥位時間を確保
- ③P/F比 $\geq 150\text{mmHg}$ もしくは4～5回以上を目標に施行

FiO_2 : 吸入酸素濃度、PEEP: 呼気終末陽圧、P/F: 動脈血酸素分圧/吸入酸素濃度

ARDS 患者に対して、VV（Veno-Venous：静脈脱血 - 静脈送血）-ECMO と腹臥位療法を併用した研究では、生存率や P/F 比、肺コンプライアンスが改善すると報告されている³²⁻³⁵⁾。また、VV-ECMO を使用している患者に対して、ECMO 開始後、早期に腹臥位療法を実施すると ECMO 離脱率の上昇や死亡率の低下が得られると報告されている³⁵⁾。ARDS 診療ガイドライン 2021²³⁾ では、条件付きではあるものの、長時間の腹臥位療法は弱く推奨されている。そのため、呼吸理学療法の観点から PT が腹臥位療法の提案を医師や看護師へ行うことや、腹臥位療法を多職種で実施することも多い。

2. 超急性期の呼吸・骨格筋評価とリハビリテーション治療の実践

人工呼吸患者における呼吸評価では、肺コンプライアンスや吸気努力などのメカニカルパワーを評価し、医師と共有することで人工呼吸器管理の支援を行うことも超急性期の PT の役割のひとつである。さらに肺の評価では、呼吸音などのフィジカルイグザミネーション、胸部レントゲンや胸部 CT 画像を用いる。しかし、画像所見だけでは日内の変化を捉えるには十分でないため、加えて肺エコーを行うことで、無気肺や

肺水腫、胸水の鑑別やその程度が把握でき、治療方針の支援や有効な体位交換へとつなげることができる。肺エコーを用いた無気肺や肺水腫、胸水、気胸の診断精度を胸部レントゲン、胸部 CT と比較した研究では、感度、特異度ともに胸部レントゲンよりも優れるとの報告もある³⁶⁾。

超急性期は、深鎮静管理であることが多く ICU-AW の評価が難しいため、近年では筋エコーを用いることで骨格筋評価を行うことができる³⁷⁾。筋エコーは、筋断面積や筋の厚さ、筋輝度、pennation angle など骨格筋の量や質を評価することが可能である³⁸⁾。先行研究³⁹⁻⁴¹⁾ では、大腿直筋を用いることが多く、Parry SM ら⁴⁰⁾ は大腿直筋の筋断面積と筋力に関連があることを報告している。また、7日以内に大腿直筋の筋断面積が10%減少すると多臓器不全の発症率が上昇し、人工呼吸器装着期間や ICU 滞在期間の延長、PICS の残存期間が延長する^{38, 39)}。筋エコーの評価は、入室48時間以内に初回の評価を行い、基準を設定することが望ましいとされ、定期的に再評価を行うことが重要である。ICU-AW を評価する指標は、筋断面積が10%、筋の厚さが20%、pennation angle が5%それぞれ減少、および筋輝度の8%以上の増加とされているが、明確なカットオフ値は定められていない⁴²⁾。



図2 超急性期～急性期のリハビリテーション治療の実践

- a. VV-ECMO 患者の腹臥位（医師、看護師、PT、臨床工学技士 計 8 名で実施）
- b. VV-ECMO 患者の離床（医師、看護師、PT 計 6 名 協議のうえで端坐位を実施）
- c. 人工呼吸患者の歩行練習（医師、看護師、PT 計 4 名で実施）

リハビリテーション治療の実際には、早期からの運動・離床は急性期から実施することが多い（図1）。超急性期は患者の病態が不安定なため、呼吸理学療法を中心に他動運動や神経筋電気刺激を実施する。その他は、呼吸・骨格筋評価の結果を多職種に共有する。また、日本集中治療医学会から公表されている「集中治療室における早期リハビリテーション～根拠に基づくエクスパートコンセンサス～」⁴³⁾に基づいて、早期からの運動・離床の開始基準を確認しつつ、離床プロトコルを作成することで、早期からの運動・離床が遅延しないようにすることが重要である。

このように、高度救命救急センターの超急性期はPTのみで完結する内容が少なく、医師や看護師などと多職種で連携し、チームとして機能する必要がある。超急性期から急性期までの多職種連携によるリハビリテーション治療の実際を図2に示す。

結 論

ICU 内の PT を取り巻く環境は、近年大きく変動している。多職種と共通言語でコミュニケーションを取り、リスク管理のもと安全にリハビリテーション治療を行い、PICS の予防、是正に貢献しなければならない。

倫理的配慮

本論文は、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。

引用文献

- 1) Inoue S, Hatakeyama J, Kondo Y, Hifumi T, Sakuramoto H, Kawasaki T, et al: Post-intensive care syndrome: its pathophysiology, prevention, and future directions. *Acute Med Surg*. 2019; 6: 233～246.
- 2) 厚生労働省：救命救急センター及び二次救急医療機関の現状。 <https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002xuhe-att/2r9852000002xuo0.pdf>, 2023年6月9日。
- 3) 松嶋真哉:救命救急集中治療室における早期離床・リハビリテーション。 *理学療法ジャーナル*. 2023; 57: 12-19.
- 4) Needham DM, Davidson J, Cohen H, Hopkins RO, Weinert C, Wunsch H, et al: Improving long-term outcomes after discharge from intensive care unit: report from a stakeholders' conference. *Crit Care Med*.

2012; 40: 502-509.

- 5) Lone NI, Gillies MA, Haddow C, Dobbie R, Rowan KM, Wild SH, et al: Five-Year Mortality and Hospital Costs Associated with Surviving Intensive Care. *Am J Respir Crit Care Med*. 2016; 194: 198-208.
- 6) Shankar-Hari M, Saha R, Wilson J, Prescott HC, Harrison D, Rowan K, et al: Rate and risk factors for rehospitalisation in sepsis survivors: systematic review and meta-analysis. *Intensive Care Med*. 2020; 46: 619-636.
- 7) Shima N, Miyamoto K, Shibata M, Nakashima T, Kaneko M, Shibata N, et al: Activities of daily living status and psychiatric symptoms after discharge from an intensive care unit: a single-center 12-month longitudinal prospective study. *Acute Med Surg*. 2020; 7: e557.
- 8) Rabiee A, Nikayin S, Hashem MD, Huang M, Dinglas VD, Bienvenu OJ, et al: Depressive Symptoms After Critical Illness: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Crit Care Med*. 2016; 44: 1744-1753.
- 9) Davidson JE, Jones C, Bienvenu OJ: Family response to critical illness: postintensive care syndrome-family. *Crit Care Med*. 2012; 40: 618-624.
- 10) Adler J, Malone D: Early mobilization in the intensive care unit: a systematic review. *Cardiopulm Phys Ther J*. 2012; 23: 5-13.
- 11) Pun BT, Balas MC, Barnes-Daly MA, Thompson JL, Aldrich JM, Barr J, et al: Caring for Critically Ill Patients with the ABCDEF Bundle: Results of the ICU Liberation Collaborative in Over 15,000 Adults. *Crit Care Med*. 2019; 47: 3-14.
- 12) Moraes FDS, Marengo LL, Moura MDG, Bergamaschi CC, de Sá Del Fiol F, Lopes LC, et al: ABCDE and ABCDEF care bundles: A systematic review of the implementation process in intensive care units. *Medicine (Baltimore)*. 2022; 101: e29499.
- 13) Devlin JW, Skrobik Y, Gélinas C, Needham DM, Slooter AJC, Pandharipande PP, et al: Clinical Practice Guidelines for the Prevention and Management of Pain, Agitation/Sedation, Delirium, Immobility, and Sleep Disruption in Adult Patients in the ICU. *Crit Care Med*. 2018; 46: e825-873.
- 14) Schweickert WD, Pohlman MC, Pohlman AS, Nigos C, Pawlik AJ, Esbrook CL, et al: Early physical and occupational therapy in mechanically ventilated, critically ill patients: a randomised controlled trial. *Lancet*. 2009; 373: 1874-1882.

- 15) Morris PE, Goad A, Thompson C, Taylor K, Harry B, Passmore L, et al: Early intensive care unit mobility therapy in the treatment of acute respiratory failure. *Crit Care Med.* 2008; 36: 2238-2243.
- 16) Hodgson C, Needham D, Haines K, Bailey M, Ward A, Harrold M, et al: Feasibility and inter-rater reliability of the ICU Mobility Scale. *Heart Lung.* 2014; 43: 19-24.
- 17) Hodgson CL, Bailey M, Bellomo R, Berney S, Buhr H, Denehy L, et al: A Binational Multicenter Pilot Feasibility Randomized Controlled Trial of Early Goal-Directed Mobilization in the ICU. *Crit Care Med.* 2016; 44: 1145-1152.
- 18) Tipping CJ, Harrold M, Holland A, Romero L, Nisbet T, Hodgson CL: The effects of active mobilisation and rehabilitation in ICU on mortality and function: a systematic review. *Intensive Care Med.* 2017; 43: 171-183.
- 19) Anekwe DE, Biswas S, Bussi eres A, Spahija J: Early rehabilitation reduces the likelihood of developing intensive care unit-acquired weakness: a systematic review and meta-analysis. *Physiotherapy.* 2020; 107: 1-10.
- 20) Mayer KP, Pastva AM, Du G, Hatchett SP, Chang M, Henning AN, et al: Mobility Levels With Physical Rehabilitation Delivered During and After Extracorporeal Membrane Oxygenation: A Marker of Illness Severity or an Indication of Recovery? *Phys Ther.* 2022; 102: pzab301.
- 21) Fuke R, Hifumi T, Kondo Y, Hatakeyama J, Takei T, Yamakawa K, et al: Early rehabilitation to prevent postintensive care syndrome in patients with critical illness: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open.* 2018; 8: e019998.
- 22) Raurell-Torred  M, Arias-Rivera S, Martí JD, Frade-Mera MJ, Zaragoza-García I, Gallart E, et al: Variables associated with mobility levels in critically ill patients: A cohort study. *Nurs Crit Care.* 2022; 27: 546-557.
- 23) ARDS 診療ガイドライン作成委員会 : ARDS 診療ガイドライン2021. 日本集中治療医学会雑誌. 2022; 29: 295-332.
- 24) Zayed Y, Kheiri B, Barbarawi M, Chahine A, Rashdan L, Chintalapati S, et al: Effects of neuromuscular electrical stimulation in critically ill patients: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Aust Crit Care.* 2020; 33: 203-210.
- 25) Takaoka A, Utgikar R, Rochwerf B, Cook DJ, Kho ME: The Efficacy and Safety of In-Intensive Care Unit Leg-Cycle Ergometry in Critically Ill Adults. A Systematic Review and Meta-analysis. *Ann Am Thorac Soc.* 2020; 17: 1289-1307.
- 26) Guérin C, Reignier J, Richard JC, Beuret P, Gacouin A, Boulain T, et al: Prone positioning in severe acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2013; 368: 2159-2168.
- 27) Lee JM, Bae W, Lee YJ, Cho YJ: The efficacy and safety of prone positional ventilation in acute respiratory distress syndrome: updated study-level meta-analysis of 11 randomized controlled trials. *Crit Care Med.* 2014; 42: 1252-1262.
- 28) Sud S, Friedrich JO, Adhikari NKJ, Taccone P, Mancebo J, Polli F, et al: Effect of prone positioning during mechanical ventilation on mortality among patients with acute respiratory distress syndrome: a systematic review and meta-analysis. *CMAJ.* 2014; 186: E381-390.
- 29) Beitler JR, Shaefi S, Montesi SB, Devlin A, Loring SH, Talmor D, et al: Prone positioning reduces mortality from acute respiratory distress syndrome in the low tidal volume era: a meta-analysis. *Intensive Care Med.* 2014; 40: 332-341.
- 30) Shelhamer MC, Wesson PD, Solari IL, Jensen DL, Steele WA, Dimitrov VG, et al: Prone Positioning in Moderate to Severe Acute Respiratory Distress Syndrome Due to COVID-19: A Cohort Study and Analysis of Physiology. *J Intensive Care Med.* 2021; 36: 241-252.
- 31) Mathews KS, Soh H, Shaefi S, Wang W, Bose S, Coca S, et al: Prone Positioning and Survival in Mechanically Ventilated Patients With Coronavirus Disease 2019-Related Respiratory Failure. *Crit Care Med.* 2021; 49: 1026-1037.
- 32) Kimmoun A, Roche S, Bridey C, Vanhuyse F, Fay R, Girerd N, et al: Prolonged prone positioning under VV-ECMO is safe and improves oxygenation and respiratory compliance. *Ann Intensive Care.* 2015; 5: 35.
- 33) Rilinger J, Zotzmann V, Bemtgen X, Schumacher C, Biever PM, Duerschmied D, et al: Prone positioning in severe ARDS requiring extracorporeal membrane oxygenation. *Crit Care.* 2020; 24: 397.
- 34) Giani M, Rezoagli E, Guervilly C, Rilinger J, Duburcq

- T, Petit M, et al: Prone positioning during venovenous extracorporeal membrane oxygenation for acute respiratory distress syndrome: a pooled individual patient data analysis. *Crit Care*. 2022; 26: 8.
- 35) Giani M, Rezoagli E, Guervilly C, Rilinger J, Duburcq T, Petit M, et al: Timing of Prone Positioning During Venovenous Extracorporeal Membrane Oxygenation for Acute Respiratory Distress Syndrome. *Crit Care Med*. 2023; 51: 25-35.
- 36) Danish M, Agarwal A, Goyal P, Gupta D, Lal H, Prasad R, et al: Diagnostic Performance of 6-Point Lung Ultrasound in ICU Patients: A Comparison with Chest X-Ray and CT Thorax. *Turk J Anaesthesiol Reanim*. 2019; 47: 307-319.
- 37) Nakanishi N, Tsutsumi R, Okayama Y, Takashima T, Ueno Y, Itagaki T, et al: Monitoring of muscle mass in critically ill patients: comparison of ultrasound and two bioelectrical impedance analysis devices. *J Intensive Care*. 2019; 7: 61.
- 38) Patel S, Bear D, Patel B, Puthuchear Z: Clinical Application of Ultrasound in Intensive Care Unit-Acquired Weakness. *Ultraschall Med*. 2020; 41: 244-266.
- 39) Puthuchear Z, Rawal J, McPhail M, Connolly B, Ratnayake G, Chan P, et al: Acute skeletal muscle wasting in critical illness. *JAMA*. 2013; 310: 1591-600.
- 40) Parry SM, El-Ansary D, Cartwright MS, Sarwal A, Berney S, Koopman R, et al: Ultrasonography in the intensive care setting can be used to detect changes in the quality and quantity of muscle and is related to muscle strength and function. *J Crit Care*. 2015; 30: 1151. e9-14.
- 41) Peres LM, Luis-Silva F, Meneguetti MG, Sato L, Basile-Filho A, Suen VMM, et al: Comparison of ultrasound with computed tomography to measure skeletal muscle mass in critically ill patients: A prospective study protocol. *Medicine (Baltimore)*. 2022; 101: e31921.
- 42) Formenti P, Umbrello M, Coppola S, Froio S, Chiumello D: Clinical review: peripheral muscular ultrasound in the ICU. *Ann Intensive Care*. 2019; 9: 57.
- 43) 高橋哲也, 西田修, 宇都宮明美, 安藤守秀, 飯田有輝, 尾崎孝平, 他. 集中治療における早期リハビリテーション～根拠に基づくエクスパートコンセンサス～. *日本集中治療医学会雑誌*. 2017; 24: 255～303.

Abstract

Rehabilitation in the advanced emergency and intensive care unit

Akira Saito^{1, 2)}, Tetsuya Takahashi³⁾, Toshiyuki Fujiwara^{1, 3)}

¹⁾ Department of Rehabilitation Medicine, Juntendo University Graduate School of Medicine

²⁾ Department of Rehabilitation, Nippon Medical School Hospital

³⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Juntendo University

In recent years, early rehabilitation therapy, including early mobilization, has been actively performed in Intensive Care Units. Due to improved survival rates, Post-Intensive Care Syndrome (PICS) has become a worldwide concern. PICS can cause physical, cognitive, and psychological impairments, resulting in a decrease in daily activities and quality of life for both patients and their families. To prevent and improve PICS, various medical and care practices have been bundled into the ABCDEFGH bundle, which includes early mobilization and exercise, highlighting the significant role played by rehabilitation therapy. This paper provides an overview of rehabilitation therapy in Emergency Intensive Care Units and discusses the role that physiotherapists are expected to play in preventing and improving PICS in the future.

Key Words: early mobilization, Emergency Intensive Care Unit (E-ICU), Post Intensive Care Syndrome (PICS), ABCDEFGH bundle

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 33-39, 2024]

消防団員の演習訓練中における外傷・障害予防を目的とした運動プログラムの開発

宮森隆行¹⁻⁵⁾、長尾雅史^{1, 6, 7)}、西尾啓史^{1, 6)}、岩木峻平⁴⁾、野津将時郎⁴⁾、斎藤正治⁸⁾、福井隆久⁸⁾、吉田友哉⁸⁾、甲能 萌⁸⁾、高澤祐治^{1, 4, 6)}

- ¹⁾ 順天堂大学医学部スポーツ医学研究室
- ²⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科
- ³⁾ 順天堂大学医学部附属さくらキャンパス診療所
- ⁴⁾ 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科
- ⁵⁾ 順天堂大学大学院保健医療学研究科
- ⁶⁾ 順天堂大学医学部整形外科・スポーツ診療科
- ⁷⁾ 革新的医療技術開発研究センター
- ⁸⁾ 消防団員等公務災害補償等共済基金

要 旨

消防団員等公務災害補償等共済基金が保有する3年間の公務災害データを分析すると、演習訓練中に発生した外傷・障害が全体の約70%を占めていた。そこで、順天堂大学医学部スポーツ医学研究室と同基金は、3年間の共同プロジェクトを立ち上げ、ポンプ操法を含む演習訓練に対応した外傷・障害予防のための運動プログラムを開発し、その普及状況を調査した。初年度は、ポンプ操法訓練のスポーツ的な動きの評価を行い、科学的根拠に基づく運動プログラム動画を作成した。2年目は、YouTube配信や、各自治体を通じたポスターによる運動プログラムの啓発を行った。さらに、3年目は、消防団員を対象に運動プログラムの実施状況についてアンケート調査をした。その結果、定期的な運動習慣の無い消防団員は全体の50%である一方で、1か月でポンプ操法訓練に6回以上参加している団員は80%であった。また、運動プログラムの動画やポスターを視聴したことのある団員は14%であり、その実施率は5%であった。アンケートの自由記載項目では、運動プログラムの効果が実感できるものの、より短時間で効率的にできるウォーミングアップ方法が知りたいなどの意見があった。今後は、効果的で短時間で実施できるウォーミングアップ体操の考案や、消防団員への普及方法について再検討する必要がある。

キーワード：消防団員、ポンプ操法訓練、外傷・障害予防、運動プログラム、普及

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 40-45頁, 2024年(受付 2024.1.29.; 受理 2024.2.9.)

1. はじめに

消防団員とは、市町村の非常備の消防機関である消防団において、他の本業を持ちながら消防防災活動を行う非常勤特別職の地方公務員であり、令和5年4月1日現在、全国で約76万3千人が活動している¹⁾。消防団の主たる任務は、水火災又は地震等の災害の防除及び被害の軽減である。一方で、こういった災害の発生頻度を勘案すると、消防団の活動機会は、災害現場での活動割合に比して、その技術を習得するための日頃の演習訓練の割合が必然的に高くなる。そして、消防団員の活動機会と外傷・障害の発生機会の相関関係を勘案すると、活動機会が多い演習訓練中の外傷・障害の割合が高くなると推測される。実際に、消防団員等公務災害補償等共済基金（以下、消防基金）が保有す

る公務災害データ（2017年から2019年分）においても、全体の約70%は、演習訓練中に発生した外傷・障害であった。そのため、活動機会が多い演習訓練中の外傷・障害予防に焦点を当てた運動プログラムを構築することは、公務災害の発生率減少に貢献できる可能性があり、災害時に活動する消防団員のコンディションの維持、ひいては消防力の向上に繋がると考えられる。そこで、整形外科をはじめとするスポーツドクターや理学療法士が在籍し、アスリートの外傷・障害予防に科学的知見を持つ順天堂大学医学部スポーツ医学研究室と消防基金は、2021年度から2023年度までの3年間の共同プロジェクトを立ち上げ、演習訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラムを開発した。本稿は、第2節に消防団員における公務災害発生の特徴をまとめ、第3節にそれらの予防を目的とした運動プログラ

責任著者：宮森 隆行
 順天堂大学保健医療学部理学療法学科
 〒113-8421 東京都文京区本郷2-1-1
 E-mail: t.miyamori.hi@juntendo.ac.jp

ムを紹介する。また第4節は、消防団員へ運動プログラムを普及させるための方法について情報提供し、第5節では、運動プログラム実施の実態調査の結果について報告する。

2. 消防団員の公務災害発生件数とその特徴

消防基金では、2020年度及び2021年度において公務災害発生件数の約2/3を占める演習訓練中の外傷・障害を予防するため、消防基金が保有する2017年度～2019年度の3年間ににおける公務災害の発生状況を調査した。我々が解析したところによると、この期間における公務災害件数3,499件のうち、演習訓練中の外傷・障害発生件数は、70% (2,457件 / 3,499件) であり、中でも「ポンプ操法訓練」(消防用の各資機材の取扱い及び操作を習得するための訓練) が約49% (1,715件 / 3,499件) と圧倒的に多く、その他は「準備・後片付け」が9% (304件 / 3,499件)、「教養基礎訓練」が約2% (82件 / 3,499件) などであった。

さらに、ポンプ操法訓練での負傷 (1,715件) を分析すると、「資機材 (管槍・ホース) を保持して走行する一連の操作」が約30% (518件 / 1,715件)、「吸管 (水利から水を吸い上げるための管) を扱う一連の操作」が約11% (194件 / 1,715件) であり、この二つの操法訓練中で約40% の外傷・障害が発生していることが明らかになった。

また、外傷・障害の部位や種類をみると、資機材を保持して走行する一連の操作では、「下肢の筋腱断裂・擦傷」が346件、「脱臼・捻挫」が57件、吸管を扱う一連の操作では、「下肢の筋腱断裂・挫傷」が83件であった。

3. 演習訓練中の外傷・障害予防を目的とした運動プログラム

本共同プロジェクトの初年度 (2021年度) は、消防団員の公務災害発生状況を踏まえて、実際に本プロジェクトメンバーが全国5か所 (神奈川県横須賀市、長野県千曲市、奈良県奈良市、兵庫県福崎町、岡山県和気町) の消防団の演習訓練に参加して準備運動を含めたトレーニング指導 (図1) を行うとともに、ポンプ操法の特徴を捉えた外傷・障害予防のための運動プログラムを作成した。この運動プログラムは、演習訓練中に発生する「下肢の筋腱断裂」や「足関節捻挫」の原因を医師が説明する「解説編」 (図2)、理学療法士による演習訓練前の準備運動を紹介する「ウォームアップ編」 (図3)、自宅でできる体づくり運動を取り入れた「トレーニング編」 (図4) の構成とした。



図1 演習訓練前に外傷障害予防のためのトレーニング指導を実施



図2 医師が消防団員に多発する外傷・障害について説明する「解説編」



図3 筋や腱に対するストレッチやエクササイズをテーマに構成される「ウォームアップ編」



図4 自宅のできる自重負荷を中心に構成される「トレーニング編」

今回、作成した運動プログラムは、科学的根拠に基づき効果が立証されているものであり、図3、図4のQRコードを読み込むことで閲覧することが可能である。

運動の種類とその根拠の一部を本稿でも紹介する。
「ウォームアップ編」

- 1) 内転筋のストレッチ²⁾
 - 2) アキレス腱のストレッチ³⁾
 - 3) ハムストリングのストレッチ⁴⁾
 - 4) 大腿四頭筋のストレッチ⁵⁾
- 「トレーニング編」
- 1) 体幹の安定性を高めるトレーニング⁶⁾
 - 2) 片脚立位でのバランストレーニング⁷⁾
 - 3) 股関節の支持性を高めるトレーニング⁸⁾
 - 4) 瞬発力を高めるトレーニング⁹⁾

4. 消防団員への運動プログラムの普及活動

本共同プロジェクトの2年目（2022年度）は、作成した運動プログラムを社会的に啓発し、全国の消防団員への認知度を高めることを目的として、以下のような普及活動を展開した。

- 1) YouTube による動画配信（順天堂チャンネル・消防基金チャンネル）（図5）



図5 YouTube を利用した運動プログラムの紹介（順天堂チャンネル）



図6 ポンプ操法訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラムの啓発ポスター

職業、定期的な運動（体づくりのための身体活動）の実施状況と頻度、1か月間のポンプ操法訓練の参加回数、過去1年間でポンプ操法訓練中に起きた外傷・障害の種類、本プロジェクトで作成した「ポンプ操法訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラム」の認知の有無と実施状況、本プロジェクトにおいて消防団活動を支援するための要望や感想（自由記載）とした。なお、アンケート調査は、書面による説明をもとに、紙面にて同意を得たうえで実施した。

4) 結果

今回のアンケート調査で回答を得られた人数は475人（男性469名、女性6名）、回答率12.4%であった。平均年齢は、 38.9 ± 9.2 歳であり、平均消防団員歴は、 10.9 ± 7.2 年であった。職業は、会社員286名（59.9%）が半数を占め、次に、自営業102名（21.3%）、公務員64名（13.4%）の順に多かった。

次に、定期的な運動（体づくりのための身体活動）と頻度の結果を図7に示す。消防団員の約40%は、週に1～3回以上運動を実施している一方で、50%の団員は、定期的な体づくり運動を行っていないことが分かった。

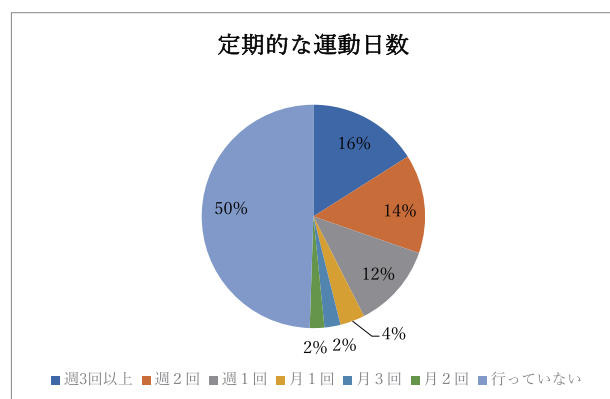


図7 定期的な運動（体づくりのための身体活動）の頻度

また、1か月間でポンプ操法訓練に参加している頻度においては、80%の消防団員が6回以上と回答した（図8）。

アンケート回答者の過去1年間ににおけるポンプ操法訓練中に起きた外傷・障害の発生状況（204件）においては、靱帯・腱損傷が29%、筋損傷が28%と約30%ずつを占めた（図9）。

本プロジェクトで作成した「ポンプ操法訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラム」の認知度においては、ポスターや実際の動画を閲覧したことのある消防団員は、15%に満たないことが分かった（図10）。

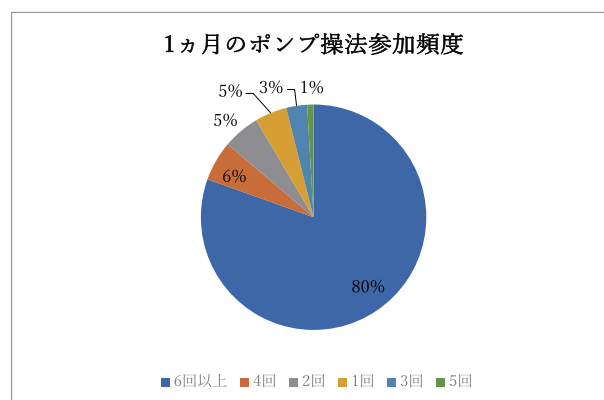


図8 1か月間のポンプ操法訓練の参加頻度

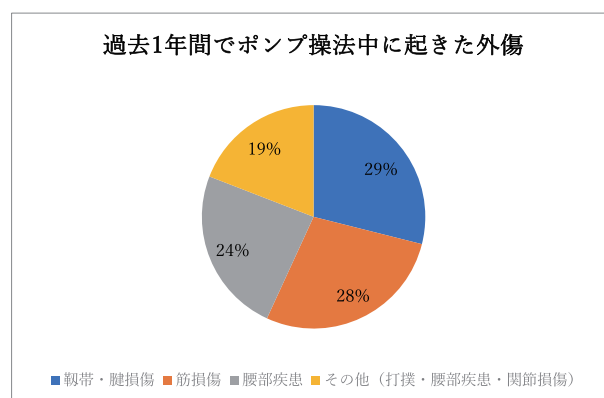


図9 過去1年間に発生したポンプ操法訓練中の外傷・障害の種類

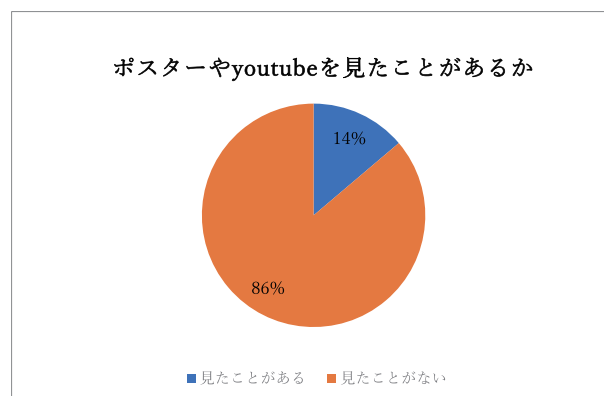


図10 運動プログラムの認知度

また、実際に運動プログラムを実施した割合は、全体の5%であった。

最後に、本プロジェクトにおける感想や要望において、消防団員からの前向きな意見としては、「運動プログラムを実施することで体調が整い、普段の生活にも良い影響が出ている」、「運動プログラム実施後に操法訓練に参加することでパフォーマンスが上がることを実感している」、などの意見があった。また、改善要望としては、「年齢差・個人差に合わせた運動プログラムを提供してほしい」、「全ての動画を実施するた

めの時間はないので、短時間で実施できる効率の良いウォームアップ方法が知りたい」、などの意見があった。

5) 考察

今回、順天堂大学スポーツ医学研究室と消防基金の共同プロジェクトにより作成した「ポンプ操法訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラム」の実施状況などをアンケート調査した。その結果、回答した消防団員の半数は、演習訓練以外に定期的な運動習慣が無いが、演習訓練への参加は高頻度であることが明らかになった。演習訓練の中でも特にポンプ操法は、巧緻性や持久性運動能力が求められ、競技スポーツで要求される動きの要素が多く含まれている¹⁰⁾。そのため、訓練前に適切なウォームアップを実施することや、体づくりを目的とした定期的な運動を実施することは、演習訓練中に発生する外傷・障害を予防できる可能性がある。そして、外傷・障害の特徴では、靱帯損傷や筋腱損傷の割合が多いことが確認され、これらの結果は、我々の解析した過去3年間の調査結果と一致した。今回作成した運動プログラムは、演習訓練中の外傷・障害を予防する内容のみならず、トレーニング編では、自宅でできる体づくり運動を含めたエクササイズ等も含んでいる。しかし、消防団員において本プロジェクトで作成した運動プログラムの認知度は14%と低く、実施率も全体の5%であった。その理由としては、消防団員は他の本業を持つ非常勤特別職の地方公務員であり、今回の調査でも90%以上の消防団員が会社員や自営業、公務員であり、運動プログラムの閲覧や実施をする機会が限られていた可能性が考えられる。そのため、今後は消防団員へのオンデマンド教育や、市町村のモデル消防団を対象に、週末などに直接運動プログラムを指導する機会を設けることも検討する必要がある。さらに、短時間で効果が得られ、現場で活用しやすいウォームアップ体操を考案し、消防団員へ普及させて、演習訓練中の外傷・障害を予防していくことが必要であると考ええる。

6. おわりに

今回、消防団員の公務災害を予防するために順天堂大学スポーツ医学研究室と消防基金が共同プロジェクトを立ち上げ、ポンプ操法訓練中の外傷・障害予防のための運動プログラムを作成し、広報媒体等を利用して普及に努めた。アンケート調査を通して、実際に本運動プログラム動画の認知度及び実施率は低いことが分かったが、定期的な運動習慣が無い消防団員が演習

訓練に高頻度で参加していることが推察されるなど、消防団員の背景因子を把握することができた。今後は、運動プログラムの普及方法について更なる検討をするとともに、演習訓練前に短時間で実施できる効果的なウォームアップ体操を提案していくことが必要と考える。

謝 辞

本運動プログラムの動画撮影にご協力頂いた順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科生の松永青葉氏、稲川尚汰氏に、この場を借りて深く感謝します。

倫理的配慮

本プロジェクトは、順天堂大学さくらキャンパス研究等倫理委員会の承認のもと実施した（承認番号：順大ス倫第2022-138号）。

利益相反

本プロジェクトは、消防団員等公務災害補償等共済基金より助成を受け実施した。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：消防団. <https://www.fdma.go.jp/relocation/syobodan/about/role/>, 2024年1月16日.
- 2) Rubini EC, Souza AC, Mello ML, Bacurau RF, Cabral LF, Farinatti PT: Immediate effect of static and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on hip adductor flexibility in female ballet dancers. *J Dance Med Sci.* 2011; 15: 177-181.
- 3) Rosenbaum D, Hennig EM: The influence of stretching and warm-up exercises on Achilles tendon reflex activity. *J Sports Sci.* 1995; 13: 481-490.
- 4) Iwata M, Yamamoto A, Matsuo S, Hatano G, Miyazaki M, Fukaya T, et al: Dynamic Stretching Has Sustained Effects on Range of Motion and Passive Stiffness of the Hamstring Muscles. *J Sports Sci Med.* 2019; 18: 13-20.
- 5) Su H, Chang NJ, Wu WL, Guo LY, Chu IH: Acute Effects of Foam Rolling, Static Stretching, and Dynamic Stretching During Warm-ups on Muscular Flexibility and Strength in Young Adults. *J Sport Rehabil.* 2017; 26: 469-477.
- 6) Shahtahmassebi B, Hebert JJ, Stomski NJ, Hecimovich M, Fairchild TJ: The effect of exercise training on lower trunk muscle morphology. *Sports Med.* 2014; 44: 1439-1458.

- 7) Junker D, Stöggl T: The Training Effects of Foam Rolling on Core Strength Endurance, Balance, Muscle Performance and Range of Motion: A Randomized Controlled Trial. *J Sports Sci Med*. 2019; 18: 229-238.
- 8) Slater LV, Hart JM: Muscle Activation Patterns During Different Squat Techniques. *J Strength Cond Res*. 2017; 31: 667-676.
- 9) Markovic G, Dizdar D, Jukic I, Cardinale M: Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *J Strength Cond Res*. 2004; 18: 551-555.
- 10) 中宿伸哉, 高井史朗: 消防団員の操法訓練中における傷害発生の実態について. 消防庁 消防研究センター. 2017: 142~150.

Abstract

Development of exercise program aimed at preventing trauma and injuries during training of volunteer firefighters

Takayuki Miyamori¹⁻⁵⁾, Masashi Nagao^{1, 6, 7)}, Hirofumi Nishio^{1, 6)}, Syunpei Iwaki⁴⁾, Shojiro Nozu⁴⁾, Masaharu Saito⁸⁾, Takahisa Fukui⁸⁾, Tomoya Yoshida⁸⁾, Moe Kounou⁸⁾, Yuji Takazawa^{1, 4, 6)}

¹⁾ Department of Sports Medicine, Faculty of Medicine, Juntendo University

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

³⁾ Juntendo University Sakura Campus Clinic

⁴⁾ Graduate School of Health and Sports Science, Juntendo University

⁵⁾ Graduate School of Health Science, Juntendo University

⁶⁾ Department of Orthopaedics, Faculty of Medicine, Juntendo University

⁷⁾ Medical Technology Innovation Center, Juntendo University

⁸⁾ The Mutual Aid Fund for Official Casualties and Retirement of Volunteer Firefighters

An analysis of 3 years of occupational accident data held by the Mutual Aid Fund for Official Casualties and Retirement of Volunteer Firefighters showed that trauma and injuries occurring during training exercises accounted for approximately 70% of the total incidents. Consequently, School of Medicine's Sports Medicine Research Laboratory in Juntendo University and the Mutual Aid Fund for Official Casualties and Retirement of Volunteer Firefighters initiated a 3-year collaborative project that aimed to develop an exercise program for preventing trauma and injuries specific to training exercises, including pump operation techniques. Subsequently, the dissemination status of the program was investigated. In the first year, a sports movement assessment for pump operation training was conducted, and a scientifically based exercise program video was created. During the second year, the program was promoted through YouTube broadcasts and posters distributed via each municipality. Additionally, in the third year, a survey was conducted among firefighters to assess the implementation status of the exercise program. The results indicated that 50% of firefighters lacked a regular exercise routine, while 80% of those who participated in pump operation training attended six or more sessions per month. Fourteen percent (14%) of the respondents had watched the exercise program video or poster, and the implementation rate was 5%. Furthermore, in the open-ended section of the survey, participants expressed the desire for more efficient warm-up exercises that could be performed in a shorter time, despite acknowledging the perceived effectiveness of the exercise program. Therefore, future considerations will involve the development of efficient and brief warm-up exercises and a reevaluation of dissemination methods to firefighters.

Key Words: volunteer firefighter, pump operation training, injury prevention, exercise program, dissemination

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 40-45, 2024]

肺癌における放射線治療法と H-VMAT

須賀 健太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

肺癌は世界で2番目に多い癌であり、特に日本では増加傾向が見られ、1998年には死亡率で第1位となり、2020年には7万5600人が肺癌により亡くなった。主要な治療法は手術、放射線治療、全身療法で、特に非小細胞肺癌（NSCLC）がよく見られる。放射線治療技術の進歩により、強度変調回転照射法（VMAT）やその進化形の Hybrid-VMAT（H-VMAT）が注目されている。VMAT は治療時間を短縮し、標的線量を向上させる一方、低線量が広がり、放射線肺臓炎のリスクが懸念されている。H-VMAT はこの課題に対処し、腫瘍への線量収束性を実現しつつ、周囲の組織への線量を最小限に抑える特性を持っている。研究によれば、H-VMAT は肺の低線量を抑制し、放射線肺臓炎のリスクを低減できる可能性があるが、VMAT の特性により対側の健常肺に低線量が広がる課題も存在する。臨床応用では患者の個別の特性や治療要因を考慮し、特にリスク臓器の近傍や不整形な照射範囲の場合に有効であるとされている。総じて、H-VMAT は肺癌の放射線治療において有望な選択肢であり、将来的な臨床試験や患者集団に対する効果の検証が期待される。

キーワード：NSCLC、3D-CRT、IMRT、VMAT、H-VMAT

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 46-53頁, 2024年（受付 2024.2.7.; 受理 2024.4.12.）

1. Introduction

1) 肺癌統計

肺癌は世界で2番目に多い癌であり、全世界で年間224万人が罹患している。また肺癌は癌による死亡の主要な原因であり、世界中で180万人が死亡している¹⁾。日本では、罹患者数の増加とともに、死亡率も年々上昇しており、1998年には胃癌を抜いて肺癌が死亡率の第1位となった。その後も死亡率は高まり続けており、2020年には約7万5600人が肺癌を主因として死亡している。男女別の死亡者数は、男性で約5万3200人（死亡率第1位）、女性で約2万2300人（死亡率第2位）となっている。また、5年生存率は34.9%（2009～2011年）である²⁾。肺癌のうち、腺癌や扁平上皮癌を含む非小細胞肺癌（Non-Small Cell Lung Cancer: NSCLC）は肺癌の主要な形態であり、世界中で癌による死亡の大部分を占めている³⁾。非小細胞肺癌では、切除術の対象となるのは全症例の3分の1程度であり、切除不能で遠隔転移や悪性胸水・心嚢水を伴わない症例は、局所制御を目的とした根治的放射線治療の適応である。根治が望めない症例でも、緩和や延命目的の照射も有効である⁴⁾。小細胞肺癌は肺癌全体の約10～

15%を占める癌で、増殖速度が早く早期に転移を認める悪性度の高い腫瘍であるが、放射線治療や薬物療法に対する感受性が高い癌である⁵⁾。

2) 肺癌に対する放射線療法

肺癌の治療は複雑であり、多くの場合、手術、放射線治療法、全身療法（化学療法、免疫療法、標的薬剤）、緩和ケアなど複数の治療法が用いられる。放射線療法は、腫瘍の状態や呼吸機能、循環器機能、血液・生化学所見、年齢などの患者の状態に応じて適応カテゴリーが分類される。I、II期非小細胞肺癌の標準治療は手術であり、放射線治療は何らかの理由で手術が不可能な症例に対して用いられる。II期非小細胞肺癌の手術不能な症例では、放射線単独療法または化学放射線療法が選択される。日本における手術の5年粗生存率はcIA期、cIIA期、cIB期、cIIB期ではそれぞれ、72%、79%、50%、60%であり⁶⁾、55～75 Gy（平均65 Gy）での放射線治療後の5年粗生存率はcI期全体で23%、死因の57%が局所再発であった⁷⁾。放射線治療では一般的に、予防的照射領域は40～50 Gy/20～25回、肉眼的病巣部には60～70 Gy/30～35回照射するが、いくつかの症例で線量増加により局所制御率と生存率の

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

向上が示されている⁸⁻¹⁰⁾。

局所進行性肺癌、いわゆる stage III 以上の肺癌にあたるが、切除不能局所進行性肺癌の治療においては化学放射線療法が有効である。特に切除不能Ⅲ期非小細胞肺癌に対しては化学放射線療法が標準治療として推奨されている¹¹⁾。ガイドラインでは、手術不能で根治的胸部放射線治療が可能な局所進行非小細胞肺癌で、全身状態が良好 (PS: 0, 1) な場合、シスプラチンを含む化学放射線療法を行うことが強く勧められている。局所進行性肺癌では放射線単独治療も行われるが、stage III A においては広範囲のリンパ節転移がない場合は手術療法が第一選択となるため、放射線単独療法の対象は stage III B でかつ化学療法の併用が不可能な症例、もしくは緩和的局所治療の必要な症例となっている。そして、ガイドラインでは、局所進行性肺癌の放射線治療として、化学放射線療法の適応とならないⅢ期非小細胞肺癌には無症状であっても根治的放射線単独療法が推奨されている。また、放射線単独療法で治療する場合、Ⅲ期非小細胞肺癌には通常線量分割で少なくとも 60 Gy/30 回 6 週を行うことが勧められている。なお、放射線治療単独の場合は休止期間を置かないことが推奨されている。さらに、照射期間を短縮する加速寡分割照射は標準治療と推奨されている⁵⁾。

3) 放射線治療技術の進歩

放射線治療技術は急速に進化しており、副作用が少なく、より正確で迅速な治療が可能になっている。放射線治療の精度を決定する重要な要素の1つは、放射線治療計画に用いる画像情報の進化である。四次元コンピュータ断層撮影 (Four-Dimensional Computed Tomography: 4DCT) は、現在、放射線治療計画の策定において日常的に行われている。これにより、患者毎の呼吸による腫瘍の動きを計測し、その移動範囲を放射線治療計画に組み込むことで、照射中の腫瘍の動きを考慮した上で所定の線量が腫瘍に確実に照射されるようになる。また、リニアック上のコーンビームコンピュータ断層撮影 (Cone Beam Computed Tomography: CBCT) により、治療前および治療中に腫瘍の位置を確認することも可能である。他にも、呼吸性移動を正確に把握する呼吸監視装置などもある。これは、患者の胸部や上腹部に設置したマーカーを監視カメラでモニタリングし、呼吸の状態を監視する装置である。画像技術以外にも固定具の進化も大きな要素の1つである。シェルは、熱可逆性であり 70℃ 程度で柔らかくなり、その後冷えると固まる特徴があるため、患者個々に作成し、毎回の治療時に患者に装着することで再現

性と安定性を担保する。中でも、体幹部用のシェルは吸引式固定バッグと合わせて使用することで、体動抑制に加え呼吸抑制にも役立つ。これらのイメージング技術の発明と改良された患者固定方法の組み合わせにより、定位放射線療法 (Stereotactic Radiosurgery: SRT) が実現できるようになった⁵⁾。SRT は、幾何学的な精度と正確さを備え、より少ない分割数で大量の処方線量を照射できる。従来の放射線治療では、腫瘍の動きや不確実性を考慮して大きなマージンを設定していたが、画像照合技術の進歩により、マージンが減少し、それに伴い周囲の正常組織への線量と放射線治療による副作用も減少した。不均一な強度の複数のビームを腫瘍に向ける強度変調放射線療法 (Intensity-Modulated Radiation Therapy: IMRT) も、治療の適合性を高め正常組織の線量を減少させることができる。

4) NSCLC の放射線治療

NSCLC の放射線治療は、肺野の被ばくに伴う放射線肺炎や、呼吸運動による腫瘍への照射精度の低下および化学療法との併用による正常組織の放射線毒性の増加などの問題がある。三次元原体放射線療法 (Three-Dimensional Conformal Radiation Therapy: 3D-CRT) は、NSCLC に有効な照射法であることが証明されており、正常組織の照射線量を避けながら、多方向から計画標的体積 (Planning target volume: PTV) 形状に合わせた照射野のビームを複数作成し、PTV を包含した線量分布を作成できることから、PTV に十分な線量を照射することができる。それにより、正常組織が原体的に回避され、より処方線量を標的に照射することができる¹²⁾。図1の (a) に3D-CRT の線量分布図を示す。IMRT は3D-CRT のより進化した照射法であり、最適化計算によって得られた複数の強度変調ビームを組み合わせることで、腫瘍への線量収束性の向上とリスク臓器 (Organs at Risk: OAR) の線量低減を達成することができる¹³⁻¹⁴⁾。一方で、IMRT は照射時間が長くなるため、治療中の患者の生理的な動きが照射線量分布に影響する可能性がある。さらに、Monitor Unit (MU) が増加することで、二次放射線誘発癌の発生率が増加する可能性がある¹⁵⁻¹⁶⁾。強度変調回転照射法 (Volumetric Modulated Arc Therapy: VMAT) は、多くの部位の癌治療において、IMRT よりも治療時間が短く、均一な標的線量分布と OAR 線量の低減を実現した¹⁷⁻¹⁸⁾。ただし、VMAT では患者の周りを回転しながら放射線を照射するため、低い線量域である V5 (5 Gy 以上照射される肺容積の全肺容積に対する割合) および V10 (10 Gy 以上照射される肺容積の全

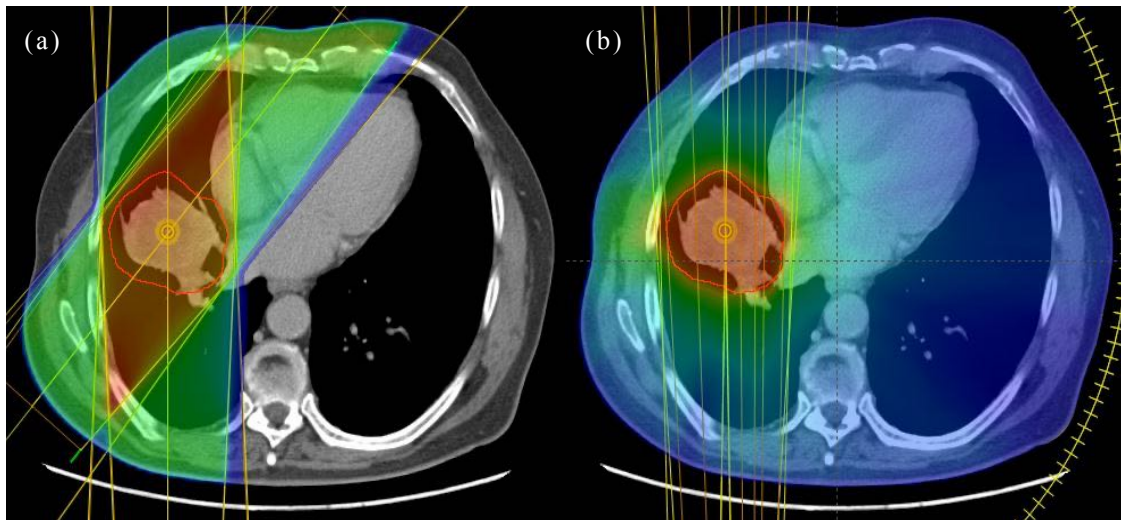


図1 3D-CRT (a) と VMAT (b) の線量分布図

肺容積に対する割合) が健常肺に広く拡散することが報告されている¹⁹⁾。図1の (b) に VMAT の線量分布図を示す。これらの V5²⁰⁻²¹⁾ および V10²²⁻²³⁾ の体積の増加は、放射線肺臓炎の誘発因子であることが示されている。これらの問題に対処するため、Akca らは、IMRT と single arc VMAT および 2partial arc VMAT を比較した研究を行った。2partial arc VMAT として180度の半円弧からの照射方法を使用した結果、2partial arc VMAT が肺全体での V5、V10、Mean lung dose (MLD) で single arc VMAT よりもそれぞれ3.0%、6.4%、1.4 Gy 低かった。健側を避けて患側のみに VMAT を用いることで、肺の低線量と平均線量を低減できることが証明された²⁴⁾。さらなる治療方法として、3D-CRT (または IMRT) と VMAT を組み合わせたハイブリッド 3D-CRT (IMRT)/VMAT (Hybrid-Volumetric Modulated Arc Therapy: H-VMAT) が研究されている。これは、

VMAT 計画の変法として使用され、VMAT と比較して肺と脊髄への線量を軽減できるといわれている²⁵⁾。

2. H-VMAT の概要

図2に NSCLC に対する H-VMAT の線量分布図を示す。H-VMAT は高度な放射線治療技術の一つであり、3D-CRT または IMRT と VMAT の照射法を組み合わせたハイブリッド放射線治療計画法である。H-VMAT は、VMAT を使用して腫瘍に収束した線量分布を達成することで、治療効果の向上を目指している。一方で、周囲の正常組織への無用な線量を最小限に抑えた照射を実現するものである。また3D-CRT は、照射角度や門数を調整して標的の形状に照射野を一致させることで、OAR に大線量が照射されることを避けた線量分布を作成することができる。つまり H-VMAT は、VMAT による腫瘍への線量収束の向上と、3D-CRT に

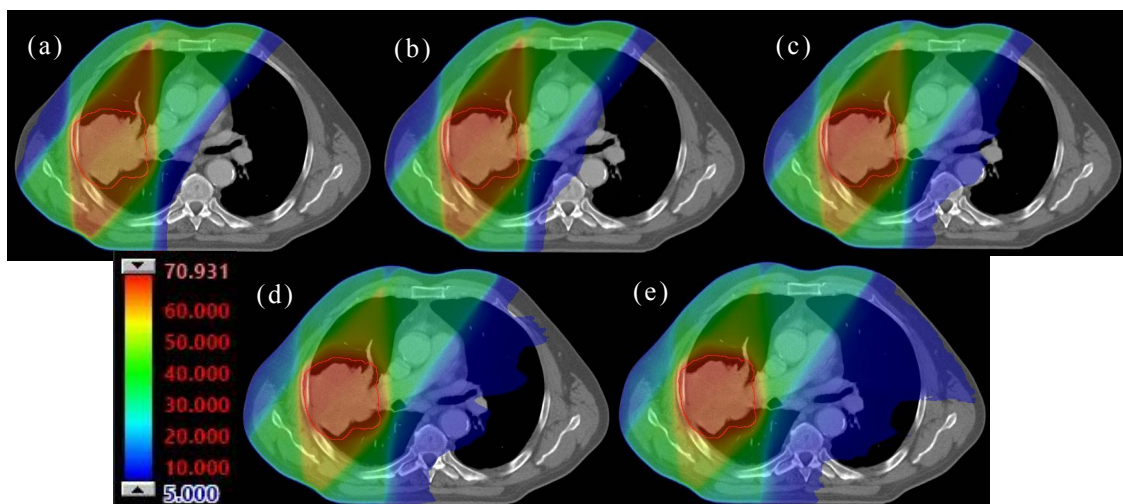


図2 H-VMAT の線量分布図

(VMAT 線量分配割合 : (a) 10%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%)

よるリスク臓器への高線量照射を回避する性質を組み合わせることで、標的に線量を集中させつつ、正常組織への線量を最適化することができる。また、3D-CRTの代わりにIMRTを用いた固定多門の強度変調照射と回転照射のVMATを組み合わせ、リスク臓器の線量を低減させ、標的に一致した線量分布を得ようとする方法もある。H-VMATは、腫瘍がリスク臓器の近傍にあり、照射範囲が不整形な場合に効果的な照射法となりうる。しかしながら、肺癌に対するH-VMATにはいくつかの欠点が存在する。VMATが回転照射であるため、対側の健常肺に対して低線量領域が広がってしまうという問題点がある。また、H-VMATは3D-CRTおよびVMATの技術を必要とするため、放射線治療チームにそれぞれの照射の知識と経験が要求される。

3. H-VMATの臨床応用

肺癌に対するH-VMATは臨床で実用されており、いくつかの方法が提案されている。Kun-hoら²⁹⁾は、2門の3D-CRTと、360°方向から2回転または180°方向から2〜3回転の照射を行うVMATを組み合わせたH-VMATプランについて、3D-CRT単独およびVMAT単独との計画線量分布を比較した。その結果、H-VMATは他の治療計画法と比べ、肺のV5およびV10が最も低くなり、その他の正常組織の線量はわずかに上昇したが許容線量を超えなかったことから、H-VMATにより放射線肺臓炎の発生率を低下できる可能性が示唆された。Chanら³⁰⁾は、5〜7門の3D-CRTと240°方向から2回転の照射を行うVMATを組み合わせたH-VMATを、3D-CRTおよびVMATの単独治療計画と比較した。結果として、H-VMATは肺のV20と平均線量を最も低くすることができ、3D-CRTと比較して総治療時間を平均39秒短縮できたことから、H-VMATが3D-CRTやVMATの単独治療計画法と比較して優れた照射法であることが示された。Hattuら³¹⁾は、前後対向2門照射と180°方向から2回転の照射を行うVMATを組み合わせたH-VMATにより、縦隔および心臓の線量はIMRT単独の方が優れていたが、肺のV5においてはH-VMATは有意に線量低減が可能であることを示した。IMRTとVMATを組み合わせたH-VMATとして、Azaklıoğluら³²⁾は、3D-CRTと2つの異なるIMRT/VMATの線量分配の比率（10%および50%）を組み合わせたプラン（それぞれh-IMRT1、h-IMRT2およびh-VMAT1、h-VMAT2）と3D-CRT単独照射法との比較を行った。なお、VMATは患側194°方向からの2つの部分アークを用いている。その結果、い

れのH-VMATにおいても全肺および健側肺のV5は3D-CRT単独照射法に比べて増加した。また、IMRT/VMATの線量分配比率が低いほど、H-VMATでの全肺および健側肺のV5が減少した。さらに、h-IMRT1はh-IMRT2と比較して、全肺および健側肺のMLD、健側肺のV20が減少し、h-VMAT1はh-VMAT2と比較し全肺のV20と対側肺のMLDが減少した。これらのことから、肺の低線量・中線量を減らすためにはハイブリッドプランにおいてはIMRTまたはVMATの線量割合を10%にするのが適切であると示された。

Zhaoら³³⁾とSaglamら³⁴⁾は、5〜8門のIMRTと180°方向から2回転照射のVMATを組み合わせたH-VMATを作成し、IMRT、VMATそれぞれの単独照射法と比較した。VMATとIMRTを組み合わせたH-IMRT/VMATは、標的線量の均一性と収束性が大幅に改善した。IMRTおよびVMAT単独の照射法と比較して、健側肺のMLDがわずかに高くなったが、VMAT単独の照射法のものよりは減少したため、H-IMRT/VMATは総MUを低減させ、OARの線量低減を実現することのできる優れた放射線治療技術となることが示された。

H-VMATを化学放射線療法に用いた研究では、Silvaら³⁵⁾は、初めて同時化学療法実施患者に対して、VMATと3D-CRTを組み合わせたH-VMATと3D-CRT、VMATそれぞれの単独照射法を比較した。H-VMATは3D-CRTより全肺のV20、MLDを大幅に減少させ、VMATより健側肺のMLDを有意に低減した。そして、H-VMATおよびVMATプランでは11プラン中9プランで肺のV20が25%であったが、3D-CRTプランでは11プランすべてで肺のV20が25%を超過した。よって、H-VMATを使用して健常肺への線量を低減し、放射線肺臓炎のリスクを低減できる可能性が示唆された。さらに、化学療法を併用し肺腫瘍に60〜66 Gyを照射したが、グレード3以上の放射線肺臓炎は報告されなかった。よって、H-VMATは放射線障害のリスクを低減できることから、大きな肺腫瘍や縦隔リンパ節の腫脹、およびステージIIIの疾患の治療には、3D-CRTよりもH-VMATの方が好ましい可能性があると結論付けられた。

4. 考察

H-VMATは3D-CRTと比較して、肺のV20とMLDを大幅に抑え、腫瘍線量の均一性と収束性の改善が可能である。またIMRTと比較して、低MUで腫瘍線量の均一性と収束性を改善し、治療時間を短縮できる。さらにVMATと比較して、肺のV5、V10、V20、MLDを低減でき、総MUを抑えて健側肺へ低線量広がり

を抑えることが可能である。一方で、3D-CRTと比較して、正常組織の低線量被ばく、全肺および健側肺のV5が高くなった。IMRTと比較して、正常肺の平均線量が若干増加し、縦隔付近の腫瘍では縦隔と心臓の線量低減にはIMRTの方が優れていた。VMATと比較して、腫瘍線量の収束性が低下し、健側肺のMLDと縦隔付近の腫瘍では縦隔や心臓線量がわずかに上昇した。

表1に先述したH-VMATの臨床例における各論文の情報を示す。H-VMATにおける3D-CRTおよびVMATへの線量分配割合は、研究によって様々なものが報告されている。3D-CRTに対してIMRTやVMATの線量を処方線量の10%と低く設定することで、肺の低・中線量、特にV5を抑えることができるとされている。一方で、この線量分配割合は腫瘍の位置や大きさに依存すると考えられ、分配割合の適正値は定かでない。よって、H-VMATにおける3D-CRTおよびVMATへの線量分配割合が、健側肺の低線量値に与える影響を明らかにする必要があると考えられる。

肺の低線量の増加は、H-VMATに含まれるVMATによる照射が主な原因である。VMATでは患者の周りを回転しながらビームを照射するため、腫瘍周辺以外の正常組織にまで広くビームが照射されることで低線量が広範囲に拡散する。この肺の低線量は放射線治療後の放射線肺臓炎の誘発原因となるため、なるべく低くする必要がある。肺への低線量照射と放射線肺臓炎との関係は、疫学研究やガイドライン等で示されている。Shaikhら³⁶⁾は、食道癌の放射線治療を受けた患者139人（胸部上部/中部が12人、胸部下部/食道胃接合部が127人）を5年間追跡調査した。その結果、V5、V10、V20、およびV30がグレード2の放射線肺臓炎のリスクと正の相関があることが示唆された。この研究の中で、V5が65%未満、V20が25%未満であることがグレード2の放射線肺臓炎の閾値として特定

された。またNCCNのガイドライン³⁷⁾では、高度(CTCAE grade2以上)な放射線肺臓炎発症のリスクを低下させるために、V20が正常肺全体の体積の35%以下（化学療法同時併用では30%以下）になるように計画することが推奨されている。V20を35%以下に抑えることは、特に70歳以上の高齢者の治療においては重要とされている。これらを解決する手段としては、H-VMATにおけるVMAT成分の総線量に対する割合を低く設定することが一般的である。しかし、VMAT成分を下げすぎてしまうと腫瘍線量の収束性が悪化し、高線量が腫瘍周辺に拡散してしまう。そのため、腫瘍とリスク臓器との位置関係や肺の低線量をガイドライン以下に留めるなどの、バランスの取れたVMAT線量割合を模索する必要がある。

5. まとめ

肺癌に関する統計によれば、世界では年間224万人が罹患し、180万人が死亡しており、特に日本では死亡者数が増加している。治療法としては手術、放射線治療、全身療法があり、放射線治療は手術が難しい場合や局所進行性肺癌に適用される。治療技術の進歩により、放射線治療はより正確で迅速に行えるようになっていく。NSCLCの放射線治療では、肺の被ばくや正常組織の放射線障害の発生が懸念されている。3D-CRTやIMRTは有効な治療法だが、照射線量の収束性の低下と照射時間の延長が問題である。VMATは治療時間を短縮し、標的線量分布を向上させるが、健常肺へ低線量が広がる。この課題に対処するため、H-VMATは腫瘍線量の収束性を改善しながら肺野への低線量の広がりを抑制し、放射線肺臓炎のリスクを低減できる可能性がある。一方で、3D-CRTとVMATの線量分配割合は最適な値が明らかでないため、腫瘍の位置や大きさに応じた検討が必要である。

表 1 H-VMAT 研究結果

Author	Patient	Cancer	Total dose	Plan	Dose
Lee Kun-ho et al ²⁹⁾	25	NSCLC:20 SCLC:5	44 Gy/22 fr	H-VMAT	not listed
Oscar S.H. Chan et al ³⁰⁾	24	StageIIIA,B	60 Gy	h-VMAT	3D-CRT:VMAT=5:5
Djoya Hattu et al ³¹⁾	26	NSCLC	60 Gy/30 fr	Hybrid	3D-CRT:VMAT=2:1
Ömer Azaklıoğlu et al ³²⁾	8	not listed	Median : 5,475 cGy (4,800~6,600)	h-IMRT1 h-IMRT2 h-VMAT1 h-VMAT2	3D-CRT:IMRT=9:1 3D-CRT:IMRT=5:5 3D-CRT:VMAT=9:1 3D-CRT:IMRT=5:5
Nan Zhao et al ³³⁾	15	NSCLC	66 Gy/33 fr	h-IMRT/VMAT	IMRT:VMAT=5:5
Yucel Saglam et al ³⁴⁾	10	NSCLC	70 Gy/35 fr	HA-IMRT	IMRT:VMAT=6:4
Scott R. Silva et al ³⁵⁾	11	StageIII concurrent chemotherapy	59.4~66 Gy/30~35 fr	h-VMAT	3D-CRT:VMAT=6:4

謝 辞

本論文で参考にさせていただいた全ての先生方に感謝致します。

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) Sung H, Ferlay J, Siegel R L, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F, et al: Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer J Clin.* 2021; 71: 209-249.
- 2) 国立研究開発法人国立がん研究センター：国立がん研究センター がん情報サービス：がん登録・統計 2022. https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html, 2023年1月23日.
- 3) Siegel R, Naishadham D, Jemal A: Cancer statistics, 2012. *CA Cancer J Clin.* 2012; 62:10-29.
- 4) 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: 160-166
- 5) 日本肺癌学会：肺癌診療ガイドライン-悪性胸膜中皮腫・胸腺腫瘍含む-2022年版. 第7版. 東京. 金原出版. 2022: 70-127
- 6) 白日高歩, 小林紘一：肺癌外科切除例の全国集計に関する報告. *肺癌.* 2002; 42: 555-566.
- 7) Hayakawa K, Mitsuhashi N, Saito Y, Nakayama Y, Futa M, Sakurai H et al: Limited field irradiation for medically inoperable patients with peripheral stage I non-small cell lung cancer. *Lung Cancer.* 1999; 26: 137-42.
- 8) Kong FM, Haken RK, Schipper MJ, Sullivan MA, Cheb M, Lopez C, et al: High-dose radiation improved local tumor control and overall survival in patients with inoperable/unresectable non-small cell lung cancer: long-term results of a radiation dose escalation study. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2005; 63: 324-33.
- 9) Narayan S, Henning GT, Haken RK, Sullivan MA, Martel MK, Hayman JA: Results following treatment to dose of 92.4 or 102.9 Gy on a phase I dose escalation study for non-small cell lung cancer. *Lung Cancer.* 2004; 44: 79-88.
- 10) Chen M, Hayman JA, Haken RK, Tatro D, Fernando S, Kong FM: Long-term results of high-dose conformal radiotherapy for patients with medically inoperable T1-3N0 non-small-cell lung cancer: is low incidence of regional failure due to incidental nodal irradiation? *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2006; 64: 120-6.
- 11) 日本肺癌学会：EBMの手法による肺癌診療ガイドライン 2016年版. 第4版. 東京. 金原出版. 2016: 84-105
- 12) Patel RR, Mehta M: Three-dimensional conformal radiotherapy for lung cancer: promises and pitfalls. *Curr Oncol Rep.* 2002; 4: 347-353.
- 13) Bree ID, van Hinsberg MG, van Veelen, LR: High-dose radiotherapy in inoperable nonsmall cell lung cancer: comparison of volumetric modulated arc therapy, dynamic IMRT and 3D conformal radiotherapy. *Med Dosim.* 2012; 37: 353-357.
- 14) Liao ZX, Komaki RR, Thames HD Jr, Liv HH, Tucker SL, Mohan R, et al: Influence of technologic advances on outcomes in patients with unresectable, locally advanced non-small-cell lung cancer receiving concomitant chemoradiotherapy. 2010; 76: 775-781.
- 15) Dörr W, Herrmann T: Second primary tumors after radiotherapy for malignancies. *Treatment-related parameters. Strahlenther Onkol.* 2002; 357-362.
- 16) Hall EJ: Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers. *International Journal of Radiation Oncology•Biology•Physics.* 2006; 65: 1-7.
- 17) Pasler M, Georg D, Bartelt S, Latterbach J: Node-positive left-sided breast cancer: does VMAT improve treatment plan quality with respect to IMRT? *Strahlenther Onkol.* 2013; 189: 380-386.
- 18) Holt A, Van Gestel D, Arends MP, Korevaar EW, Schuring D: Multi-institutional comparison of volumetric modulated arc therapy vs. intensity-modulated radiation therapy for head-and-neck cancer: a planning study. *Radiat Oncol.* 2013; 8: 26.
- 19) Jiang X, Li T, Liu Y, Zhou L, Xu Y, Zhou X, Gong Y: Planning analysis for locally advanced lung cancer: dosimetric and efficiency comparisons between intensity-modulated radiotherapy (IMRT), single-arc/partial-arc volumetric modulated arc therapy (SA/PA-VMAT), *Radiat Oncol.* 2011; 6: 140.

- 20) VanRiet A, Mak AC, Moerland MA, Elders LH, Van Der Zee W: A conformation number to quantify the degree of conformality in brachytherapy and external beam irradiation: application to the prostate, *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1997; 37: 731-736.
- 21) Abbas AS, Moseley D, Kassam Z, Kim SM, Cho C: Volumetric-modulated arc therapy for the treatment of a large planning target volume in thoracic esophageal cancer, *J Appl Clin Med Phys.* 2013; 14: 192-202.
- 22) Lee TF, Chao PJ, Ting HM, Lo SH, Wang YW, Tuan CC, et al. Comparative analysis of SmartArc-based dual arc volumetric-modulated arc radiotherapy (VMAT) versus intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for nasopharyngeal carcinoma, *J Appl Clin Med Phys.* 2011; 12: 3587.
- 23) Studenski MT, Bar-Ad V, Siglin J, Cognetti D, Curry J, Tuluc M, Harrison AS: Clinical experience transitioning from IMRT to VMAT for head and neck cancer, *Med Dosim.* 2013; 38: 171-175.
- 24) Akcay M, Etiz D, Duruer K, Bozdogan O, Ozen A: Dosimetric comparison of single-arc/partial-arc volumetric modulated arc therapy and intensity-modulated radiotherapy for peripheral and central lung cancer, *J Cancer Res Ther.* 2021; 17: 80-87.
- 25) Kim ST, An HJ, Kim J, Yoo JR, Kim HJ, Park JM: Non-coplanar VMAT plans for lung SABR to reduce dose to the heart: A planning study. *Br J Radiol.* 2020; 93: 93-96.
- 26) Ma M, Ren W, Li M, Niu C, Dai J: Dosimetric comparison of coplanar and noncoplanar beam arrangements for radiotherapy of patients with lung cancer: A meta-analysis. *J Appl Clin Med Phys.* 2021; 22: 34-43.
- 27) Cheung EYW, Lee KHY, Lau WTL, Lau APY, Wat PY, I: Non-coplanar VMAT plans for postoperative primary brain tumour to reduce dose to hippocampus, temporal lobe and cochlea: A planning study. *BJR Open.* 2021; 3, 20210009.
- 28) Steber JL, Silva S, Harkenrider MM, Surucu M, Choi MI: Clinical Application of a Hybrid Volumetric Arc Therapy Technique for Locally Advanced Lung Cancer. *International J Rad Oncol•Bio•Phys.* 2015; 93: E595.
- 29) Lee GH, Kang HS, Choi BJ, Park SJ, Jeong DE, Lee DS, Ahn MW et al: Evaluation of the usefulness of Hybrid-Volumetric Modulated Arc Therapy in lung cancer radiation treatment. *Journal of the Korean Society of Radiation Therapy* 2017; 29(2): 19~26
- 30) Chan OSH, Lee MCH, Hung AWM, Chong ATY, Yeung RMW, Lee AWM: Treatment planning of lung cancer The superiority of hybrid-volumetric arc therapy (VMAT) technique over double arcs VMAT and 3D-conformal technique in the treatment of locally advanced non-small cell lung cancer - A planning study. *Radiother Oncol.* 2011; 101: 298-302
- 31) Hattu D, Emans D, Stope JVD, Canters R, Loon JV, Ruyscher DD: Original Research Article Comparison of photon intensity modulated, hybrid and volumetric modulated arc radiation treatment techniques in locally advanced non-small cell lung cancer. *Phys Imaging Radiat Oncol.* 2023; 28: 100519
- 32) Azaklıoğlu Ö, Akçay D, Er İ, Akgüngör K, Demiral A N. Comparison of Hybrid Techniques with 3D-Conformal Radiotherapy in Patients with Lung Cancer. *J Bas Clini Heal Scie.* 2023; 7: 50-57.
- 33) Zhao N, Yang R, Wang J, Zhang X, Li J: Research Article An IMRT/VMAT Technique for Nonsmall Cell Lung Cancer, *Biomed Res Intl.* 2015; 7: 613060
- 34) Saglam Y, Bolukbasf Y, Alban V, Tpkam E, Kirsner S, Ballo M, et al. Hybrid Arc Could Combine the Benefits of IMRT and VMAT to Deliver a Fast, Conformal, Homogeneous Treatment in Non-Small Cell Lung Cancer without Limitations of Low Dose Bath: A Planning Study. *ULUSLARARASI HEMATOLOJİ-ONKOLOJİ DERGİSİ* Number. 2017; 3: 161-170
- 35) Silva SR, Surucu M, Steber J, Harkenrider MM, Choi M: Clinical Application of a Hybrid RapidArc Radiotherapy Technique for Locally Advanced Lung Cancer. *Technol Cancer Res Treat.* 2017; 16(2): 224-230.
- 36) Shaikh T, Churilla TM, Monpara P, Scott WJ, Cohen SJ, Meyer JE: Risk of radiation pneumonitis in patients receiving taxane-based tri-modality therapy for locally advanced esophageal cancer. *Pract Radiat Oncol.* 2016; 6(6): 388-394.
- 37) Ettinger DS, Wood DE, Asuner DL, Alkerley W, Bauman JR, Bharant A, et al: Non-Small Cell Lung Cancer, Version 3.2022, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology: *J Natl Compr Canc Netw.* 2022; 20: 497-530.

Abstract

Radiotherapy and H-VMAT in lung cancer

Kenta Suga¹⁾, Keisuke Usui^{1, 2)}

¹⁾ Graduate school of Health Science, Juntendo University

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

Lung cancer is the second-most common cancer worldwide, with a notable increase observed in Japan. In 1998, it became the leading cause of death, and in 2020, 75,600 individuals succumbed to lung cancer. Non-small cell lung cancer (NSCLC) is the predominant form, treated through surgery, radiation therapy, and systemic therapy. Advancements in radiation therapy, particularly Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) and its evolution, Hybrid-VMAT (H-VMAT), have garnered attention. While VMAT reduces treatment time and enhances target dose distribution, concerns arise about the potential spread of low doses in the lungs, leading to radiation pneumonitis. By combining 3D-CRT, IMRT, and VMAT, H-VMAT solves this problem by making sure that the dose is tailored to the tumor while avoiding giving too much radiation to healthy tissues nearby. Research suggests that H-VMAT may suppress low doses in the lungs, potentially reducing the risk of radiation pneumonitis. However, challenges remain, as VMAT's characteristics may result in low-dose spread to the contralateral healthy lung. In clinical applications, H-VMAT proves effective, especially near risk organs or in cases with irregular irradiation areas. Nevertheless, individual patient characteristics and treatment factors must be considered. Overall, H-VMAT emerges as a promising option in lung cancer radiation therapy, potentially surpassing other methods. Future clinical trials and assessments on diverse patient populations are anticipated to validate its effectiveness.

Key Words: NSCLC, 3D-CRT, IMRT, VMAT, H-VMAT

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 46-53, 2024]

X 線 CT のモーションアーチファクト低減技術の変遷と臨床への応用

鈴木拓哉¹⁾、坂本肇¹⁾、室井健三²⁾、臼井桂介¹⁾、坂野康昌¹⁾、京極伸介¹⁾、代田浩之¹⁾

¹⁾ 順天堂大学大学院保健医療学研究科

²⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

X 線 Computed Tomography (CT) 検査では、検査中の被検者の体動によってモーションアーチファクトが生じる。モーションアーチファクトが生じる要因となるのは、心拍動や呼吸運動、救急患者や乳幼児のような検査中の姿勢保持が難しい被検者の体動などが挙げられる。モーションアーチファクトによって画像にボケが生じ、画像診断や評価・解析を行う際の精度を低下させる問題がある。これまで、モーションアーチファクト低減を目的にハードウェア面とソフトウェア面で様々な技術開発が進められている。ハードウェア開発によるモーションアーチファクト低減技術では、検出器の多列化、Dual-Source CT による時間分解能の向上、心電図同期撮影法などに関する報告がある。ソフトウェア開発によるモーションアーチファクト低減技術では、Half reconstruction、高時間分解能再構成、体動補正ソフトに関する報告がある。近年では深層学習を用いたモーションアーチファクト低減技術に関する研究として、敵対的生成ネットワークに関する報告がある。本稿では、X 線 CT のモーションアーチファクト低減技術の変遷と臨床への応用について紹介する。

キーワード：X 線 CT、モーションアーチファクト、心電図同期撮影法、体動補正ソフト、深層学習

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 54-61頁, 2024年 (受付 2024.2.7.; 受理 2024.4.24.)

緒 言

X 線 Computed Tomography (CT) 装置は、1973年にロンドンの Electrical and Musical Industries 社の Godfrey N. Hounsfield によって発表された¹⁻³⁾。コンピュータ断層撮影技術は、1スキャンに時間を要する並進回転式の第一世代 CT 装置から、高速でスキャン可能な第四世代 CT 装置へと進化を遂げてきた⁴⁾。

X 線 CT における画像診断で問題となるのはアーチファクトである。アーチファクトは、「画像に現れる人体情報以外の二次元的障害陰影、被写体の動き、装置の不具合などによって発生する疑似画像」⁵⁾であり、X 線 CT 撮影では様々なアーチファクトが発生する。装置の故障によって発生するアーチファクトには、リング状アーチファクト、ストリーク状アーチファクト、シャワー状アーチファクトのほか、画像再構成系に起因するものなどがある。スキャン状況で発生するアーチファクトには、モーションアーチファクト、ビームハードニングによるアーチファクト、パーシャルボリューム効果によるアーチファクト、メタルアーチファクト、液面アーチファクトがある。その他、ヘリカルスキャンにおけるヘリカルアーチファクトやステ

アステップアーチファクトなど様々なアーチファクトがある⁶⁾。

これらの中でモーションアーチファクトは、スキャン中の被写体の動きに起因するアーチファクトである。最善の対策は被検者の協力であるが、困難な場合も多い。体動だけでなく、呼吸運動や心拍運動にも注意が必要である⁶⁾。特に救急撮影や小児の撮影では、被検者による撮影中の息止めや撮影中の姿勢の保持が困難であることがある。

モーションアーチファクト低減を目的に、これまでハードウェアやソフトウェアの開発が進められており、近年では深層学習を用いた方法も取り入れられてきている⁷⁻¹⁰⁾。

本稿では X 線 CT のモーションアーチファクト低減技術の変遷と画像診断への応用について、ハードウェアとソフトウェアに分けて概説するとともに、近年研究が進められている深層学習を用いた活用事例⁷⁻¹⁶⁾ について紹介する。

1. ハードウェアの開発

1) 検出器の多列化による時間分解能の向上

Hounsfield により開発された初めての X 線 CT 装置

は患者をスキャンするのに15時間かかった。1972年当時の X 線 CT 装置のガントリ回転時間は5分であったが、1990年初頭の単検出器 (Single Detector: SD) CT 装置の開発、そしてその後の多検出器 (Multi Detector: MD) CT 装置の開発により、ガントリ回転時間は1秒以下へと大幅に短縮された歴史がある¹⁷⁾。検査時間の短縮は、特に小児、老人、外傷、心臓など、自発的または非自発的な患者の動きの影響を受ける検査において利点がある。MDCT による時間分解能の大幅な向上により、複数の心周期から情報を取得するためのセグメント化された再構成が可能になった。MDCT のセグメント化された再構成アルゴリズムは、2つの心周期からのデータを使用して時間分解能を向上させることにより、優れた画質で心臓をイメージングできる。これらの開発の結果、心臓 CT は冠動脈カルシウムスコアの測定から高解像度の冠動脈造影および非石灰化ソフトプラークが検出可能になるまで発展した⁴⁾。

MDCT においてガントリが回転するたびに複数の投影データを取得できるため、より薄いスライスで高解像度を得ることができ、スキャン時間も短縮できる。Lemos らの研究では、SDCT に比べ MDCT では検査時間が短いため、小児への鎮静剤投与の必要性が減った結果が示された¹⁸⁾。

2) 心電図同期撮影法

心臓や隣接する肺血管は急速に動く臓器であるため、ボケやアーチファクトに影響する。冠動脈は不均一に動き、変形するため、運動速度が CT 装置の時間分解能を超えるとモーションアーチファクトが発生する。モーションアーチファクトは冠動脈画像を不鮮明にさせ、冠動脈狭窄の診断不能または不正確な診断につながる可能性がある¹⁹⁾。

動きをできる限り小さく、静止したように撮影するために現在では心臓 CT において、electrocardiogram (ECG) ゲーティングを使用して動きを減らし、β遮断薬で心拍数を遅くし、ニトログリセリンで冠動脈を拡張することで良好な冠動脈像を取得している²⁰⁾。心電図をトリガ情報として同期収集させる。収集方法としては Prospective 法と Retrospective 法の2つがある^{21, 22)}。

(1) Prospective 法

Prospective 法は、心電図の R 波間隔を100%とした場合の相対遅延時間を例えば75%とあらかじめ決定し、その相対遅延時間に合わせてハーフスキャンによるコンベンショナルスキャンを行う方法である。本法はヘリカルスキャンに比べて被ばく線量が抑えられる

というメリットはあるが、2次元の Axial 像しか得られず、高精度の3次元データは得ることができない。また、この方法はあらかじめ決定した心拍数に対しての相対遅延時間をもとに撮影されるため、予測していた心拍動と撮影時の心拍動にずれが生じた場合や撮影中に不整脈等が出現すると、同期が不十分になり静止した明瞭な画像が得られない²³⁾。

(2) Retrospective 法

Retrospective 法は、ヘリカルスキャンでの撮影と同時に心電図データも収集し、得られた生データから最適な心位相の画像データを得る方法である。得られるボリュームデータは高い体軸方向の空間分解能を有し、Volume Rendering (VR)、Maximum Intensity Projection (MIP)、Curved Planar Reformat (CPR) 画像作成に使用される。Retrospective 法はヘリカルスキャンのため Prospective 法と比較すると被ばく線量は増えてしまうが、全心位相の画像再構成が可能なことから、不整脈症例でも至適位相を探して再構成することが可能である²³⁾。

心電図同期撮影法は心臓、特に冠動脈の撮影のために開発された手法であるが、大動脈疾患にも有用である。具体的には、大動脈解離、特に急性大動脈解離では、剥離内膜 (intimal flap) が激しく動いているので通常の方法で撮影すると、モーションアーチファクトにより剥離内膜の静止画像を得ることが困難である。ここで問題なのは、このアーチファクトのためにエントリー (入口) の評価が困難になることである。急性大動脈解離の手術では、entry (tear) oriented surgery と呼ばれるエントリーを含んだ部位の大動脈の人工血管置換術が行われるため、エントリー部位の診断はきわめて重要である。この対策として心電図同期撮影が有用である。心電図に同期して撮影を行った後に拡張期の画像を再構成することで、静止した状態の剥離内膜の画像が得られ、エントリー部位の診断が可能となる²⁴⁾。

Roos らは、胸部大動脈における X 線 CT 撮影で、ECG 同期 MDCT と ECG 非同期 MDCT を用いて、放射線技師による視覚的な4段階評価にてモーションアーチファクトの程度を比較した。その結果、ECG 非同期 MDCT では、ECG 同期 MDCT で取得した Prospective 法と Retrospective 法の両者の画像と比較して、モーションアーチファクトが優位に多いという結果となった。ECG 同期 MDCT は心臓や冠動脈の撮影だけでなく、胸部大動脈の X 線 CT 撮影においても有用であることが示されている²⁵⁾。

3) Dual-Source CT (DSCT) を使用した撮影

(1) DSCT システムのコンセプトと設計

2つの X 線管と対応する2つの検出器のペアを持ち、角度90度のオフセットでガントリに取り付けられている²⁶⁾。

(2) DSCT の特徴

DSCT の第一の利点は、時間分解能の向上である。一般に心臓の画像再構成には部分スキャンが用いられる。画像再構成するには少なくとも180度の平行光線投影が必要である。Single-Source CT (SSCT) はこのデータ量を提供するために半回転+ファン角度 (約50～60度) を必要とする。同じ回転時間であれば、ハーフスキャンデータセットを連続する心周期から得られる小さなセグメントに分割することで、SSCT の時間分解能を向上させることができる。このマルチセグメントアプローチは、各心周期間での冠動脈の位置の変動が無視できるという仮定に依存している。さらに、心臓の運動周期はガントリの回転に対して適切に非同期化される必要があり、異なる心周期で取得された相補的なデータセグメントが、同じ心位相でハーフスキャンサイノグラムに加算される。しかし、この方法による時間分解能は、患者の心拍数と安定した予測可能な心運動に強く依存する。一方、DSCT では、90度の回転角でシフトされた2つの部分データセグメントが、同じ解剖学的レベルで同時に取得される。2組の投影データは完全な (180度) サイノグラムに合成される。各測定系は90度のデータのみを提供すればよいので、露光時間は2分の1に短縮される。臨床における確実な心臓イメージングには、心拍数に依存しない0.1秒未満の時間分解能が望ましい²⁷⁾。SSCT のハーフスキャンにおいて、0.1秒未満の時間分解能を達成するためには0.2秒未満の回転時間が必要となるが、遠心力に装置が耐えられないという機械的な制限から実現できていない。そのため、SSCT では心臓イメージングの時間分解能を向上させるために、マルチセグメントアプローチ技術を使用している。DSCT では、管球回転速度0.28秒/回転に対する約1/4 (ハーフ再構成+2管球に検出器ファン角を考慮) の0.075秒という圧倒的な時間分解能が得られ²⁸⁾、心臓イメージングに必要な時間分解能を達成できる。また、時間分解能をさらに向上させるために、マルチセグメントアプローチをDSCT に適用することができる。

DSCT 技術のもう一つの新しい応用は、「高ピッチ」であり、高速ヘリカルスキャンのためのピッチモードである。SSCT によるギャップレス Z 軸サンプリング

は、最大ピッチ値1.5に制限されることはよく知られている。1つの測定システムしか存在しない場合、ピッチが1.5より大きくなるとギャップが開くことから、DSCT の第2の測定システムは所望のスキャン視野にに応じて、はるかに高ピッチでギャップレスなボリューム範囲が提供されている²⁷⁾。

心電図同期での胸部大動脈撮影は35～40秒の息止めを必要とし、心拍は60～100bpm の範囲で心電図の R 波と R 波の間隔が一定である必要がある。救急時、大動脈の傷害や解離では息止めはできず、頻脈である患者が多いため ECG ゲートの使用は難しい^{25, 26, 29, 30)}。ガントリの回転時間の短縮とデュアルソーススキャナーにより、時間分解能が向上し、画像内の心臓の動きを効果的にフリーズすることにより、高心拍数や不整脈の場合でも高品質の画像を可能にしている³¹⁾。

Nakagawa らの研究では、高ピッチ DSCT は、SSCT と比較して胸部大動脈のモーションアーチファクトの低減や時間分解能の向上が見られ、頻脈や息止めなしの患者の放射線診断を可能とし、被ばく線量も減少されたことが示されている³¹⁾。

2. ソフトウェアの開発

1) 一つの X 線管を用いた短時間撮影

(Half reconstruction)

Half reconstruction³²⁾ は、180度+ファン角のデータのみで画像再構成する方法である。ファン角(γ)分のデータも利用して、180度+2 γ 分の投影データを用いて、残った未スキャンスペースを直接埋める方式が一般的な Half reconstruction である³³⁾。Half reconstruction の時間分解能は、線形補間法の1つである180度線形内挿法 (180度 Linear Interpolation) と比較して高くなる。

山本らの研究では、180°線形内挿法と比較して Half reconstruction がより心臓の動きによる影響を抑制していることが示唆された³³⁾。ハーフスキャンは、心臓や呼吸による生理的な動きを低減するのみでなく、特に狭い体軸方向の範囲を薄いスライス厚でスキャンし、かつ拡大して観察する肺野 High Resolution CT (HRCT) において、微細な臨床情報を得るのに最適な方法であることが示された³³⁾。肺野 HRCT における心臓辺縁部の動きのアーチファクトを低減することが可能な高速ハーフスキャン法に着目して、その有用性が実験から評価された。その結果、従来の線形補間法で得られていた画質をほとんど損なうことなく、時間分解能を改善したハーフスキャン画像が得られた¹⁷⁾。

歯科用 CT のガントリ回転時間は1回転当たり10秒で、医療用 CT よりもはるかに遅い。そのため、歯科

用 CT は医療用 CT よりも、主に頭の動きによって引き起こされるモーションアーチファクトの影響を受けやすくなる。ハーフスキャンはフルスキャンよりもスキャン時間を2分の1に短縮できるため、モーションアーチファクトを軽減できる³⁴⁻³⁸⁾が、投影データが適切に処理されていない場合、特に骨などの高密度オブジェクトの周囲に、シェーディングまたはストリーク形状のハーフスキャンアーチファクトが発生する場合がある。従来は、「Parker weighting 法」を用いてハーフスキャンアーチファクトを除去するが、強い残留ハーフスキャンアーチファクトと高い CT ノイズを有することがある³⁹⁾。

2) 高時間分解能再構成 high temporal resolution

reconstruction (HTRR) アルゴリズムを用いた方法

HTRR アルゴリズムとは、従来の再構成アルゴリズムに特殊な weight function を加えたもので、画像再構成に使用される一回転データの中心である180度を再構成の中心とし、この中心部の重み係数を最大の1.0とし、中心からずれた部位では、スキャンデータのずれに比例した三角形上の線形重み付けを行う再構成方法である⁴⁰⁾。

沈雲らの研究では、HTRR アルゴリズムを使用したファントム実験において、空間分解能は Full reconstruction が最も優れ、次に Half reconstruction が続き、HTRR アルゴリズムは最も劣る結果となった。反面、密度分解能とノイズは Full reconstruction と HTRR アルゴリズムが同等となり、Half reconstruction が劣る結果となった。また、HTRR アルゴリズムを使用した臨床例においては、心拍動によるモーションアーチファクトの軽減（心臓の輪郭の鮮明な描出）が可能であり、肺血管陰影も1本の線として描出でき、息止めを施行していない患者の肺でも良好な時間分解能とモーションアーチファクト軽減効果が得られた⁴⁰⁾。HTRR アルゴリズムは、Full reconstruction および Half reconstruction と比較して空間分解能は低下するが、それを上回る良好なアーチファクト軽減効果と時間分解能を有しており、心臓領域および肺の HRCT に適するアルゴリズムであることが示唆された⁴⁰⁾。

HTRR アルゴリズムの開発により、実効時間分解能の向上、信号雑音比の向上およびモーションアーチファクト軽減が得られ、さらに subsecond CT および心電図による時相情報を併用することにより、心拍動のモーションアーチファクトが軽減可能となった⁴⁰⁾。

酒井らの研究によると、HTRR の使用は、有効時間分解能の向上により、放射線被ばくを増加させること

なく心臓の動きによるアーチファクトの軽減に役立つことが示された⁴¹⁾。

3) 体動補正ソフト automatic patient motion correction (APMC) を用いた再構成による体動抑制

APMC は、サイノグラム上で0度および360度近辺の重み付けを調整して、モーションアーチファクトを軽減する再構成法である。

高柳らの研究では、冠動脈 CT において、Full reconstruction で軽度のモーションアーチファクトのある冠動脈が、APMC 再構成を用いるとモーションアーチファクトがなく、評価可能になる結果が示された。これは、Half reconstruction でも同様の結果であったが、画像ノイズが Half reconstruction よりも APMC 再構成法で少なくなったことから、冠動脈 CT において APMC 再構成法を用いた体動補正技術の有用性が示された⁴²⁾。

3. 深層学習を用いた方法

1) 敵対的生成ネットワーク GAN (Generative Adversarial Network) モデル

GAN は、生成ネットワークと識別ネットワークから構成されている。この2つのネットワークが互いに対立することで、ネットワークのパラメータを最適化し、新しい画像を生成する。GAN は、競合するパターンに従って画像を生成するためのニューラルネットワークアーキテクチャである。生成器はデータの分布から学習し、できる限り学習データに近い画像を生成する。生成されたサンプルが、ペアとなる参照画像と類似性の高い「本物」なのか、「偽物」なのかを判別する役割が識別器である。生成器と識別器の拮抗的なイタレーションにより、最終的に生成された画像は参照画像に近く、識別器はそれを偽物と判断できないという動的平衡に達する^{8,9)}。

従来の GAN は、入力に対応した画像を出力することができず、出力サンプルの種類を制御することができなかった。pix2pix では、画像を生成器の入力とし、生成器の入力と出力を合わせて識別機の入力とすることで、モデル全体の入力と出力の相関が確保された⁸⁾。図1に GAN と pix2pix の構成図を示す。識別器の入力データは、動きのある参照画像と動きのない参照画像、GAN で生成された参照画像と動きのない参照画像の2組での画像である。生成器は一般的な「U-Net」¹⁰⁾ ベースのアーキテクチャで構成され、層 i から層 n-i までの活性化を連結するスキップ接続を持つ (n は全層数である)。識別器は畳み込み式の「Patch GAN」分類機からなり、パッチスケールでの構造のみにペナル

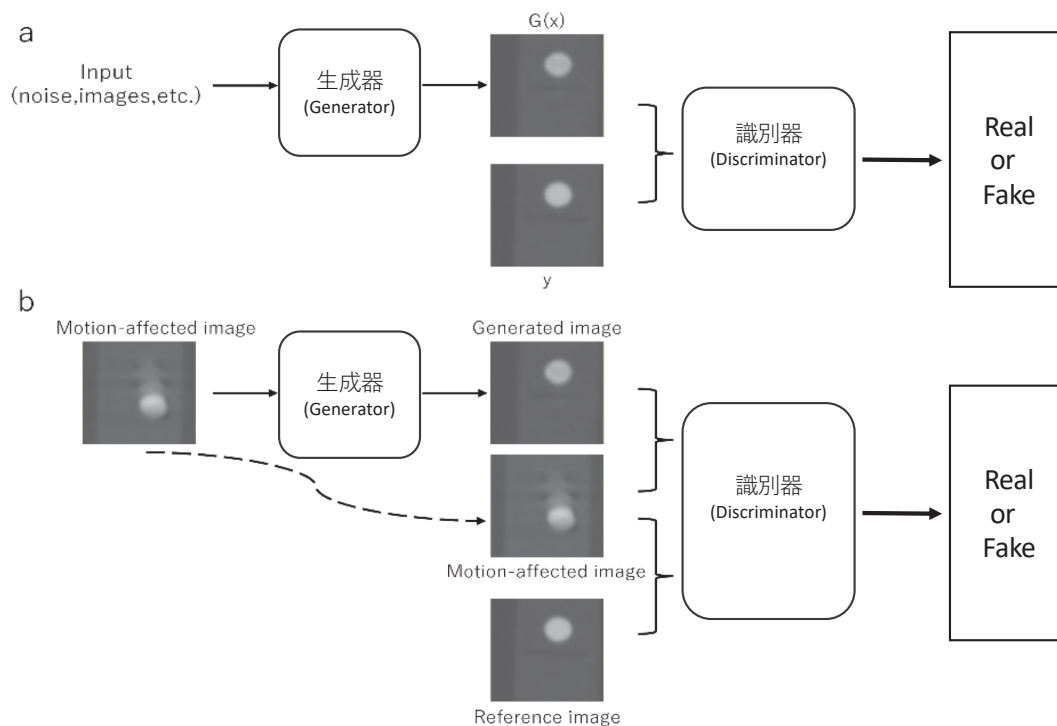


図 1 敵対的生成ネットワーク (GAN) と pix2pix の構成図⁸⁾

a : GAN は、競合的パターンに従って画像を生成するためのニューラルネットワークアーキテクチャである。生成器と識別機の拮抗的なイタレーションにより、両者は最終的に動的平衡に達する。

b : pix2pix アルゴリズムは画像から画像への変換手法である。一般的な GAN と pix2pix の違いは、pix2pix の生成器と識別機の両方が動きの影響を受けた画像（入力）を観察することである。

Motion-affected image および生成器で処理された画像は著者の研究データを示す。

ティを与え、各パッチが本物が偽物かを判断する。

GAN は、革新的なニューラルネットワークとして、CT のみならず様々なモダリティの医療画像に導入されている⁷⁾。例えば、頭部 MRI におけるアルツハイマー患者の画像取得中に発生するモーションアーチファクトを pix2pix ネットワークを用いて補正した結果、海馬萎縮の過大評価が改善され、VSRAD (Voxel-Based Specific Regional Analysis System for Alzheimer's Disease) 解析に有用な手法であることが示唆された¹¹⁻¹⁴⁾。

(1) CT 領域での深層学習を用いたモーションアーチファクト補正方法

Ren らは、GAN モデルを使用して coronary CT angiography (CCTA) 画像のモーションアーチファクトを改善することに成功し、病変のコントラストを維持しながら、右冠状動脈のモーションアーチファクトが少ない Grand truth 画像と同様のコントラストを持つ GAN 生成画像を作成し、臨床診療への合成 CCTA 画像の導入を容易にする可能性を示した¹⁵⁾。

Hegazy らの研究では、GAN を用いて歯科用 CT 画像のハーフスキャンアーチファクトを修正し、従来行われてきた Parker weighting 法³⁹⁾を上回った画像を提供することが示された¹⁶⁾。

Zhang らの研究では、動きの少ない冠動脈画像と動きのある冠動脈画像を学習させたモデルを用いて、モーションアーチファクトが発生した原画像から生成された冠動脈画像は、定量的な評価である peak signal-to-noise ratio (PSNR)、structural similarity (SSIM)、dice similarity coefficient (DSC)、hausdorff distance (HD) および視覚的な評価 (5ポイントリッカートスケール) で、原画像よりも良好な結果が得られ、診断性能を大きく向上させたことを示された⁸⁾。

まとめ

X 線 CT のスキャン中に発生するモーションアーチファクトの低減技術の変遷と臨床への応用についてこれまで取り組まれてきた研究をまとめた。ハードウェアによるものでは、検出器の多列化から始まり、心電図を同期させたスキャン、2つの管球が搭載された CT の開発があった。ソフトウェアによるものでは、時間分解能を向上させるための再構成法の考案があった。今後は、CT 装置の回転時間の高速化や深層学習の利用により、さらにモーションアーチファクトの改善が期待できると考える。深層学習技術が進歩し、近年は様々なモダリティにおいて深層学習を使用したモーションアーチファクトを補正する研究が行われ、それ

らが医療の現場でも応用されることで画像診断の精度はさらに向上していくと考えられる。

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) Hounsfield GN: Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. Br J half. 1973: 46: 1016-1022.
- 2) Ambrose J: Computerized transverse axial scanning (tomography). 2. Clinical application. Br J Radiol. 1973: 46: 1023-1047.
- 3) Perry BJ, Bridges C. Computerized transverse axial scanning (tomography). 3. Radiation dose considerations. Br J Radiol. 1973: 46: 1048-1051.
- 4) Kalra MK, Maher MM, D'Souza R, Saini S. Multidetector computed tomography technology: current status and emerging developments. J Comput Assist Tomogr. 2004 : 28 Suppl 1:S2-6.
- 5) 津坂昌利, 篠原文章, 阿南充洋, 段床晴, 立花敬三, 保科正夫, 他: 放射線技術学用語集. 公益社団法人日本放射線技術学会出版委員会. さいたま. 望月印刷. 1994: 1.
- 6) 辻岡勝美: X線CT装置の機器工学(5): アーチファクト (基礎連続講座「CT講座」). 日本放射線技術学会雑誌. 2002: 58: 733~739.
- 7) Jiang B, Guo N, Ge Y, Zhang L, Oudkerk M, Xie X: Development and application of artificial intelligence in cardiac imaging. Br J Radiol. 2020: 93: 20190812.
- 8) Zhang L, Jiang B, Chen Q, Wang L, Zhao K, Zhang Y, et al: Motion artifact removal in coronary CT angiography based on generative adversarial networks. Eur Radiol. 2023: 33: 43-53.
- 9) Isola P, Zhu J, Zhou T, Efros AA: Image-to-Image translation with conditional adversarial networks. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017: 5967-5976.
- 10) Ronneberger O, Fischer P, Brox T: U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical image computing and computer-assisted intervention – MICCAI 2015. 2015: 234-241.
- 11) Matsuda H: MRI morphometry in Alzheimer's disease. Ageing Res Rev. 2016 :30: 17-24.
- 12) Hirata Y, Matsuda H, Nemoto K, Ohnishi T, Hirao K, Yamashita F, et al: Voxel-based morphometry to discriminate early Alzheimer's disease from controls. Neurosci Lett. 2005: 382: 269-274.
- 13) Blumenthal JD, Zijdenbos A, Molloy E, Giedd JN: Motion artifact in magnetic resonance imaging: Implications for automated analysis. Neuroimage. 2002: 16: 89-92.
- 14) Yoshida N, Kageyama H, Akai H, Yasaka K, Sugawara H, Okada Y, et al: Motion correction in MR image for analysis of VSRAD using generative adversarial network. PLoS One. 2022: 17: e0274576.
- 15) Ren P, He Y, Zhu Y, Zhang T, Cao J, Wang Z, et al: Motion artefact reduction in coronary CT angiography images with a deep learning method. BMC Med Imaging. 2022: 22: 184.
- 16) Hegazy MAA, Cho MH, Lee SY: Half-scan artifact correction using generative adversarial network for dental CT. Comput Biol Med. 2021: 132: 104313.
- 17) Westerman BR: Current status of MDCT. Presented at the Advances in Multidetector CT Meeting, Washington, DC, 2003.
- 18) Lemos AA, Siegel MJ, Rossi G, Somalvico F, Cioffi U, Biondetti PR: Single-versus multidetector-row CT: comparison of sedation rates, conventional angiograms and motion artefacts in young children following liver transplantation. Radiol Med. 2006: 111: 911-920.
- 19) Husmann L, Leschka S, Desbiolles L, Schepis T, Gaemperli O, Seifert B, et al: Coronary artery motion and cardiac phases: dependency on heart rate -- implications for CT image reconstruction. Radiology. 2007: 245: 567-576.
- 20) Rajiah P, Abbata S: CT coronary imaging-a fast evolving world. QJM-An Int Med. 2018: 111: 595-604.
- 21) 福田国彦, 谷口郁夫. 心臓CTの実際. 大阪. エム. シー・アンド・ピー. 2006.
- 22) 谷口彰: Multi-slice CTにおける心電図同期撮影技術について (撮影手法と原理概要). 全国循環器撮影研究会誌. 2003: 15: 44~53.
- 23) 石塚良和, 高橋真一, 村松禎久, 森山正巳: 心臓CTの検査技術. 医療 (国立医療学会誌). 2009: 63: 331~337.
- 24) 吉岡邦浩, 折居誠, 田中良一: CTの進歩と脈管画像診断. 脈管学. 2023: 63: 39~43.

- 25) Roos JE, Willmann JK, Weishaupt D, Lachat M, Marincek B, Hilfiker PR: Thoracic aorta: motion artifact reduction with retrospective and prospective electrocardiography-assisted multi-detector row CT. *Radiology*. 2002; 222: 271-7.
- 26) Thomas G, Flohr, Cynthia H, McCollough, Herbert Bruder, Martin Petersilka, Klaus Gruber, Christoph Süß, et al: First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system. *Eur Radiol*. 2006; 16: 256-268.
- 27) Petersilka M, Bruder H, Krauss B, Stierstorfer K, Flohr TG: Technical principles of dual source CT. *Eur J Radiol*. 2008; 68: 362-368.
- 28) 城戸輝仁 : Coronary CT plus Perfusion CT がもたらす新たな可能性. *心臓*. 2011; 43: 308~314.
- 29) Wu W, Budovec J, Foley WD: Prospective and retrospective ECG gating for thoracic CT angiography: a comparative study. *AJR Am J Roentgenol*. 2009; 193: 955-963.
- 30) Manghat NE, Morgan-Hughes GJ, Roobottom CA: Multi-detector row computed tomography: imaging in acute aortic syndrome. *Clin Radiol*. 2005; 60: 1256-1267.
- 31) Nakagawa J, Tasaki O, Watanabe Y, Azuma T, Ohnishi M, Ukai I, et al: Reduction of thoracic aorta motion artifact with high-pitch 128-slice dual-source computed tomographic angiography: a historical control study. *J Comput Assist Tomogr*. 2013; 37: 755-759.
- 32) Crawford CR, King KF: Computed tomography scanning with simultaneous patient translation. *Med Phys* 1990; 17: 967-982.
- 33) 山本修司, 上甲剛, 利府俊裕, 松本貴, 中西省三, 鳴海善文, 他 : ハーフセコンド CT を用いた肺野 HRCT における Cardiac Motion Artifact の低減 - 高速ハーフスキャン法の有用性の検討 -. *Medical Imaging Technology*. 2001; 19: 115~123.
- 34) Palomo JM, Kau CH, Palomo LB, Hans MG: Three-dimensional cone beam computerized tomography in dentistry. *Dent Today*. 2006; 25: 132-135.
- 35) Schöndube H, Allmendinger T, Stierstorfer K, Bruder H, Flohr T: Temporal resolution and motion artifacts in single-source and dual-source cardiac CT. *Med Phys*. 2013; 40: 031112.
- 36) Hahn J, Bruder H, Allmendinger T, Stierstorfer K, Flohr T, Kachelriess M: Reduction of motion artifacts in cardiac CT based on partial angle reconstructions from short scan data. In *Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging*. SPIE. 2016: 97831A.
- 37) Taguchi K, Cammin J: A new redundancy weighting scheme for nonstationary data for computed tomography. *Med Phys*. 2015; 42: 2659-2667.
- 38) Hernandez D, Eldib ME, Hegazy MAA, Cho MH, Cho MH, Lee SY: A head motion estimation algorithm for motion artifact correction in dental CT imaging. *Phys Med Biol*. 2018; 63: 065014.
- 39) Parker DL: Optimal short scan convolution reconstruction for fan beam CT. *Med Phys*. 1982; 9: 254-257.
- 40) 沈雲, 堀内哲也, 木村文子, 酒井文和, 郷野誠, 国安芳夫 : 心拍動によるモーションアーチファクト軽減のための高時間分解能再構成アルゴリズム. *日本放射線技術学会雑誌*. 1998; 54: 1287~1294.
- 41) 酒井文和, 沈雲, 堀内哲也, 山田隆之, 鈴木恵子, 上野恵子, 他 : Subsecond scan と高時間分解能アルゴリズムを用いた胸部高分解能 CT 画像における心拍動アーチファクト軽減の試み. *日本医学放射線学会雑誌*. 1998; 58: 521~523.
- 42) 高柳知也, 佐野始也, 近藤武, 天沼誠, 石坂和真, 関根貴子, 他 : 320列面検出器 CT (0.275 s/rot.) を用いた冠動脈 CT 血管造影における低管電流撮影フル再構成および体動補正ソフト (APMC) の実臨床における有用性. *日本放射線技術学会雑誌*. 2015; 71: 237~245.

Abstract

The evolution of the motion artifact reduction techniques and clinical applications for x-ray CT

Takuya Suzuki¹⁾, Hajime Sakamoto¹⁾, Kenzo Muroi²⁾, Keisuke Usui¹⁾,
Yasuaki Sakano¹⁾, Shinsuke Kyogoku¹⁾, Hiroyuki Daida¹⁾

¹⁾ Graduate School of Health Science, Juntendo University

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

In x-ray computed tomography (CT) examinations, motion artifacts are generated by body movements of the examinee during the procedure. Factors that cause motion artifacts include heartbeats, respiratory motion, and the body movements of those who have difficulty maintaining their posture during the examination, such as in emergency patients and infants. Motion artifacts cause blurring of images, which reduces the accuracy of image diagnosis, evaluation, and analysis. Various technological developments have been made in terms of the hardware and software to reduce motion artifacts. Among the methods to reduce motion artifacts by hardware development, there have been reports on the improvement of temporal resolution by using multiple detector rows, Dual-Source CT, and electrocardiogram-synchronized imaging. As for the methods to reduce motion artifacts by software development, there are reports on helical half reconstruction, high temporal resolution reconstruction, and body motion compensation software. Recently, there has been a report on the generative adversarial networks as a study of motion artifact reduction techniques using deep learning. This paper introduces the evolution of the motion artifact reduction techniques for x-ray CT and their clinical applications.

Key Words: x-ray CT, motion artifact, electrocardiography-synchronized imaging, body motion compensation software, deep learning

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 54-61, 2024]

X線CT検査における医療被ばく低減への取り組み

神山 彩絵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

現在、医療において放射線を利用した検査や治療が一般的であり、世界の医療被ばくの平均値は増加している。日本での医療被ばくは減少傾向にあるが、世界と比べると圧倒的に多い。日本での主な被ばく原因はCT検査によるものであり、これにはCTの保有台数の多さが関係している。そのため、放射線被ばくによる健康への影響が懸念されており、小児や成人におけるX線CT検査による白血病や癌のリスク増加が報告されている。近年では低線量X線CT検査が注目されており、肺癌や頭部検査において画質を保持しながら、被ばく線量を低減する方法が研究されている。そこで本稿では逐次近似再構成 (Iterative Reconstruction: IR) 法、TV (Total Variation) 正則化、そして深層学習画像再構成 (Deep Learning Reconstruction: DLR) 法についての先行研究をまとめた。IR法はノイズを低減し、高い空間分解能を示しながら被ばく線量の低減を可能にし、臨床で実用化されている。また、TV正則化やDLR法も低線量領域でのノイズ低減や画質の向上に貢献している。DLRは直接的に画像再構成を行う方法と (Filter Back Projection: FBP) 法やIR法と組み合わせた方法があり、線量低減に伴う画像ノイズやストリークアーチファクトを抑制し、高解像度を維持することを実現しており、臨床での応用も進んでいる。

キーワード: CT、逐次近似再構成法、TV正則化、深層学習画像再構成法

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 62-67頁, 2024年 (受付 2024.1.30.; 受理 2024.3.14.)

緒言 (背景と目的) 医療放射線被ばくの現状

放射線を利用した検査や治療は広く普及しており、現在の医療に必要不可欠なものとなっている。世界の医療被ばくの平均値は2000年から2008年にかけて、年間0.4mSvから年間0.6mSvに増加した¹⁾。一方で、日本での医療被ばくの平均値は2011年から2022年にかけて年間3.86mSvから年間2.6mSvに減少したが²⁾、世界の平均と比較して約4倍も医療被ばくが多い。その中でも多くを占めているのがX線CT検査による被ばく線量で、およそ2.3mSvといわれている¹⁾。この背景には本国のX線CT装置の保有台数が関係している。図1に各国における人口100万人当たりのX線CT装置の保有台数を示す。日本では人口100万人当たりのX線CT保有台数が115.7台で他国と比較して多いため³⁾、医療被ばくは自然放射線による被ばく (2.1mSv)²⁾を上回っている。これにより問題となるのが、医療放射線被ばくによる健康への影響についてである。

先行研究では小児を対象としたX線CT検査において、累積線量約50mGyで白血病のリスクが約3倍、累積線量約60mGyで脳腫瘍のリスクが約3倍になる可能

性があると報告されている⁵⁾。また、成人におけるX線CT検査では、検査に伴う被ばく線量と甲状腺癌および白血病のリスク増加との関連がある可能性が示された⁶⁾。さらに全身のX線CT検査による発癌リスクは、交通事故により死亡するリスクより高いという報告もある⁷⁾。その他にも多くの文献でX線CT検査に伴う被ばく線量が発癌リスクなどの健康障害の要因になり得るという報告がされている⁸⁻¹¹⁾。

そこで近年では、低線量X線CT検査が注目されている。低線量X線CT検査とは、従来のX線CT検査よりも低線量で撮影を行う方法である。主に肺癌検査に用いられており、肺癌の臨床試験 (NLST: The National Lung Screening Trial) における低線量X線CT検査では肺癌が圧倒的に多く検出でき、早期の肺癌を発見しやすいということが証明された¹²⁾。頭部を対象とした低線量X線CT検査では、従来のX線CT検査より被ばく線量を50%以上低減できることが報告されている¹³⁾。低線量X線CT検査と従来のX線CT検査を比較した研究では、低線量X線CT検査のCTDI_{vol} (CT Dose Index) とDLP (Dose-Length Product) の値が従来法よりも有意に低いことが示された (図2)¹⁴⁾。しかし低線量X線CT検査は、従来法と比べると撮影線量

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

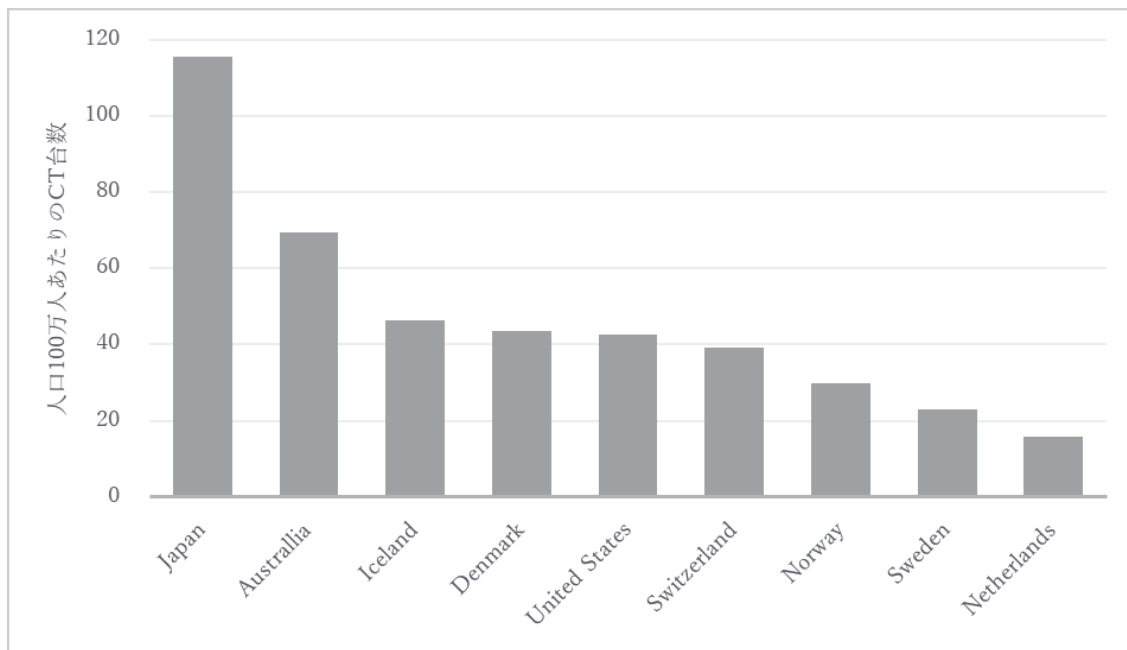


図1 人口100万人あたりのCT台数³⁾

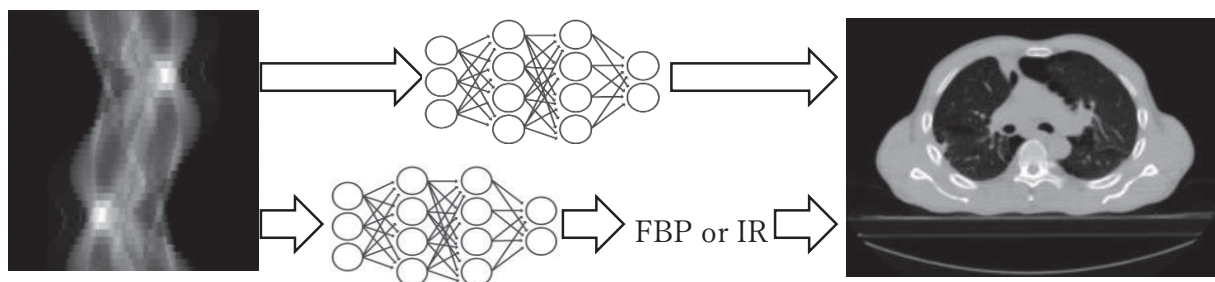


図2 DLRの構造

が低いとノイズが多くなり、画質劣化が生じることが問題である¹⁵⁾。そこで本稿では、さまざまな方法での低線量X線CTの画像再構成技術に関する研究について紹介する。

1. 逐次近似再構成法

逐次近似再構成 (IR: Iterative Reconstruction) 法とは、投影された実測値と仮定値を比較して、順投影、逆投影を繰り返し、その都度補正を行うことで正しい解に近づけていく方法であり、空間分解能と画像コントラストを維持しながら、主に画像ノイズ低減や種々のアーチファクト低減といった画質改善が可能である¹⁶⁾。IR法には、低線量撮影時に増加するノイズの低減が可能である statistical/hybrid IR (HIR) と、画質を維持しながらノイズを低減する model-based IR (MBIR)^{17, 18)} が存在する¹⁹⁾。MBIRはHIRと比較して、ノイズ特性、空間分解能において優れていると報告がされている²⁰⁾。通常、ノイズの2乗が線量に反比例するのに対し、MBIRではノイズに4乗が線量に反比例するため、線

量を下げてもノイズ特性が高い²¹⁾。死体に対して全線量でのスキャンを実施し、FBP (Filter Back Projection) 法と SAFIRE (Sinogram Affirmed Iterative Reconstruction) レベル2および4による再構成を比較した研究では、SAFIREの方が最大56%の線量低減を可能にし、同等の画質を保持したことが示されている²²⁾。Raslauらは、生きたヒツジに対してCTスキャンを行い、12段階の線量レベルとFBP法および強度が5段階あるADMIRE (Advanced Modeled Iterative Reconstruction) を組み合わせることで、最大60%の線量低減が達成できると報告している²³⁾。PIR (Prior Iterative Reconstruction) を用いた肝病変を診断するためのCT検査においては、診断性能を損なわずに線量低減するのに有効な方法であると示されている²⁴⁾。その他にも多くの研究で、逐次近似再構成法を用いることで線量が低減可能であると報告されており²⁴⁻²⁶⁾、臨床での実用化も進んでいる。

2. TV (Total Variation) 正則化

TV正則化はポアソンノイズの増幅抑制効果のある

正則化演算子のひとつであり、画像の濃度変化を平滑し、エッジ部分を強調する性質を持つ。一方で低線量領域において階段状のアーチファクトが発生するという問題点がある。Zgen らはエッジ保存 TV 正則化 (EPTV : Edge-preserving TV) を用いた研究を報告している。EPTV は元の TV のノルムにペナルティを加えることで、アルゴリズムが自動的に不連続性を見つけ、回復するエッジ情報を調整することを可能にする方法である。EPTV を使用することで低線量撮影時でのストリーク状のアーチファクト画像の抑制が可能であると示されている²⁸⁾。また、パッチ状のアーチファクトに対しては、PWLS (Penalized Weighted Least-squares) のもとで TGB (Total Generalized Variation) が適応可能である。以下は TGV についての式であり、一階微分だけでなくラプラシアンも使用することで画像の複雑、微細な構造をより効果的に捉える手法である。

$$\text{TGV}_\alpha^k(u) = \sup \left\{ \int_\Omega u \operatorname{div}^k v \, dx \mid v \in \mathcal{C}_c^k(\Omega, \operatorname{Sym}^k(\mathbb{R}^d)), \right. \\ \left. \|\operatorname{div}^1 v\|_\infty \leq \alpha_1 \right\} \quad (1)$$

Ω : bounded domain, div : the divergence operator,

u : the dual variable of the exact,

$l = 0, \dots, k-1$, and $k \in \mathbb{N}$: an order of TGV,

$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{k-1})$: the positive weights to TGV,

$\operatorname{Sym}^k(\mathbb{R}^d)$: the space of symmetric k -tensor

Shanzhou らの研究で焦点が当てられている2次元 TGV は式 (1) より以下の式で表される。

$$\text{TGV}_\alpha^2(u) = \sup \left\{ \int_\Omega u \operatorname{div}^2 v \, dx \mid v \in \mathcal{C}_c^2(\Omega, S^{d \times d}), \right. \\ \left. \|v\|_\infty \leq \alpha_0, \|\operatorname{div} v\|_\infty \leq \alpha_1 \right\} \quad (2)$$

$S^{d \times d}$: the space of symmetric $d \times d$

PWLS-TGV 法は PWLS 下での TV 法と比較して微細構造情報の保存、画像ノイズの抑制が達成可能である。投影数を削減してこの方法を使用することで、放射線量低減に有用な可能性がある²⁹⁾。ML-EM 法に対して TV-EM 法という手法が存在し、ノイズ除去を行いつつ、エッジを保存した画像再構成が可能であると期待されている³⁰⁾。

3. 深層学習

深層学習画像再構成法 (DLR : Deep Learning Reconstruction) とは、人工ニューラルネットワークを用いた方法であり、FBP や IR 法と組み合わせた手

表 1 100 万人あたりの CT 台数と HAQ (Health Access and Quality) 指数

	CT 台数/100 万人	HAQ 指数
Japan	115.700	94
Australia	69.570	94
Iceland	46.390	97
Denmark	43.590	92
United States	42.630	89
Switzerland	39.060	96
Norway	29.860	97
Sweden	22.960	95
Netherlands	15.860	96

法と、サイノグラムから直接画像に再構成する手法がある (図2)。従来の再構成手法と組み合わせた方法では、主に畳み込みニューラルネットワーク (CNN : Convolutional Neural Network) が利用される³¹⁾。DLR は低画像ノイズ、ストリークアーチファクトの抑制、低コントラスト病変検出能の向上、および高解像度を実現する³²⁾。また FBP、HIR、MBIR と比較して低線量領域でのノイズの低減効果が高いといわれている^{33,34)}。低線量胸部 CT における DLR の有用性を検討した研究では、撮影線量を60%低減した撮影条件で従来と同等の SNR を示し、解像度を維持したままノイズの低減を実現したと報告されている³⁵⁾。True Fidelity Image (GE Healthcare)³⁶⁾ と、逐次近似法の統計ノイズと被写体ノイズ部分を超高速演算コンピュータによって最大82%の線量低減を実現する ASiR-V (GE Healthcare) を用いて同じ条件で撮影した胸部 CT 画像を比較すると、True Fidelity Image の方が高い画像コントラストであり、画像ノイズを30%低減することを可能にした³⁷⁾。腹部 CT 検査において AiCE (Advanced Intelligent Clear-IQ Engine、キャノンメディカルシステムズ株式会社)³⁸⁾ を用いた研究では、FBP や IR より優れた画質特性を持ち、従来と比較して線量を1/3に低減することが可能であることが示された³⁹⁾。そのため近年、DNN (Deep Neural Network) を用いて Ground Truth である高品質の FBP 画像に近い画像を実現する True Fidelity Image、DCNN (Deep Convolutional Neural Network) を組み込むことで高画質を得る AiCE などが FDA (Food and Drug Administration) によって承認されており、臨床での応用も進んでいる。

4. まとめ

本稿では、X 線 CT 検査の被ばく線量低減の手法である IR 法、TV 正則化、および DLR についての先行研究を紹介した。いずれの方法も低線量で CT 検査を

行った場合でもノイズを低減し、従来の線量で撮影した場合と同等の画質の保持が可能であることが示されている。また現在では、IR 法および DLR を用いた手法が臨床現場で応用されている。TV 正則化はエッジの保存をしながらノイズの低減が可能であるが、構造情報を消失してしまうことから、実用化は進んでおらず、さらなる改良が必要であるといえる。

謝 辞

本論文の完成にあたり、多くの方々のご協力と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) United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation : Exposures of the public and workers from various sources of radiation. UNSCEAR 2008 Report, Annex B. 2008: 404.
- 2) 米原英典. 「生活環境放射線 (国民線量の算定) 第3版」の紹介. FBNews. 2022: 547: 3-4.
- 3) OECD. Computed tomography (CT) scanners (indicator). <https://www.oecd.org/tokyo/statistics/ct-scanners-japanese-version.htm> Accessed September 30, 2023.
- 4) GBD 2016 Healthcare Access and Quality Collaborators: Measuring performance on the Healthcare Access and Quality Index for 195 countries and territories and selected subnational Locations: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2016. Lancet. 2018: 391: 2236-2271.
- 5) Pearce MS, Salotti JA, Little MP, McHugh K, Lee C, Kim KP, et al: Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. Lancet. 2012: 380: 499-505.
- 6) Shao YH, Tsai K, Kim S, Wu YJ, Demissie K: Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks. JNCI Cancer Spectr. 2020: 4: 1-7.
- 7) Brenner DJ, Elliston CD. Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. Radiology. 2004: 232: 735-758.
- 8) Brenner D, Elliston C, Hall E, Berdon W. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. AJR Am J Roentgenol. 2001: 176: 289-96.
- 9) Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, Butler MW, Goergen SK, Byrnes GB, et al: Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. BMJ. 2013: 346: 1-18.
- 10) Berrington de González A, Darby S. Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. Lancet. 2004: 363: 345-351.
- 11) Meulepas JM, Ronckers CM, Smets AMJB, Nievelstein RAJ, Gradowska P, Lee C, et al: Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. J Natl Cancer Inst. 2019: 111: 256-263.
- 12) The National Lung Screening Trial Research Team: Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening. N Engl J Med. 2011: 365: 395-409.
- 13) Wu D, Wang G, Bian B, Liu Z, Li D: Benefits of Low-Dose CT Scan of Head for Patients With Intracranial Hemorrhage. Dose Response. 2020: 19: 1559325820909778.
- 14) Zheng C, Wang H, Liu Q, Han D, Xin Y, Lu W, et al: Application effect of low-dose spiral CT on pulmonary nodules and its diagnostic value for benign and malignant nodules. Am J Transl Res. 2023: 15: 256-263.
- 15) Tian Q, Li X, Li J, Cheng Y, Niu X, Zhu S, Xu W, et al: Image quality improvement in low-dose chest CT with deep learning image reconstruction. J Appl Clin Med Phys. 2022: 23: e13796.
- 16) 木暮陽介, 北川久, 萩原芳広, 土橋俊男 : 比べて理解 CT 検査 & MRI 検査. 東京. ピラールプレス. 2018: 76.
- 17) 村松 駿, 三浦 夏美, 佐藤 和宏 : Model Based Iterative Reconstruction を用いた頭部 CT における低線量撮影の可能性 : 通常線量撮影との比較. 日本 CT 技術学会雑誌. 2022: 10: 1-5.
- 18) 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.
- 19) Ippolito M, Maino C, Riva L, Pecorelli A, De Vito A,

- Lombardi S, et al. Iterative model-based CT reconstruction algorithm the background and added clinical value review paper. *J Radiological Review*. 2020; 7: 185-195.
- 20) Higaki T, Tatsugami F, Fujioka C, Sakane H, Nakamura Y, Baba Y, et al: Visualization of simulated small vessels on computed tomography using a model-based iterative reconstruction technique. *Data Brief*. 2017; 13: 437-443.
 - 21) 桂正樹, 大友邦: 逐次近似再構成法を用いた被ばく低減. *Med Imag Tech*. 2014; 32: 267~271.
 - 22) Godt JC, Johansen CK, Martinsen ACT, Schulz A, Brøgger HM, Jensen K, et al: Iterative reconstruction improves image quality and reduces radiation dose in trauma protocols; A human cadaver study. *Acta Radiol Open*. 2021; 10: 1-11.
 - 23) Raslau FD, Escott EJ, Smiley J, Adams C, Feigal D, Ganesh H, et al: Dose Reduction While Preserving Diagnostic Quality in Head CT: Advancing the Application of Iterative Reconstruction Using a Live Animal Model. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2019; 40: 1864-1870.
 - 24) Mohammadinejad P, Ehman EC, Vasconcelos RN, Venkatesh SK, Hough DM, Lowe R, et al: Prior iterative reconstruction (PIR) to lower radiation dose and preserve radiologist performance for multiphase liver CT: a multi-reader pilot study. *Abdom Radiol (NY)*. 2020; 45: 45-54.
 - 25) Li X, Shu H, Zhang Y, Li X, Song J, Du J, et al: Low-dose CT with adaptive statistical iterative reconstruction for evaluation of urinary stone. *Oncotarget*. 2018; 9: 20103-20111.
 - 26) Macri F, Greffier J, Pereira FR, Mandoul C, Khasanova E, Gualdi G, et al: Ultra-low-dose chest CT with iterative reconstruction does not alter anatomical image quality. *Diagn Interv Imaging*. 2016; 97: 1131-1140.
 - 27) De Crop A, Smeets P, Van Hoof T, Vergauwe M, Dewaele T, Van Borsel M, et al: Correlation of clinical and physical -technical image quality in chest CT: a human cadaver study applied on iterative reconstruction. *BMC Med Imaging*. 2015; 15: 1-9.
 - 28) Tian Z, Jia X, Yuan K, Pan T, Jiang SB: Low-dose CT reconstruction via edge-preserving total variation regularization. *Phys Med Biol*. 2011; 56: 5949-5967.
 - 29) Niu S, Gao Y, Bian Z, Huang J, Chen W, Yu G, et al.: Sparse -view x-ray CT reconstruction via total generalized variation regularization. *Phys Med Biol*. 2014; 59: 2997-3017.
 - 30) 奥村直裕, 庄野逸: TV 正則化と辞書学習を用いた OS-EM 法における PET 画像再構成. *Med Imag*. 2019; 37: 217~229.
 - 31) Koetzier LR, Mastrodicasa D, Szczykutowicz TP, van der Werf NR, Wang AS, Sandfort V: Deep Learning Image Reconstruction for CT: Technical Principles and Clinical Prospects. *Radiology*. 2023; 306: e221257.
 - 32) Jensen CT, Liu X, Tamm EP, Chandler AG, Sun J, Morani AC, et al: Image Quality Assessment of Abdominal CT by Use of New Deep Learning Image Reconstruction: Initial Experience. *AJR Am J Roentgenol*. 2020; 215: 50-57.
 - 33) Higaki T, Nakamura Y, Zhou J, Yu Z, Nemoto T, Tatsugami F, et al: Deep Learning Reconstruction at CT: Phantom Study of the Image Characteristics. *Acad Radiol*. 2020; 27: 82-87.
 - 34) Akagi M, Nakamura Y, Higaki T, Narita K, Honda Y, Zhou J, et al: Deep learning reconstruction improves image quality of abdominal ultra-high-resolution CT. *Eur Radiol*. 2019; 29: 6163-6171.
 - 35) 小林聖子, 大須田恒一, 竹内岳, 秋葉理沙, 谷藤貴行, 七尾結輝, 他: 深層学習再構成法 (DLR) を導入した低線量胸部 CT の有用性 — 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 患者を想定した検討 —. *道南医学会ジャーナル*. 2022; 5: 33~35.
 - 36) GE Healthcare: TrueFidelity: <https://www.gehealthcare.com/products/truefidelity>, Accessed January 14, 2024.
 - 37) Kim JH, Yoon HJ, Lee E, Kim I, Cha YK, Bak SH: Validation of Deep-Learning Image Reconstruction for Low-Dose Chest Computed Tomography Scan: Emphasis on Image Quality and Noise. *Korean J Radiol*. 2021; 22: 131-138.
 - 38) Canon: Advanced intelligent Clear-IQ Engine, Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE). <https://jp.medical.canon/products/computed-tomography/ct-aice>, Accessed January 10, 2024.
 - 39) 多田佳司, 鰐岡茜, 岩坂徹, 南京貴広, 大岡敏彦, 堀郁子: 腹部 CT 検査における Deep learning reconstruction の被ばく線量低減の検討. *松江市立病院医学雑誌*. 2020; 24: 26~32.

Abstract

Efforts to reduce medical exposure dose in CT examinations

Sae Kamiyama, Keisuke Usui

Department of Radiology, Graduate school of Health Science, Juntendo University

The use of radiation in medical examinations and treatment is common, and the medical exposure of global average is increasing. Although the medical exposure in Japan is declining, it still remains significantly higher than the global average. The major cause of exposure in Japan is CT scans, which is related to the high number of CT devices in the country. Therefore, we have concerns about the health effects of radiation exposure. It has been reported that there is an increase in the risk of leukemia and cancer associated with X-ray CT scans, especially in pediatric and adult populations. In recent years, low-dose X-ray CT examinations have been getting attention. Research has been done on reducing radiation exposure while maintaining image quality in lung cancer and head examinations. This paper compiles previous research on Iterative Reconstruction (IR), Total Variation (TV) regularization, and Deep Learning Reconstruction (DLR). IR methods reduce noise, provide high spatial resolution, and enable reduced radiation doses, achieving clinical practicality. TV regularization and DLR contribute to noise reduction and improved image quality in low-dose regions. DLR has methods of directly reconstructing images and combining with Filter Back Projection (FBP) or IR, achieved suppresses image noise and streak artifacts associated with reduced radiation doses, maintaining high resolution. The clinical applications of DLR are advancing alongside these developments.

Key Words: CT, Iterative Reconstruction, Total Variation regularization, Deep Learning Reconstruction

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 62-67, 2024]

頭部 MRI モーションアーチファクトに対する各種補正法と今後の展望

有田 晃大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

この論説では、頭部 MRI モーションアーチファクトに対する補正法として、k 空間取得データへのアプローチと深層学習を用いた手法に焦点を当て紹介した。k 空間取得データに対する補正法では、k 空間の低周波数領域からデータを充填することでアーチファクトの影響を最小限に抑え、画像の品質向上が図られた。また、深層学習を応用した補正法は、大量のデータを学習し、モデルを最適化する構造によって、高い補正精度を実現できることが示唆されており、将来的に医療分野全体で重要な役割を果たすと強調されている。また深層学習の進化が、頭部 MRI 画像の精度向上、正確な診断や検査スループットの向上に寄与するとされている。今後の展望として、患者のより正確かつ迅速な画像診断が可能になり、深層学習がますます医療画像において中心的な役割を果たすことが期待されている。

キーワード：MRI、モーションアーチファクト、k 空間、深層学習

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 68-73頁, 2024年 (受付 2024.1.29.; 受理 2024.4.12.)

緒 言

核磁気共鳴画像 (MRI: Magnetic Resonance Imaging)¹⁾ は、現在、人体の内部構造、頭蓋内構造を詳細に画像化する重要な画像診断ツールの一つとして広く使用されている。また、様々な MR イメージング法は高いコントラスト分解能を提供し、脳や腹部臓器、筋繊維、血管などの軟部組織を識別できる。そのため、脳梗塞や脳腫瘍をはじめとする多くの頭部領域疾患の画像診断では MRI が第一選択といわれており^{2,3)}、その病態の検出や特徴付けにおいて優れた能力を持っている。2021年の調査では脳血管疾患が死因の第4位であり、その脳血管疾患の9割以上を占める脳卒中が65歳以上男性の要介護状態になった主な要因の第1位となっていることから^{4,5)}、国民の健康を脅かす大きな疾患の一つとなっている。したがって、頭部 MRI は重大な疾患の早期発見や診断を行うために極めて重要な画像検査法といえる。

しかし、多くの MRI の利点があるにもかかわらず、長いデータ収集時間、閉所、騒音などの問題により、その臨床的・研究的応用には依然として課題が残されている。MRI のデータ収集時間が比較的に長いために、当初から患者の動きに対する画質の劣化が指摘されており、臨床現場での画像診断精度や研究目的での解析

精度の結果に大きな影響を与えている。健常で検査に協力的な成人であっても、最大1mmの自発的な頭の動きが発生していると言われており⁶⁾、撮像中の患者の動きは偽信号を発生させるモーションアーチファクトやゴースト、ぼやけ、歪み、Signal to Noise Ratio (SNR) の低下などのアーチファクトを引き起こすことから、画質や画像の診断能力の低下を招く要因となっている⁷⁾。2015年に Andre らは、モーションアーチファクトによる画質の低下は診断精度に支障をきたし、また追加の撮像が必要となることから、検査のスループットの遅延、病院リソースの使用における非効率性、および誤った画像診断の原因になるとしている⁸⁾。このように、モーションアーチファクトの発生により治療の遅れや医療費の増加を招く可能性があり、脳や海馬の容積を測定するような定量的データ解析を行うと、予期せぬ誤った陽性や陰性の結果が生じる可能性が考えられる。

こうした問題を未然に防ぐため、臨床現場では頭部 MRI を撮像する際に頭部固定器具を使用する。具体的なものとして、Pearltect MRI/CT 用患者ポジショニングシステム (東洋メディック株式会社) や、MPU-028048 (龍野コルク工業株式会社) が挙げられる。これらの固定具を有効に使用することで、MRI 撮像中の患者頭部の動きを抑えることが可能となり、画像に

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

影響するモーションアーチファクトを低減することができる。しかし、これらの固定具は着脱操作に時間を要し、また患者に対して拘束するという圧迫感や不安を与えてしまうこと、さらに各施設における経済的理由によって、広く普及しておらず、現状はタオルやクッションを用いて患者頭部を固定するのみになっている⁹⁾。

したがって、ソフト面で頭部 MRI 撮像時のモーションアーチファクトを低減させる数多くの方法がこれまで提案されており、本稿ではそれらを k 空間取得データに対する補正法、および深層学習による補正法の2つの種類に区別して記述する。また、補正画像の臨床応用例を調査し、頭部 MRI に対するモーションアーチファクトに関する補正法の今後の展望を考察する。

k 空間取得データに対する補正法

2010年に木村らは、生体内の動きが与える MRI の信号変化のうち、周波数や位相シフトを伴うマクロな動き (coherent motion) は補正可能であることを述べ、画像スライス間 (スライス傾斜磁場方向 Gz) での動きによる位置補正は後処理でも可能だが、データ収集中での被検体の動きの抑制には収集段階での工夫が重要であることを示している¹⁰⁾。収集段階での工夫として、スパイラル MRI や投影再構成法などのセンタアウトイメージング法の考え方が生まれた。1986年に Ahn らは、2つの直線的に増加する正弦波勾配磁場を用いることによって、空間周波数領域において周波数領域全体を一様にカバーする、スパイラル軌跡を描くスパイラルスキュンを用いた改良型エコー・プラナー高速イメージング法を提案した¹¹⁾。投影再構成法は、アーチファクトを放射状のストリークとして描写し、その振幅は動いている要素付近で最小になること、また動く要素の運動方向に対して垂直にストリークが展開し、被験者の解剖学的境界の外側に存在することが多いこと、および中心付近の k 空間データのオーバーサンプリングによる低空間周波数の固有の信号平均化などの理由から、モーションアーチファクト補正に有効であることが示された¹²⁾。一方で、再構成時の条件によってはストリークアーチファクトの増加が課題であるとしている。また、ナビゲータ・エコーと呼ばれる収集データの追加、またはモーションアーチファクトに関連する位相を測定することでモーションアーチファクトを低減することができる。ナビゲータ・エコーは長い収集時間を要するものの、大きな動きがある収集データを捨てることでモーションアーチファクトを低減させている¹³⁾。

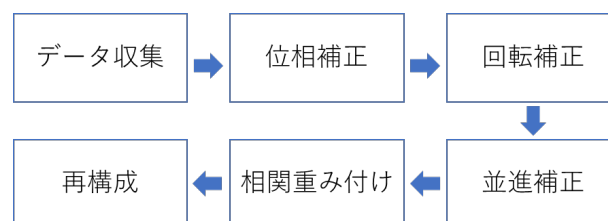


図1 PROPELLER MRIによるモーションアーチファクト補正法と画像再構成プロセス

1999年に Pipe JG らは、Periodically Rotated Overlapping Parallel Lines with Enhanced Reconstruction (PROPELLER) MRI を発表した¹⁴⁾。PROPELLER MRI のデータ収集法と画像再構成の概要を図1に示す。PROPELLER MRI 法は、k 空間取得データに対するモーションアーチファクト低減法の中で、現在でも有力な方法として知られている。この方法は k 空間の原点を中心に回転した同心円状の矩形ストリップでデータをオーバーサンプリングする。これにより、ストリップ間の位置、回転運動、面内変位の空間的不整合を補正することができ、面内運動を示す相関指標に基づいてデータを棄却することや、低空間周波数に対する平均化効果によってモーションアーチファクトをさらに減少させることが可能になる¹⁴⁾。本法で撮像された MRI 画像に関して、SNR は高いものの空間分解能が低いことや¹⁵⁾、撮像時間が延長するという問題がある。近年の研究では、PROPELLER MRI にマルチバンド RF パルスを使用して複数のスライスを同時に励起する、同時マルチスライス (Simultaneous Multi-Slice: SMS) イメージングを組み合わせることで効果的に高速化させ、スキャン時間を短縮しつつ画像解像度の向上を見込めることが示された¹⁶⁾。

深層学習による補正法

近年、人工知能に対する関心が急速に高まり、自動運転や自動翻訳などの産業応用のみならず、医療分野にも応用され始めている。MRI のモーションアーチファクトに対して深層学習を用いた補正法の研究は、2017年に Thomas らが取り組みを始めている。Thomas らは、画質に影響を与える主要な外因的要因となる患者の動きの自動検出に焦点を当て、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolution Neural Network) を利用し、MRI 撮像中のモーションアーチファクトを高い精度で定量化、早期検出を可能とする学習モデルを作成した¹⁷⁾。使用されたモーションアーチファクト自動検出のために提案されたアルゴリズムを図2に示す。学習データとなる MR 画像は16人 (27歳±4.5歳) の健常ボランティアから取得され、動きのないデータ

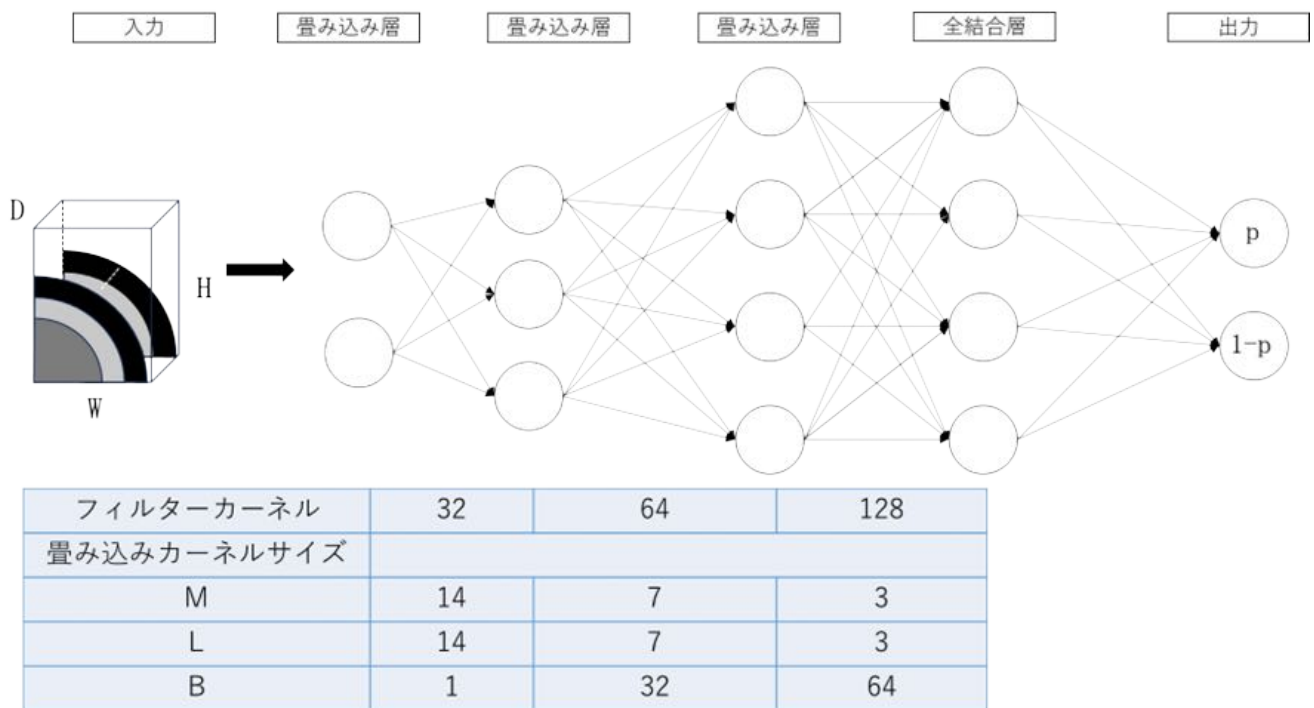


図2 3つの畳み込み層と1つの全結合出力層を持つ畳み込みニューラルネットワーク

セットと動きの影響を受けるデータセットを取得するために、各ボランティアに対して2回撮像が実行された。最初の撮像では、ボランティアは頭を静止させるように指示され、2回目の撮像中では、意図的に頭を左右に傾ける（最大傾斜で約5秒ごと）ように指示された。このように取得したMRデータを3つの畳み込み層と1つの全結合出力層からなる多層CNNに、モーションアーチファクトが存在する画像パッチを識別するための学習を実行した。CNNの最終層でソフトマックス関数を使用し、モーションアーチファクトの有無の確率値 p を返す。各畳み込み層はサイズが $M \times L \times B$ の N 個のフィルター・カーネルと、活性化関数は ReLU (Rectified Linear Unit) で構成される。それぞれの畳み込みカーネルサイズ $M \times L \times B$ は図2に示す通りである。

この方法によって、臨床で生じる患者データの品質が向上し、このデータを画像品質保証のための前向きデータや大規模なコホート研究に対して有効的にフィードバックできるようになった。また、画像品質評価や品質管理のために遡及的に使用することで、高品質のデータ処理がより高いコスト効率で快適に利用できるようになると述べられている¹⁷⁾。この Küstner らによって頭部MRIのモーションアーチファクトに対するディープラーニングの有効性が示唆され、この年を境に深層学習の利用が急激に増加の一途をたどった。翌2019年に Patricia は、動き補正に初めて条件付き敵対生成ネットワーク (CGAN: Conditional Generative

Adversarial Network) を利用し、モーションアーチファクトが発生している画像に対して学習済みモデルの適用を行った¹⁸⁾。まず、敵対生成ネットワーク (GAN: Generative Adversarial Network) とは、2つのネットワークのペアによって構成される学習システムであり、1つは生成器 (generator)、もう一方は識別器 (discriminator) と呼ばれ、敵対的生成ネットワークの名のとおり、2つのネットワークが切磋琢磨し合うように学習する。GAN では、生成器にノイズを入力して生成されたデータと、学習対象の真のデータを用意し、その2つを識別器にどちらが正解であるか判定させることで学習を行う。ここで、CGANはクラスラベルや他のモダリティからのデータなどの補助情報を条件付けしたデータラベルを追加入力層として識別器と生成器の両方に入力することで、入力画像から出力画像へのマッピングを学習するだけでなく、このマッピングを訓練するための損失関数も学習する¹⁹⁻²¹⁾。これまで画像から画像への変換問題では通常、エンコーダー・デコーダー形式のネットワーク構造をしたディープニューラルネットワーク (DCNN: Deep Convolution Neural Network) が使用されてきたが、DCNNは多くのMRIアプリケーションで大きな成功を収めているものの、わずかにぼやけた画像を生成する傾向があった²²⁾。Patricia らはこの問題に対処するためにCGANによるアプローチによってモーションアーチファクト補正を遡及的に達成し、CGANの有用性を広く周知させた¹⁸⁾。また、モーションアーチファクトの補正のためのディープラーニ

ング手法は、後処理方法であり、撮像中の体動の測定等が必要ではないため、臨床現場で実用しやすい手法である。また、多くの画像類似度評価に用いられる定量評価指標の構造的類似度 (Structural Similarity: SSIM) やピーク信号対雑音比 (Peak Signal to Noise Ratio: PSNR) を、これらの MRI 画像の画質改善に対する定量的な評価に用いたことで、その後の多くの研究者のメルクマールになったといえる。

また、同年 Küstner は、変分オートエンコーダー (Variational Autoencoder: VAE) と CGAN を利用し、それぞれを比較することで深層学習アーキテクチャによるモーションアーチファクト補正の実現可能性を証明した²³⁾。VAE のエンコーダは、GAN とは対照的に基礎となる一定の確率分布を表現している。この潜在変数から、ある平均と標準偏差を持つガウス分布でサンプルを抽出する。VAE のこの確率的性質により、動きの影響を受けた入力から動きのない画像を生成することができる。教師データは各スキャンを2回実行し、ボランティアは頭を静止させて動きのないデータセットを取得し、次に $\pm 30^\circ$ の範囲でランダムに左右に傾けるように求められ、動きの影響を受けるデータセットを取得した。画質評価は二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE) や SSIM などの定量評価に加え、視覚知覚を判断するために、動きの影響を受ける画像、動きのない画像、および動き補正された画像を、2人の経験豊富な放射線科医によって、モーションアーチファクトの強さ (0:「モーションアーチファクトなし」から3:「強いモーションアーチファクト」までのスケール) および全体的な画質に関して採点された。提案された CGAN モデルは、定性的・定量的両面で VAE を凌駕し、優れた結果を提供できると結論付けられた²³⁾。

翌2020年、Sommer はマルチスケール完全畳み込みニューラルワーク (Fully Convolutional Networks: FCN) を利用したモーションアーチファクトの適応的補正の有用性を示した²⁴⁾。このデータセット収集は後ろ向きに行われ、頭部の MRI 検査を受けた検出可能な病状がない46名の MRI 画像を頭部の併進運動と回転運動をシミュレートするアーチファクトをフーリエ変換データに導入し、リアルなモーションアーチファクト画像を再現した。合計93,600枚のトレーニング用の画像ペアと、テストデータとして11,700枚の画像ペアが作成された。テストデータへの定量的評価では平均二乗誤差 (Mean Square Error: MSE) の平均値が約42%、SSIM では0.863から0.924への増加が観察された。しかし、重大なアーチファクトがある領域において、補

正後にわずかなぼやけが観察された。Sommer はこのぼやけは体動による典型的なアーチファクトの除去よりも難しい画像変換問題であるが、近年のニューラルネットワークがそのような画像のブレ除去を可能にする可能性があることを示唆している²⁴⁾。このように、現段階ではまだすべてのモーションアーチファクトを完全に除去することはできていないが、臨床でのワークフローにおいて大きな役割を果たす可能性がある。

補正画像の臨床応用

今日、深層学習の医療への応用はコンピュータ支援診断/検出 (Computer-aided diagnosis/detection (CAD))²⁵⁾をはじめ、多くの領域で進められている。MRI 撮像技術においても前項で述べたように、様々なアプローチの研究結果が報告されている。実際に深層学習技術が一般的になるためには主要 MRI メーカーが深層学習技術を搭載したソフトウェアを標準化することが重要であるが、現時点ではシーメンスヘルスケアの Deep Resolve²⁶⁾ や、キヤノンメディカルシステムズの Advanced intelligent Clear-IQ Engine (AiCE)²⁷⁾ が代表的な AI ソフトウェアであり、どちらもノイズ除去や撮像時間の短縮などを焦点としており、モーションアーチファクトを特異的に低減できるソフトウェアは開発されていない。しかし、高解像度の MRI 画像を取得するためには、比較的長い撮像時間を要し、患者の不快による体動によって、画像がぼやけたりモーションアーチファクトを発生させたりする可能性がある。深層学習技術を使用することで、比較的短い撮像時間で得られた画像であってもノイズのない高解像度の MRI 画像を得ることができ、結果的にモーションアーチファクトの低減に繋がっているといえる²⁸⁾。このように、現時点では深層学習によるモーションアーチファクトを特異的に除去する臨床例は研究段階であるが、MRI 画像における適用は臨床運用に近いレベルまで進んでいる。

まとめ

今回の論説では、頭部 MRI のモーションアーチファクトに対する補正法のうち、k 空間取得データを工夫したものと深層学習によって適応的に補正を行う研究成果を紹介した。頭部 MRI のモーションアーチファクト補正の歴史は、初期の MRI 技術では患者の動きが画質に影響を与え、診断精度を損なっていた。従来では、患者に静止を求める患者教育により体動の最小化が試みられたが、この方法には動き抑制の精度と画像の品質向上において限界があった。その後、画像再

構成技術やセンサーの進化により、モーションアーチファクトの低減が進んだ。近年、深層学習の発展によりモーションアーチファクトの補正に新たな可能性が開かれた。深層学習アルゴリズムは、患者の動きによるアーチファクトを予測し、画像を補正することが可能である。これにより、タオルやクッションなどの物理的な対策だけでなく、AI ソフトウェアによる補正を実現した。

現在、検査モダリティの進化と同時に、患者一人の検査にかかる身体的および精神的負担の増加が懸念されている。未だ研究段階ではあるが、深層学習による補正は、患者が完全に静止できない場合でも高品質な画像を提供でき診断の正確性を向上させる可能性がある。これにより、患者の快適さや検査の迅速な実施が促進され、医療の質が向上すると期待されている。深層学習が頭部 MRI のモーションアーチファクト補正において大きな役割を果たしていることは、今後の医療画像診断の進展において重要な展望といえるだろう。研究者や医療機器メーカーは、深層学習を含む新たな画像処理技術の導入とその臨床への適用に注力し、医療の質と効率を向上させる方向に進展していくことが期待されている。

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) Abdullah BJ, Bux SI, Chien D: Safety considerations in magnetic resonance imaging (MRI). *Med J Malaysia*. 1997; 52: 445-453.
- 2) 日本医学放射線学会編集：画像診断ガイドライン 2021年版（第3版）。東京：金原出版。2021: 38.
- 3) Al-Okaili RN, Krejza J, Woo JH, Wolf RL, O'Rourke DM, Judy KD, Poptani H et al: Intraaxial brain masses: MR imaging-based diagnostic strategy--initial experience. *Radiology*. 2007; 243: 539-550.
- 4) 厚生労働省：令和4年（2022）人口動態統計月報年計（概数）の概況。 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai22/dl/gaikyouR4.pdf>, 2023年2月2日。
- 5) 内閣府: 令和4年版高齢社会白書（全体版）2 健康・福祉 第1章 高齢化の状況（第2節 2）。 https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2022/html/zenbun/sl1_2_2.html, 2023年2月2日。

- 6) Friston KJ, Williams S, Howard R, Frackowiak RS, Turner R: Movement-related effects in fMRI time-series, *Magn Reson Med* 1996; 35: 346-355.
- 7) Oksuz I: Brain MRI artefact detection and correction using convolutional neural networks, *Comput Methods Programs Biomed*. 2021; 199: 105909.
- 8) Andre JB, Bresnahan BW, Mossa-Basha M, Hoff MN, Smith CP, Anzai Y, et al: Toward Quantifying the Prevalence, Severity, and Cost Associated With Patient Motion During Clinical MR Examinations, *J Am Coll Radiol*. 2015; 12: 689-695.
- 9) 鈴木修平, 國本桂史: MRI における頭部固定器具の心理的・肉体的負担を軽減させるデザイン設計要件の抽出。 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jssd/59/0/59_162/_pdf/-char/ja, 2024年2月8日。
- 10) Tokunori K: Correction Techniques for MRI Imaging, *Med Imag Tech*. 2010; 28: 145-148.
- 11) Ahn CB, Kim JH, Cho ZH: High-speed spiral-scan echo planar NMR imaging-I, *IEEE Trans Med Imaging*. 1986; 5: 2-7.
- 12) Glover GH, Pauly JM: Projection Reconstruction Techniques for Reduction of Motion Effects in MRI, *Magn Reson Med*. 1992; 28: 275-289.
- 13) Sachs TS, Meyer CH, Irarrazabal P, Hu BS, Nishimura DG, Macovski A: The diminishing variance algorithm for real-time reduction of motion artifacts in MRI, *Magn Reson Med*. 1995; 34: 412-422.
- 14) Pipe JG: Motion Correction With PROPELLER MRI: Application to Head Motion and Free-Breathing Cardiac Imaging. *Magn Reson Med* 1999; 42: 963-969.
- 15) 後藤政実, 青木茂樹, 林直人, 森壱, 渡辺靖志, 井野賢司, 他: PROPELLER T2WI における撮像条件の検討。 *日本放射線技術学会雑誌*. 2004; 60: 1585~1595.
- 16) Norbeck O, Avventi E, Engström M, Rydén H, Skare S: Simultaneous multi-slice combined with PROPELLER, *Magn Reson Med*. 2018; 80: 496-506.
- 17) Küstner T, Liebgott A, Mauch L, Martirosian P, Bamberg F, Nikolaou K, et al: Automated reference-free detection of motion artifacts in magnetic resonance images, *MAGMA*. 2018; 31: 243-256.
- 18) Patricia MJ, Drangova M: Conditional generative adversarial network for 3D rigid-body motion correction in MRI, *Magn Reson Med*. 2019 82: 901-910.

- 19) 篠崎隆志 : GAN – 敵対的生成ネットワークの発展. 人工知能学会誌. 2018; 33: 181~188.
- 20) Mirza M, Osindero S: Conditional Generative Adversarial Nets. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.1784>, 2023年11月16日.
- 21) Isola P, Zhu J-Y, Zhou T, Efros AA: Image-To-Image Translation With Conditional Adversarial Networks, Proceedings of the IEEE CVPR. 2017: 1125-1134.
- 22) Kyathanahally SP, Döring A, Kreis R: Deep learning approaches for detection and removal of ghosting artifacts in MR spectroscopy, Magn Reson Med. 2018; 80: 851-863.
- 23) Küstner T, Armanious K, Yang J, Yang B, Schick F, Gatidis S: Retrospective correction of motion-affected MR images using deep learning frameworks. Magn Reson Med 2019; 82: 1527-1540.
- 24) Sommer K, Saalbach A, Brosch T, Hall C, Cross NM, Andre JB: Correction of Motion Artifacts Using a Multiscale Fully Convolutional Neural Network. AJNR Am J Neuroradiol. 2020; 41: 416-423.
- 25) Sim Y, Chung MJ, Kotter E, Yune S, Kim M, Do S, et al: Deep Convolutional Neural Network-based Software Improves Radiologist Detection of Malignant Lung Nodules on Chest Radiographs, Radiology. 2020: 294: 199-209.
- 26) 齋木秀太郎 : MRI 検査に AI を活用した Siemens Healthineers の最新動向. https://www.innervision.co.jp/sp/ad/suite/siemens/technical_notes/210968, 2024年1月9日.
- 27) 山下康行 : 画像診断と機械学習そして Deep Learning Reconstruction による MRI 画像にあたえるインパクト. https://www.innervision.co.jp/sp/ad/suite/canonmedical/seminarreport/garon2018_mri, 2024年1月9日.
- 28) Kidoh M, Shinoda K, Kitajima M, Isogawa K, Nambu M, Uetani H, et al: Deep learning-based noise reduction for brain MR imaging. tests on phantoms and healthy volunteers. Magn Reson Med Sci. 2020: 19: 195-206.

Abstract

Various correction methods for head MRI motion artifacts and future prospects

Akihiro Arita, Keisuke Usui

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

This article introduced a k-space acquisition approach and a deep learning method as correction of head MRI motion artifacts. In the correction method for k-space acquisition data, the effect of artifacts was minimized, and image quality was improved by filling data from the low-frequency components of k-space. It was also suggested that correction methods that apply deep learning can achieve high correction accuracy through a structure that learns large amounts of data and optimizes models, and it was emphasized this will play an important role in the entire medical field in the future. Advances in deep learning will contribute to improve the accuracy of head MRI images, accurate diagnosis, and throughput of examination. From now on, deep learning is expected to play an increasingly central role in medical imaging as it enables more accurate and rapid imaging of patients.

Key Words: MRI, motion artifact, k-space, deep learning

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 68-73, 2024]

PET 画像における統計雑音低減処理法

鈴木 淳平、津田 啓介

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

陽電子放射型断層撮像法 (positron emission tomography: PET) 検査において、疾患の診断成績、治療評価および予後予測の評価は定量的な評価に影響する。PET 画像の統計雑音低減は画質向上の要素の1つであり、これまでに多くの研究が報告されている。近年では、人工知能の進歩により、画像診断をコンピュータが支援するなど、深層学習技術が医用画像に広く利用されている。本論説では、定量的な評価に影響を与える統計雑音低減に関する研究について、再構成画像の統計雑音低減法に焦点を当てた。臨床では、一般的に再構成画像にガウシアンフィルタを用いて PET 画像の統計雑音を低減し、画質の向上を図っている。しかし、ガウシアンフィルタを用いた統計雑音の低減では、同時に空間分解能も低下してしまうため、定量値の正確性を維持しながら統計雑音を低減できるエッジ保存平滑化フィルタが開発された。また、深層学習を用いて統計雑音低減されたフィルタは、短時間の画像収集においても、理論上では従来の後処理フィルタより効果的に統計雑音を低減できる。これらの統計雑音低減法についての先行研究を報告する。

キーワード：PET、統計雑音低減、後処理フィルタ、深層学習

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 74-79頁, 2024年 (受付 2024.1.26.; 受理 2024.4.30.)

緒 言

陽電子放射型断層撮像法 (positron emission tomography: PET) は、陽電子を放出する放射性同位元素で標識された放射性化合物を体内に投与し、その陽電子が周囲の電子と結合して消滅する際に放出される消滅放射線を検出することにより、その放射性化合物の体内濃度分布を画像化する撮像法である。

PET 検査において、疾患の診断成績、治療評価および予後予測の評価は、定量値の正確性に影響を与える^{1,2)}。定量値の正確性や精度に影響を与える因子として、患者の体動や PET 装置自体の精度管理、部分容積効果、画像再構成法、統計雑音および補正方法などが挙げられる³⁾。

本稿は、定量的な評価に影響を与える統計雑音低減に関する先行研究における、画像再構成後の統計雑音低減法について報告する。

1. PET 検査における後処理フィルタの違いによる統計雑音低減法

PET 画像の統計雑音を低減する方法として、一般的に再構成画像にガウシアンフィルタ (gaussian filter: GF) を使用して平滑化を行うことにより、信号対雑

音比 (signal to noise ratio: SNR) を向上させている⁴⁻⁶⁾。しかし、GF は統計雑音の低減と同時に空間分解能も低下させてしまう。空間分解能の低下により小さな病変の描出能が低下するため、臓器や病変の境界などから統計雑音による信号強度の変動を最小限に抑えて SNR を向上させるエッジ保存平滑化フィルタの使用が提案されている⁴⁻⁶⁾。

1) PET 画像の後処理におけるバイラテラルフィルタ (bilateral filter: BF) の適合性

バイラテラルフィルタ (bilateral filter: BF) はエッジ保存平滑化フィルタの1つであり、GF をベースとしたフィルタである。GF は画像マトリクスの中央に近い画素ほど大きな重みづけがされるような処理が行われるが、周囲の大きい画素値が隣接する画素値に影響を与え、画素間の境界が不鮮明になる。これに対して BF では、画像マトリクスの中心と隣接するピクセル値の差が大きい場合、周囲のピクセルの重みを小さくして、エッジを保存した平滑化を行っている^{4,7)}。

このような特徴の BF を用いた PET 画像の後処理における適合性の先行研究が行われている。Hofheinz らは、患者10名に対し全身 FDG-PET 撮像を行い、取得した断層画像に ordered subsets expectation maximization

責任著者：津田啓介

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.tsuda.rz@juntendo.ac.jp

(OSEM) 画像再構成法を用いた⁴⁾。OSEM 法は、逐次近似法の一種である。 γ 線の発生がポアソン分布に従う確率過程であることを利用し、投影データと期待値の関係において期待値が最大となる値を算出する maximum likelihood expectation maximization (MLEM) 法を高速化したものであり、投影データをいくつかのサブセットに分割して計算する手法である³⁾。そして、Hofheinz らは、この OSEM 法を使用した画像を原画像 (original) とし、画像の統計雑音の推定のために肝臓と肺の中央にそれぞれ球状の立体的な関心領域を配置した。患者10名の原画像とその原画像に GF や BF をかけたデータセットを作成し、そのデータセットに対して SNR の逆数の比を用いて定量評価を行った。SNR は以下のように定義された。

$$\text{SNR} = \mu/\sigma$$

μ は肝臓と肺の関心領域におけるボクセル値の標準偏差、 σ はそのボクセル値の平均値であり、ノイズレベルは SNR の逆数の比 (σ/μ の比) と示された。つまり、ノイズレベルが低い値になれば SNR が向上したと考えられる。

Hofheinz らの報告において、原画像の統計雑音は肝臓で30.0%、肺で36.2%であった。GF では、肝臓で15.7%、肺で20.1%であり、BF を用いると肝臓で18.9%、肺で17.8%に減少した。したがって、後処理フィルタを使用すると元の画像データにおける統計雑音を約2分の1に低減でき、SNR が約2倍向上したと報告されている⁴⁾。

また、異なる後処理フィルタによる maximum standardized uptake value: SUV_{max} の評価では、GF を用いると空間分解能の低下に伴い部分容積効果が増大し、特に小さい病変で定量値の正確性が損なわれる。しかし、BF の場合、病変の大きさに依存性はなく、 SUV_{max} の誤差は少なくなる。これは、病変内部の統計雑音低減により関心領域内の最大ボクセルの値が減少して SUV_{max} の変動が抑えられたためである。これらのように、BF は GF よりも定量値の正確性を維持しながら PET 画像の SNR を向上できるフィルタである^{4,7)}。

2) Spatially Guided NLM (SG-NLM) の性能評価

BF など多くのエッジ保存平滑化フィルタは、隣接したピクセルに対して重み付けをするため、ボケや重みの構造損失の原因を注目画素近くの領域内のみにあるとみなしてしまう。そこで、定義されたマトリクス内の画像全体に存在する非局所領域から類似性のある情報を抽出し、基礎となる重みの構造を維持しながら効果的な信号と統計雑音を識別することが可能である

non local means (NLM) フィルタが用いられるようになった^{5,6)}。

しかし、NLM フィルタは BF などの計算時間を短縮させるために重み付け箇所を限定したものと異なり、事前に定義したマトリクス内の画像全体に対する情報を重み付け平均化するため、計算処理時間が長くなる⁵⁾。特に三次元 (3D) PET イメージングにおいて適用される場合、その影響は顕著に現れる。Arabi らは、この問題を解決するために spatially guided NLM (SG-NLM) フィルタを開発した⁵⁾。検索ウィンドウと呼ばれる事前に定義されたマトリクスは通常、標的とする箇所の近くに限定される。したがって、NLM フィルタでは検索ウィンドウの外側に存在する類似した情報を見落としてしまう。SG-NLM フィルタは、異なる信号強度と強調されたエッジに基づいて作成した画像を用いている。その画像は、複数の入力画像を重ねて1つにまとめた画像である。これを利用することで、外側に存在する類似した情報も重み付けが可能となる。したがって、SG-NLM フィルタは結果的に計算処理の負荷を緩和し、画像の類似情報を抽出することができる。

コンピュータシミュレーション、画質評価ファントムを用いた実験および臨床研究において、SG-NLM フィルタは従来の NLM フィルタ、BayesShrink wavelet (BW) フィルタ、BF および GF に対して比較された。

BW フィルタは Chang ら⁸⁾が考案した、“BayesShrink”と呼ばれる閾値選択によるウェーブレット閾値処理を使用した非線形統計雑音低減法である。画像の周波数成分に基づき、閾値処理されたウェーブレット係数に対して逆ウェーブレット変換を行うことによって、統計雑音低減された画像が取得できる⁹⁾。

Arabi らの研究は、15名の頭頸部がん患者に対して実施された⁵⁾。統計雑音低減法の効果を評価するために15名の患者の FDG-PET 画像に存在する悪性病変(頭頸部)と肺集積について関心領域を配置し、その内の頭頸部と肺におけるトレーサー取り込みの定量評価を行った。画像再構成法として ordinary poisson ordered subset-expectation maximization iterative algorithm: OP-OSEM が用いられ、この方法によって得られた画像を原画像 (original) とし、後処理フィルタをかけたものと比較し、 t 検定を用いて $p < 0.05$ を統計的に有意とした。肝臓や肺における SUV の統計的な変動率や contrast-to-noise ratio: CNR、SNR について、それぞれのフィルタに対して比較評価が行われた。Arabi らの報告では、NLM フィルタは GF および BF と比較して信号の変動率が抑制され、GF、BF および BW フィル

タと比較してSNRが向上した。さらに、そのNLMフィルタとSG-NLMフィルタとの結果では、肺のSUVの平均値 ($p < 0.08$) を除く全ての定量評価においてSG-NLMフィルタが優れた。SG-NLMフィルタは原画像と比較して肝臓や肺におけるSUVの平均値の変動率が約2.3%低くなった。また、SNRおよびCNRについてもSG-NLMフィルタが最も優れた画質であると示された⁵⁾。これらのことから、SG-NLMフィルタはNLMフィルタと比較して計算量に余分な負担をかけることなく、3D PET画像において統計雑音低減が可能なフィルタである。

2. PET検査における人工知能 (artificial intelligence: AI) 技術の応用

近年、急速に発展しているAI (artificial intelligence) 技術はPET検査の診断成績向上に貢献している¹⁰⁾。実地臨床では、患者や医療従事者の過度な放射線被ばくによる発がんや遺伝的な疾患の発症リスクが高まることから、放射性医薬品を投与する際の線量の低減が求められる¹¹⁻¹³⁾。また、患者の負担軽減のため画像データの収集時間の短縮も望ましい^{8, 10)}。その結果、収集カウント数の不足による統計雑音の増加やSNRの低下が起きる。これらの要因はPET画像の画質や定量性に影響を及ぼす可能性がある¹³⁻¹⁷⁾。そこで、深層学習を用いて統計雑音低減されたフィルタは、短時間の画像取得でも統計雑音を低減し、SNRの向上を可能とした。Liuらの先行研究では、GFを用いた収集時間300秒のPET画像と深層学習を用いた収集時間20秒のPET画像におけるSNRに統計的な有意差は生じなかった¹¹⁾。さらに、深層学習を用いて統計雑音低減されたフィルタは、従来のGF、BFおよびNLMフィルタなどと比較して、より効果的に統計雑音を低減し、SNRを向上させている¹⁸⁻²⁰⁾。

このような深層学習を利用した統計雑音低減法として、畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network: CNN) および正解データを与えることなく特徴を学習する教師なし学習を基本とする敵対的生成ネットワーク (generative adversarial network: GAN) が活用されている^{13-16, 21)}。CNNは畳み込み層、プーリング層および全結合層から構成され、複数層重ねることで複雑な画像の情報を抽出可能にした。また、CNNは画像内の局所的な特徴や形状を捉え、空間的な関係を考慮した特徴の予測が可能である²¹⁾。U-NetはCNNを応用したものであり、入力画像を圧縮して特徴を抽出するエンコーダと抽出された特徴を元の次元に拡大するデコーダから成り立つ。U-Netの特徴として、エ

ンコーダとデコーダの間にスキップ接続が存在することにより、詳細な情報が失われにくいことが挙げられる。このスキップ接続効果の影響で少ない学習データでも高性能なセグメンテーションが可能となっている²²⁾。また、U-Netの構造は計算効率が高い。Zoeらの研究では、学習済みのU-Netモデルを使用してリアルタイムに腫瘍の輪郭を形成し、画像による手術中のサポートに臨床的有用性があると報告されている²³⁾。これらのような特徴から、U-Netは研究に利用されることが多く、特に3D U-Netを用いた低線量PET画像の統計雑音低減に有用である^{18, 24-28)}。しかし、U-NetはCNNを基にしており、CNNは画像の局所的な特徴を抽出することに長けているが、非局所的な特徴を抽出しにくいという欠点がある²⁹⁾。

GANは、新たに独自の特徴を持ったデータを生成することや、元のデータの特徴に沿ったデータの変換が可能である^{13-16, 21)}。また、GANはGeneratorとDiscriminatorの2つのニューラルネットワークで構成される。Generatorは、生成データに偶発的な統計雑音 (ランダムノイズ) を入力することで目的のデータに類似した情報へと近づけるネットワークである。Discriminatorは、Generatorが生成した偽物の画像データと真の画像データに対して、その画像データの真偽を決定するネットワークである。これら2つのネットワークを競合させ、深層学習を進めることで本物に近いデータを生成することが可能となっている^{1, 10, 15, 20, 21)}。さらに近年では、GANを応用したものとしてCycleGANが開発された。CycleGANは、従来のGANと同様にGeneratorが生成した偽の画像をDiscriminatorを用いて本物の画像に近づけさせる方法に加えて、一度Generatorで生成した画像を別のGeneratorやDiscriminatorを使用して、再変換した画像を元の本物の画像に近づけさせる手法である³⁰⁾。そして、用意した2つの画像の形や位置が揃ってなくても教師なし学習により問題なく変換することが可能である。例えば、走っているウマの画像と自然に立っているシマウマの画像を用意した場合でも、CycleGANを用いると走っているウマと同等の姿をしたシマウマの画像を生成できる³⁰⁾。このようなことから、CycleGANは、異なる画像間において共通した特徴の情報を学習させ、互いの画像における特徴部分を変換することが可能であり、U-Netと比較して高い定量評価を得ている^{1, 10, 31-33)}。ただし、これらのGANは、入力させた画像と類似した画像を生成する“モード崩壊”と呼ばれるエラーが学習中に起き、生成されるデータに偏りが生じてしまう³⁴⁾。さらに、GeneratorとDiscriminatorのどちらか

表 1 統計雑音低減法の種類とそのメリットおよびデメリット

種類	メリット	デメリット
Gaussian Filter	• 平滑化	• 空間分解能の低下
Bilateral Filter	• エッジを保存して平滑化することによる SNR 向上	• 非局所のピクセルに対して重み付けしにくい
NLM Filter	• エッジを保存して平滑化 • Gaussian Filter や Bilateral Filter による SNR 向上 • 定義したマトリクス内全体におけるピクセルに対して重み付け可能	• 計算時間が長い
CNN	• 高度な画像認識能力 • 画像内の局所的な特徴や形状を捉え、空間的な関係を考慮した特徴の予測が可能	• 大量のデータが必要 • 多くの学習時間を要する
U-Net	• スキップ接続効果により詳細な情報が失われにくく、少量のデータでも高性能な情報のセグメンテーションが可能 • 計算効率が高い	• 画像における非局所的な特徴を抽出しにくい
GAN	• 新たに独自の特徴を持った画像を生成し、元の画像の特徴に沿った変換が可能	• モード崩壊の発生 • Generator と Discriminator の性能差による学習の質の低下
CycleGAN	• 異なる画像間において共通した特徴の情報を学習させ、互いの画像における特徴部分を変換することが可能	• モード崩壊の発生 • Generator と Discriminator の性能差による学習の質の低下

が性能的に優位になると学習の質が低下してしまう。例えば、Generator が優位になる場合、Discriminator の真偽を判別する正確性が低くなり、本物に近いデータを生成しにくくなるという問題が生じる³⁴⁾。

これらの AI 技術を応用した PET 画像の統計雑音低減法は、現在も盛んに研究結果が報告されており、さらなる発展が期待される。

ま と め

PET 画像における統計雑音低減に関連する先行研究を調査した。医療技術の発展に伴い、新たな統計雑音の低減法が開発され、従来の手法と比較して報告した。表1に本論説で調査した統計雑音低減法の種類とそのメリットおよびデメリットをまとめた。深層学習は数多くのデータを必要とするが、臨床において短時間の画像収集でも統計雑音を低減し、SNR の向上を可能としている。

謝 辞

本論説の作成にあたり、適切な助言をして下さった順天堂大学保健医療学部診療放射線学科の堀拳輔助教に深く感謝申し上げます。

倫理的配慮

本論説は、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本論説における利益相反は存在しない。

参考文献

- 1) Liu J, Malekzadeh M, Mirian N, Song TA, Liu C, Dutta J: Artificial Intelligence-based Image Enhancement in PET Imaging: Noise Reduction and Resolution Enhancement. PET Clin. 2021; 16: 553-576.
- 2) Machado MAD, Menezes VO, Namias M, Vieira NS, Queiroz CC, Matheoud R, et al: Protocols for Harmonized Quantification and Noise Reduction in Low-Dose Oncologic 18F-FDG PET/CT Imaging. J Nucl Med Technol. March 2019; 47: 47-54.
- 3) Hudson HM, Larkin RS: Accelerated image reconstruction using ordered subsets of projection data. IEEE Trans Med Imaging.1994; 13: 601-609.
- 4) Hofheinz F, Langner J, Beuthien-Baumann B, Oehme L, Steinbach J, Kotzerke J, et al: Suitability of bilateral filtering for edge-preserving noise reduction in PET. EJNMMI Res. 2011; 1: 23.
- 5) Arabi H, Zaidi H: Spatially guided nonlocal mean approach for denoising of PET images. Med Phys. 2020; 47: 1656-1669.
- 6) Arabi H, Zaidi H: Non-local mean denoising using multiple PET reconstructions. Ann Nucl Med. 2021; 35: 176-186.
- 7) Manduca A, Yu L, Trzasko JD, Khaylova N, Kofler

- JM, McCollough CM, et al: Projection space denoising with bilateral filtering and CT noise modeling for dose reduction in CT. *Med Phys*. 2009; 36: 4911-9.
- 8) Chang SG, Yu B, Vetterli M: Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression. *IEEE Trans Image Process*. 2000; 9: 1532-46.
 - 9) Ikeda M, Makino R, Imai K: A new evaluation method for image noise reduction and usefulness of the spatially adaptive wavelet thresholding method for CT images. *Australas Phys Eng Sci Med*. 2012; 35: 475-83.
 - 10) Matsubara K, Ibaraki M, Nemoto M, Watabe H, Kimura Y: A review on AI in PET imaging. *Ann Nucl Med*. 2022; 36: 133-143.
 - 11) Liu E, Lyu Z, Yang Y, Lv Y, Zhao Y, Zhang X, et al: Sub-minute acquisition with deep learning-based image filter in the diagnosis of colorectal cancers using total-body 18F-FDG PET/CT. *EJNMMI Res*. 2023; 13: 66.
 - 12) Gavrilidis P, Koole M, Annunziata S, Mottaghy FM, Wierts R: Positron Range Corrections and Denoising Techniques for Gallium-68 PET Imaging: A Literature Review. *Diagnostics (Basel)*. 2022; 12: 2335.
 - 13) Zhou L, Schaefferkoetter JD, Tham IWK, Huang G, Yan J: Supervised learning with cyclegan for low-dose FDG PET image denoising. *Med Image Anal*. 2020; 65: 101770.
 - 14) Zhao K, Zhou L, Gao S, Wang X, Wang Y, Zhao X, et al: Study of low-dose PET image recovery using supervised learning with CycleGAN. *PLoS One*. 2020; 15: e0238455.
 - 15) Hu Y, Lv D, Jian S, Lang L, Cui C, Liang M, et al: Comparative study of the quantitative accuracy of oncological PET imaging based on deep learning methods. *Quant Imaging Med Surg*. 2023; 13: 3760-3775.
 - 16) Usui K, Ogawa K, Goto M, Sakano Y, Kyougoku S, Daida H: Quantitative evaluation of deep convolutional neural network-based image denoising for low-dose computed tomography. *Vis Comput Ind Biomed Art*. 2021; 4: 21.
 - 17) Quak E, Weyts K, Jaudet C, Prigent A, Foucras G, Lasnon C: Artificial intelligence-based 68Ga-DOTATOC PET denoising for optimizing 68Ge/68Ga generator use throughout its lifetime. *Front Med (Lausanne)*. 2023; 10: 1137514.
 - 18) Xing Y, Qiao W, Wang T, Wang Y, Li C, Lv Y, et al: Deep learning-assisted PET imaging achieves fast scan/low-dose examination. *EJNMMI Phys*. 2022; 9: 7.
 - 19) Itagaki K, Miyake KK, Tanoue M, Oishi T, Kataoka M, Kawashima M, et al: Feasibility of Dedicated Breast Positron Emission Tomography Image Denoising Using a Residual Neural Network. *Asia Ocean J Nucl Med Biol*. 2023; 11: 145-157.
 - 20) Muller FM, Vervenne B, Maebe J, Blankemeyer E, Sellmyer MA, Zhou R, et al: Image Denoising of Low-Dose PET Mouse Scans with Deep Learning: Validation Study for Preclinical Imaging Applicability. *Mol Imaging Biol*. 2024; 26: 101-113.
 - 21) Manoj Doss KK, Chen JC: Utilizing deep learning techniques to improve image quality and noise reduction in preclinical low-dose PET images in the sinogram domain. *Med Phys*. 2024; 51: 209-223.
 - 22) Ronneberger O, Fischer P, Brox T: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *MICCAI 2015*. Cham. Springer. 2015: 234-241.
 - 23) Hu Z, Nasute Fauerbach PV, Yeung C, Ungi T, Rudan J, Engel CJ, et al: Real-time automatic tumor segmentation for ultrasound-guided breast-conserving surgery navigation. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2022; 17: 1663-1672.
 - 24) 大手希望, 得居葵, 橋本二三生, 磯部卓志, 齊藤右典, 大村知秀: 畳み込みニューラルネットワークによるPET画像ノイズ除去. *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*. 2019; 37: 35-45.
 - 25) Liu Q, Liu H, Mirian N, Ren S, Viswanath V, Karp J, et al: A personalized deep learning denoising strategy for low-count PET images. *Phys Med Biol*. 2022; 67: 10. 1088/1361-65601ac783d.
 - 26) Lu W, Onofrey JA, Lu Y, Shi L, Ma T, Liu Y, et al: An investigation of quantitative accuracy for deep learning based denoising in oncological PET. *Phys Med Biol*. 2019; 64:165019.
 - 27) Schaefferkoetter J, Yan J, Ortega C, Sertic A, Lechtman E, Eshet Y, et al: Convolutional neural networks for improving image quality with noisy PET data. *EJNMMI Res*. 2020; 10: 105.
 - 28) Liu CC, Qi J: Higher SNR PET Image Prediction using A Deep Learning Model and MRI Image. *Phys Med Biol*. 2019; 64: 115004.
 - 29) Cao H, Wang Y, Chen J, Jiang D, Zhang X, Tian Q, et al: Swin-Unet: Unet-like Pure Transformer for Medical Image Segmentation. *European conference on computer*

- vision. ECCV 2022. Cham. Springer. 2022: 205-218.
- 30) Radford A, Metz L, Chintala S: Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.06434>, Accessed February 24, 2024.
- 31) Arabi H, AkhavanAllaf A, Sanaat A, Shiri I, Zaidi H: The promise of artificial intelligence and deep learning in PET and SPECT imaging. *Phys Med*. 2021: 83: 122-137.
- 32) Pain CD, Egan GF, Chen Z: Deep learning-based image reconstruction and post-processing methods in positron emission tomography for low-dose imaging and resolution enhancement. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2022: 49: 3098–3118.
- 33) Amirrashedi M, Sarkar S, Mamizadeh H, Ghadiri H, Ghafarian P, Zaidi H, et al: Leveraging deep neural networks to improve numerical and perceptual image quality in low-dose preclinical PET imaging. *Comput Med Imaging Graph*. 2021: 94: 102010.
- 34) Zhu JY, Park T, Isola P, Efros AA: Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 2017: 2223-2232.

Abstract

Statistical noise reduction processing methods for PET imaging

Junpei Suzuki, Keisuke Tsuda

Department of Radiological Technology
Juntendo university Graduate school of Health Science

The assessment of disease diagnosis, treatment evaluation, and prognosis prediction by positron emission tomography (PET) relies heavily on quantitative accuracy. Reduction of statistical noise in PET imaging is a key element for improving image quality, and has been the subject of numerous studies. Recent advances in artificial intelligence have led to the widespread application of deep learning techniques such as computer-assisted image diagnostics to medical imaging. This article focuses on research related to the reduction of statistical noise in reconstructed images, with a particular emphasis on methods for removing statistical noise to enhance quantitative accuracy. In clinical settings, it is common to use a Gaussian filter to reduce statistical noise in reconstructed PET images, and thus improve image quality. However, a simultaneous decrease in spatial resolution occurs with statistical noise reduction using Gaussian filters, which has prompted the development of edge-preserving smoothing filters that remove statistical noise while maintaining quantitative accuracy. In addition, image filters created based on deep learning have been proven theoretically to be more effective than conventional post-processing filters for removing statistical noise, even in short-duration image acquisition. The development of edge-preserving smoothing filters and the application of deep learning-based image filters are promising avenues for achieving improved quantitative accuracy while addressing the challenges posed by traditional methods. Overall, this discussion highlights the potential of these statistical noise reduction techniques to enhance the accuracy and reliability of PET imaging in clinical applications. This article presents a review of previous studies that describe state-of-the-art statistical noise reduction methods.

Key Words: PET, statistical noise reduction, post-processing filter, deep learning

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 74-79, 2024]

fMRI による脳機能解析：てんかんへの臨床応用

佐々木香乃、後藤政実

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) は、非侵襲的に脳機能イメージングを行うことができる MRI 撮像法の一つである。fMRI は、血中の酸素濃度の違いによってコントラストに差が付く BOLD (blood oxygenation level dependent) 法を利用し、賦活化している箇所を高信号で映し出す。1990年に BOLD 法を用いた fMRI が提唱され、現在では主に精神疾患の病態解明の研究に用いられており、一部の病院では、fMRI を臨床で応用していくための、てんかんの術前検査に用いる研究が進められている。てんかんの術前に行う言語優位半球同定検査において、現在では Wada test がゴールドスタンダードとされているが、fMRI は Wada test よりも非侵襲的に検査を行うことができるため、今後の研究の発展に伴い、fMRI がてんかんの術前検査のゴールドスタンダードに変わるのではないかと期待される。

キーワード：fMRI、脳機能解析、BOLD 法、Wada test

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 80-84頁, 2024年 (受付 2024.3.13.; 受理 2024.4.24.)

1. はじめに

脳というのは未だに謎の多い臓器である。脳の謎を解明するために、様々な研究が行われている。脳機能イメージングは、脳の活動状況により生じた局所の代謝や血流変化 (局所血流動態) を捉え、画像化するのである。脳機能イメージング方法として、 $H_2^{15}O$ を用いた PET (Positron Emission Tomography) や、NIRS (Near-infrared spectroscopy: 近赤外線分光法) が用いられてきたが、近年では fMRI (functional magnetic resonance imaging: 機能的磁気共鳴画像法) が注目されている。その理由としては、PET で必須となる放射性薬剤投与の必要がなく、NIRS では得られない構造画像を取得できる点が考えられる。MR 装置があれば、非侵襲的に空間分解能の高い脳機能イメージングを行うことができるという点で非常に有用である¹⁾。実際に現在、fMRI は精神疾患における脳の活動パターンの解析や、脳腫瘍など術前の切除部位確認のために用いられている。

本論説は、fMRI の発展の歴史や原理、現在の臨床への応用状況をレビューすることを目的とした。

2. fMRI の発見

fMRI では BOLD (blood oxygenation level dependent)

法が主に用いられている。BOLD 法は、1990年、ベル研究所の小川誠二らによって発見された²⁾。小川らは、麻酔下のラットに酸素吸入を行って血中酸素濃度を変化させ、高磁場 (7 T 以上) MR 装置で、GRE (Gradient echo Sequences) 法を用いて T2*WI (T2-weighted image) を撮像した²⁾。撮像結果から、血中酸素濃度の変化で画像から得られる情報が変化することを発見した。血中酸素濃度が100%の状態では、脳の大きな形骸画像が撮像され、血中酸素濃度を通常の大気と同等の条件である20%に減少させると、脳全体に血管と考えられる線状の信号損失 (細く黒い線) が見られた。小川らは、血中の酸素状態と磁化率との関係を証明するために、生理食塩水に oxyhemoglobin (オキシ Hb) と deoxyhemoglobin (デオキシ Hb) をそれぞれ多く含んだ液体を、SE (Spin echo) 法と GRE 法で撮像した。オキシ Hb は、SE 法・GRE 法どちらにおいても画像内に歪みは見られなかった。デオキシ Hb は、SE 法ではわずかに歪みを認める程度だったが、GRE 法では大きく歪みを認めた²⁾。デオキシ Hb は磁化率効果を持ち、GRE 法において MR 信号を減弱することが証明された²⁾。

3. BOLD fMRI の原理

BOLD 法を用いた fMRI のコントラストは、血液の

酸素濃度の違いに依存する。オキシ Hb は、磁場に対して反対に作用する反磁性で、不対電子を持たないため磁気モーメントが0である。デオキシ Hb は、局所の磁場強度を強める常磁性で、不対電子と強力な磁気モーメントを持つ。常磁性体は周囲の磁場を歪めるため、デオキシ Hb が多い箇所では近傍のプロトンが受ける磁力が変化し、異なる周波数で歳差運動するようになり、横磁化の急激な減衰をもたらす (T2* を短縮する)。この現象により、完全に脱酸素化された血液は、完全に酸素化された血液に比べ20%磁化率が高いという性質を持つ。T2* に感受性が高い MR パルスシーケンス (echo-planar imaging) を用いた時、デオキシ Hb が局所的に増加している箇所では MR 信号が減弱し、デオキシ Hb が局所的に減少している箇所では MR 信号が増強する³⁾。

脳内で神経活動が起こった際、電位の伝播、シナプス前接合部への小胞の結合、シナプスギャップを超えた神経伝達物質の放出などが発生する。脳内の神経信号のプロセスでは、アデノシン三リン酸 (Adenosine tri-phosphate: ATP) を必要とする⁴⁾。ATP の生成は、酸素を用いて、二酸化炭素が生成されるため、神経活動が発生した箇所では、脳酸素消費量が増加し、局所的な酸素欠乏が起こる。酸素欠乏を回復するために、活性箇所の脳血流 (オキシ Hb) が増加し、酸素消費を上回る酸素供給をもたらす。この現象により活性化した箇所では、デオキシ Hb < オキシ Hb となり、MR 信号が増強される。脳血流の変化による BOLD コントラストを MR 装置で捉え、解析することで、fMRI の脳機能イメージングが得られる。

4. 計測の対象と方法

fMRI には、活動が脳のどの部分で行われているのかを調べる task-based fMRI (以下 task fMRI) と、脳の各部位間の機能的結合を同定し、脳ネットワークを推定する resting state fMRI (以下 rest fMRI) がある。

task fMRI は、何らかの課題 (task) を行った際の BOLD 信号の変化を捉えた画像を得る。被験者に、指を動かすなどの運動刺激や、名前や日付を答える言語刺激などの課題を与え、被験者が活動を行った際の神経活動に伴う脳血流の変化が、BOLD コントラストとして現れる。検査は task と休憩を交互に繰り返すブロックデザインに従って実行され、休憩時の信号から task 時の信号を差分して画像化するものが最も単純な手法である。また、T1WI を形態画像として撮像し、fMRI 信号画像と重ね合わせることで高解像度の fMRI 画像を得ることができる⁵⁾。

rest fMRI は、1995年、Biswal らが発見した脳機能イメージング法である。1990年に fMRI が発見され、多くの研究者がブロックデザインを用いた task fMRI の研究を行う中で、安静時に BOLD 信号が自発的な変動を示すことが認識された。当初は、多くの試行やタスクブロックにより起こるノイズと見なされていた⁶⁾。しかし、Biswal とその同僚らは、安静時に BOLD 信号が増大するのは特定の領域であることを発見し、その変化を機能的な脳の局在化に利用できるのではないかと考えた⁷⁾。その後研究は進み、近年ではこれらの変動が脳の機能局在を反映していることが示されている⁸⁾。安静時に神経活動が亢進した領域は、内側前頭前野と後部帯状回およびそれに隣接する楔前部、下頭頂小葉であった。これらの部位は、DMN (default mode network) と呼ばれる⁹⁾。rest fMRI は、小児や昏睡状態など task を行うことが難しい患者でも行うことが可能であり、特定の脳領域の機能、異なる脳領域間の機能的接続性に関する情報を抽出できるという点で非常に有用である⁶⁾。

5. fMRI の臨床応用

fMRI は発見されてから30年程しか経っておらず、主に精神疾患の発症メカニズム解明のための脳機能研究に用いられることがほとんどで、現状では広く臨床現場で用いられているものではない。しかし、これから精神疾患の研究が進むにつれ、臨床現場で診断や治療方針決定の材料の一つとして広く普及していくのではないかと考える。

例えば、ASD (Autism Spectrum Disorder: 自閉症スペクトラム障害) 患者は、rest fMRI で症状の重症度に比例した脳の機能的接続性の低下を示す¹⁰⁾。task fMRI では、羞恥心を感じたり、周囲と同じ動きをしたりするなどの社会的脳領域の活動が弱いということが判明している¹⁰⁾。この結果から、fMRI では ASD の症状の度合いを評価することができるといえるため、その患者の状態に合った治療法を選択できるようになると考えられる。その他には、鬱病などの精神疾患や、偏頭痛などの病態解明に用いられている^{11,12)} が、近い将来、臨床応用が最も期待されるのは、てんかんの術前検査であると考ええる。

6. てんかんの術前検査

fMRI は、難治性てんかん (薬剤抵抗性てんかん) の切除手術の術前検査として、既に一部の病院では用いられている。難治性てんかんは、日本てんかん学会のガイドラインを参照すると、「2ないし3種類の抗てんかん薬を服用しているにもかかわらず、2年以上持続的に発作を繰り返している患者」を指す。

んかん薬による単独療法または併用療法がなされているにも関わらず、発作の抑制されていない状態が2年以上持続している状態¹³⁾である。難治性てんかん患者は、てんかん患者全体の約20～40%を占めており¹⁴⁾、切除術は、難治性てんかん患者の完全な発作抑制を目標として、有効な治療法であるとされている¹⁵⁾。切除術適応例の大多数は、側頭葉てんかん (temporal lobe epilepsy: TLE) を患っており、前頭側頭葉切除術 (anterior temporal lobectomy: ATL) の対象である¹⁶⁾。切除術を行う前に、術後の脳機能障害を防ぐために切除してはいけない箇所を同定する検査を行う。言語機能を司る箇所を同定するために、現在では Wada test による頸動脈内アモバルビタルテスト (intracarotid amobarbital testing: IAT) がゴールドスタンダードとして用いられている。Wada test は内頸静脈から麻酔薬を注入し、同側半球の機能を一時的に停止し、その状態で名前や年齢、日付を尋ねたり、音読課題を課して、言語優位半球を同定する^{17, 18)}。しかし、Wada test にはいくつかのデメリットがある。1つ目は副反応の問題が挙げられる。脳内の麻酔薬分布を予測するための脳血管造影を行うため、造影剤によるアナフィラキシーショックや、脳卒中、カテーテル挿入部位からの出血などが1.1～11%程度の割合で発生する。また、麻酔薬として標準ではアモバルビタルが用いられるが、アモバルビタルは入手が難しい麻酔薬であるため、プロポフォールを用いる場合もある。プロポフォールは患者の3分の1にけいれんなどの副作用が起こるリスクの高い麻酔薬であるため、検査は慎重に行う必要がある。麻酔薬を用いたことによる副作用として、術後の認知機能の低下や傾眠傾向も挙げられる^{18, 19)}。2つ目は、言語優位脳が右大脳半球なのか、左大脳半球なのかを判明するだけで、具体的な局在が分からないという点である¹⁸⁾。

fMRI での術前検査は、Wada test と同じように言語タスクを課し、それを行った際の BOLD 信号の変化を画像化する。Wada test よりも非侵襲的で、空間分解能が高い¹⁸⁾。さらに、拡散テンソル像と一緒に撮像することで、手術時に運動に関連した領域を切除することを防ぐことができる¹⁹⁾などのメリットがあるが、一番のメリットは優位半球だけでなく、局在まで分かることである¹⁹⁾。fMRI のデメリットには、1つ目に活性化した箇所が必ずしも言語領域であるとは限らないという点がある。言語タスクを行う際、名前を聞かれて答える場合には、言語領域だけでなく、名前を思い出すための記憶領域や、指示を聞くという点では注意領域など、言語領域以外のところも高信号を示す¹⁹⁾。

表 1 fMRI と Wada test の特徴比較

	fMRI	Wada test
検査実施に伴う副反応	小	大
検査実施に伴う侵襲性	小	大
脳機能局在の把握	領域レベル	半球レベル
検査結果の信頼性	低い	高い
造影剤	不要	要
小児への適用	困難	可能

2つ目は、小児など長い時間同じ姿勢でいることができない、体内に金属がある、閉所恐怖症のような通常 MR 検査を行うことのできない患者には不適であるという点があげられる¹⁸⁾。両者の特徴比較を表1に示す。

Wada test と fMRI の間には90%以上の結果の一致がみられており^{14, 16)}、言語優位脳がどちらかの半球に寄っている際は、fMRI の検出能がより優れている。しかし、fMRI は被験者の知能レベルや、検査の手順などの他因子に結果が左右されやすく、両側性の場合には Wada test の検出能がより優れており¹⁵⁾、現状は完全に置き換えられず、補完的役割である¹⁶⁾。しかし、今後研究が進み、より分解能の高い高磁場装置での撮像や、言語機能領域だけを描出できる解析法の開発などにより、Wada test に代わり fMRI がゴールドスタンダードとして用いられるようになるのではないかと考えられる。

7. まとめ

本稿では、BOLD 法の原理、fMRI の計測方法、臨床における応用に関してまとめた。fMRI が発見されたことによって、MR 装置を用いた非侵襲的な脳機能解析は、更なる発展を遂げた。現在は、研究に用いられることが多いが、近い将来、多くの病院で精神疾患の診断や治療の材料として用いられ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) Raichle ME: Behind the scenes of functional brain imaging: a historical and physiological perspective.

- Proc Natl Acad Sci U S A. 1998; 95: 765-772.
- 2) Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, Glynn P: Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med*. 1990; 14: 68-78.
 - 3) Glover GH: Overview of functional magnetic resonance imaging. *Neurosurg Clin N Am*. 2011; 22: 133-139.
 - 4) Ruegg MA: Molecules involved in the formation of synaptic connections in muscle and brain. *Matrix Biol*. 2001; 20: 3-12.
 - 5) Maheshwari M, Deshmukh T, Leuthardt EC, Shimony JS: Task-based and Resting State Functional MRI in Children. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2021; 29: 527-541.
 - 6) Lv H, Wang Z, Tong E, Williams LM, Zaharchuk G, Zeineh M, et al: Resting-State Functional MRI: Everything That Nonexperts Have Always Wanted to Know. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2018; 39: 1390-1399.
 - 7) Biswal B, Yetkin FZ, Haughton VM, et al: Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn Reson Med: official J Soc Magn Reson Med/Soc Magn Reson Med* 1995; 34: 537-541.
 - 8) Maheshwari M, Deshmukh T, Leuthardt EC, Shimony JS: Task-based and Resting State Functional MRI in Children. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2021; 29: 527-541.
 - 9) Raichle ME, Mintun MA: Brain work and brain imaging. *Annu Rev Neurosci* 2006; 29: 449-476.
 - 10) Sato W, Uono S: The atypical social brain network in autism: advances in structural and functional MRI studies. *Curr Opin Neurol*. 2019; 32: 617-621.
 - 11) Han KM, De Berardis D, Fornaro M, Kim YK: Differentiating between bipolar and unipolar depression in functional and structural MRI studies. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*. 2019; 91: 20-27.
 - 12) Messina R, Gollion C, Christensen RH, Amin FM: Functional MRI in migraine. *Curr Opin Neurol*. 2022; 35: 328-335.
 - 13) 三原忠紘, 藤原建樹, 池田昭夫, 他 : てんかん外科の適応に関するガイドライン. てんかん研. 2008; 26: 114~118.
 - 14) Campbell JM, Kundu B, Lee JN, Miranda M, Arain A, Taussky P, et al: Evaluating the concordance of functional MRI-based language lateralization and Wada testing in epilepsy patients: A single-center analysis. *Interv Neuroradiol*. 2023; 29: 599-604.
 - 15) Pelletier I, Sauerwein HC, Lepore F, Saint-Amour D, Lassonde M: Non-invasive alternatives to the Wada test in the presurgical evaluation of language and memory functions in epilepsy patients. *Epileptic Disord*. 2007; 9: 111-26.
 - 16) Detre JA: fMRI: applications in epilepsy. *Epilepsia*. 2004; 45: 26-31.
 - 17) Massot-Tarrús A, Mirsattari SM: Roles of fMRI and Wada tests in the presurgical evaluation of language functions in temporal lobe epilepsy. *Front Neurol*. 2022; 13: 884730.
 - 18) Abou-Khalil B: An update on determination of language dominance in screening for epilepsy surgery: the Wada test and newer noninvasive alternatives. *Epilepsia*. 2007; 48: 442-455.
 - 19) Binder JR: Functional MRI is a valid noninvasive alternative to Wada testing. *Epilepsy Behav*. 2011; 20: 214-222.

Abstract

The brain functional analysis with fMRI: the clinical application in epilepsy

Kayano Sasaki, Masami Goto

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

Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a type of MRI imaging technique that allows noninvasive functional brain analysis. fMRI uses the blood oxygenation level dependent (BOLD) method, in which contrast is produced by differences in oxygen concentration in the blood, to visualize areas of activation. Since its inception in 1990, it is now often used in research to elucidate the pathophysiology of psychiatric disorders. Moreover, some hospitals are studying the use of fMRI as a preoperative test for epilepsy. The Wada test is now considered the gold standard for preoperative identification of the language-dominant hemisphere in epilepsy. However, since fMRI is more noninvasive than the Wada test, it is expected that fMRI will replace the Wada test as the gold standard for preoperative testing for epilepsy as research continues to develop.

Key Words: fMRI, Analysis of the brain, BOLD method, Wada test

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 80-84, 2024]

Activation of meat by neutron irradiation and biokinetics of radionuclide from ingested activated meat

Maria Yoshida^{1,2)}, Machiko Hatsuda¹⁾, Hayato Kimura¹⁾, Yumi Koganei¹⁾, Shiomi Komoriya¹⁾, Yui Hamano¹⁾, Miyu Sakai¹⁾, Yasuaki Sakano¹⁾, Shinsuke Kyogoku¹⁾, Hiroyuki Daida¹⁾

¹⁾ Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University

²⁾ Iwaki City Medical Center

Abstract

The effects of radiation on the human body during space exploration to the Moon and Mars, and the use of neutron beams of boron neutron capture therapy (BNCT) in medicine have attracted much attention. In this study, we conducted experiments on the activation of food by fast neutrons that would be generated secondarily in a spacecraft in deep space, and investigated the effects on the human body through the in vivo dynamics of the ingestion of activated food. The interaction between neutrons and matter strongly depends on both the type of matter and the energy of the neutrons, and various kinds of interaction occur. This study aims to scientifically evaluate the effects of neutron radiation from the perspective of internal exposure due to food ingestion and to give a basic process for taking countermeasures. In this experiment, pork was selected as a food sample since pork contains a large amount of essential amino acids essential for life. The neutron irradiation experiment used the RIKEN Accelerator-driven compact neutron source (RANS). Radioactive isotopes produced by neutron irradiation were identified from the γ -ray spectra measured by the Germanium (Ge) semiconductor detector. Nuclear elements contained in the pork that produce the radioisotopes and their nuclear reactions were identified using the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) database. Furthermore, the characteristics of the radioisotopes, biokinetics such as their circulation in the body after ingestion, and their effects were discussed.

Key Words: radioactivation analysis, neutron irradiation, deep space, food

Juntendo Health Science Journal 5(1): 85-92, 2024 (Received Dec. 6. 2023 ; Accepted Mar. 13. 2024)

Introduction

In deep space environments to explore the Moon and Mars, cosmic rays are a significant risk factor. In addition to primary cosmic rays, there are secondary cosmic rays such as neutron, proton, and γ -rays that are generated inside the spacecraft due to the interaction between cosmic rays and the walls of the spacecraft. It was shown that the neutron flux becomes significantly larger in the spacecraft with 15 g/cm² aluminum shielding¹⁾. Not only the effects of cosmic rays-radiation on the human body but also the effects on various space foods will also be an important risk factor.

Irradiation of food for the purpose of sterilizing food, killing insects, and preventing germination has

become widespread. X-rays, gamma rays, and electron beams are used for irradiating food. However, the effects of neutron beams on food resources have rarely been studied because of the difficulty of handling neutron beams, which are generated mainly by large equipment such as nuclear reactors or accelerators.

The interaction between neutrons and matter strongly depends on both the type of matter and the energy of the neutrons, and various kinds of interaction occur²⁾. When elements constituting food are transformed into radioactive elements by cosmic ray irradiation and activated to emit radiation, ingestion of the food can cause internal exposure.

As effects of cosmic rays, not only external exposure due to direct irradiation to the human body but also

Corresponding author: Machiko Hatsuda
Department of Radiological Technology, Faculty of Health Science, Juntendo University
1-5-32 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, 113-0034
E-mail: mhatsuda@juntendo.ac.jp

indirect internal exposure through the ingestion of activated food, etc., must be considered. To take measures to prevent the occurrence of internal radiation exposure, it is important to evaluate specifically how the effects of internal exposure manifest themselves. It is necessary to elucidate the radiation physics and radiation chemistry of the process of food activation in deep space environments. It is also necessary to elucidate the nature of the produced radioactive elements and the possible effects of ingesting them from the viewpoints of radiation physics and medicine. In this study, biokinetics such as the circulation of radioactive elements in the body after ingestion and their effects were discussed.

Methods

1. Pork sample preparation

In this experiment, commercially available Japanese pork shoulder block meat was used as the food sample for neutron irradiation (Fig. 1 left). To clarify the role of water in the effects of neutron irradiation on biomolecules, comparative experiments were conducted by preparing raw meat samples and dried meat samples. First, the meat was cut into pieces with a knife and ground into a paste using a food processor in a low-temperature room (4°C) at the Juntendo University Biomolecular Laboratory. This experiment involves biochemical analysis as well as activation analysis. A temperature of 4°C in a refrigerated room is necessary to prevent decomposition, etc. of biological materials. Then, 2.00 g or 3.00 g of the paste-like meat was weighed and placed in an Eppendorf container for the freeze-dried meat samples and in a breast milk bag for the fresh meat samples

(cryopreservation is necessary for biochemical analysis, and the breast milk bag withstands flash freezing with liquid nitrogen). To freeze-dry the samples, they were flash-frozen through liquid nitrogen and then freeze-dried for 21 hours in a vacuum freeze-drying unit. The freeze-dried meat samples were white in color (Fig. 1 right), and the average of water evaporation, (mass before drying - mass after drying)/mass before drying, for the eight dried meat samples was $(74.5 \pm 0.5)\%$.

2. Neutron irradiation experiments and radiation measurements

The meat sample prepared by Method 1 was irradiated with fast neutrons of about 1 to 5 MeV by RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source (RANS). The reason for the energy of about 1 to 5 MeV was to create a situation like the deep space environment (inside a spacecraft) where neutrons below a few MeV are the most abundant in galactic cosmic rays¹⁾. Since the type of nuclear reaction between neutrons and matter depends on the energy of the neutrons, the production of fast neutron beams is essential for exploring their effects in deep space environments.

The mechanism of neutron irradiation by RANS is as follows.

- i. Place meat samples in the target station of RANS without a moderator in such a way that fast neutrons directly irradiate meat samples.
- ii. Protons are accelerated to 7 MeV in the accelerator.
- iii. Neutrons are produced by bombarding a beryllium target with protons. This uses the



Fig. 1 Pork shoulder meat (left) and freeze-dried meat samples (right)



Fig. 2 Measurement of γ -ray spectra from meat samples by Ge detector

${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ reaction.

- iv. The meat samples are irradiated with neutrons of 1 to 5 MeV. In this process, thermal neutrons and γ -rays are also slightly included.

As a result of neutron irradiation, both raw and dried meat samples were activated. The γ -ray spectra obtained from the activated meat samples were measured with the Germanium (Ge) detector (Fig. 2). The β and γ radiation doses were measured using the Geiger-Müller (GM) counter for both the meat sample and the dried meat sample.

3. Estimation of radionuclides by nuclear reaction data

Pork meat contains many trace elements (less than 0.2 % of the total number of nuclei) as well as the major elements H, O, C, and N. In this analysis, we focused on K, Na, Cl, P, Ca, S, Mg which are semi-major elements with a weight content of 3-4%, and Fe which is a trace element with a weight content of 0.02% in meat³⁾. Based on data from the neutron reaction sub-library in the JENDLE-4.0 site of the JAEA-Nuclear Data Research Group⁴⁾, neutron nuclear reactions were estimated considering the scattering cross sections. Natural abundance ratio of target nuclei and properties such as decay modes and half-life of produced radioactive nuclei together with the nuclear reactions were examined using the WWW Chart of the Nuclides 2014⁵⁾.

4. Identification of radionuclides by γ -ray spectral analysis

Using the γ -ray energy spectrum values obtained in Method 2 and the results of the nuclear reaction database obtained in Method 3, the nuclear reaction between neutrons and nuclei in the meat sample and the radionuclides produced were identified. The identification procedure is as follows.

1) Calibration between channels and energies of γ -ray spectra

The γ -ray count data from the Ge detector were graphed in Excel. Since the data of the γ -ray detector is given by the counts of gamma rays (vertical axis E [keV]) by channels (number of rows in Excel, horizontal axis x) (Fig. 3), it is necessary to convert the channels on the horizontal axis to energy; based on the energies 1.37 MeV and 2.75 MeV of the gamma rays emitted from the two ${}^{24}\text{Na}$, $E(\text{keV})=a+bx$ calibration equation was obtained to convert the channels to energy.

2) γ -ray spectrum search

The energy values of the peaks in the γ -ray spectra shown in Fig. 3 were searched for candidates of radioactive nuclei emitting γ -rays using the γ -ray search database⁶⁾ of the JAEA-Nuclear Data Research Group. Among the candidate radionuclides, we searched for any that corresponded to the results obtained in Method 3. Whether the radioactive nuclei emitting γ -rays were produced by nuclear reactions between elements in the meat and neutron irradiation, or whether the nuclear reactions were caused by neutrons of 5 MeV or less, was checked by using scattering cross sections⁴⁾. Through these investigations, the nuclear reactions and the radionuclides were identified.

Results

1. Radionuclides produced from constituent elements of pork

Both raw and dried meat samples were activated by fast neutron irradiation. The radiation counts measured by the GM counter were (2.43 ± 0.06) kcpm for the raw meat sample, (8.33 ± 0.10) kcpm for the dried

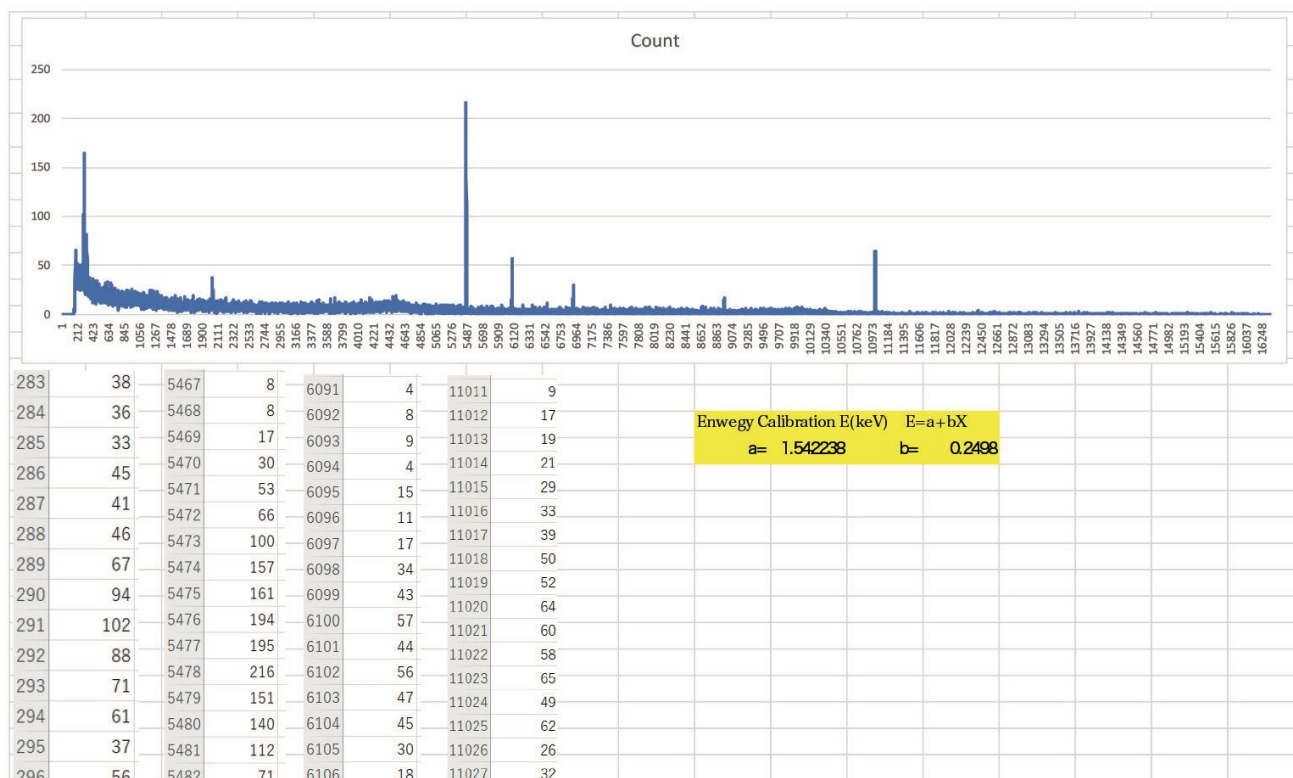


Fig. 3 Calibration between channels and energies of γ -ray spectra

meat sample respectively, under the 4.1 Gy neutron irradiation⁷⁻⁹⁾. The background value was (55.8 $\pm$ 10.8) cpm. Radiation levels measured with the GM counter were greater for dried meat than for raw meat. The radionuclides produced from the elements (K, Na, Cl, P, Ca, S, Mg, Fe) contained in the pork studied in Method 3, the energies of the radiation emitted from the radionuclides with half-lives are listed in Table 1.

2. γ -ray spectra of activated meat

The 1-hour measurement and the 5-minute measurement by the Ge detector of the γ -ray spectra were performed for pork meat samples irradiated with 0.7 Gy and 4.1 Gy neutrons respectively. The 5-minute measurements were performed to detect short-lived radionuclides. In all of these data, peaks were observed below 50 keV, and these peaks are considered to be background due to the lead that makes up the device. In the case of 0.7 Gy, no significant peaks other than the background were observed in the 1-hour and the 5-minute measurements. On the other hand, for the 4.1 Gy neutron-irradiated sample, peaks at 1369 keV, 1525 keV, and 2754 keV; were observed both in the 1-hour and 5-minute measurements, peaks at 1642

keV and 2168 keV were observed only in the 5-minute measurement, and peaks at 1732 keV and 2243 keV were observed only in the 1-hour measurement^{7,9)}.

3. Identification of the radionuclides

The results of the activation analysis of the γ -ray spectra data from the Ge detector are as follows: ^{24}Na (1369 keV, 2754 keV), ^{42}K (1525 keV), ^{38}Cl (1642 keV, 2166 keV) from the 5-minute measurement data; ^{42}K (1524 keV), ^{24}Na (1369 keV, 2754 keV), as well as a single escape peak (2243 keV) and a double escape peak (1732 keV) for ^{24}Na were detected in the 1-hour data^{7,9)}.

Discussion

We have shown that the neutron irradiation on meat produced radionuclides, ^{24}Na , ^{38}Cl , and ^{42}K , in meat. The possible nuclear reactions between nuclides in meat and fast neutrons to produce the above radionuclides are the following.

Neutron capture: $^{23}\text{Na}+n \rightarrow ^{24}\text{Na}+ \gamma$

Neutron capture: $^{37}\text{Cl}+n \rightarrow ^{38}\text{Cl}+ \gamma$

(n, α) reaction: $^{41}\text{K}+n \rightarrow ^{38}\text{Cl}+ \alpha$

Neutron capture: $^{41}\text{K}+n \rightarrow ^{42}\text{K}+ \gamma$

(n,p) reaction: $^{42}\text{Ca}+n \rightarrow ^{42}\text{K}+p$

Table 1 Nuclides contained in pork (K, Na, Cl, P, Ca, S, Mg, Fe), radionuclides produced by neutron irradiation and nuclear reactions

Nuclide in pork meat	Mass number A	Atomic number Z	Natural abundance ratio (%)	Nuclear reaction	Radionuclide	Mass number A	Atomic number Z	Half-life	Decay mode	Intensity (%)	Energy of γ -ray (keV)	Energy of β -ray (keV)
K	39	19	93.3	(n, α) (n, p)	Cl Ar	36 39	17 18	3.013±5y 269y	β^- , EC β^-			709.522± 0.045 565± 5
K	40	19	0.012		Cl Ar	37 40	17 18	stable stable				-813.873± 0.2 -1504.403± 0.056
K	41	19	6.73	(n, α)	Cl	38	17	37.24m	β^-	33.29 44.4 0.03 99.95	1642.43 2167.54 3810.03 671.36	4916.733± 0.218
					(n, p)	Ar	41	18		1.8268h	IT β^-	99.16 0.05
				(n, γ)	K	42	19	12.360h	β^-	0.34 0.05 18.08	312.6 899.7 1524.6	3525.217± 0.183
K	42	19	—		K	43	19	22.3h		β^-	86.8 11.85 79.16	372.76 396.86 617.49
Na	23	11	100	(n, α)	F	20	9	11.163s	β^-	100 8.00E-03 5.00E-05	1633.6 3332.54 4965.85	7024.467 ± 0.030
					(n, p)	Ne	23	10		37.24s	β^-	33 1 0.1
				(n, p)	Ne	23	10	37.24s	β^-	33 1 0.1	439.99 1635.96 2075.91	4375.808± 0.104
					(n, γ)	Na	24	11		14.99h	β^-	99.99 99.86 0.07
Cl	35	17	75.76	(n, α) (n, p)	P S	32 35	15 16	14.268d 87.37d	β^- β^-			1710.660± 0.04 167.323± 0.026
Cl	37	17	24.24		P	34	15	12.43s		β^-	0.13 15 0.18	1987.18 2127.49 4114.54
				(n, p)	S	37	16	5.05m	β^-	0.06 94 0.26	3066 3103.36 3741.02	4865.111± 0.196
					(n, γ)	Cl	38	17		37.24m	β^-	33.29
P	31	15	100	(n, α) (n, p)	Al Si	28 31	13 14	2.245m 2.6277h	β^- β^-	100 0.07	1778.85 1266.15	4642.264± 0.121 1491.505± 0.043
Ca	40	20	96.94		Ar K	37 40	18 19	35.011d 101171.248E9		EC EC β^-	10.66	1460.82
Ca	42	20	0.65	(n, α) (n, p)	Ar K	39 42	18 19	269y 12.360h	β^- β^-	0.34 0.05 18.08	312.6 899.7 1524.6	565.000± 5.000 3525.217± 0.183
Ca	43	20	0.14		Ar K	40 43	18 19	stable 22.3h		β^-	86.8 11.85 79.16	372.76 396.86 617.49
S	32	16	94.99	(n, α) (n, p)	Si P	29 32	14 15	stable 14.268d	β^-			-4942.628± 0.563 1710.660 ± 0.040
S	33	16	0.75		Si P	30 33	14 15	stable 25.35d		β^-		
S	34	16	4.25	(n, α) (n, p)	Si P	31 34	14 15	2.6227h 12.43s	β^- β^-	0.07 0.13 15 0.18	1266.15 1987.18 2127.49 4114.54	1491.505± 0.043 5382.994 ± 0.812
Mg	24	12	78.99		(n, α)	Ne	21	10		stable		
Mg	25	12	10	(n, α) (n, p)	Ne Na	22 25	10 11	stable 59.1s	β^-	12.68 13 14.95	399.71 595.03 974.74	-2843.196 ± 0.171 3834.954 ± 1.201
Mg	26	12	11.01		non							
Fe	54	26	5.85	(n, α) (n, p)	Cr Mn	51 54	24 25	27.7010d 312.05d	EC EC	9.91 99.98	320.08 834.85	-3207.559± 0.352 697.343± 1.096
Fe	56	26	91.75		Cr Mn	53 56	24 25	stable 2.5789h		β^-	98.87 27.19 14.34	846.75 1810.72 2113.05
Fe	57	26	2.12	(n, α) (n, p)	Cr Mn	54 57	24 25	stable 1.42m	β^-	10.56 13.91 5.5	14.41 122.06 692	-1377.174 ± 1.008 2695.049 ± 1.553
Fe	58	26	0.28		non							

As characteristics of the above radionuclides, ^{24}Na undergoes β -decay with a half-life of 14.9590 hours with a probability of 99.9%, and the β -ray with energy 1391 keV. After that, it emits 1369 keV γ -ray with 100% and 2754 keV γ -ray with 99.9%, and changes to the stable isotope $^{24}\text{Mg}^{10}$. ^{38}Cl undergoes β -decay with a half-life of 37.24 minutes to become the stable isotope ^{38}Ar . The β -ray energies at that time are 1107 keV (31.9%), 2749 keV (10.5%), and 4917 keV (57.6%). During γ -rays emission, 1643 keV (31.9%) and 2167 keV (42.4%) of energy are emitted¹⁰. ^{42}K has the β -decay mode with a half-life of 12.360 hours, emitting 2001 keV at a probability of 17.6% and 3525 keV at a probability of 81.9%. After the β -decay, γ -rays with 313 keV (0.34%) and 1525 keV (18.1%) are emitted to the stable isotope $^{42}\text{Ca}^{10}$.

Sodium (Na) and potassium (K) are major positive ions in extracellular fluid that play an important role in the active transport of molecules through the cell membrane and in regulating extracellular fluid volume and an essential element in the human body. An electrochemical gradient across the cell membrane resulting from a high intracellular concentration of K and low intracellular concentration of Na relative to concentrations in the extracellular fluid is required to sustain intracellular tonicity, transmission of nerve impulses, contraction of muscles including heart, and maintenance of normal kidney function^{11, 12}. Both Na and K are transported in and out of the extracellular fluid by the K-Na pump in the cell membrane^{11, 12}.

Based on these properties, we first discuss the biokinetics for systemic Na whose pathway might be related to internal exposure. Figure 4^{11, 12} shows the brief

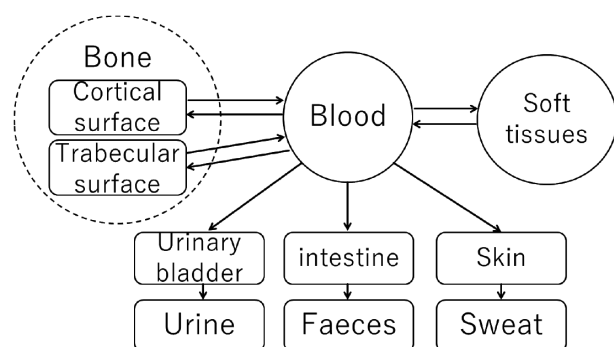


Fig. 4 Brief structure of the biokinetic model for systemic sodium (Na)
Figure adapted from Samuels and Leggett^{11,12}.

structure of the biokinetic model for systemic Na.

As shown in Fig. 4, Na circulates throughout the body via blood and other media, including bone cortex, trabeculae, sweat (for elimination by sweating), bladder (for urinary excretion), and intestine or colon (for fecal excretion)¹¹. It is estimated that bone contains 40% of the total body Na content¹¹. In ICRP 2002, 95% of the amount transferred from the blood to tissues in this category is transferred to soft tissue, and 5% is deposited in bone. The Na deposited in bone is the most important factor. Of the Na deposited in bone, 80% is assumed to be deposited in the bone cortex and 20% in the trabeculae¹¹. 99% of the deposited amount in bone is assumed to be transferred to the excretory pathway with a half-life of 10 days, only 1% is assumed to be retained with a half-life of 500 days, and Na distributed to other tissues and body fluids is also assumed to be excreted with a half-life of 10 days¹¹. In the case of oral ingestion of ^{24}Na , approximately 94% of the dose is absorbed into the blood through the proximal jejunum¹¹. Therefore, it is necessary to focus on the short-term effects on the intestinal tract and extracellular fluid (or blood cells in the blood) that pass through during absorption and decay rather than the long-term effects of exposure in the body, and the main effects of large amounts of ^{24}Na . The main effects of ingestion of large amounts of ^{24}Na would include blood cell depletion and effects on the jejunum, such as diarrhea. In addition, although urinary excretion is the main excretion route for ^{24}Na , the contribution of ^{24}Na excretion from sweat may increase in certain situations where large amounts of sweat are shed (warm climate, certain intense exercise, etc.)¹¹, and through this process, ^{24}Na may adhere to the skin through sweat glands and induce external exposure to those tissues. Considering the physical and biological half-life of ^{24}Na , the period of internal exposure is limited. Although ^{24}Na passes through the blood and colon, which are radiosensitive organs, the short physical half-life of ^{24}Na makes us skeptical about whether ^{24}Na is radioactive at the time of excretion.

Next, we discuss the biokinetic model for systemic potassium (K). Figure 5^{13, 14} is a relatively detailed biokinetic model for systemic K. K is exchanged

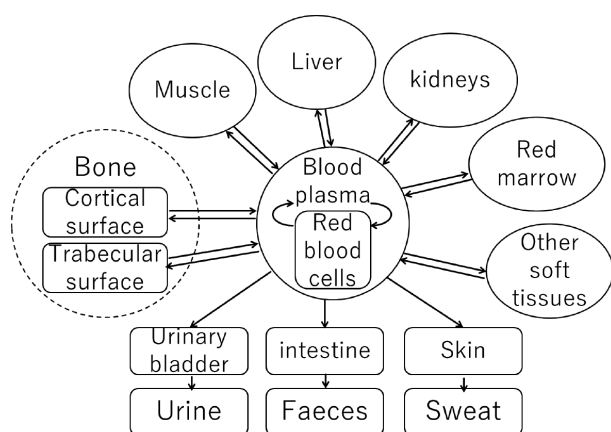


Fig. 5 Detailed structure of the biokinetic model for systemic potassium (K)

Figure adapted from Leggett and Williams^{13,14}.

between a central blood compartment (plasma) and a set of peripheral tissue compartments representing relatively important systemic repositories^{13, 14}. Intravenously injected K is rapidly removed from blood plasma and distributed to tissues and a lesser extent to excretion pathways¹⁴. For ^{42}K , 98% of the total amount of K in the body is distributed intracellularly, and 1-2% is distributed in extracellular fluid, and therefore, internal exposure is considered to affect mainly cellular tissues¹⁵. K is excreted mainly through the kidneys in amounts like those ingested unless there are special circumstances such as diarrhea or vomiting¹⁶. ^{42}K is an isotope of ^{40}K , a typical natural radionuclide, so the biokinetics of ^{42}K in the body are inferred from the characteristics of ^{40}K ¹⁴.

In boron neutron capture therapy (BNCT), ^{24}Na produced by the neutron capture reaction $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ will be a source of exposure to patients and clinical staff¹⁷, and the effect of exposure should be considered.

As for ^{38}Cl , since chlorine (Cl) is the major electrolyte of extracellular fluid¹⁸, it is expected to have a similar kinetics to that of ^{24}Na , which is also the major electrolyte of extracellular fluid. Like ^{24}Na , ^{38}Cl is also a radionuclide produced in the blood during BNCT¹⁷.

Conclusion

In the deep space environment inside a spacecraft in which fast neutrons have possibly affect food as well as astronauts. To examine the effects of fast neutrons on food we conducted an irradiation

experiment of fast neutrons of about 1 to 5 MeV using RANS on pork meat samples. As a result, we found that radioactive nuclei, ^{24}Na , ^{38}Cl , ^{42}K , were produced in the meat samples. For a case activated meat is ingested, these radionuclides follow the biokinetics in the human body. These radionuclides are contained in the extracellular fluid and intracellular fluid which are widely distributed throughout the human body. As the effects of internal exposure to these radionuclides a wide range of organs may be affected since the extracellular fluid and intracellular fluid circulate throughout the entire body. When considering the actual impact, their defecation time is very important and needs further study.

The amount of meat used in this experiment was a minute amount (2-3g), which is much smaller than the actual amount ingested daily. It is also important that the neutron flux in this experiment is much larger than the deep space environment¹. It is necessary to further study the effect of meat on the actual dietary intake in a deep space-like environment and the comparison with freeze-dried meat.

Acknowledgment

We would like to express our deepest gratitude to Prof. Fumiyuki Yamakura for his guidance in preparing samples for this research, to the professors at the RIKEN Center for Advanced Photon Research for their collaboration and guidance in neutron irradiation experiments, and to the staff at the Biomolecular Laboratory of Juntendo University.

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) Simonsen LC, Slaba TC, Guida P, Rusek A: NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: Enabling a new era in space radiobiology research. PLoS Biol. 2020; 18: e3000669.

- 2) Tada J, Nakajima H, Hayano R, Kobayashi H, Asano Y: Easy-to-understand Radiation Physics. 3rd ed. Tokyo. Ohmsha. 2018: 166.
- 3) Suzuki T, Wada G (eds): Nutritional Science of Minerals and Trace Elements. Tokyo. Daiichi Shuppan. 1994.
- 4) Japan Atomic Energy Agency: JAEA, JENDLE-4.0 Neutron reaction sub-library. https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/J40_J.html, Accessed Oct 1, 2022.
- 5) Japan Atomic Energy Agency: JAEA WWW Chart of the Nuclides 2014. <https://www.ndc.jaea.go.jp/CN14/sp/>, Accessed Oct 1, 2022.
- 6) Japan Atomic Energy Agency: Nuclear Data Center, γ -ray Data in Selected Energy Range. <https://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/sbygame.html>, Accessed Oct 1, 2022.
- 7) Hatsuda M, Yamakura F, Kawasaki H, Ootake Y, Taketani A, Takanashi T, et al: Effects of Neutron Radiation on Dry Meat in Deep Space Environment. JPS Autumn Meeting 2022, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2022.
- 8) Hatsuda M, Kawasaki H, Yamakura F, Taketani A, Takanashi T, Wakabayashi Y, et al: Effects of Neutron Radiation as Cosmic Radiation on Food Resources. J Neutron Res. 2023; 25: 41-46.
- 9) Hatsuda M, Kawasaki H, Shigenaga A, Taketani A, Takahashi T, Wakabayashi Y, et al: Effects of neutron radiation generated in deep space-like environments on food resources. Sci Rep. 2023; 13: 12479.
- 10) Japan Radioisotope Association: Isotope Handbook. 12th ed. 2020: 26-28.
- 11) Samuels C, Leggett R: A biokinetic model for systemic sodium. J Radiol Prot. 2021; 41.
- 12) Clement CH, Fujita H, Paquet F, Leggett RW, Blanchardon E, Bailey MR, et al. ICRP Publication 151: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 5. Ann ICRP. 2022; 51: 35-39.
- 13) Leggett R, Williams L: A model for the kinetics of potassium in healthy humans. Phys Med Biol. 1986; 31: 23.
- 14) Clement CH, Fujita H, Paquet F, Leggett RW, Blanchardon E, Bailey M R, et al. ICRP Publication 151: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 5. Ann ICRP. 2022; 51: 79-84.
- 15) Kimura H: Monthly Topic 1, No difficulty with electrolyte and acid-base equilibrium testing, How to read potassium. Clinical examination. 2014; 58: 793-800.
- 16) Takaichi N: Patient Safety and Infusion Therapy, Basic Understanding of Water and Electrolyte Regulation Potassium. Clinical Journal of Internal Medicine. 2006; 98: 25.
- 17) Fujiwara K, Kinashi Y, Takahashi T, Yashima H, Kurihara K, Sakurai Y. et al: Induced radioactivity in the blood of cancer patients following Boron Neutron Capture Therapy. J Radiat Res. 2013; 54: 769-774.
- 18) Sakai T: Systematic Nursing Course, Anatomy and Physiology: Structure and Function of the Human Body 1. 10th ed. Tokyo. Igaku Shoin. 2019: 59-60.

Third Annual JUHS 2023

Yasuaki Sakano, Yuh Morimoto

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

Abstract

The third annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS) was held on May 20, 2023. This report is an overview of the event, which was a result of academic collaboration with internationally recognized researchers and proved the department's commitment to promoting globalization.

Key Words: 3rd JUHS, research collaboration, academic exchange

Juntendo Health Science Journal 5(1): 93-95, 2024 (Received Feb. 8, 2024 ; Accepted Feb. 13, 2024)

Introduction

The third annual Juntendo University Faculty of Health Science International Symposium (JUHS), held on May 20, 2023, celebrated the theme of “Commemorating the Establishment of the Graduate School of Health Science,” which was divided into three parts. Parts 1 and 3 were held as joint sessions of the two departments, while Part 2 was dedicated to department-specific sessions. The symposium was a significant milestone on the joint journey for knowledge and innovation.

Part 1: Symposium with guest speakers

The symposium began at 9:30 a.m. in the Ogawa Hall, Bldg. 7. Figures 1 and 2 provide a visual representation of the program structure. After the opening remarks by Prof. Hiroyuki Daida, Prof. Sakano, one of the authors of this article, took the stage to introduce the Department of Radiological Technologies. The presentation provided an overview of the department's research efforts, highlighting the varied activities of the faculty members. Topics such as deep learning, nuclear medicine, medical imaging, education, medical physics, and radiation safety were highlighted, as shown in Fig.3.

Part 1 featured presentations by four guest speakers, including two prolific experts in the field of radiological technology. Dr. Napapong Pongnapang (Mahidol University, Thailand) gave a presentation on the “Research Activities at the Department of



Fig.1 Symposium flyer

Start	End	Program	Department(s)	Speaker	Chair / Host	Venue
9:30	9:35					
		Part 1	Opening Remarks	RT/PT	Hiroyuki Daida	Takahashi T
9:35	9:40		Department Introduction	RT	Yasuaki Sakano	Takahashi T
9:40	10:20	Part 1	Lecture 1	RT	Napapong Pongnapang	Sakano / Takahashi M
10:20	11:00		Lecture 2	RT	Nikola Stikov	Sakano / Takahashi M
11:00	11:10		Coffee Break			
11:10	11:15	Part 1	Department Introduction	PT	Toshiyuki Fujiwara	Takahashi T
11:15	11:55	Part 1	Lecture 3	PT	Kei Masani	Yamaguchi / Takahashi T
11:55	12:35		Lecture 4	PT	Yu-Jung Cheng	Yamaguchi / Takahashi T
12:35	12:40	Part 1	Group Photo Taking	PT/RT		Ogawa Hall (Bldg 7)
12:40	13:40		Lunch Break			
13:40	14:40	Part 2	Afternoon Session	PT	Kei Masani	Fujiwara / Yamaguchi
				PT	Yu-Jung Cheng	Takahashi T
				RT	Nikola Stikov / Napapong Pongnapang / Ruiira Wanotavan	Sakano / Takahashi M
14:40	15:00		Coffee Break			
15:00	15:25	Part 3	General Discussion	PT/RT	Tetsuya Takahashi Tomofumi Yamaguchi Masaya Takahashi	Takahashi T
15:25	15:30	Part 3	Closing Remarks	PT/RT	Shinsuke Kyogoku	Ogawa Hall (Bldg 7)

Fig.2 Program at a glance

PT: Physical Therapy; RT: Radiological Technology

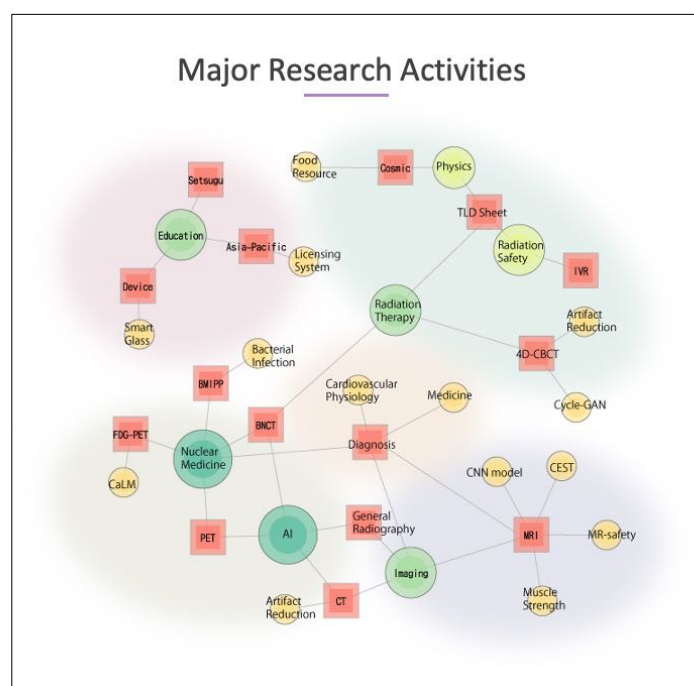


Fig.3 Main research activities of the Department of Radiological Technology

Radiological Technology, Mahidol University, Thailand,” while Dr. Nikola Stikov (Polytechnique Montréal, Canada) gave a presentation on the “Reproducibility and the Future of MRI Research.” Two other guest speakers, who are experts in the field of physical therapy, also gave presentations and added valuable perspectives to the discourse on the advances in the field.

Part 2: Afternoon session

The afternoon sessions were organized by our department. The department held the session in the conference room on the 9th floor of Bldg. 7, with a specific focus on the nine newly enrolled Master’s students (Fig.4). Before the symposium, we asked the guest speakers to present papers closely related to their research topics. In addition, we invited Dr.



Fig.4 Afternoon session of the Department of Radiology

Rujira Wanotayan (Mahidol University, Thailand) to participate virtually in the Part 2 session. During this session, students were encouraged to ask one question related to the articles presented by the guest speakers. This 1-h session offered a valuable opportunity for the students to engage in academic discussions in English. The session was also live-streamed for the undergraduate students.

Part 3: General discussion and closing remarks

After a short break, the participants from the two departments reassembled in the Ogawa Hall to share the progress of Part 2 and discuss future prospects. Prof. Masaya Takahashi, representing our department, reported the results of the Part 2 session. The closing remarks were made by Prof. Shinsuke Kyogoku.

Conclusion

Reflecting on the symposium, it is clear that it was important not only in promoting the globalization of the department but also in encouraging both the

faculty members and the students to actively contribute to the research community. Looking ahead, we are pleased to announce that the Faculty of the Health Sciences is planning the 4th JUHS to be held in May, 2024. We eagerly look forward toward this opportunity of continued collaboration and exchange of knowledge in the ever-evolving landscape of global health research.

Acknowledgments

We would like to sincerely thank our esteemed faculty members for their unwavering support throughout the planning and conducting of the symposium. Their guidance and dedication were instrumental in making this event a success.

Ethical approval

Not applicable

Competing interests

Nothing to declare

Research activities at Department of Radiological Technology, Mahidol University, Thailand

Napapong Pongnapang

Department of Radiological Technology, Faculty of Medical Technology, Mahidol University, Siriraj Hospital

Department of Radiological Technology, Faculty of Medical Technology, Mahidol University was founded in 1965 as the first X-rays Technology School in Thailand under the support from the World Health Organization (WHO). The bachelor's degree program was accredited by the Asean University Network Quality Assurance in 2020, first program in Southeast Asia. The department runs 2 academic programs, including bachelor's and master's degree of Sciences in Radiological Technology and a combined doctoral research degree. Currently, there are 10 full-time PhD academic staffs. Research areas focus on 5 areas, namely, diagnostic radiology, radiation therapy, nuclear medicine, IT and AI in radiology and radiation dosimetry/nano technology/radiobiology. Collaboration activities with world renown universities help create research topic funded by various sources. Current on-going research projects include applications of AI in radiology, patient dose assessment, molecular effects from low energy X-rays, image processing and quantification in nuclear medicine. The department has more than 40 peer-review publications during the past 5 years.

Reproducibility and the future of MRI research

Nikola Stikov^{1,2)}

¹⁾ Montreal Heart Institute

²⁾ NeuroPoly, the Neuroimaging Research Laboratory at École Polytechnique, University of Montreal

Transparency in science is an essential goal, but there are differing opinions on how open our science really should be. The questions surrounding open science and research transparency are particularly relevant for fields like magnetic resonance, in which much of the innovation over the past 50 years has been driven by intellectual property and a tight link between industry and academia.

This talk will illustrate how transparent development ecosystems can facilitate the standardization and reproducibility of MRI at multiple levels. The first part of the talk will outline the basic principles of reproducible research, with examples contributed by the wider MR community. The second half will focus on quantitative MRI and the need to peek inside the vendor-supplied black boxes that generate the numbers.

Few would disagree that reproducibility accelerates scientific progress, as well as its translation to clinical practice. As tectonic technological changes shape research in the 21st century, we need to be careful not to damage its foundations, and instead focus on aspects of open science where we can reach consensus. The open - science movement needs to pick its battles. The battle for reproducible research is one that it cannot afford to lose.

Functional electrical stimulation therapy for lower limb motor function in individuals with incomplete spinal cord injury

Kei Masani^{1, 2)}

¹⁾ The KITE Research Institute

²⁾ The Institute of Biomedical Engineering, University of Toronto

Spinal cord injury is a devastating and costly injury that has life-long, negative effects on the mobility, function, autonomy, and quality of life of the individual. The majority of individuals with spinal cord injury have a motor incomplete spinal cord injury (iSCI), in which residual motor function below the level of injury is preserved to some degree. While some of these individuals can stand and walk, iSCI makes maintaining their balance difficult resulting in frequent falls. Our research aims to help individuals with iSCI regain mobility and function using engineering approach. Our key tool is functional electrical stimulation (FES) that can artificially activate paralyzed muscles, and can effectively improve motor functions by facilitating positive neuroplasticity resulting in a functional recovery. In this presentation, first I will introduce our studies on the neurophysiology of transcutaneous electrical stimulation that is critically important in understanding the mechanism of neuroplasticity in therapies using FES. Key findings of our research are: transcutaneous FES predominantly activates the motor nerve; transcutaneous FES induces F-wave more robustly compared to nerve trunk stimulation, suggesting the transcutaneous FES induces antidromic firing on motor nerves; paired corticospinal-motoneuronal stimulation using transcutaneous FES can induce an increase of corticospinal excitability, which can be the essential mechanism of FES therapy. Next, I will introduce our approaches that can help individuals with iSCI improve upright balance. Based on understanding of physiological controller maintaining upright standing, we designed the FES controller for standing balance, with which we developed FES therapy for standing balance.

Non-invasive and non-pharmacological therapies for muscles: Pulsed electromagnetic field and photobiomodulation therapy

Yu-Jung Cheng

Department of Physical Therapy, China Medical University

Muscle injuries are common occurrences and cause functional impairment and affect performance of athletes. Although skeletal muscle can regenerate, the process is slow and sometimes increases susceptibility to further injury. Among the non-invasive and non-pharmacological treatments for muscle injuring, two modalities, pulsed electromagnetic field therapy (PEMF) and photobiomodulation (PBMT), can promote muscle healing through several common pathways. Thus, studying muscle regeneration and factors contributing muscle healing are clinically important for understanding these two treatments.

Earlier studies have examined the cellular effects of PEMF. Excepting stimulating muscle contraction, PEMF can modulate G protein coupling receptors and ion channels, downregulate inflammatory proteins, and increase mitochondrial function. Previous studies showed PEMF can alleviate diabetic and posttraumatic muscle atrophy in animal models, and clinical results also demonstrated applying PEMF can increase muscle activity and blood lactate concentration in cyclists, and altering muscle bioenergetics biomarkers in patients with ACL reconstruction. In addition, several clinical trials have shown that high-intensity focused electromagnetic field combined with radiofrequency treatment can increase skeletal muscle mass and reduced adipose tissue. However, these studies still require more careful review.

Unlike PEMF can directly activate muscle contraction in high intensity, PBMT improves muscle regeneration through non-thermal effects. The well-known effects are through cytochrome c oxidase absorbed red photons and then activating mitochondria. In a prior in vitro study, PBMT could increase muscle cell proliferation and inhibit apoptosis through mitochondria modulation in acute phase. In rodent muscle injury models, PBMT can enhance muscle maturation, muscle recovery, and angiogenesis in the regeneration phase. In clinical studies, pre- and post-exercise PBMT can reduce oxidative stress, enhance performance, and improving postexercise recovery. PBMT may also increase muscle fiber recruitment and muscle strength in stroke patients. A single bout of PBMT can increased handgrip strength of chronic kidney disease patients with hemodialysis. Interestingly, the combination of PBMT and PEMF in the lower extremity can increase the exercise performance of COPD patients.

Collecting evidence shows PBMT and PEMF have many similarities, and clinical trials have shown that both treatments benefit the muscles in healthy people and patients. This lecture is intended to provide an overview of findings from recent PEMF and PBMT studies on muscular disorders, which may have important implications for rehabilitation for patients.

市民公開講座「がんの放射線治療－放射線で“がん”を治す！－」

佐藤 英介

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

令和5年9月30日（土）、御茶の水センタービルおよびオンライン配信のハイブリッド形式で、市民公開講座（がん治療と回復：放射線治療とリハビリテーションの重要性）が開催された。がん治療の3本柱は手術療法・放射線療法・薬物療法とされ、質の高い放射線療法（放射線治療）を安全に提供するために、がん診療拠点病院を中心に整備が行われ、強度変調放射線治療や粒子線治療などの新しい放射線治療法が保険適用されるに至っている。本講演では、3部構成（がんの疫学・放射線治療とは？・放射線治療の紹介）とし、がん治療における放射線治療の果たす役割や技術を紹介した。

キーワード：悪性新生物（腫瘍）、がん、放射線治療

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，100-102頁，2024年（受付 2023.12.28.；受理 2024.1.17.）

がんの疫学

令和4年（2022）人口動態統計月報年計（概数）の概況¹⁾において、死因別死亡数・死亡率（人口10万対）の第1位は悪性新生物「腫瘍」であり、全体の24.6%を占めている。悪性新生物「腫瘍」による死亡数・死亡率（人口10万対）は上昇しており、令和4年（2022）の死亡数は385,787人と報告されている。本邦では、平成19年（2007）6月にがん対策推進基本計画（以下、基本計画）が策定され、第4期がん対策推進基本計画（令和5年3月）²⁾では「誰一人取り残さないがん対策を推進し、全ての国民とがんの克服を目指す。」を全体目標に掲げるとともに、全体目標の下に「がん予防・がん医療・がんとの共生」の分野別の目標が定められた。

最新がん統計³⁾では、2009～2011年にがんと診断された人の5年生存率（総数）は64.1%、日本人ががんで死亡する確率（2021年のデータに基づく）は男性が26.2%（4人に1人）、女性が17.7%（6人に1人）と報告されている。部位別のがん罹患数（2019年）の総数は、第1位が大腸、第2位が肺、第3位が胃であり、部位別のがん死亡数（2021年）の総数は、第1位が肺、第2位が大腸、第3位が胃である。

放射線治療とは？

がん治療の3本柱は手術療法・放射線療法・薬物療法である。放射線療法（放射線治療）は、がんの存在

する部分に局限して放射線を照射することから局所療法といえる。臓器を切らずに治すことが可能であり、臓器の機能や形態の温存が期待できるため、手術に比べて患者の負担が少なく、生活の質（quality of life : QOL）を維持できる。局所制御という点で、放射線感受性が低い腫瘍や正常組織周囲に位置する病巣を除き、治療効果は手術と同等であるとされる。また、高齢者でも根治目的で実施することが可能であり、通院で治療を受けられる点もメリットの1つである。

放射線治療を安全に提供するためには、環境整備が必須である。国は、がん診療拠点病院を中心に整備を行い、強度変調放射線治療や粒子線治療などの新しい放射線治療法に対して保険適用を拡大するとともに、これらに対応できるように診療報酬上の要件の見直し等の取り組みも進めてきた。この背景を受け、日本における放射線治療患者数は年々増加している⁴⁾。

放射線治療の大原則は、腫瘍組織への線量集中性を高めるとともに正常組織への線量投与を最小限に抑制することである。実際、腫瘍組織のみに照射することは困難であり、正常組織への照射は避けられない。そのため、腫瘍組織と正常組織との放射線感受性の差（腫瘍組織＞正常組織）を利用する。一般に、放射線治療による副作用（有害事象）は、急性期有害事象と晩期有害事象に大別される。しかし、放射線治療は局所治療であるため、副作用（有害事象）も原則として放射線を照射した部分に限定される。

責任著者：佐藤英介

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: e.sato.ft@juntendo.ac.jp

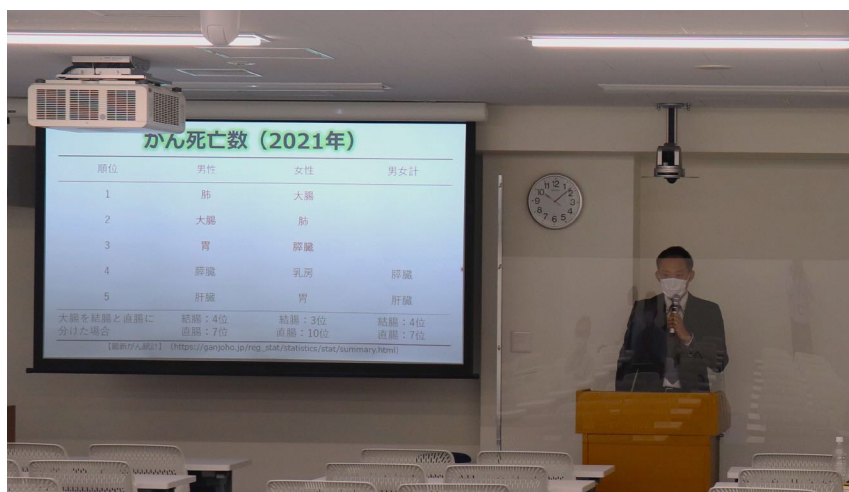


図 1 講演中の筆者

**【市民公開講座】
がん治療と回復**

放射線治療とリハビリテーションの重要性

がんの放射線治療
－ 放射線で“がん”を治す！ －

順天堂大学
佐藤 英介
e.sato.ft@juntendo.ac.jp

Faculty of Health Science, Juntendo University

生成AI (ChatGPT) に聞いてみる

<https://chat.openai.com/?model=text-davinci-002-render-sha>

死因別死亡数・死亡率（人口10万対）

順位	死因
1	悪性新生物（腫瘍）
2	心疾患（高血圧性を除く）
3	老衰
4	脳血管疾患
5	肺炎
6	誤嚥性肺炎
7	不慮の事故
8	腎不全
9	アルツハイマー病
10	血管性及び詳細不明の認知症

【令和4年（2022）人口動態統計月報年計（概数）の概況】（厚生労働省）

主な死因別にみた死亡率の年次推移

【令和4年（2022）人口動態統計月報年計（概数）の概況】（厚生労働省）

放射線治療

- ✧ 局所療法
- ✧ 臓器の機能や形態の温存が可能
- ✧ 他の治療法と併用することが可能
- ✧ 高齢者でも根治目的で行うことが可能
- ✧ 非観血的である

*日本では、がん患者の約30%が初回治療として放射線治療を受けている。

*手術に比べて患者の負担が少なく、生活の質（quality of life: QOL）を維持しやすい治療法である。

*局所制御の点では手術と同等である（放射線感受性の低い腫瘍や正常組織周囲に位置する病巣を除く）。

放射線治療の分類

	X線	医療用直線加速装置（リニアック） トモセラピー® MRIdian® サイバーナイフ®
外部放射線治療（外部照射）	電子線 γ線 陽子線 炭素線 中性子線	医療用直線加速装置（リニアック） ガンマナイフ® 陽子線治療装置 炭素線治療装置 中性子線加速装置
密封小線源治療（内部照射）	γ線	一時挿入線源（ ¹⁹² Ir, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs） 永久挿入線源（ ¹⁹² Ir, ¹⁹⁸ Au）
核医学治療（RI内用療法）	β線 α線	非密封RI（ ¹³¹ I, ⁸⁹ Sr, ⁹⁰ Y, ¹⁷⁷ Lu） 非密封RI（ ²²³ Ra）

放射線治療の大原則

- 腫瘍組織（ターゲット）に線量を集中させる！
- 正常組織（リスク臓器）への線量を低減させる！

Take-Home Message

- ✧ 放射線治療
 - がん治療の三本柱
 - 様々な放射線を利用
 - 切らずに治す！（QOLの維持）

図 2 講演スライド（抜粋）

放射線治療の紹介

放射線治療は、体外から放射線を照射する外部放射線治療、密封小線源を体内に挿入・刺入して放射線を照射する密封小線源治療、非密封小線源を体内に投与して放射線を照射する核医学治療に分類される。これらの中で、最も多く実施されているのはX線をを用いた外部放射線治療である。

外部放射線治療の主力装置は、医療用直線加速装置（リニアック）であるが、TomoTherapy®やCyberknife®も普及している。照射技術も飛躍的に進歩し、強度変調放射線治療や画像誘導放射線治療が実施されている。

放射線治療では、様々な放射線（X線・電子線・γ線・陽子線・炭素線など）が利用されている。陽子線と炭素線を利用する放射線治療は、粒子線治療と呼ばれる。令和2年（2020）6月には、ホウ素中性子捕捉療法が、切除不能な局所進行または局所再発の頭頸部腫瘍に限って保険収載された。

ま と め

放射線治療は切らずに治すことを特徴とするがん治療法であり、患者のQOL維持に有効である。近年では、粒子線治療やホウ素中性子捕捉療法なども選択肢となり、がん治療における放射線治療への期待は高まっている。

倫理的配慮

本論説において、人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本論説において、利益相反は存在しない。

参考文献

- 1) 厚生労働省：令和4年（2022）人口動態統計月報年計（概数）の概況。 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai22/index.html>, 2023年10月1日。
- 2) 厚生労働省：がん対策推進基本計画。 <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000183313.html>, 2023年10月1日。
- 3) 国立研究開発法人国立がん研究センター：がん情報サービス 最新がん統計。 https://ganjoho.jp/reg_stat/statistics/stat/summary.html, 2023年10月1日。
- 4) 沼崎穂高, 仲田佳広, 大場久照, 中村和正, JASTRO データベース委員会：全国放射線治療施設の2019年定期構造調査報告（第1報）, https://www.jastro.or.jp/medicalpersonnel/data_center/JASTRO_NSS_2019-01.pdf, 2023年10月1日。

Abstract

Citizen public lecture: “Radiation therapy for cancer - Curing 'cancer' with radiation!”

Eisuke Sato

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

On September 30, 2020, a hybrid (on-site and online) public lecture (Cancer treatment and recovery: The importance of radiation therapy and rehabilitation) was held. The three pillars of cancer treatment are surgery, radiation therapy, and drug therapy, and in order to safely provide high-quality radiotherapy (radiotherapy), cancer treatment base hospitals are the focus of efforts to improve the new radiation therapy methods such as modulated radiation therapy and particle beam therapy are now covered by insurance. This lecture consisted of three parts (cancer epidemiology, what is radiotherapy? and introduction to radiotherapy), and introduced the role of radiotherapy in cancer treatment and radiotherapy techniques.

Key Words: malignant neoplasm (tumor), cancer, radiation therapy

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 100-102, 2024]

2023年度保健医療学部市民公開講座の実践

飛山 義憲

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

令和5年4月15日に順天堂大学御茶の水センタービルにおいて、順天堂大学保健医療学部主催の市民公開講座「ひざ痛との正しい付き合いの仕方」をハイブリッド形式で開催した。市民公開講座の概要や参加者の特性、参加者からのアンケート結果を踏まえ、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、ひざ痛、変形性膝関節症

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，103-104頁，2024年（受付 2023.12.11.；受理 2023.12.21.）

市民公開講座の概要

日本では約800万人が膝関節に疼痛などの何らかの症状を有し、X線上の潜在的な患者を含めると約2,500万人が変形性膝関節症に罹患していると推計されている。変形性膝関節症は軟骨の変性や骨変形、滑膜炎などを特徴とする代表的な関節疾患の一つであり、疼痛や膝伸展筋力および身体機能の低下を生じ、疼痛による不活動がさらに膝伸展筋力および身体機能を低下させ、疾患が進行して健康寿命を脅かす。そのため、変形性膝関節症について正しく理解し、その予防方法について学習することが疾患の発症予防、進行予防につながる。そこで本公開講座では「ひざ痛との正しい付き合いの仕方」をテーマとし、市民の方々に変形性膝関節症の発症や進行の予防方法について理解していただくことを目的とした（図1）。

前半は順天堂大学保健医療学部理学療法学科の池田浩教授が変形性膝関節症の特徴や予後、リスクファクター、症状や障害、診断方法、治療方法等について、実際のX線画像などを用いながら講演を行った（図2）。後半は筆者が変形性膝関節症者における身体活動量の特徴や目標とすべき身体活動量とその計測方法、膝伸展筋力増強運動の実践方法、日常生活における関節負荷の軽減方法等についての講演を行った（図3）。

開催方法と参加者

本市民公開講座は新型コロナウイルス感染症対策を踏まえ、対面およびオンラインのハイブリッド形式で



図1 2023年度市民公開講座「ひざ痛との正しい付き合いの仕方」の案内

開催した。当日の来場者は42名で、オンラインでの参加者は63名であった。来場者の6割以上が60歳以上であり、加齢とともに変形性膝関節症に悩む方や関心を持つ方が増えることが推察できる。一方、20歳以下の参加者も数名おり、若年者からの関心度の高さも伺えた。

責任著者：飛山義憲

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

〒113-0033 東京都文京区本郷3-2-12 御茶ノ水センタービル503

E-mail: y.hiyama.cj@juntendo.ac.jp



図2 池田浩氏(順天堂大学保健医療学部理学療法学科教授)による講演



図3 筆者(保健医療学部理学療法学科准教授)による講演

参加者からのアンケートの結果

市民公開講座後のアンケートの結果、大多数の参加者から「理解できた、やや理解できた」という回答を得られた。講演の難易度については半数以上が「普通」と回答しており、適切な内容の講演が行えたと考える。また、大部分が「大変満足、やや満足」と回答しており、充実した市民公開講座になったと思われる。

その他の自由記載欄では「初めて学ぶことが多く、特に PRP (多血小板血漿、Platelet Rich Plasma) 療法や運動療法等に関しては非常に興味深く、今後詳しく調べたいと思った」、「日常生活に活かし、筋力アップを行って健康寿命を伸ばしたい」、「変形性膝関節症との向き合い方だけでなく、他の障害にもつながる対処法などをたくさん学ぶことができた」、「科学的理論に基づいて具体的な説明がありよくわかった」、「現在理学療法士の仕事に興味があり、今日の講座はさらに興味が増すものになった」という意見が得られた。

また、四十肩や五十肩等の上肢疾患や腰痛について、栄養を含む予防医学について、在宅勤務で生じる肩こりや腰痛などの解消法と予防策について、といったテーマを取り上げてほしいとの要望もあり、今後も市民のニーズに応える市民公開講座を行う必要があると考える。

倫理的配慮

本実践報告には人間または動物を対象として実施された研究は含まれていない。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

Abstract

Public lectures at the Faculty of Health Science in 2023

Yoshinori Hiyama

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

On April 15th, 2023, a public lecture entitled “How to deal with knee pain correctly” was held in a hybrid format at the Juntendo University. I report on the practice of the public lecture based on an overview of the public lecture, the characteristics of participants, and the results of questionnaire.

Key Words: public lecture, knee pain, knee osteoarthritis

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 103-104, 2024]

順天堂大学保健医療学部市民公開講座

齊藤 正和

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

令和5年9月30日（土）に順天堂大学御茶の水センタービルにおいて順天堂大学保健医療学部主催の市民公開講座「がんの治療と回復 - 放射線治療とリハビリテーションの重要性」を開催した。理学療法士の視点からがん予防や再発予防に向けたがんリハビリテーションについて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、予防、がんリハビリテーション、腫瘍循環器リハビリテーション

順天堂保健医療学雑誌, 第5巻, 第1号, 105-108頁, 2024年（受付 2023.10.3.; 受理 2023.10.27.）

緒 言

がんは昭和56年より本邦における死因第1位を占めており、年間30万人が、がんで死亡し、生涯のうちにがん罹患する可能性は男性の2人に1人、女性の3人に1人と推測されている。そのため、平成18年にがん対策基本法が成立（平成19年にがん対策基本法が施行）し、がん対策推進基本計画に基づき、国、地方公共団体、医療保険者、国民および医療スタッフがそれぞれの責務において、がん対策の充実に向けた取り組みを実践している。令和5年現在、第4期がん対策推進基本計画が示されており¹⁾、①がん予防、②がん医療、③がんとの共生が分野目標とされており、いずれの分野目標

においてもリハビリテーションが重要な位置付けとなっている。

今回、「がんの治療と回復 - 放射線治療とリハビリテーションの重要性」と題して開催された保健医療学部主催の市民公開講座において、「がんのリハビリテーション - あなたに寄り添うがんリハビリテーション -」というタイトルで講演を行った（図1）。

1. がんリハビリテーションとは？

「がん患者の生活の質（Quality of Life: QoL）の改善を目的とする医療ケアであり、がんとその治療に因る制限を受けた中で、患者に最大限の身体的、社会的、心理的、職業的活動を実現させること」と定義されて



図1 順天堂大学保健医療学部市民公開講座の講演場面

責任著者：齊藤正和

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

〒113-0033 東京都文京区本郷3-2-12 御茶ノ水センタービル503

m.saito.tl@juntendo.ac.jp

いる。がんと診断されてから受けるリハビリテーションは、一般的に予防期・回復期・維持期の3段階に分類されている²⁾。また、最近では、診断後早期から終末期にかけての疼痛コントロール、生きがいの再獲得、ご家族へのケアといった観点からの緩和的がんリハビリテーションの概念も存在している。本講演では、がん治療に伴う合併症予防の意味での“予防期”の前段階にあるがん予防に対する身体活動や運動療法の視点も加えて講演を行った。

2. がん予防に向けた身体活動や運動療法

がんは生活習慣の是正によりがんになりにくくする（予防する）ことができる疾病であり、禁煙、節酒、食生活管理、適切体重管理、身体活動などの健康行動が重要とされている。最近では、日本対がん協会より、「がんを防ぐための新12か条」³⁾として、以下の項目が示されている。

- 1) タバコを吸わない
- 2) 他人のタバコの煙を避ける
- 3) お酒はほどほどに
- 4) バランスのとれた食生活
- 5) 塩辛い食品は控えめに
- 6) 野菜や果物は不足にならないように
- 7) 適度に運動
- 8) 適切な体重維持
- 9) ウィルスや細菌の感染予防と治療
- 10) 定期的ながん検診
- 11) 身体の異常に気づいたら、すぐに受診
- 12) 正しいがん情報でがんを知る

がん罹患率と身体活動との間には関係性が示されており、Inoue らの報告では、全がんを対象に男性で13%、女性で16%のがん罹患リスクの軽減効果が示されている⁴⁾。また、適切な身体活動量によるがん罹患リスク軽減と関連するがんとして、食道がん、肺がん、腎がん、大腸がん、乳がん、胃がん、膀胱がん、子宮体がんなどが挙げられている。一方、座位行動時間の

延長によるがん罹患リスク上昇と関連するがんとして、大腸がん、子宮体がんおよび肺がんなどが挙げられており⁵⁾、多くのがんにおいて身体活動の増進や身体不活動の予防ががん罹患予防に重要な戦略となることが示されている。

3. がんサバイバーのがんリハビリテーション

がんリハビリテーションによる効果とエビデンスの強さを表1に示した。がんリハビリテーションにより骨格筋機能、身体機能の改善効果のみならず、倦怠感軽減、不安軽減、抑うつ軽減、自覚的な症状の改善効果、さらに QoL 向上効果に関する強いエビデンスが示されている。とくに、骨格筋については、腫瘍そのものに加えて、化学療法や放射線治療により骨格筋萎縮や機能障害を招くことが報告されており、運動療法や栄養療法を含めた包括的がんリハビリテーションの重要性が示唆されている。具体的な運動療法としては、ストレッチ、有酸素運動ならびにレジスタンストレーニングによる多角的なトレーニングが推奨されている。また、がん再発予防に向けた身体不活動の是正は重要なポイントであり、van Waart らの報告においても低身体活動量を呈する大腸がん患者では再発率が高いことが示されている⁶⁾。また、運動療法は、大腸がん、乳がん、膵臓がん患者の生存率の改善効果も示されており、がんサバイバーにおいて長期的な身体活動管理ならびに運動療法の継続は重要な治療戦略であることが示されている。

4. 腫瘍循環リハビリテーション

Patnaik らの報告では、がん治療後10年以上生存している高齢女性乳がん患者では、乳がんの再発や他のがんによる死亡よりも心血管疾患による死亡率が高いことが示されている⁷⁾。これらのことから、高齢女性乳がん患者では、乳がんの診断・治療後の長期的ケアとして、心血管疾患発症リスク軽減に向けた包括的アプローチの重要性が示されている。また、近年ではアントラサイクリン、分子標的薬トラスツズマブ、放射

表 1 がんリハビリテーションにより改善効果を示す項目と科学的根拠の強さ

強い科学的根拠がある項目	中等度の科学的根拠がある項目	科学的根拠が不十分な項目
身体機能 不安 抑うつ 倦怠感 生活の質 (QoL)	睡眠 骨代謝 骨粗鬆症予防	心毒性 化学療法誘発性末梢神経障害 認知機能 転倒 吐き気 疼痛 性機能

線治療などのがん治療自体により心臓や血管への障害が生じることが示されており、循環器領域とがん領域の双方が重なった領域を扱う新しい臨床研究分野である腫瘍循環器学（Onco-cardiology）への関心や期待が高まっている⁸⁾。そのため、がん治療による心臓や血管への障害を抱えたがんサバイバーに対しても、包括的心臓リハビリテーションプログラムの導入が推奨されている。これらは腫瘍循環器リハビリテーション（Cardio-oncology rehabilitation：CORE）として注目されており、栄養療法、食事療法、体重管理、血圧管理、脂質管理、血糖管理、禁煙、心理サポートなどの冠危険因子の是正に加えて、身体活動管理および運動療法などが含まれる⁹⁾。一方で、腫瘍循環器リハビリテーションに関するエビデンスは極めて乏しく、心機能低下や心血管疾患を保有するがんサバイバーに対する腫瘍循環器リハビリテーションの安全性や効果に関するエビデンスの構築が喫緊の課題である。

5. 最後に

がん予防ならびにがんサバイバーに対する包括的アプローチとして、がんリハビリテーションは重要な位置付けとなっている。そのため、がん治療後の急性期リハビリテーションのみならず、がん予防を目的とした身体活動管理や運動療法、がんサバイバーにおけるがん再発予防または心血管疾患予防を目的とした心臓リハビリテーションプログラムのエッセンスを含んだ包括的がんリハビリテーションが重要になると考える。昨今、循環器病対策基本法も施行され、本邦の死因の上位を占める「がん」ならびに「循環器病」への対策が重要な課題となっており、今後の腫瘍循環器リハビリテーションの発展とエビデンス構築が極めて重要な役割を担うことになると思う。

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。

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) 厚生労働省健康局がん・疾病対策課：第4期がん対策推進基本計画。 <https://www.mhlw.go.jp/content/10901000/001091843.pdf>, 2023年10月1日。
- 2) 国立がん研究センター：がん情報サービス。 がんリハビリテーション医療。 https://ganjoho.jp/public/dia_tre/treatment/rehabilitation/index.html, 2023年10月1日。
- 3) がん研究振興財団：がんを防ぐための新12か条ハンドブック。 https://www.fpcr.or.jp/data_files/view/214/mode:inline, 2023年10月1日。
- 4) Inoue M, Yamamoto S, Kurahashi N, Iwasaki M, Sasazuki S, Tsugane S: Daily total physical activity level and total cancer risk in men and women: results from a large-scale population-based cohort study in Japan. *Am J Epidemiol*. 2008; 168: 391-403.
- 5) Patel AV, Friedenreich CM, Moore SC, Hayes SC, Silver JK, Campbell KL, et al: American College of Sports Medicine Roundtable Report on Physical Activity, Sedentary Behavior, and Cancer Prevention and Control. *Med Sci Sports Exerc*. 2019; 51: 2391-2402.
- 6) van Waart H, Stuiver MM, van Harten WH, Geleijn E, Kieffer JM, Buffart LM, et al: Effect of low-intensity physical activity and moderate- to high-Intensity physical exercise during adjuvant chemotherapy on physical fitness, fatigue, and chemotherapy completion rates: results of the PACES randomized clinical trial. *J Clin Oncol*. 2015; 33: 1918-1927.
- 7) Patnaik JL, Byers T, DiGuseppi C, Dabelea D, Denberg TD: Cardiovascular disease competes with breast cancer as the leading cause of death for older females diagnosed with breast cancer: a retrospective cohort study. *Breast Cancer Res*. 2011; 13: R64.
- 8) 一般社団法人日本腫瘍循環器学会ホームページ。 <https://j-onco-cardiology.or.jp>, 2023年10月1日。
- 9) Gilchrist SC, Barac A, Ades PA, Alfano CM, Franklin BA, Jones LW, et al: Cardio-oncology rehabilitation to manage cardiovascular outcomes in cancer patients and survivors: A scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2019; 139: e997-e1012.

Abstract

Public lecture of Faculty of Health Science, Juntendo University

Masakazu Saitoh

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

On 30th September 2023 (Sat), a public lecture entitled "Cancer Treatment and Recovery - Importance of Radiotherapy and Rehabilitation" was organized by the Faculty of Health Sciences at the Juntendo University. This report describes the content of the lecture on cancer rehabilitation for cancer prevention and recurrence prevention from the perspective of a physiotherapist.

Key Words: public lecture, prevention, cancer rehabilitation, cardio-oncology rehabilitation

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 105-108, 2024]

臨床実験型短期留学（台湾）

新城 碧、鈴木柊真、永瀬克哉、中野啓太郎、森 香奈

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

要 旨

2023年8月20日から9月2日の14日間、台北・台中にて臨床実験型短期留学（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5名の学生が、1週目は国立台湾大学を、2週目は中国医薬大学を拠点に研修を行った。短期留学参加前には、英語能力向上を目指し、学生同士で主体的に英会話を実践する機会を作った。また、1年次から中国医薬大学をはじめ協定校の学生とオンラインで交流をし、この留学を見据えて少しずつ関係を築いてきた。現地では、双方の大学についてプレゼンテーションをし、理学療法における日本と台湾の相違点を臨床現場で明確にした。今回の臨床実習型短期留学を通じて、海外の理学療法に対する関心が高まり、今後の自身のキャリア形成にとって有意義な経験を得ることができた。

キーワード：台湾、臨床参加、異文化交流、理学療法

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，109-112頁，2024年（受付 2024.1.9.；受理 2024.2.27.）

海外研修プログラムの概要・研修の
全体スケジュール

2023年8月20日～9月2日の14日間、我々は臨床実験型短期留学（台湾）に参加する機会を得た。短期留学前半は台北にある国立台湾大学（National Taiwan University: 以下、NTU）を訪問し、主に附属病院で入院患者やその家族との関わり方を学んだ。短期留学後半は台中にある中国医薬大学（China Medical University:

以下、CMU）を訪問し、主に地域のクリニックや障がい者施設などで病院外における理学療法士の関わり方について学んだ。各大学で見学した病院・施設を表1にまとめた。

また、病院・施設見学だけでなく、現地学生と交流する機会もあり、キャンパスツアーや市内巡りを通して台湾の街並みに触れ、異文化理解を深めることができた。研修全体を通して、台湾の国民性や文化に触れつつ、理学療法士の役割について考えることができた。

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	NTU Hospital	NTU Hospital
2日目	NTU Hospital	NTU Hospital
3日目	NTU Hospital	NTU Hospital
4日目	NTU Hospital	NTU Hospital/Campus tour
5日目	NTU Hospital	NTU Hospital/Student presentation
6日目	台北観光	
7日目	台南観光、その後台中へ移動	
8日目	立夫 (Lifu) 中興薬博物館	Lunch meeting
9日目	CMU Lab	Asia University Hospital
10日目	臻理物理治療所	Cycling park
11日目	Maria Social Welfare Foundation	瑪利 Young の快樂襪子店 & 童樂館
12日目	永春物理治療所	台中市内観光

連絡先：澤 龍一

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

〒113-8421 東京都文京区本郷2-1-1

E-mail: r.sawa.ia@juntendo.ac.jp

研修施設の概要と研修内容および所感

A. 1週目の臨床参加について（図1）

1週目はNTU 附属病院で、2グループに分かれ、曜日ごとに運動器や呼吸器、小児など様々な分野を見学する機会を得た（図2）。NTU 附属病院は約2600床を有する台北の国立病院で、教育・研究・サービスの3つを担っている。我々は、ベッドサイドでの理学療法と理学療法室での外来患者に対する理学療法のどちらも見学を行うことができた。多くの日本の総合病院とは異なり、疾患ごとに理学療法を行う部屋が分かれている。それぞれの部屋は広かったが、業務が始まると狭く感じるほどに大勢の患者が訪れるため、一人の理学療法士が多数の患者を担当し、短時間での介入となることが多かった。そのため、物理療法や患者とその家族へのトレーニング指導を丁寧に行っていたことが印象に残っている。台湾では保険を用いることで、最低限の負担で医療を受けられるようになっており、一対多のシステムになっていることを知った。一方で、

マンツーマンで長時間の理学療法を受けたい患者のために、台湾では保険適用外の理学療法クリニックを開業することが認められている。

B. 2週目の臨床参加について（図3）

2週目には台中に移動し、前述したような理学療法士が開院しているクリニックや、障がい児支援施設などを見学した。1か所目はスポーツ分野の整形外科領域に力を入れている BOMT PHYSICAL THERAPY CLINIC に伺い、競輪チームの選手のケアを行う様子を間近に見学することができ、貴重な経験となった。また、この施設では様々な物理療法機器を駆使しており、それぞれの機器の使い方の説明を受け学生同士で使用する機会を得た（図4）。クリニックでの治療は保険適応外のため、それぞれの物理療法機器に対して使用することの値段が定められている。患者が支払う治療費に直接反映されることになるため、使用する機器の選択や期間設定を含め、責任をもって効果的な治療を提供する必要があると感じた。



図1 NTU 教員、学生の集合写真

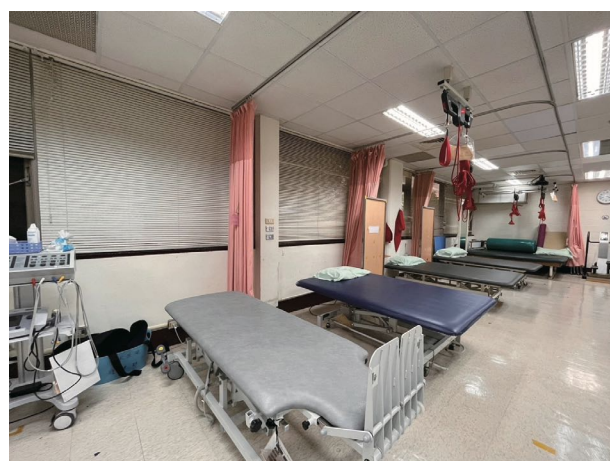


図2 NTU 附属病院 リハビリテーション室



図3 CMU 学生との集合写真



図4 物理療法機器体験

2か所目は、永春物理治療所である。このクリニックは整形外科疾患だけではなく、脳卒中などの神経系理学療法も行って、完全にマンツーマンで理学療法を行うのが特徴である。なかでも興味深かったのは、歩行練習を行う際のサスペンションである。天井にレールを敷き、ロープで患者を支えることで免荷を調整したり、転倒時の傷害リスクを軽減したりすることができる機器が導入されていた（図5）。患者が保険適用外の理学療法を希望する意味を考え、それに見合う治療を提供する重要性を確認できた。この他にも、Maria Social Welfare Foundationのように障がいを持つ小児に対する理学療法を行う施設や、障がい者の就労支援を行う施設の見学も行った。台湾でもリハビリテーションを必要とする人は幅広く、理学療法士の必要性を再確認することができた。

学生交流の概要および所感

本研修中では、台湾の学生との交流の機会が多く設けられていた。各大学にて、台湾の学生と両国の理学療法士育成プログラムや臨床現場における治療法の相違点についてのディスカッションを行った（図6）。このような現地の学生や理学療法士との交流、様々な医療施設見学を経て、教育面と臨床現場における日本との相違点を知ることができた。まず、教育面では、実習形態に明らかな違いがあった。台湾では運動器、神経、内部、小児の4つの分野で理学療法実習を行うことが必須とされており、各6週間、計24週間の期間を要する。一方で日本は、分野ごとに実習地や期間を分配することなく合計約18週間と、台湾と比較すると短



図5 歩行練習を行うサスペンション

期間となっている。また、今回留学した NTU は6年制の理学療法士養成プログラムを採用しており、日本の4年制大学とのカリキュラムの違いも挙げられる。資格取得までの履修年数の違いは、同時に学生が在学中に得ることのできる臨床経験の充実度に大きく関わると考えられる。そのため、日本と台湾それぞれの教育体制を互いに共有し、将来の自身のキャリア形成や理学療法の発展を見据えたうえで両者の良し悪しを考える大変貴重な機会となった。理学療法分野の社会的認知度の上昇およびニーズの増加を考えると、欧米諸国を中心に先駆けて認められている開業の自由やダイレクトアクセスが日本でも承認されれば、より理学療法士の職域の拡大や発展を加速させることができる可能性がある。しかし、4年制大学の他、専門学校での教育を受けて国家試験受験資格を得ることも可能である現状において、養成校における教育の質の標準化、および卒後の理学療法士の質の担保が懸念される。日本や台湾における開業やダイレクトアクセスの権限取得の実現に向けて、安全面やリスク管理の視点から必要十分な教育の量と質を検討していく必要があると実感した。

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、台湾では物理療法機器の使用頻度が多いこと、理学療法士1人あたりの患者数が多いことが挙げられる。これは、NTU 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、一緒に理学療法を受けるというスタイルが関係していると考えられる。特に外来では、患者1人あたり1回に1時間程度の理学療法を実施しており、そのうち理学療法士による直接的な介入、生活動作および介助指導の時間は15分ほどで、残りの時間に患者とその付添人による自主トレーニングや物理療法機器を使用し



図6 NTUにて学生同士のディスカッション

た治療を行っており、効率化と生活指導を重視した様子が見受けられた。しかし、患者とその家族によるトレーニングによって、理学療法士によるトレーニングと同等の効果を得ることができるかは定かでない。日本と台湾を比較し、治療効果と効率、どちらも同時に実現させるために我々にできることを考えていきたい。

後輩へのメッセージ

4週間の海外研修プログラムでは、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は異なり、医療という1つのテーマをもとに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。台湾の医療を知り、そこから日本の医療を客観視し、両者の相違点や互いの良し悪しに気づくことができたり、同世代で同じ分野を目指す学生との交流を経て刺激をもらったりと、大変有意義なものとなった。

た。互いに非母国語である英語でのコミュニケーションとなるため、意思疎通に苦勞する場面も多々あったが、自分の意思をできる限りシンプルに分かりやすく伝える工夫や、ディスカッションの場で自分の考えを持ち、積極的に意見交換に参加する姿勢を積み重ねることで、学びを深めていくことができると実感した。こうした経験は、今後社会に出た際に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、後輩たちにも志高く参加してほしいと願っている。

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。

Abstract

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

Aoi Shinjo, Shuma Suzuki, Katsuya Nagase, Keitaro Nakano, Kana Mori

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

From 20 August to 2 September 2023, for 14 days, we participated in a short-term study abroad for clinical observation in Taipei and Taichung (Taiwan). This time, five of us from the Department of Physiotherapy, Faculty of Health Sciences, participated in the training, based at National Taiwan University for the first week and China Medical University for the second week. Before participating in the study abroad, we created opportunities to practice English conversation independently with each other to improve their English language skills. In addition, since the first year, we have been interacting online with students from the China University of Medical Sciences and other partner universities, gradually building relationships in anticipation of this study abroad. On-site, we gave presentations at both universities and clarified the differences between Japan and Taiwan in physiotherapy in the clinical field. Through this short-term study abroad for clinical observation, our interest in overseas physiotherapy increased, and we gained meaningful experiences for our future career development.

Key Words: Taiwan, clinical observation, cross-cultural exchange, physical therapy

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 109-112, 2024]

語学教育型海外短期留学（カナダ）

竹越慎吾、佐久間未希、藤山瑞稀

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、英語教育のみならず、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。英会話における異文化交流を通じて、将来は国際的に活躍できる理学療法士になりたいと感ずることができた。このようなカナダにおける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5巻，第1号，113-115頁，2024年（受付 2023.11.16.；受理 2023.12.7.）

研修プログラムの概要

2023年9月3日から9月16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（カナダ）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に参加した（表1）。ま

た、休日は市街地散策や（図1）、研修プログラムに参加した。他にもホストファミリーとショッピングをしたり、BBQ をしたり（図2）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

研修プログラムでは、ReBalance というクリニックを見学した。ここには、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経験豊富な医療チームがあった。このチームは、スポーツ内科医、理学療法士、整形外科医で構成されており、これらの医療専門家が連携をしながら総合的な診断と

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3日	日	ビクトリア到着	
9月4日	月	語学学校	ダウンタウン散策
9月5日	火	語学学校	Camosun College & PISE 見学
9月6日	水	語学学校	ビクトリア大学 キャンパス見学
9月7日	木	語学学校	現地理学療法士との意見交換
9月8日	金	語学学校	Westhill Stadium & Rugby 施設見学
9月9日	土	Pacific FC ゲーム観戦	
9月10日	日	フリータイム	
9月11日	月	語学学校	ReBalance（理学療法医院）見学
9月12日	火	語学学校	現地スポーツ医療学生との交流
9月13日	水	語学学校	ビクトリア大学 キャンパス見学
9月14日	木	語学学校	語学学校アクティビティ参加
9月15日	金	語学学校	フリータイム
9月16日	土	日本へ帰国	

連絡先：宮森隆行

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

〒113-0033 東京都文京区本郷3-2-12 御茶ノ水センタービル503

E-mail: t.miyamori.hi@juntendo.ac.jp



図1 市街地の有名なホテル（The Empress）



図3 Rebalance の見学を終えて



図2 ホストファミリーと BBQ をする様子

治療計画を提供していた。

また、実際に現場で活躍する医療専門家から話を聞いて、改めて理学療法士を目指して良かったと思った。私たちは、病院を中心とした保険診療機関で働くことになるが、憧れていた理学療法士像を目の当たりにして、自分自身も将来は国際的に活躍できる理学療法士になりたいと感じた。この ReBalance というクリニックでは、最先端の診療機器を取り入れており、医師と理学療法士が対等な立場で議論をし、患者へ最善の医療を提供していることが魅力的だった（図3）。

学生交流の概要および所感

平日の放課後に語学学校の課外活動に参加し、様々な国の生徒との交流を通して、異なる文化や価値観を肌で感じ、自分自身の将来の可能性を広げる選択肢を増やすことができた。実際に英語で会話をしてみると、聞き取れたとしても自分達が言いたいことを伝えられないもどかしさがあったが、会話をしていくうちに徐々に自分の意見を伝えることができ、英語を学ぶ楽しさを感じることができた。（図4）

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、医師と同じように診断できることである。そのため、カナダでは理学療法士がクリニックを開業して、理学療法士の診断のもとで理学療法を提供できる。また、施設によっては医師と理学療法士が対等な立場で協働しているところもある。その一方で、日本と違い理学療法士の養成校は少ないため、理学療法士になること自体が難しく、人員不足といった問題点を抱えている。（図5）

後輩へのメッセージ

海外研修プログラムは、旅行に行つて観光するのとは違い、ホームステイや語学学校などが含まれる。社会人になってからこのような機会を得ることは難しいと思われるため、少しでも興味があれば行く価値はあ



図 4 語学学校終了時



図 5 カナダの理学療法士からの情報収集

と考える。英語力に不安があっても大きな問題ではなく、身振り手振りを用いて伝えようとする気持ちがあれば、少しずつ英会話が上達していくと思う。

最後に

二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を増やすことができた。日本のみならず、世界で活躍することも視野に入れて自己研鑽を重ねていきたい。

利益相反

本研究における利益相反は存在しない。

Abstract

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

Shingo Takegoshi, Miki Sakuma, Mizuki Fujiyama

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

We participated in short-term study abroad for the language education in Canada offered by the Department of Physical Therapy, Faculty of Health Sciences, Juntendo University. During the training, we not only received English language education, but also observed a sports clinic and learned about the working style of physiotherapists in Canada. The experience, including the cross-cultural exchange in English conversation, made us feel that we would like to become internationally recognized physiotherapists in the future. We would like to report on this two-week overseas training program in Canada.

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

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 113-115, 2024]

専門教育型短期留学（台湾）

飯野秀慶、滝澤さらら、小山和也、堀 拳輔、村中由佳、坂野康昌

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

要 旨

今回、台湾の元培医事科技大学における8日間の短期留学に参加した。同大学での英語での講義やコミュニケーションを我々の個人的または専門的な成長に繋げることができた。8日間、英語を活用する日々を送り、英語力向上に対する意欲が増し、刺激的な毎日を過ごすことができた。このような台湾における留学体験について報告する。

キーワード：専門教育型短期留学、台湾

順天堂保健医療学雑誌，第5巻，第1号，116-117頁，2024年（受付 2024.2.15.；受理 2024.4.3.）

研修プログラムについて

2023年9月10日～9月17日まで、保健医療学部診療放射線学科が提供する短期留学に参加する機会を得た（図1）。今回の留学では、主に元培医事科技大学で英語による講義を受け、放課後は同大学の学生と交流を行った（図2）。現地の学生に混ざって受けた講義の中で特に印象に残ったのは、カテーテル治療の講義と単純X線撮影に関する実習である。カテーテル治療

の講義では実際のカテーテルを触ることができ、カテーテル治療の原理についてより深く理解することができた。単純X線撮影に関する実習では、撮影体位を学び、ポジショニング・撮影について一連の流れを現地の学生と共に学習した。また、大学内にある放射線機器の博物館を見学した際には、現在では使われていない初期の単純X線撮影装置（図3）に加え、現在の機器の内部構造を見ることができた。

大学の講義において、日本とは異なる点を2点挙げる。1点目は国際意識の違いである。元培医事科技大学では英語のみで行う講義や教科書があり、国際化を意識した教育が感じられた。英語のみで行う講義は少ないようだが、専門用語は英語で学ぶらしく、学生は難なく理解して講義に参加していた。母国語のように英語を話す学生が多く、国際化教育の水準の高さを感じた。



図1 元培医事科技大学の方々との集合写真



図2 留学プログラム修了証授与式



図3 初期の単純X線撮影装置

連絡先：坂野康昌
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: y-sakano@juntendo.ac.jp

2点目は医療機器と撮影基準の違いである。撮影体位を学び、ポジショニングの練習をした後、ポジショニングから撮影までの流れを行う講義があった。撮影までの一連の流れをテストするとき、対象はファントムで2枚の画像を撮影した後に画像処理を行い、左右がわかるマーカーを入れるところまでを5分で行う。本学で行われている、撮影までの流れをテストするOSCE（Objective Structured Clinical Examination：客観的臨床能力試験）では、対象は人で検査説明およびポジショニングを行うが、時間に決まりはなく、撮影後の画像処理もしない。台湾ではポジショニングの正確さに加えて撮影後の画像処理までのスピードが重視されており、日本ではポジショニングの正確さに加えて接遇の丁寧さが重視されているという違いを感じた（図4）。

学生交流について

9時から16時までは大学の講義に参加して学習をし、



図4 元培医事科技大学におけるポジショニング・撮影に関する講義の様子

昼休みには親交を深めるために観光地や趣味などについて英語でコミュニケーションを取った。放課後には夜市を散策したり、観光地を案内してもらった（図5）。英語で会話することは難しく、とても苦労したが、身振り手振りで伝える努力をし、コミュニケーションを取ることができた。しかし、伝えたいことがうまく伝わらずに断念してしまったり、相手の伝えたいことが理解できずに会話が成り立たないこともあり、自分の英語力の低さを痛感し、英語力向上に対する意欲が増した。

短期留学全体を通して

台湾における8日間の研修プログラムである本留学で、講義や学生との交流を通して多文化共生できたことは、医療人を目指す我々にとって刺激的であり、とても貴重な経験となった。今後は日本のみならず、国際社会で活躍できる診療放射線技師を目指したいと思う。



図5 夜市散策の様子

Abstract

Participation in short-term study abroad for professional education in Taiwan

Hideyoshi Iino, Kirara Takizawa, Kazuya Koyama, Kensuke Hori, Yuka Muranaka, Yasuaki Sakano

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

We participated in an eight-day study abroad program at Yuanpei University of Medical Technology in Taiwan. This program, enriched by lectures and interactive communication in English, significantly contributed to our personal and professional development. The daily practice of English during this period not only enhanced our language skills but also provided stimulating and enriching experiences. This report outlines our experiences and learnings from this educational venture in Taiwan.

Key Words: short-term study abroad for professional education, Taiwan

[Juntendo Health Science Journal 5(1): 116-117, 2024]

2022年度保健医療学部共同研究・奨励研究抄録

前十字靱帯損傷・再建術後患者におけるスポーツ復帰に向けた身体機能および心理状態の回復過程

相澤純也、宮森隆行、中村絵美、池田 浩

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：前十字靱帯 (anterior cruciate ligament, ACL) 再建術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。客観的身体機能として片脚バランス能力と片脚ホップ能力を計測した。膝関節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3か月と6か月の記述統計値を算出した後に、術後経過時期による値の差を Wilcoxon の符号付順位検定で分析した。

結果：術後3か月の IKDC-SKF スコア ($P=.028$)、JACL-25 スコア ($P=.028$) 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、術後3か月のそれより中央値で約4点の増加を認めたが、差は有意ではなかった。術後6か月の片脚での前方ホップ、外方ホップ、内方ホップの下肢対称性指数 (非術側値に対する術側値の割合) は、それぞれ中央値で 87.5%、92.9%、84.5% であった。術後6か月の自覚的走行能力の中央値は 75% であった。

考察：術後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。先行研究で心理的準備に関連しやすいとされる自覚的走行能力や片脚側方ホップ能力は、術後6か月では回復が十分でないことが示唆された。

血液透析中に実施するレジスタンストレーニングの定量化に向けた検討

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、血液透析中に実施するトレーニングボールを使用したレジスタンストレーニングの定量化を検討することを目的とした。

方法：健康成人 24 例 (年齢 21 ± 1 歳、女性 41%) を対象に、伸縮性歪みゲージ (C-STRECH, バンド化学) を貼付したトレーニングボールをベッドの足元に設置し、ベッドアップ 45 度肢位で最大レッグプレス (LP) 運動時の伸縮性歪みゲージ値 (LPM) を計測した。最大 LP 時に加えて、伸縮性歪みゲージをガイドにして 40%、60%、80% LPM 負荷強度にて LP 運動を 3 分間実施し、外側広筋の筋活動を表面筋電図 (Delsys Trigno, DELSYS) にて評価した。筋活動の解析値は最大 LP 運動時、1RM 測定時の筋電図の二乗平均平方根 (RMS) の相対値 %RMS とした。同様にウエイトマシンを用いた LP の 1 回最大挙上重量 (1RM) 時の外側広筋の RMS を評価した。また、安静時に加えて、40%、60% および 80% LPM 負荷強度にて、LP 運動を 3 分間実施した際の心拍数および血圧を調査した。

結果：伸縮性歪みゲージをガイドとした 40%、60%、80% LPM 時の外側広筋の筋活動は、最大 LP 運動時の 56 ± 16 、 64 ± 18 、 $67 \pm 19\%$ 、ウエイトマシンによる LP の 1RM の 25 ± 10 、 27 ± 13 、 $33 \pm 15\%$ であった。また、安静時、40%、60% および 80% LPM 時の心拍数 (79 ± 19 vs. 84 ± 16 vs. 87 ± 16 vs. 91 ± 17 拍 / 分, $p=0.128$)、収縮期血圧 (123 ± 14 vs. 126 ± 14 vs. 125 ± 15 vs. 128 ± 17 mmHg, $p=0.710$) は、LP 運動による有意な上昇を認めなかった。

結論：伸縮性歪みゲージをガイドとしたトレーニングボールを用いたレジスタンストレーニングは、定量的に実施することができる可能性が示された。

骨格筋の筋線維長と生理学的筋断面積の測定値に関する解剖学的・基礎的研究

坂井建雄¹⁾、市村浩一郎²⁾、加藤公太²⁾、姉帯飛高²⁾、武田晃一²⁾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：本研究では、人体の上下肢のいくつかの筋について単離筋標本を作成し、標準化した測定方法を用いて、構築特性（筋体積 V_m 、筋長 L_m 、筋線維長 L_f 、羽状角 θ ）ならびに筋線維長の適正化によく用いられる筋節長（ L_s ）を測定し、ここから PCSA、平均筋断面面積（ $AvCSA$ ）、筋線維長比率（ L_f/L_m ）、PCSA 比率（ $PCSA/AvCSA$ ）を算出する。

方法：単離筋標本から測定・算出された構築特性値を、文献上で報告されている同じ筋の構築特性値と比較し、それぞれの構築特性値ごとに個体間の差異および研究者間の差異を検討する。それぞれの研究者による測定方法についても精査・評価する。

結果：ハムストリングスは大腿の後面にある3筋4頭からなり、股関節の伸展と膝関節の屈曲に作用する重要な筋であり、半腱様筋・半膜様筋・大腿二頭筋長頭は紡錘状の形状を有している。解剖学の教科書的な理解では、紡錘状筋の筋線維は筋の長軸に平行に配置すると考えられてきた。しかし、単離筋標本を用いた研究分担者（武田）の観察により、ハムストリングスの紡錘状筋はいずれも起始腱と停止腱が筋の両面に広がり、筋線維が両面の腱の間をつなぐ羽状の配列を有すること、筋によって起始腱・停止腱の広がり方に明確な差異のあることが分かっている。紡錘状筋における筋線維の配列がこれまで漠然と考えられていたように筋の長軸に平行なのではなく、筋の両面に広がる起始・停止腱の間を斜めに走る羽状筋の構造を持つことを、ハムストリングスを例にとり示した。また PCSA の算定にあたって必要な筋線維長および適正化のために必要とされる筋節長の測定を行い、先行研究のデータと比較して、筋線維長が測定方法（解剖体、MRI）により影響を受けること、筋節長が筋に特有の値を持ち、ランダムではないことを示した。研究成果を *Journal of Anatomy* 誌に発表した。

結論：これらの知見は骨格筋の解剖学的な理解に大きな進歩をもたらすものである。

小型センサを用いた立ち座り動作の新しい評価システムの開発に向けた基礎的研究

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：後期高齢者数が増加する昨今、要介護高齢者の自立した日常生活をサポートする上で、在宅医療・リハビリテーションの重要性が高まっている。要介護高齢者の自立した日常生活の継続を脅かすのが、居住空

間での「転倒」であり、我々理学療法士には高齢者の居住空間で詳細な運動機能評価を遂行することが求められる。本研究は、在宅医療・リハビリテーション現場で応用することを視野に、健常者を対象として小型センサを用いて立ち座り動作を評価し、得られた時間・運動学的データの波形解析により、定量的な運動機能評価指標の開発を目的とする。

方法：小型センサの装着部位による収集データの乖離を検討するため、健常若年成人1名（男性、身長171.0 cm、体重60.5kg）を対象に、腰部（第4腰椎棘突起）、胸部（胸骨体中央）、頸部（第7頸椎棘突起）、頭部（頭頂）に小型センサを装着した状態で立ち座り動作の測定を行った。実験環境として、対象者は裸足となり、座面高42cmの椅子から立ち座り動作を10回繰り返した。10回の立ち座りから得られたデータの内、中央8回の矢状面上の角速度データを用いて、動作の規則性の指標である自己相関係数（autocorrelation coefficient: AC）を装着部位ごとに算出した。ACは-1から1の間の値を取り、本研究では1に近いほど動作の規則性が高いことを示す指標となる。

結果：立ち座り動作8回の角速度データから算出された各部位のACは、それぞれ腰部0.7628、胸部0.9364、頸部0.8405、頭部0.5684であり、胸部での測定において高い規則性が確認された。

結論：装着部位によるACの違いが明らかとなった。健常若年成人を対象にした実験であることを考慮すると、ACは1に近い値を取ることが想定される。また、在宅医療・リハビリテーションの現場での活用を考えると、胸部への装着で実用可能性が高いと考えられた。今後は高齢者を対象として指標の妥当性を検討していく。

スマートグラス（眼鏡型ウェアラブルデバイス）を用いた双方向型遠隔臨床実習

高橋容子¹⁾、藤野雄次¹⁾、中村絵美¹⁾、澤 龍一¹⁾、住瀬洋二²⁾、高橋哲也¹⁾、藤原俊之^{1,3)}、代田浩之⁴⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

²⁾ 順天堂大学総務局企画調査室

³⁾ 順天堂大学大学院医学研究科リハビリテーション医学

⁴⁾ 順天堂大学大学院保健医療学研究科

新型コロナウイルス感染症の拡大により、医療施設での臨床実習が難しくなった背景から、我々は遠隔臨床実習システムの構築を急務とした。この課題に対処する手段として、スマートグラスを実習に活用してきた。スマートグラスとは、眼鏡型ウェアラブルデバイ

スであり、装着者の視野情報や音声を、インターネットを介してリアルタイムに遠隔へ共有するデバイスである。本研究では、この実習システムを発展させ、プレリミナルな双方向型遠隔臨床実習システムを構築することを目的とした。対象は理学療法学科1・2年生の合計224名とした。フレッシュャーズゼミナールおよび基礎ゼミナールの授業に、生活期脳卒中患者を招聘し、医師と理学療法士の教員が問診・評価を実施した。別室の学生は、スマートグラスで撮影された教員の視野や全体を映すカメラの映像をモニターでリアルタイムに視聴した。学生はグループ討議を行い、患者との質疑応答を通して双方向型の意思疎通を図った。終了後、学生に対し、①見学には全体を映すカメラだけでなくスマートグラスがあったほうが良かったか、②スマートグラスを用いて見学したい内容や疾患を尋ねるアンケートを実施した。①の質問に対し、「両方のカメラの映像があったことがよかった」と回答した学生が95.1%であり、「全体の様子を撮影するカメラだけで十分だった」と回答した学生は4.0%にとどまった。②の質問では、理学療法士の治療実施中や評価実施中の視野と回答した学生が7割以上を占めた。従来の全体を映すカメラによる遠隔見学に加え、スマートグラスを活用することが、双方型遠隔臨床実習の質を高める可能性が示唆された。

末梢神経ランダムノイズ刺激の効果と前庭電気刺激との比較

春山幸志郎、山口智史

順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：近年では末梢神経へのランダムノイズ刺激の有効性が報告されているが、刺激中だけでなく刺激後効果も認められるかは不明である。本研究では、下肢末梢へのランダムノイズ電気刺激が、刺激中および刺激後の立位姿勢制御に及ぼす影響を検証することを目的とした。さらに予備的検証として前庭電気刺激との比較を行った。

方法：健康若年者24名（平均 20.6 ± 1.0 歳）と健康高齢者24名（平均 69.9 ± 4.9 歳）を対象とした。対象者は無作為に介入群（0-640Hzで変調するランダムノイズ電気刺激）と対照群（偽刺激）に割り付けた。刺激部位は両脚の足底神経とし、感覚閾値の0.9倍の刺激強度で課題中に15分間刺激した。課題は立位で前後足圧中心を制御するトラッキング課題を実施し、基準曲線との誤差面積を accuracy ratio として算出した。介入群と対照群の比較のために、介入後および介入中効果の二元配置分散分析を実施した。統計処理には SPSS28-J

を使用し、有意水準は5%に設定した。追加実験として、刺激部位のみ両側乳様突起に変更した前庭電気刺激介入を、3名の健康若年者に対して実施した。

結果：介入前後の accuracy ratio は、若年者、高齢者ともに両群で有意に改善したが、有意な群間差は認めなかった。刺激中効果の比較では、高齢者でのみ対照群と比較して介入群で有意な改善を認めた。また、前庭電気刺激条件では、下肢末梢刺激および偽刺激と比較して差を認めなかった。

結論：下肢末梢へのランダムノイズ刺激は、高齢者において刺激中の即時的効果のみを認め、刺激後効果は認められなかった。刺激部位は下肢末梢でも前庭神経でも大きく変わらない可能性はあるが、適切な刺激部位を継続して検証していく必要がある。

大腿直筋肉ばなれ既往肢の筋形態と膝蓋腱組織弾性の特徴

宮森隆行^{1,2,3)}、野津将時郎⁴⁾、藤巻美詠³⁾、島寄 佑⁴⁾、吉村雅文³⁾、池田 浩^{1,2,5)}

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部

²⁾ 順天堂大学大学院保健医療学研究科

³⁾ 順天堂大学大学院スポーツ健康科学研究科

⁴⁾ 順天堂大学スポーツ健康科学部

⁵⁾ 順天堂大学整形外科・スポーツ診療科

目的：大腿四頭筋肉ばなれは、ハムストリング肉ばなれより発生率は低いものの、再発率が高く、再発した場合は重症化しやすいため、予防法を含めた発生要因の解明が必要である。特に二関節筋である大腿直筋は肉ばなれが好発し、同部位の既往が危険因子であることが明らかにされている。ハムストリング肉ばなれでは、既往肢の筋束長は短く、羽状角が大きいという特徴が明らかにされているが、大腿直筋については不明点が多い。また、肉ばなれからの回復の際にできる瘢痕組織は、筋腱複合体の張力低下を引き起こす可能性があり、筋膜は硬くなるとの報告があるものの、腱については明らかにされていないことから、これを検証するためには、肉ばなれ既往肢の腱の硬さを明らかにする必要がある。したがって、本研究では、大腿直筋肉ばなれ既往肢の筋形態と膝蓋腱組織弾性率の特徴を明らかにすることを目的とした。

方法：対象者は、日常的に運動をしている女子大学生のうち、過去18ヶ月以内に大腿直筋肉ばなれを受傷したことのあった10名と、肉ばなれ既往のない10名とした。超音波画像診断装置のBモードとせん断波エラストグラフィにて、安静時とストレッチ時の筋形態と膝蓋腱組織弾性率をそれぞれ測定した。既往者の既往肢と

非損傷肢の同一被験者内比較と、既往群と対照群の左右非対称性を示す肢間差を群間で比較した。

結果：群間比較において、既往群の膝蓋腱組織弾性率肢間差は、ストレッチ時において有意に高値を示した($p=0.04$)。安静時の膝蓋腱組織弾性率、筋形態においては、両肢位とも肢間差は認められなかった。また、既往者の既往肢と非損傷肢でも筋形態と膝蓋腱組織弾性率に有意な差は見られなかった。

結論：大腿直筋肉ばなれ既往群は、ストレッチのような伸張ストレスが加わった際に、既往肢の膝蓋腱組織弾性率が大きくなり、肢間差が対照群と比較して大きくなることが明らかになった。

食道がん患者における食道切除術前後の phase angle の変化と身体機能回復の関連

森沢知之¹⁾、吉田 司²⁾、北原エリ子²⁾、高橋哲也¹⁾、藤原俊之^{1,2)}

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部

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：生体電気インピーダンス分析で計測された位相角 (phase angle: PhA) は、栄養状態、身体機能、老年症候群などに関連することから、「身体の総合的な健康指標」として注目されている。心臓血管外科術後は PhA が有意に低下し、術後の身体機能低下と関係することが報告されているが、手術侵襲が高度である食道がん患者の術後の PhA の変化と身体機能回復との関連性については明らかにされていない。本研究では、食道切除術前後の PhA の変化と身体機能回復の関連を明らかにすることを目的とする。

方法：対象は2020年9月～2022年2月の間に順天堂医院食道胃外科において、頸部・胸部・下部食道癌の治療のために食道切除術を施行し、かつその前後にリハビリテーションが処方された連続56例とした。術前と退院時の PhA および身体機能（握力、歩行速度、5回立ち上がり試験）を計測して比較した。

結果：56例のうち除外基準該当例を除外し、最終的に29例（平均年齢66.78±9.72歳、男性56%）が解析対象者であった。術前 PhA の平均が $4.04 \pm 0.84^\circ$ であるのに対して、退院時 PhA は 4.03 ± 0.82 であり、術後 PhA は有意に低下していた ($p<0.05$)。ΔPhA と Δ 握力および Δ 5回立ち座りテストの間に有意な相関が認められた ($p<0.05$)。ΔPhA の中央値から PhA 低下群と維持・増加群に分類し、両群を比較した結果、年齢、性別、重症度、手術侵襲には両群で有意な差は認められなかったが、PhA 低下群は退院時のアルブミン値が有意

に低値であった ($p<0.05$)。

考察：食道切除術後に PhA は有意に低下し、身体機能の低下率と有意に関連していた。また、PhA が中央値以上に低下していた群では、退院時のアルブミン値が有意に低値であったことから、食道切除術後の PhA および身体機能の回復には術後の栄養状態が関連することが示唆された。

筋シナジー解析によるパーキンソン病患者の運動障害の解明

山口智史¹⁾、土屋順子²⁾、春山幸志郎¹⁾、亀山啓博²⁾、佐藤和命²⁾、渡部幸司²⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

²⁾ 東京工科大学医療保健学部理学療法学科

³⁾ 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

背景：筋シナジーは、脳から筋への神経伝導を簡略し、複数の筋群を協調的に活性化することで、動作を円滑に遂行する役割を持つ。近年、動作再獲得のためのリハビリテーションのために、パーキンソン病 (PD) 患者の筋シナジー評価の重要性が指摘されている。

目的：PD 患者を対象に、歩行様の下肢筋活動が誘発可能なペダリング運動中の筋シナジー変化を評価し、健常者との相違や平地歩行との相違を検証することで、下肢運動障害を解明することを目的とした。

方法：対象はPD患者4名、健常者6名とした。条件は、至適回転速度でのペダリング運動および至適速度での平地歩行とした。筋シナジー評価として、上記の条件中に、下肢の10筋から表面筋電図を記録した。対象筋は、大臀筋、中殿筋、内側ハムストリングス、大腿筋膜張筋、大腿直筋、外側広筋、内側広筋、前脛骨筋、腓腹筋、ヒラメ筋とした。筋電図はサンプリング周波数2kHzで取得し、動作の周期データについて非負値行列因子分解 (NMF) 解析を実施し、筋シナジーの重みづけとその活動度を算出した。

結果：PD 患者では、歩行時に5つの筋シナジーを認めた。健常者の歩行では、4つの筋シナジー数が得られた。PD 患者で追加された筋シナジーは、歩行立脚期に出現し、特に下肢の同時収縮による筋活動であった。一方で、ペダリング運動中では、健常者と同様に4つで構成される筋シナジーを認めた。

結論：PD 患者の歩行で認めた筋シナジー数の増加は、歩行における姿勢制御能力の低下を示しており、動作に伴う運動障害の程度を反映していると考えられる。一方、ペダリング運動は、座位で実施できるため高い姿勢制御能力を必要とせず、健常者と同様の筋シナ

ジーによる運動制御が可能となっていると考えられた。

低酸素領域を深層学習により可視化したハイポキシック画像誘導放射線治療

白井桂介、赤沼優文、前原栄一、坂本 肇、
坂野康昌、京極伸介、代田浩之

順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

目的：強度変調放射線治療法は、腫瘍内の線量分布に強弱をつけることが可能であるため、腫瘍内の低酸素領域の可視化は放射線療法にとって有効な情報になり得る。低酸素イメージング剤である¹⁸F-フルオロミソニダゾール (FMISO) を用いた PET/CT により、腫瘍の低酸素領域を描出できるが、PET 検査の繰り返しは経済的かつ時間的に困難であるため、低酸素イメージングを全ての治療計画へ利用できないという問題がある。そこで、深層学習により低酸素領域を反映した CT 画像を構築できれば、簡易的な手段で低酸素イメージングに基づく画像誘導放射線治療法を実現できると考えられる。一方で、数が限られたデータでの学習は過学習に陥るリスクを伴うが、データオーギュメントにより学習データを増加させることで、生成画像の精度を高めることが期待される。しかしながら、FMISO 画像の生成において、有効な手法は明らかでない。そこで本研究では、FMISO を用いた PET/CT 画像に対し、学習データのコントラスト強調処理によるデータオーギュメントの効果を検証した。

方法：公開画像データベースより取得した頭部 PET/CT 画像11例 (478枚) に対して、コントラスト幅およびレベル変更、局所コントラスト強調、鮮鋭化フィルタ、ラプラシアンフィルタの4つの処理によって、高集積域を強調した画像を各4780枚作成した。拡張した学習データを制約条件として、条件付き敵対生成ネットワークの学習モデルを作成した。データオーギュメント効果の検証は、4つの学習済モデルを使用して PET/CT 画像を合成し、症例毎の計11回の交差検定を行った。画質評価には、原画像との構造的類似度 (structure similarity index: SSIM) とピーク信号雑音比 (peak signal to ratio: PSNR) を求め、交差検定の評価には分散分析法を用いた。

結果：各コントラスト強調処理にて、PET/CT 画像は腫瘍周辺が強調され視覚的特徴量が増加した。しかし、各処理による合成画像の平均 SSIM および PSNR は、 0.978 ± 0.0171 、 0.976 ± 0.0202 、 0.972 ± 0.0209 、 0.976 ± 0.0194 、および 35.9 ± 1.26 、 35.3 ± 1.55 、 34.2 ± 2.10 、 35.5 ± 1.73 [dB] となり、有意差を得ることはできなかった。その結果、コントラスト調整でのデータオー

ギュメントは、複数用いても大きな効果は得られない可能性が示唆された。よって、コントラスト強調によるデータオーギュメントは、FMISO を用いた PET/CT 画像の合成画像の精度に影響しないことが示された。

順天堂式患者接遇メソッドの探索と概念的フレームワークの構築

坂野康昌¹⁾、中世古和真¹⁾、福永一星¹⁾、關根美和²⁾、森本ゆふ¹⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

²⁾ 順天堂大学医学部医学教育研究室

目的：患者接遇の重要性は広く認識されている。しかし、現状では、患者接遇という概念が学術的なコンセンサスのないまま、様々なコンテキストで使用されている。そこで本研究では、診療放射線領域における患者接遇とはどのようなものなのかを明らかにするため、文献調査を実施した。

方法：和文文献が検索できる医療系検索エンジンを用いて、「患者接遇」と「医療接遇」というキーワードで文献を調査した。査読付き論文のほか、書籍や商業誌も対象とし、接遇の定義や説明、目的が記載されている文献を抽出した。

結果：患者接遇の定義は、行動を伴うもののほか、知識やスキル、さらにマインドに関する観点が含まれていた。患者が安心感・癒し・希望・自立を得ることや、医療従事者が患者と信頼関係を構築すること、医療機関が患者に選ばれることなどが、キーワードとして見出された。

結論：文献調査の結果、接遇の定義となる基本的な要素が抽出された。結果の詳細については、現在国内の専門誌に論文を投稿中である。本研究から得られた知見は、順天堂式患者接遇メソッドを構築する上で重要な基盤となっている。

診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリの開発

佐藤英介¹⁾、小島裕輔²⁾、堀 拳輔¹⁾、小山和也¹⁾、
渋谷周平¹⁾、飛山義憲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

³⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：国家試験対策は、過去問をベースとした演習や出題基準に沿った講義を主体として実施される。国家試験対策用スマホアプリは、隙間時間を使って手軽かつ気軽に取り組むことができるため、国家試験対策の1つとして有用である。しかし、リリースされているアプリは、更新されていない、一部が有料である、途

中で広告が出てくる、開発者が専門家でないなど、学生に活用を推奨するには多くの課題が残っている。一方、国家試験対策指導を担当している教員が開発に取り組めば、学生にとって利用価値の高いアプリを提供できるのではないか？という着想に至った。本研究の目的は、診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリを独自に開発することである。

方法：まず、厚労省 HP から国家試験問題をダウンロードし、Microsoft®Excel を用いて過去問データベースを作成し、CSV 形式で保存した。数式や特殊文字は、MathJax を利用して記述した。開発プラットフォームには Monaca（有償）を採用し、データベース（CSV）を読み込むことで問題の出題および解答を実施できる仕様とした。

結果：プロトタイプではあるが、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、問題なく動作することを確認した。

結論：診療放射線技師国家試験対策用スマホアプリ（プロトタイプ）を開発した。今後は、画像の問題にも対応できるよう改良を進める予定である。

MRI 環境下における運動負荷固定具の開発

洪川周平¹⁾、飛山義憲²⁾、臼井桂介¹⁾、坂本 肇¹⁾、後藤政実¹⁾、京極伸介¹⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

²⁾ 順天堂大学保健医療学部理学療法学科

目的：MRI の定量値によって、運動による骨格筋の変化の評価が可能である。実際に我々の研究では、背屈運動負荷をかけ、前脛骨筋が変化する様子を T2* map によって評価可能であった。しかし、足の運動負荷は撮像した画像への影響が大きく、モーションアーチファクトによる劣化が画像解析の妨げになることが判明した。本研究の目的は、運動負荷時の MRI 画質を改善するため、MRI 環境下における運動負荷固定具の開発を行うことである。

方法：固定具は MRI の高磁場下でも安全に使用可能な非磁性体であることが重要である。そこで、ターゲットとなる下腿 MRI の3次元ボリュームデータを基に、3D プリンタでの作成を試みた。モーションアーチファクトの抑制効果を評価するため、ボランティア5名に対し、固定具を利用して MRI の撮像を行った。固定具の有無を条件とし、背屈運動負荷を行いながら MRI で T2* map を取得した。モーションアーチファクトを定量的に評価するため、運動負荷をかけた利き足と負荷のない非利き足の前脛骨筋 (tibialis anterior muscle:

TAM) の T2* 値変化を固定具の有無で比較した。

結果・考察：固定具を使用した場合、運動負荷をかけた TAM の T2* 値は運動負荷に伴い増加した。各 T2* 値のプロットに対し、一次近似を行うとその傾きは 0.362 という結果が得られ、増加傾向が認められた。一方、固定具がない場合、運動負荷をかけた TAM は信号の変動があるものの、運動負荷を行っていない TAM と同様に増加傾向は認められなかった。一次近似による傾きの評価は 0.068 であり、増加がないことが判明した。これは、運動負荷を行っていない TAM でも同様であった。理由として、モーションアーチファクトによって偽信号が生じ、その影響が誤差として計測され、正確な信号測定ができなかったと考えられる。これらの結果から、3D プリンタによって作製した固定具は有用であり、運動負荷をかけた TAM における T2* 値の増加を観察することが可能であった。

深層学習を用いた頭部単純撮影補助プログラムの開発

中世古和真¹⁾、小島慎也²⁾、福永一星¹⁾

¹⁾ 順天堂大学保健医療学部診療放射線学科

²⁾ 帝京大学医療技術学部診療放射線学科

目的：X 線単純撮影は、初期診断と術後の経過観察に用いられる。X 線写真が診断に不相当と判断された場合は再撮影となる。単純撮影の再撮影は、検査時間を延長、被ばく線量を増加させるため、患者にとって不利益となる。頭部単純撮影において、再撮影時のポジショニングの補正は、写損画像の誤差を推定する経験によりその精度が変わる。本研究では、放射線技師の経験不足を補い、患者の負担を軽減するために、頭部単純撮影側面像から患者の角度を推定することを目的とした。

方法：頭部側面像は、TCIA で公開されている CT 画像から3次元 CT 画像を構築し、2次元投影したものである。教師あり学習によるディープラーニングを用いた推定法を開発した。ネットワークは ResNet-RS に基づいている。患者の角度を側方および上下方向に推定した。前処理において、頭部側面像は正面像と比較して、回転方向を推定することが難しい。これは、個人差はあるものの、頭部は左右相称であるため、側面撮影では左右の部位が重なるためである。そこで頭部側面像より内耳領域のみを抽出し、微細な拡大率の差を読み取りやすくした。本研究で利用した症例は256症例であり、学習用として224例、検証用として32例とした。256症例全てを検証するために交差検証を行った。**結果・考察：**推定誤差は側方角で $0.48 \pm 0.41^\circ$ 、上下方角で $0.55 \pm 0.50^\circ$ であった。画像コントラスト等の影

響により推定誤差が大きい症例もあり、これらを補正する前処理等を取り入れる必要がある。

結語：ディープラーニングを用いることで、頭部側面像から患者の角度を正確に推定でき、経験不足を補い、再撮影時間を短縮できることが示唆された。

宇宙環境におけるドライ食肉への中性子線の影響

初田真知子¹⁾、山倉文幸¹⁾、家崎貴文¹⁾、黒河千恵¹⁾、鎌田弥生^{1,2)}、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：近年、月や火星などの深宇宙の宇宙船内の環境では、1次宇宙線と宇宙船の壁との相互作用で発生する中性子線や γ 線などの2次放射線の影響が大きくなることが明らかになった。宇宙環境においては、宇宙線の人体への影響と同様に、人が摂取する食品への影響も問題である。本研究の目的は、必須アミノ酸を多く含む食品である食肉および大豆への中性子線の影響について、放射化とタンパク質などの酸化修飾を調べることである。今回は、食肉と大豆を乾燥させた場合の影響について調べる。これは、中性子照射による食肉の放射化および酸化修飾における水の役割を明らかにすることにつながる。

方法：理研小型中性子源システム RANS により、1～5MeV の高速中性子を、0.01Gy～4Gy までの9通りの放射線量で食肉サンプルに照射した。順天堂大学生体分子研究室の低温室にて、凍結乾燥装置を用いて凍結乾燥させたドライ肉とドライ豆サンプル、そのままの

生肉と生豆サンプルを作成した。放射化分析として、ゲルマニウム検出器による γ 線スペクトルの検出、GM 管による β 線および γ 線の線量計測を行った。さらに、ドライ肉に蒸発させた水の量と同量の水を加えてからの放射線量も計測した。生化学分析として、ウェスタンブロッティングによるタンパク質・脂質の酸化修飾のシグナルの検出を行った。

結果：ゲルマニウム検出器による放射化分析により、中性子照射した食肉に放射性核種である ^{24}Na 、 ^{42}K 、 ^{38}Cl が生成されていることが分かった。これらは、豚肉中の ^{23}Na 、 ^{41}K 、 ^{37}Cl の中性子捕獲反応、および ^{42}Ca 、 ^{41}K のnp反応によって生成される。中性子照射後のGM管計測値は、生肉が約2.30 kcpm、ドライ肉が約8.42 kcpm、バックグラウンドは約75 cpmであり、ドライ肉の方が生肉の2倍以上大きかった。その後、ドライ肉に蒸発させた分と同量の水を加えてからGM管で計測すると、生肉とあまり変わらない放射線量となった。このことから、生肉の水が β 線を遮蔽しているが、ドライ肉では水分を蒸発させたため遮蔽が小さくなり、放射線量が大きくなったことが考えられる。今後、検証実験を行うこととした。詳細な放射化分析、生化学分析は2023年度に実施する。生体分子の酸化修飾が生肉とドライ肉で差異がない場合、中性子照射の影響はよく知られた γ 線の影響と異なり、中性子と物質の直接反応が重要な役割を果たしている可能性がある。これは学術的に解明されるべき重要な問題である。

結論：食肉への中性子照射は、食肉中のナトリウム、カリウム、カルシウム、塩素を放射性元素に変えることが分かった。食肉中の水はそれら放射性元素からの β 線を遮蔽している可能性がある。食肉中タンパク質等の酸化修飾について、中性子線照射は γ 線とは異なる新しいメカニズムである可能性が示唆されたため、今後詳細に検証していく。宇宙環境における食を考える際、放射化も含めた多様な宇宙線の影響を明らかにし、その対策を講じることが極めて重要である。

2023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

代田 浩之（だいだ ひろゆき）

保健医療学部 研究科長

Nishizaki Y, et al. Study protocol and baseline characteristics of Randomized trial for Evaluation in Secondary Prevention Efficacy of Combination Therapy-Statin and Eicosapentaenoic Acid: RESPECT-EPA, the combination of a randomized control trial and an observational biomarker study. Am Heart J. 2023; 257: 1-8.

京極 伸介（きょうごく しんすけ）

保健医療学部 学部長

Goto M, et al. Analysis of synthetic magnetic resonance images by multi-channel segmentation increases accuracy of volumetry in the putamen and decreases mis-segmentation in the dural sinuses. Acta Radiol. 2023; 64(2): 741-750.

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

Murakami Y, et al. New Artificial Intelligence-Integrated Electromyography-Driven Robot Hand for Upper Extremity Rehabilitation of Patients With Stroke: A Randomized, Controlled Trial. Neurorehabil Neural Repair. 2023; 37(5): 298-306.

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

Arita A, et al. Reduction of motion artifacts in head magnetic resonance imaging using conditional generative adversarial networks. 2023 International Students Academic Conference, Hsinchu, 2023 年 3 月 24 日.

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. Home Based Exercise Rehabilitation Programs to Prevent Physical Frailty and Hospitalization-Associated Disability. Juntendo Med J. 2023; 70 (1): 2-8.

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

坂本肇, 他. 放射線安全管理学. 第 12 章 B.2. X 線透視, 血管撮影. 東京. 南江堂. 2023: 203~211.

池田 浩（いけだ ひろし）

保健医療学部理学療法学科 教授

Matsunaga R, et al. The impact of the COVID-19 pandemic on injury incidence in Japanese male professional soccer players. Orthop J Sports Med. 2023; 24: 11.

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

Takeda K, et al. Unique morphological architecture and its functional relevance of the hamstring muscles as revealed with isolated muscle specimens and quantification of structural parameters. J Anat. 2023; 243(2): 284-296.

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. Language and Sports Exercise Exchange Program: The Online Child Time. 2023 年 7 月, 11 月.

眞壁 寿（まかべ ひとし）

保健医療学部理学療法学科 教授

Makabe H, et al. Difference of Influence of Intermittent Blocking of Visual Information on Walking Parameters and Cortico-muscular Coherence Between Young Persons and Old Persons. International Society of Posture and Gait Research (ISPGR) WORLD CONGRESS, Brisbane, 2023 年 7 月 9 ~ 13 日.

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

Ohji S, et al. Kinesiophobia is negatively associated with psychological readiness to return to sport in patients awaiting anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy. 2023; 39(9): 2048-2055.

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

Saputra AA, et al. A Real-Time Control System of Upper-Limb Human Musculoskeletal Model With Environmental Integration. IEEE. 2023; 11: 74337-74363.

山口 智史 (やまぐち ともふみ)

保健医療学部理学療法学科 先任准教授

Koseki T, et al. Combined neuromuscular electrical stimulation and transcutaneous spinal direct current stimulation increases motor cortical plasticity in healthy humans. *Front Neurosci.* 2023; 16: 1034451.

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

Arai H, et al. Diagnosis and outcomes of cachexia in Asia: Working Consensus Report from the Asian Working Group for Cachexia. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2023; 14(5): 1949-1958.

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. Association of bone health by calcaneal quantitative ultrasound with quadriceps strength and function one year after unilateral total knee arthroplasty. *J Orthop.* 2023; 48: 84-88.

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

Morisawa T, 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(3): 649-657.

和田 太 (わだ ふとし)

保健医療学部理学療法学科 准教授

和田太 (佐伯覚, 高岡徹, 藤谷順子編). 標準リハビリテーション医学. 第4版. 第12章 切断「A 上肢切断」. 東京. 医学書院. 2023: 333~336.

藤野 雄次 (ふじの ゆうじ)

保健医療学部理学療法学科 講師

藤野雄次, 高橋哲也. 医療マンガが理学療法の社会的認知に与える影響について. 順天堂保健医療学雑誌. 2023; 4(1): 8~10.

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. Differences in the elastic modulus of the lumbar muscles between female athletes with and without low back pain. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2023; 105: 105968.

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

Takabayashi K, et al. External Validation of the Japanese Clinical Score for Mortality Prediction in Patients With Acute Heart Failure. *Circ J.* 2023; 87(4): 543-550.

澤 龍一 (さわ りゅういち)

保健医療学部理学療法学科 助教

Sawa R, et al. Overlapping status of frailty and fear of falling: an elevated risk of incident disability in community-dwelling older adults. *Aging Clin Exp Res.* 2023; 35(9): 1937-1944.

高橋 容子 (たかはし ようこ)

保健医療学部理学療法学科 助教

Takahashi Y, et al. Robotized knee-ankle-foot orthosis-assisted gait training on genu recurvatum during gait in patients with chronic stroke: a feasibility study and case report. *J Clin Med.* 2023; 12(2): 415.

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, 田村知佳. 女子硬式野球選手における片脚スクワット動作と軸足バランス機能の関係. 日本野球学会第1回大会, びわこ成蹊スポーツ大学, 2023年12月3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 助教

Murakami Y, et al. New Artificial Intelligence-Integrated Electromyography-Driven Robot Hand for Upper Extremity Rehabilitation of Patients With Stroke: A Randomized, Controlled Trial. *Neurorehabil Neural Repair.* 2023; 37(5): 298-306.

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

高橋昌哉 (Moderator). Educational Session ‘Molecular/Metabolic Imaging’. 2023 Annual Scientific Meeting and Exhibition, International Society for Magnetic Resonance in Medicine, Toronto, 2023 年 6 月.

中西 淳 (なかにし あつし)

保健医療学部診療放射線学科 教授

中西淳 (実行委員長). PET サマーセミナー in 成田. 2023 年 8 月 25~27 日.

初田 真知子 (はつだ まちこ)

保健医療学部診療放射線学科 教授

Hatsuda M, et al. A-theory – A brane world-volume theory with manifest U-duality. Journal of High Energy Physics. 2023; 2023: 87.

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. 紛争による地政学から見た, 日本の医療経済への影響. 日本私立医科大学放射線技師長会研修会.

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 前任准教授

家崎貴文, 他. ビタミン B1 欠乏時における血管の反応性の変化はマグネシウム欠乏とどう関連するか. 科学研究費助成事業 2023~2025 年度基盤研究 (C).

後藤 政実 (ごとう まさみ)

保健医療学部診療放射線学科 前任准教授

Goto M, et al. Accuracy of skull stripping in a single-contrast convolutional neural network model using eight-contrast magnetic resonance images. Radiol Phys Technol. 2023; 16(3): 373-383.

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

Kubo T, et al. Analysis of applicator displacement in accelerated partial breast irradiation using a strut-based design brachytherapy applicator. Brachytherapy, 2023; 22(5): 655-664.

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

長谷川望歩, 他. 大会長賞. 第 17 回日本診療放射線学教育学会学術集会, 2023 年 8 月 26 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

Tsuda K, et al. 3D-OSEM versus FORE+OSEM: Optimal Reconstruction Algorithm for FDG PET with a Short Acquisition Time. World J Nuclear Med. 2023; 22: 234-243.

室井 健三 (むろい けんぞう)

保健医療学部診療放射線学科 准教授

座間佳男, 他. ドローンへ搭載した GPS 付放射線線量計を用いた平野部における広範囲空間線量率計測法の開発. 国際医療福祉大学学会誌. 2023; 28(2): 13-24.

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. Evaluation of motion artefact reduction depending on the artefacts’ directions in head MRI using conditional generative adversarial networks. Sci Rep. 2023; 13: 8526.

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, 他. 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. 保健医療学部共同研究費.

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

上西海都, 他. 11C メチオニン画像による Deep Learning を用いた GTV 描出精度の検証. 日本核医学会 PET 核医学分科会 PET サマーセミナー, 成田, 2023 年 8 月 27 日.

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 助教

Shibukawa S, et al. Temperature measurement of intracranial cerebrospinal fluid using diffusion tensor imaging after revascularization surgery in Moyamoya disease. Magn Reson Imaging. 2023; 99: 1-6.

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. MR Fingerprinting for Liver Tissue Characterization: A Histopathologic Correlation Study. Radiology. 2023; 306(1): 150-159.

堀 拳輔 (ほり けんすけ)

保健医療学部診療放射線学科 助教

堀拳輔, 他. Python による画像再構成と深層学習の基礎 (画像再構成シリーズ). 東京. 医療科学社. 2023.

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

Muranaka Y, et al. Evaluation of L-Alanine Metabolism in Bacteria and Whole-Body Distribution with Bacterial Infection Model Mice. Int J Mol Sci. 2023; 24(5): 4775.

鍵山 暢之 (かぎやま のぶゆき)

デジタルヘルス遠隔医療研究開発講座 准教授

Kuroda Y, et al. Artificial intelligence-based point-of-care lung ultrasound for screening COVID-19 pneumoniae: Comparison with CT scans. PLoS One. 2023; 18: e0281127.

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ーディープラーニングの先にあるもの。東京、KADOKAWA. 2015: 50～53.

2) 翻訳書

原著者名、翻訳者名（訳）、翻訳書名、版表示、出版地、出版社、出版年：始頁～終頁。

(2) Esping-Andersen G, 林昌宏（訳）、アンデルセン、福祉を語る－女性・子ども・高齢者。東京、NTT 出版。2008: 100～102.

3) 雑誌掲載論文

著者名：論文名、誌名、出版年：巻数：始頁～終頁

(和文)

(3) 香本晃良、崔龍洙、江端望、渡辺由紀子、松尾美紀、片山由紀、他：黄色ブドウ球菌における RNA ポリメラーゼ遺伝子の突然変異は Linezolid の高感受性化に関連する。順天堂医学。2012: 58: 498～450.

(英文)

(4) You WC, Blot WJ, Li JY, Chang YS, Jin ML, Kneller R, et al: Precancerous gastric lesions in a population at high risk of stomach cancer. Cancer Res. 1993: 53: 1317-1321.

4) ウェブページからの引用

著者名：ウェブページの題名、ウェブサイトの名称、入手先、入手日付。

(5) 未来投資戦略2018－「Society5.0」「データ駆動型社会」への変革－。 https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_

zentai.pdf, 2019年2月26日.

- (6) American Cancer Society. Cancer Facts & Figures 2003. <https://www.adph.org/ascr/assets/AlaCancerFactsFigures2003.pdf>, Accessed March 3, 2003.

VII. 著者が負担すべき費用

掲載料は無料とする。尚、著者には PDF を送付する。ページを超過した場合は別途著者負担とする。

VIII. 執筆要領 (英文)

1. 原稿の書式 (Style for manuscripts)

原稿は、編集委員会が指定したテンプレートを使用し作成することとする。書式は、以下の原則による。すべての投稿は A4用紙に上下左右25mm以上の余白を設け、半角80字×40行に設定し、文字の大きさは12ポイント、フォントは Times New Roman を使用する。英文は原則としてネイティブチェックを受けることが望ましい。

Manuscripts should be formatted according to the template specified by the editorial committee. The format should follow the principles outlined below. All submissions must be typed on A4 or 8.5"x11" paper. Leave margin of at least 1 inch at the top, bottom, right, and left of every page. Set the lines as 80 strokes × 40 lines. The font should be 12-point-sized Times New Roman.

2. 原稿の長さ (Maximum permissible number of words)

英文による投稿は、文献、注、図・表を含め、総説4,000語、論説4,000語、原著6,500語、研究報告5,600語、実践報告5,600語、資料5,600語、その他5,600語を超えないものとする。

Review articles and Editorials should not exceed 4,000 words

Original articles should not exceed 6,500 words

Research reports should not exceed 5,600 words

Documents and others should not exceed 5,600 words including references, footnotes, tables, and figures

3. 原稿の構成 (Composition for manuscripts)

表紙を作成し、英語のキーワード (5つ以内)、タイトル、氏名、所属を記入する。原則すべてに英文で300 words 程度の要約を記載する。

The first page of the manuscripts should be a cover sheet that includes 5 or less keywords, the title, and author's name along with affiliation. The author's name and identifying references should appear only on the cover sheet. All articles should be attached with an abstract (300 words around in English).

IX. 論文の採否

投稿論文は査読を行い、編集委員会が論文の採否、掲載順序を決定する。

X. 校正

著者校正は初校のみとし、この際大幅な加筆修正は認めない。

XI. 著作権

本誌に掲載された論文の著作権は、順天堂大学保健医療学部に帰属し、本学部が電子化の権利を有する。

XII. 原稿の提出方法および提出先

1. 提出方法

以下2点の提出を要する。

①オリジナル原稿 (Word)

画像がある場合は JPEG 形式または TIFF 形式で保存し、原稿に貼付する。

②査読用原稿 (PDF)

2. 提出先・問い合わせ先

〒113-0033 東京都文京区本郷3-2-12

順天堂保健医療学雑誌編集委員会

TEL: 03-3812-1780

Mail: j-fhs@juntendo.ac.jp

原則 E-mail による投稿のみ受け付ける。

編集後記

順天堂保健医療学雑誌：Juntendo Health Science Journal の第5巻をお届けする運びとなりました。第5巻は原著論文3編、論説9編、研究報告1編、実践報告11編と、過去最多の掲載数となりました。なかでも論説の投稿数が増加しており、これは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。保健医療学研究科では修士課程1年目に、自身の研究に関連する論説を執筆することを目標としており、指導教員の指導を受けながら（おそらく初めてであろう）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方に深く感謝申し上げます。

また、本巻では英語論文の投稿が4編と、これも過去最多の掲載数になっております。保健医療学雑誌編集委員会では、英語論文の投稿数を増やすべく、今年度より英文校正サポートを始めました。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。

2024年9月

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)
児玉 麻代
(事務)

順天堂保健医療学雑誌

JUNTENDO HEALTH SCIENCE JOURNAL

第5巻 第1号

2024年9月30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@juntendo.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 Sep. 2024 vol.5