

医|学|物|理

Japanese Journal of Medical Physics

2022

Vol. 42

2

<http://www.jsmp.org/>

JSMP

Japan Society of Medical Physics

教育委員会企画
放射線防護委員会企画



令和 4年
第42巻 2号



日本医学物理学会機関誌

目 次

巻 頭 言

JSMP 放射線防護委員会企画

学会誌特集「医学物理分野に必要な中性子の基礎知識」

米内俊祐 65

〈連載：放射線防護委員会企画〉

解 説

中性子の基礎知識：物理

前畑京介 67

中性子線の生物学的影響：概説

今岡達彦 73

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

腫瘍学分野における PET 研究 [第3部]

三本拓也, 高畠 賢, 井上一雅, 福士政広 80

解 説

医学物理若手の会の紹介および若手を対象とした

本邦の医学物理教育・医学物理士養成システムに関するアンケート調査：2021年版

伊良皆 拓, 金城優志, 田中創大, 恒田雅人, 平島英明 88

施設紹介

帝京大学大学院医学物理士コースの紹介

古徳純一, 熊谷 仁, 上原隆三, 白石憲史郎 106

連載コラム：シカゴ通信

民主主義の歴史を持つギリシャと神秘的なインド

土井邦雄 110

編集後記 121

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

CONTENTS

PREFATORY NOTE

Preface to Special Feature: Fundamental Knowledge of Neutrons
in Medical Physics

Shunsuke YONAI 65

〈Special Issue Series: Radiological Protection Committee〉

REVIEWS

Basic Knowledge of Neutron: Physics

Keisuke MAEHATA 67

Biological Effects of Neutron Radiation: An Overview

Tatsuhiko IMAOKA 73

〈Special Issue Series: Educational Committee〉

REVIEW

PET Research in Clinical Oncology

Takuya MITSUMOTO, Masaru TAKABATAKE, Kazumasa INOUE, Masahiro FUKUSHI 80

REVIEW

Introduction of Young Researchers' Association of Medical Physics and
Questionnaire Survey on Medical Physics Education and Medical Physics
Training System in Japan for Young Researchers in 2021

Hiraku IRAMINA, Masashi KINJO, Sodai TANAKA, Masato TSUNEDA,
Hideaki HIRASHIMA 88

INTRODUCTION OF RESEARCH FACILITY

Introduction of Medical Physics Course at Teikyo University

Jun'ichi KOTOKU, Shinobu KUMAGAI, Ryuzo UEHARA, Kenshiro SHIRAISHI 106

COLUMN: Chicago Report

Greece and India with Proud History

Kunio DOI 110

EDITOR'S NOTE 121

巻頭言

JSMP放射線防護委員会企画 学会誌特集「医学物理分野に必要な中性子の基礎知識」

(前) JSMP放射線防護委員会 委員長

米内俊祐

量子科学技術研究開発機構

本号および次号で放射線防護委員会企画特集「医学物理分野に必要な中性子の基礎知識」を連載します。1回目となる本号では、「中性子の基礎知識」として、物理について前畑京介先生（帝京大学）、生物について今岡達彦先生（量子科学技術研究開発機構）に執筆をお願いしました。2回目の次号では「臨床現場における中性子」をテーマに、3つの放射線治療：ホウ素中性子補足療法(BNCT)、光子線治療、粒子線治療において生成する中性子の物理的特徴や放射線防護で留意すべき事項について、田中浩基先生（京都大学）、納富昭弘先生（九州大学）、森祐太郎先生（筑波大学）、松本真之介先生（東京都立大学）に執筆をお願いしています。

上述のとおり、本特集では「中性子」に焦点を当てています。現役世代のJSMP会員のどのくらいの方が、研究や測定などで中性子を扱った経験があるか定量的にはわかりませんが、多くないだろうと推測しています。例えば、昨年度に開催された第121回日本医学物理学会学術大会での中性子に関する演題数は、全演題数159件のうち8演題であり全体の5%と少なくはないという印象を受けますが、特定の機関（5機関）の学生、研究者からの発表でした。中性子を扱った研究に関するトレンドを調べるために

PubMedにて「neutron」をキーワードに検索してみました。図1は、PubMedに登録されている全論文数に対する「neutron」をキーワードに検索した論文数の比（全体比）と、Article typeを「clinical trial」とした場合のそれらの比（CT比）を示しています。（Clinical trialは1960年以降のデータです。）J. Chadwickにより中性子が発見された1932年以後すぐに、生命科学、生物医学分野においても中性子に関連する論文が公表され始めたことがわかります。例えば、1936年にはG. L. LocherによりBNCTが提唱され¹⁾、また、中性子の生物効果の研究²⁾やそれに続く速中性子線治療が1938年に米国で開始されています³⁾。全体比は1950年から単調に増加し、1970年代ごろから現在まで0.1%程度で推移しているようです。Clinical trialの論文に注目すると、現在は0.01%程度低い値を示していますが、1970～1980年代ではばらつきはあるものの全体比より高くなっており1989年には約0.30%に達しています。このCT比の増加には日本の貢献が大変大きいと考えられます。例えば、1968年に畠中坦先生（帝京大学）がBNCTの脳腫瘍治療に成功したことや、1967年以降、放射線医学総合研究所や東京大学医科学研究所での速中性子線治療の開始が挙げられます。（陽子・重粒子線治療を含

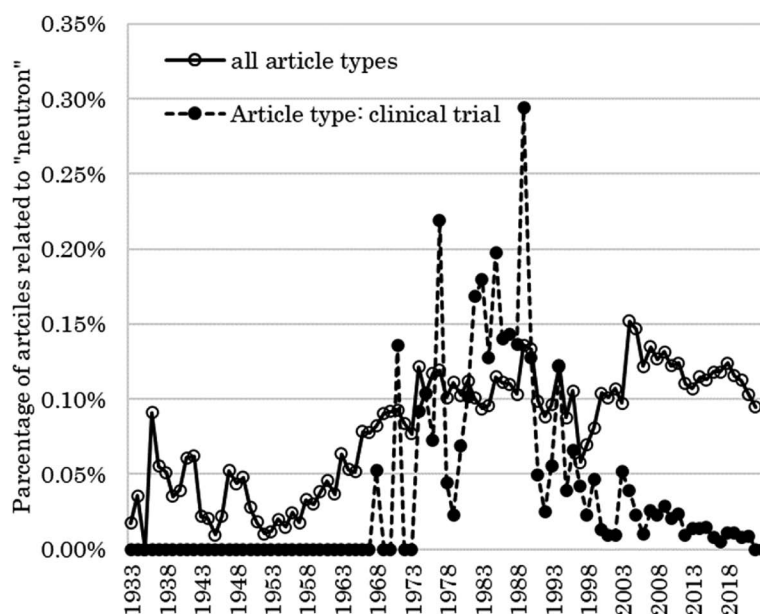


図1 PubMedに登録されている全論文数に対する「neutron」をキーワードに検索した論文数の比（all article types）と、Article typeを「clinical trial」とした場合のそれらの比（Article type: clinical trial）。Clinical trialは1960年以降登録されている。

め、河内清光先生が「日本の粒子線治療のあゆみ」として、「日本医学物理学会創立50周年 第100回学術大会記念特集号 (Jpn. J. Med. Phys. Vol. 30 No. 3: 91-99, 2011)」で解説されています。)

しかしながら、このCT比の増加は1990年代にはブレイキがかかり、現在は0.01%程度になっています。これは、高LET放射線治療が炭素線治療にシフトしたことや、BNCTで中性子源としていた原子炉の普及の難しさが影響したのではないかと推測します⁴⁾。まとめますと、生命科学、生物医学分野について、中性子に関連した論文数の全論文数に対する割合は1970年代から大きく変わっていませんが、中性子の臨床試験に関する論文数の割合は大きく減少していることになります。JSMP会員は、臨床現場もしくはそれに近い研究者が多いことを考えれば、現在、中性子に関わる研究に携わっている会員は多くはないだろうことにつながると思います。

さて、臨床研究が盛んであった1970年代を中心に中性子に関する生物医学研究また関連する線量評価などの物理研究について重要な成果が数多く報告されています。これらの成果は医療分野以外の物理、工学分野などの成果とともに、現在では、教科書にも掲載され、自己の学習により知識を得ることが可能になっています。当然のことながら、すべての内容を学習し、理解することが望ましいのですが、中性子を研究対象としていない、臨床で使用していないという方々には、日々の研究、業務の中で学習の時間を作ることは難しいかもしれません。本特集では、現在の臨床現場で使用もしくは発生する中性子に焦点を絞り、そ

れらの中性子がどのように発生しどのような振る舞いをするか、人体にどう影響するかを理解することに重点を置きます。また、放射線防護委員会企画ですが、基礎知識の延長線上に応用としての放射線防護があるため、内容は放射線防護に限定していません。これまで中性子に関する研究にほとんど触れることのなかった方が、突然、中性子の発生、振る舞いおよび人体への影響などの評価、解析をしなければいけなくなった場合にも、本特集を見れば初動の対応ができる内容としたいと考えました。古くからの会員、読者の方には、物足りない内容になるかもしれませんが、多くの新しい知見も含んでおりますので、ぜひ一読ください。

Google Scholarを開くと「巨人の肩の上に立つ」と表示されます。本特集が、中性子の知識について、まずは巨人の肩までよじ登る一つの助けになればと思います。最後に、本企画にご支援を頂戴した長谷川編集委員長ならびに編集委員の皆様にご心よりお礼申し上げ、私からの巻頭言とさせていただきます。

参考文献

- 1) Locher GL: Biological effects and therapeutic possibilities of neutrons. Am. J. Roentgenol. 36: 1-13, 1936
- 2) Lawrence EO: The biological action of neutron rays. Radiol. 29: 313-322, 1937
- 3) Stone RS, Lawrence JH, Aebersold PC: A preliminary report on the use of fast neutrons in the treatment of malignant disease. Radiol. 35: 322-327, 1940
- 4) 田中浩基, 密本俊典, 小野公二: 世界初のサイクロトロンを用いたBNCTシステムの実現. 加速器17(2): 81-85, 2020

解説

〈連載：放射線防護委員会企画〉

中性子の基礎知識：物理

前畑京介*

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科

Basic Knowledge of Neutron: Physics

Keisuke MAEHATA*

Department of Radiological Technology, Faculty of Fukuoka Medical Technology, Teikyo University

Neutrons are uncharged particles and exhibit strong ability to penetrate matter. Various charged particles and gamma rays are emitted from nuclear reactions induced by neutrons passing through the matter. It is important to consider contributions of neutrons for estimating such quantities used in radiation protection as absorbed dose, equivalent dose and effective dose. In this article basic knowledge of neutron is briefly summarized concerned with physical properties of neutrons, neutron reactions, neutron sources, fluence to karma conversion coefficient, absorbed dose, equivalent dose, effective dose.

Keywords: physical properties of neutrons, neutron reactions, neutron sources, fluence to karma conversion coefficient, absorbed dose, equivalent dose, effective dose

1. はじめに

1932年にChadwickは、Po線源から放射される α 線で照射されたBeから放出される粒子が陽子とほぼ同じ質量で電荷を持たないことを発見し、「中性子」と名づけた。中性子は電荷を持たないため物質を透過する能力が高い。物質を通過する中性子は、そのエネルギーに応じて弾性散乱や中性子捕獲などの原子核反応を引き起こす。中性子が引き起こした原子核反応に伴い、様々な荷電粒子や γ 線が放出される。そのため、放射線防護が必要とされる中性子に関する基礎知識を簡潔に整理することが望まれている。そこで本稿では、中性子の物理的特性や中性子源について簡単に整理したのち、中性子の線量評価について解説する。

2. 中性子の物理的基本特性

中性子は電荷を持たず、陽子と共に原子核を構成する核子である。中性子と陽子の質量はそれぞれ、 $m_n = 939.566 \text{ MeV}/c^2$ および $m_p = 938.272 \text{ MeV}/c^2$ であり、スピンは1/2である。中性子は原子核内部では安定であるが、原子核外部に取り出されると約15分の平均寿命で

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

のように陽子、電子および反電子ニュートリノに β 崩壊する。自由中性子の寿命はビッグバン元素合成開始時での中性子と陽子の存在比を決定するなど現代物理学において重要な物理量であるため、現在でも最先端技術を駆使した精

密測定研究が展開されている¹⁾。

2.1 エネルギーによる中性子の分類

中性子は運動エネルギー E_n により概ね次のように分類される。ただし便宜上の分類であり厳密ではない。

1) 超冷中性子

- ・ $E_n < 0.5 \mu\text{eV}$
- ・ 平均速度が10 m/s程度以下と非常に遅い。

2) 極冷中性子

- ・ $0.5 \mu\text{eV} \leq E_n < 100 \mu\text{eV}$

3) 冷中性子

- ・ $100 \mu\text{eV} \leq E_n < 5 \text{ meV}$

4) 熱中性子

- ・ $5 \text{ meV} \leq E_n < 500 \text{ meV}$
- ・ 室温300 Kにおいて熱平衡状態にある熱中性子は $E_n = 25 \text{ meV}$ 、平均速度は2200 m/sである。

5) 熱外中性子

- ・ $500 \text{ meV} \leq E_n < 10 \text{ keV}$
- ・ ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)に利用される。

6) 高速中性子

- ・ $10 \text{ keV} \leq E_n$

2.2 中性子の相互作用の分類

中性子には電荷がない。したがって、物質に入射した中性子は、物質を構成する電子や原子核とクーロン相互作用をしない。中性子と物質との相互作用は、本質的には原子

* 連絡著者(corresponding author) 帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 [〒836–8505 福岡県大牟田市岬町6–22]
Department of Radiological Technology, Faculty of Fukuoka Medical Technology, Teikyo University, 6–22 Misakimachi, Omuta, Fukuoka 836–8505, Japan
E-mail: maehata@fmt.teikyo-u.ac.jp

核との「強い相互作用」を介した相互作用となる。「強い相互作用」が有効となる距離は原子核の大きさの尺度である 10^{-15} m 程度と非常に短いために、中性子と物質の相互作用は荷電粒子との相互作用より頻度が低くなる。

2.2.1 弾性散乱 $X(n, n)X$

微視的物理現象を扱う量子力学では粒子が標的に衝突して運動方向を変える現象を散乱と呼ぶ。中性子と原子核 X との弾性散乱では、剛体球の衝突のように散乱前後で運動量とエネルギーが保存する。エネルギーが MeV 領域までの中性子が入射した場合、主として弾性散乱が発生する。質量 m_n の中性子が運動エネルギー E_n で質量 $M_X = Am_n$ の標的核と弾性散乱したとき、反跳された標的核の平均運動エネルギーは $\bar{E}_X$ は以下の式で与えられる。

$$\bar{E}_X = \frac{2A}{(A+1)^2} E_n \quad (1)$$

中性子は標的核との弾性散乱を1回行うごとに平均して $\bar{E}_X$ の運動エネルギーを失う。中性子と重い原子核との弾性散乱では、散乱前後で中性子はエネルギーをほとんど変えることなく運動方向のみが変化する。一方、軽い原子核との弾性散乱では衝突1回あたりに中性子が失う運動エネルギーは大きくなる。中性子とほぼ質量が等しい ($A=1$) 陽子との弾性散乱では、1回の衝突後の中性子の平均運動エネルギーは $E_n/2$ になる。正面衝突した場合には、入射中性子のすべての運動エネルギーは陽子に与えられ衝突後に入射中性子は停止しする。

2.2.2 非弾性散乱 $X(n, n')X^*$

中性子と原子核 X との非弾性散乱では中性子との散乱後に励起状態の原子核 X^* が残り、 γ 線を放射して基底状態の原子核になる。非弾性散乱が起こるためには、中性子は原子核を励起するのに十分なエネルギーを有する必要がある。一般的にこのエネルギー閾値は原子核の質量数と共に減少するが、概ね 1 MeV 以上である。この閾値よりエネルギーが低い場合は弾性散乱が起こる。

2.2.3 γ 線放射を伴う捕獲反応

中性子が原子番号 Z 、質量数 A の原子核 X に捕獲され、その後、原子番号 Z 、質量数 $A+1$ の原子核 X から γ 線が放射される。一般的に、中性子の速度を v とすると中性子捕獲反応断面積は $1/v$ にほぼ比例する。したがって、低エネルギーの中性子に関しては、中性子捕獲反応が発生しやすくなる。元素によるが、中性子捕獲反応断面積は $1/v$ 則に共鳴ピークが重ね合わされる。共鳴ピークの領域では、中性子捕獲反応が起こる確率が非常に高くなる。熱中性子に対して比較的大きな断面積を有すること、生成核の半減期が数十分から数日と扱いやすいこと、放出 γ 線のエネルギーが汎用の半導体検出器などで測定しやすいことなどの理由で、 ^{112}In や ^{197}Au は熱中性子束分布の計測に利用される。

2.2.4 荷電粒子放出を伴う捕獲反応 $(n, p), (n, d), (n, t), (n, \alpha)$ など

中性子が捕獲され、その後に荷電粒子が放出される。これらの反応は eV から keV のエネルギー領域で起こる。中性子捕獲反応断面積は $1/v$ にほぼ比例する。したがって、低エネルギーの中性子に関しては、中性子捕獲反応が発生しやすくなる。元素によるが、中性子捕獲反応断面積は $1/v$ 則に共鳴ピークが重ね合わされる。共鳴ピークの領域では、中性子捕獲反応が起こる確率が非常に高くなる。 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$, $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ や $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反応で放出される荷電粒子は中性子の検出に利用される。

2.2.5 核分裂反応

^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U や ^{239}Pu などの原子核は低速の中性子を吸収すると複合核を形成したのち、ほぼ同じ大きさの原子核に分裂するとともに2~3個の中性子を放出する。放出される中性子の平均運動エネルギーは2 MeVである。 ^{235}U の核分裂反応では1回あたり200 MeV程度のエネルギーが解放される。なお、 $(n, p), (n, d), (n, t), (n, \alpha)$ などの荷電粒子放出を伴う中性子捕獲反応は核分裂反応とは区別される。

2.2.6 核破碎反応

核破碎反応は約100 MeVを超える運動エネルギーを中性子によって引き起こされる多数の二次粒子放出を伴う非弾性核反応である。(運動エネルギーが15 MeV程度の場合でもわずかながらではあるが核変換反応を起こすことができる。) エネルギーが十分に高い陽子や中性子が物質に入射すると以下の二段階の核反応が発生する。

第一段階は入射中性子が核内の個々の核子(陽子、中性子)と衝突する。このとき衝突された核子も十分に高いエネルギーを持つので入射中性子と共に核内核子との衝突を繰り返す核内カスケード状態を形成する。核内カスケード状態では陽子、中性子、パイ中間子(π^-, π^0, π^+)が放出され励起状態の残留核が残る。これら粒子の放出方向は中性子の入射方向に強い指向性を示す。

核内カスケード状態が終了すると残留核に留まった核子の運動エネルギーはすべての核子間で平衡状態に達する。第二段階ではすべての核子が熱平衡状態になった励起状態の残留核から中性子、陽子、重陽子、三重陽子、 α 粒子などが0.1~10 MeVの運動エネルギーで等方的に放出される。この過程は蒸発過程と呼ばれる。蒸発過程による粒子放出が終了すると励起状態の残留核から γ 線が放射される。

2.2.7 核変換

ある原子核が放射性崩壊や人工的な核反応によって他の種類の原子核に変わることを核変換と呼ぶ。使用済み核燃料に含まれる半減期が極めて長い核種へ中性子を当て、核分裂反応あるいは中性子捕獲反応を起こし短寿命の核種に変える群分離・核変換技術の研究開発が進められている²⁾。

3. 中性子源

3.1 放射性同位元素

比較的容易に利用できる中性子源として²⁵²Cf線源がある。²⁵²Cfは半減期2.56年で自発核分裂を起こし、その際に中性子と γ 線を放出する。中性子と同時に γ 線が放出されるので、 γ 線を時間基準とした飛行時間法を用いることで、²⁵²Cf線源の中性子エネルギースペクトルが計測できる。

一方、低エネルギー α 線で発生する⁹Be(α , n)¹²C反応を中性子源として利用することができる。この場合、 α 崩壊する放射性同位元素と⁹Beを組み合わせた複合線源が中性子源となる。国内では、半減期433年で α 崩壊する²⁴¹Amと⁹Beを組み合わせたAm-Be線源が中性子源として利用されている。

3.2 加速器

加速器で加速された陽子などを標的核に照射したときに起きる核反応により中性子を発生させる。大強度陽子加速器施設(J-PARC)の物質・生命科学実験施設では、3 GeVの高エネルギー陽子を水銀標的に入射して起こる核破砕反応で発生するパルス中性子を利用した様々な研究が展開されている³⁾。

一方、比較的小型のサイクロトロンやライナックで数MeV程度に加速した陽子の⁷Li(p, n)⁷Beや⁹Be(p, n)⁹B反応で中性子を発生する方式は、近年、ホウ素中性子捕獲療法の中性子源として利用されている⁴⁾。

3.3 原子炉

熱中性子がある²³⁵Uに捕獲されると核分裂反応を起こし、核分裂片と2~3個の中性子が放出される。放出される中性子の平均運動エネルギーは2 MeVであるが、水などの体系内では弾性散乱を繰り返して熱平衡状態の熱中性子になる。この熱中性子が他の²³⁵Uに捕獲されることで再び核分裂反応が発生する。このように連鎖的に発生する核分裂反応を制御して定常的に維持する装置を原子炉と呼ぶ。原子炉は核分裂で解放されるエネルギーを電力に変換する発電だけではなく、安定な中性子源として研究に利用されている。国内では、近畿大学原子力研究所の出力1 Wの原子炉が共同利用施設として教育や研究に活用されている⁵⁾。

4. 中性子の線量評価

中性子の線量を評価する重要な量として、フルエンス、カーマ、吸収線量、等価線量、実効線量がある。これらの量の定義を簡単に示し、中性子による吸収線量と実効線量の算出について述べる。

4.1 フルエンス

断面積 da [m²] の球を dN 個の粒子が通過するとき、フ

ルエンス Φ は以下の式で与えられる。

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (2)$$

フルエンス Φ は粒子の球への入射方向には依存しない。フルエンスの単位は [m⁻²] である。

放射線輸送計算では体積要素 dV [m³] を通過した粒子の軌道長の総計を dl [m] としたフルエンス

$$\Phi = \frac{dl}{dV} \quad (3)$$

が用いられる。

4.2 カーマ

非荷電粒子（光子や中性子のような間接電離放射線）が物質を通過するときは、非荷電粒子が生成した二次荷電粒子によりエネルギーが付与される。非荷電粒子が質量 dm [kg] の物質領域で生成したすべての二次荷電粒子の初期（生成直後）の平均運動エネルギーの和を dE_{tr} [J] とするとき、カーマ K は以下の式で与えられる。

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (4)$$

カーマ K の単位は [J/kg] であるが、グレイと呼ばれる単位 [Gy] が用いられる。

4.3 吸収線量

放射線が質量 dm [kg] の物質に平均エネルギー $d\bar{\epsilon}$ [J] を与えたとき、この物質の吸収線量 D は以下の式で与えられる。

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (5)$$

吸収線量 D の単位は [J/kg] であるが、グレイと呼ばれる単位 [Gy] が用いられる。カーマは質量 dm [kg] の物質領域内における非荷電粒子の相互作用に依存する。一方、非荷電粒子の吸収線量は質量 dm [kg] の物質領域で生成された二次荷電粒子に加え、周辺領域で生成され質量 dm [kg] の物質領域を通過する二次荷電粒子の相互作用にも依存する。個々の荷電粒子が相互作用で物質に与えるエネルギー ϵ は統計的な揺らぎを持つが、 ϵ の平均値 $\bar{\epsilon}$ を使う吸収線量には組織内における相互作用の統計的変動は含まれない。吸収線量は測定可能な物理量である。

4.4 等価線量

放射線による人への影響は、組織や臓器に吸収されるエネルギーだけでなく放射線の種類によって異なる。そこで種類の異なる放射線が人体に与える影響を同じ尺度で評価する必要がある。臓器あるいは組織 T における放射線タイプ R による平均吸収線量を $D_{T,R}$ とする。このとき、放射線タイプ R はX線や γ 線、中性子などの放射線の種類により与えられる。臓器あるいは組織 T における等価線量 H_T

は以下の式で与えられる.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (6)$$

ここで, w_R は放射線タイプ R に対する放射線加重係数である. 和は臓器あるいは組織 T に入射するすべてのタイプの放射線について取る. 中性子以外のタイプの放射線の放射線加重係数 w_R は以下のように定数で与えられる⁶⁾.

- 電子, X線, γ 線, μ 粒子: $w_R = 1$
- 陽子, 荷電 π 中間子: $w_R = 2$
- α 線, 核分裂片, 重粒子線: $w_R = 20$

一方, エネルギーにより異なった核反応を起こす中性子の放射線加重係数 w_R はエネルギー E_n の関数として以下の式で与えられる⁷⁾.

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n \geq 50 \text{ MeV} \end{cases} \quad (7)$$

エネルギーの関数とした中性子の放射線加重係数 w_R のグラフを Fig. 1 に示す.

防護量である等価線量 H_T の単位は $[\text{J/kg}]$ であるが, シーベルトと呼ばれる単位 $[\text{Sv}]$ が用いられる. また, 測定では等価線量 H_T の値を求めることはできない.

4.5 実効線量

確率の影響であるがんや遺伝的障害の発症に関する放射線感受性は組織や臓器ごとに異なるので, 等価線量のみでは評価できない. 組織や臓器の放射線感受性の違いを考慮して被ばくの影響を評価するための放射線防護の基本量である実効線量 E は以下の式で与えられる.

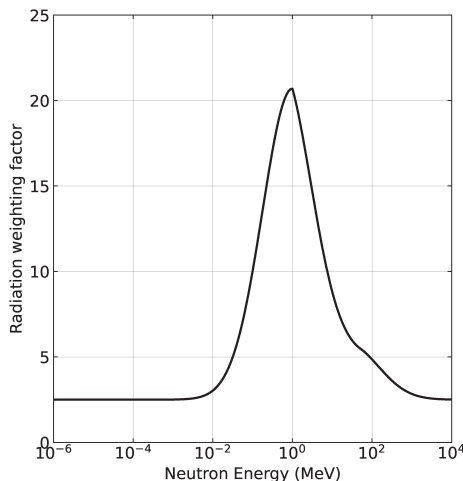


Fig. 1 Radiation weighting factor for neutrons as a function of neutron energy

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (8)$$

ここで, w_T は臓器あるいは組織 T の相対的な放射線感受性を表す組織荷重係数であり, 次に示すように $\sum_T w_T = 1.00$ となるように係数の値が定められている⁸⁾.

• 骨表面, 脳, 唾液腺, 皮膚	0.01	$\sum_T w_T = 0.04$
• 膀胱, 肝臓, 食道, 甲状腺	0.04	$\sum_T w_T = 0.16$
• 生殖腺	0.08	$\sum_T w_T = 0.08$
• 赤色骨髓, 結腸, 肺, 胃, その他の臓器	0.12	$\sum_T w_T = 0.72$
• 計		$\sum_T w_T = 1.00$

実効線量 E は全身が均等に被ばくした場合に確率的影響の程度が比較できる防護量である. 防護量である等価線量 E の単位は $[\text{J/kg}]$ であるが, シーベルトと呼ばれる単位 $[\text{Sv}]$ が用いられる. また, 測定では実効線量 E の値を求めることはできない.

4.6 中性子による吸収線量と実効線量

中性子エネルギーが 20 MeV より低い場合にはほとんどの組織あるいは器官における荷電粒子平衡が成立すると考えられるので, 吸収線量の計算にはカーマ近似が適用される. このとき, 中性子エネルギーが与えられると組織あるいは器官のフルエンス-カーマ変換係数に中性子フルエンスを乗じることで組織吸収線量の値が求められる.

中性子との相互作用で生成された 2 次重荷電粒子の飛程は短いので, 中性子場においてビルドアップ領域を超えた深部では荷電粒子平衡が良い近似で成立する. 制動放射は発生しないので, 中性子場において, 荷電粒子平衡が成立するビルドアップ領域を超えた深部では, 吸収線量とカーマは等しいと仮定できる. 単一エネルギーの中性子がある媒質を通過するときのカーマは以下の式で与えられる.

$$K_{\text{med}} = E_n \Phi_{\text{med}} \left[\frac{\mu_{\text{tr}}(E_n)}{\rho} \right]_{\text{med}} \quad (9)$$

ここで, E_n は MeV 単位の中性子エネルギー, Φ_{med} はエネルギー E_n の中性子のフルエンス, $\left[\frac{\mu_{\text{tr}}(E_n)}{\rho} \right]_{\text{med}}$ は媒質中におけるエネルギー E_n の中性子の質量エネルギー転移係数である. 通常, 中性子の質量エネルギー転移係数ではなく, 以下の式で定義されるフルエンス-カーマ変換係数が使用される.

$$\kappa_\Phi = \frac{K}{\Phi} = E_n \frac{\mu_{\text{tr}}(E_n)}{\rho} [\text{fGy} \cdot \text{m}^2] \quad (10)$$

ここで, $\text{fGy} = 1 \times 10^{-15} \text{ Gy}$ である. フルエンス-カーマ変換係数は中性子フルエンスあたりのカーマである. 荷電粒子平衡が成立している媒質中で中性子フルエンスが与えられれば, 媒質中の物質のフルエンス-カーマ変換係数からその物質の吸収線量を算出することができる. 中性子のフルエンス-カーマ変換係数 κ_Φ は以下の式で与えられる.

$$\kappa_{\phi} = C \sum_j N_j \sum_i \bar{Q}_{ij}(E_n) \sigma_{ij}(E_n) \quad (11)$$

ここで、 N_j は媒質を構成する標的要素 j の単位質量あたりの個数で単位は kg^{-1} である。 $\sigma_{ij}(E_n)$ はエネルギー E_n の中性子が標的要素 j で荷電粒子 i を生成する断面積で、単位にはb（バーン）が用いられ $1\text{b} = 1 \times 10^{-28} \text{m}^2$ である。 $\bar{Q}_{ij}$ は中性子反応で標的要素 j から放出される荷電粒子 i の平均運動エネルギーで単位はMeVである。 C はフルエンス-カーマ変換係数の単位を $\text{Gy} \cdot \text{m}^2$ に変換するための係数である。

与えられた元素についてのフルエンス-カーマ変換係数 $\kappa_{\phi} [\text{Gy} \cdot \text{m}^2]$ は、中性子の荷電粒子生成断面積から計算される。熱中性子に対する $\kappa_{\phi} [\text{Gy} \cdot \text{m}^2]$ に関しては、人体組織に多く含まれる ^{14}N とHの中性子捕獲反応 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ と $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ が重要である。反応断面積が既知であれば、これらの中性子捕獲反応から熱中性子のフルエンス-カーマ変換係数の値を求めることができる。

まず、A150組織等価プラスチックにおける熱中性子捕獲反応 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ による κ_{ϕ} を計算する。対象となる元素は ^{14}N のみなので(11)式は

$$\kappa_{\phi} = CN\bar{Q}\sigma_{\text{th}} \quad (12)$$

となる。反応断面積は $\sigma_{\text{th}} = 1.83 \text{b} = 1.83 \times 10^{-28} \text{m}^2$ である。この反応で放出される荷電粒子（pと ^{14}C ）の平均運動エネルギーは $\bar{Q} = 0.626 \text{MeV}$ である。この運動エネルギーは陽子と炭素14それぞれの質量の逆数に比例して配分される。A150には1gあたり0.0351gの窒素原子が含まれる⁹⁾。窒素の原子量 $A = 14.0$ 、アボガドロ数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{mol/atom}$ より、1kgのA150に含まれる窒素原子数は $N = (0.0351 \times 6.02 \times 10^{23} / 14.0) \times 1 \times 10^3 = 1.51 \times 10^{24} \text{atom/kg}$ となる。したがって、A150における熱中性子捕獲反応 $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ に対するフルエンス-カーマ係数 κ_{ϕ} の値は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \kappa_{\phi} &= 1.60 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right] \times 1.51 \times 10^{24} \left[\frac{\text{atom}}{\text{kg}} \right] \\ &\quad \times 0.626 [\text{MeV}] \times 1.83 \times 10^{-28} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{atom}} \right] \\ &= 2.77 \times 10^{-17} [\text{Gy} \cdot \text{m}^2] \end{aligned}$$

二次荷電粒子である陽子の生体組織中の飛程は $10 \mu\text{m}$ 程度なので、非常に小さい生体組織試料でも荷電粒子平衡は成立しカーマと吸収線量は等しいと考えてよい。

続いて、A150組織等価プラスチックにおける熱中性子捕獲反応 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ による κ_{ϕ} を計算する。A150には1gあたり0.101gの水素原子が含まれる⁹⁾。水素の原子量は $A = 1.01$ なので、1kgのA150に含まれる水素原子数は $N = (0.101 \times 6.02 \times 10^{23} / 1.01) \times 1 \times 10^3 = 6.02 \times 10^{25} \text{atom/kg}$ となる。 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ の反応断面積は $\sigma_{\text{th}} = 0.332 \text{b} = 0.332 \times$

10^{-29}m^2 であり $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ の反応断面積より小さい。しかしながら、単位質量あたりにA150に含まれる水素原子数は窒素の約40倍なので、A150では窒素より水素による中性子捕獲反応が発生する確率が高くなる。 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応ではエネルギー2.23 MeVの γ 線が放出される。荷電粒子の放出ではないが、 $\bar{Q} = 0.626 \text{MeV}$ として $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反応と同様に κ_{ϕ} の値を計算すると

$$\begin{aligned} \kappa_{\phi} &= 1.60 \times 10^{-13} \left[\frac{\text{J}}{\text{MeV}} \right] \times 6.02 \times 10^{25} \left[\frac{\text{atom}}{\text{kg}} \right] \\ &\quad \times 2.23 [\text{MeV}] \times 0.332 \times 10^{-28} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{atom}} \right] \\ &= 7.13 \times 10^{-16} [\text{Gy} \cdot \text{m}^2] \end{aligned}$$

となる。荷電粒子の場合と異なり、非荷電粒子である γ 線光子のエネルギーは直接的にカーマに寄与しない。中性子が照射された領域が小さく γ 線が相互作用することなくその領域から出ていく場合は、熱中性子による吸収線量は $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反応のみを考えればよい。中性子の照射領域増加に伴い、 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応の吸収線量への寄与が無視できなくなる。A150の場合、直径1cmの球の形状になると $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応と $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反応の吸収線量への寄与は同程度となる。A150球の直径が γ 線の平均自由行程の5倍程度より大きくなると、荷電粒子平衡が良い近似となる。このとき $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応の吸収線量への寄与は $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$ 反応の寄与の26倍となる。人体の大きさでは $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反応の吸収線量への寄与は無視できない。

中性子が生体組織の元素と弾性散乱したときは、反跳標的核の平均運動エネルギー $\bar{E}_x$ が $\bar{Q}$ となる。(1)式より運動エネルギー E_n の中性子が水素、炭素、窒素、および酸素と弾性散乱したときの $\bar{Q}$ は、それぞれ、 $0.5E_n$ 、 $0.142E_n$ 、 $0.124E_n$ および $0.111E_n$ となる。これらの反跳原子核の水中での飛程は十分に短く、 E_n が20 MeVの場合に反跳原子核に付与される運動エネルギーは半径25~40 μm の領域になる。

中性子エネルギーが20 MeVを超えると、ほとんどの組織あるいは器官における荷電粒子平衡が成立しなくなるので、モンテカルロシミュレーションコードを用いた中性子輸送計算で組織吸収線量の値が計算される。モンテカルロ法は乱数を何度も繰り返し用いて計算機実験を行うシミュレーションの一方法である。現象の素過程を支配する確立法則がわかっているとき、計算機を用いてこれらの素過程が実際に起こっているかのように再現する。光子、電子、陽子、中性子などの放射線粒子と物質の様々な相互作用に関する断面積、エネルギー付与、エネルギースペクトル、放出粒子の角度分布などの基本データがそろえば、放射線粒子が物質を通過する際に発生する様々な挙動を平均的な数値として計算することができる。代表的な放射線輸送モンテカルロシミュレーションコードには、日本原子力研究開発機構発機構を中心に開発されたPHITS (Particle and

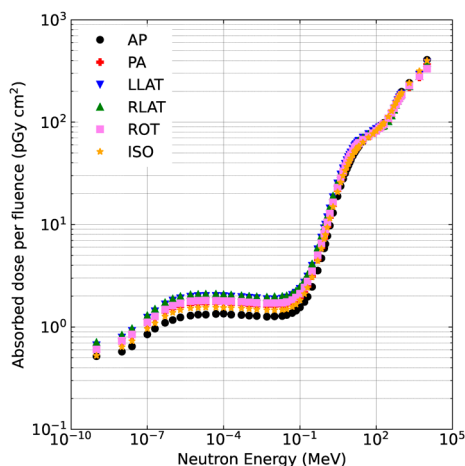


Fig. 2 Absorbed dose per neutron fluence for the brain of the male reference phantom. AP, antero-posterior; PA, postero-anterior; LLAT, left lateral; RLAT, right lateral; ROT, rotational; ISO, isotropic

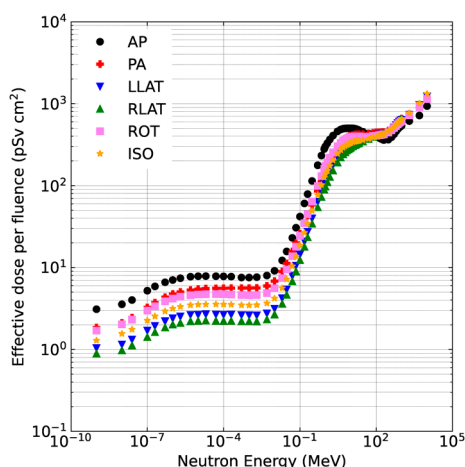


Fig. 3 Effective dose per neutron fluence for the male reference phantom. AP, antero-posterior; PA, postero-anterior; LLAT, left lateral; RLAT, right lateral; ROT, rotational; ISO, isotropic

Heavy Ion Transport code System)¹⁰⁾ などがある。

ICRP Pub. 116には、1 MeVから10 GeVの単一エネルギーの中性子を男性と女性の標準ファントムに照射した場合についてモンテカルロシミュレーションコードによる計算で求めたフルエンスあたりの組織吸収線量が表にまとめられている¹¹⁾。例として男性の脳の吸収線量とエネルギーの関係¹²⁾をFig. 2に示す。図中のAP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISOは、それぞれ、中性子の入射方向が正面から、背面から、左側面から、右側面から、周辺からおおよそ等方的である場合を示す。このようにして求めた組織吸収線量から(8)式を用いて実効線量を計算することができる。単一エネルギーの中性子を男性標準ファントムに照射したときのフルエンスあたりの実効線量とエネルギーの関係¹³⁾をFig. 3に示す。等方的な中性子照射の場合、中性子エネルギーが10 keV程度までは、二次的に発生する光子が

吸収線量に大きく寄与をする。人体深部における吸収線量のおよそ90%は水素の中性子捕獲反応で放出されるエネルギー2.2 MeVの γ 線による。残りの約10%は $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 反応で放出される陽子と ^{14}C 反跳核が寄与をする。中性子エネルギーが10 keVを超えると光子による寄与の割合は急激に小さくなり、1 MeVでは20%程度になる。中性子エネルギーが1 keVを超えると水素との弾性散乱で放出される陽子の寄与が重要になるが、数MeVを超えると中性子反応で放出される様々な荷電粒子の寄与が中性子エネルギーと共に大きくなる。

5. ま と め

本稿では、まず、中性子の物理的特性や中性子源について簡単に整理した。次に、中性子線量の解説としてフルエンスカーマ係数の計算例を示し、モンテカルロシミュレーションコードを用いた組織吸収線量や実効線量の計算について述べた。本稿が放射線防護で必要とされる中性子に関する基礎知識の整理に役立てば幸いである。

参考文献

- 1) 三島賢二：中性子で見る素粒子・原子核・宇宙物理。加速器13: 220-228, 2016
- 2) 辻本和文：加速器駆動システムを用いた核変換技術の研究開発の現状。Isotope News 751: 15-20, 2017
- 3) Takada H, Haga K, Teshigawara M, et al.: Materials and life science experimental facility at the Kapan Proton Accelerator Research Complex I: Pulsed spallation neutron source. Quantum Beam Sci. 1: 8, 2017, doi:10.3390/qubs1020008
- 4) 鬼柳善明：加速器を用いた中性子源。加速器13: 192-197, 2016
- 5) <https://www.kindai.ac.jp/rd/research-center/aeri/> (2022年2月14日アクセス)
- 6) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". Table 2.1, p. 34
- 7) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". equation (2.8), p. 35
- 8) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". Table 2.2, p. 36
- 9) Pedro A, Burns DT, Nahum AE, Seuntjens J, Attix FH: Fundamentals of ionizing radiation dosimetry. Table 19.1, p. 815, 2017, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, Germany
- 10) <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html> (2022年2月14日アクセス)
- 11) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". pp. 171-201
- 12) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". Table C.16, p. 187
- 13) ICRP Publication 116 "Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures". Table A.5, p. 130

解説

〈連載：放射線防護委員会企画〉

中性子線の生物学的影響：概説

今岡達彦*

量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所放射線影響研究部

Biological Effects of Neutron Radiation: An Overview

Tatsuhiko IMAOKA*

Department of Radiation Effects Research, National Institute of Radiological Sciences, National Institutes for Quantum Science and Technology

Exposure of human body to neutrons occurs in radiotherapy using high-energy radiations. This review summarizes knowledges related to biological effects of neutrons, including those obtained in recent projects in Japan and Europe. A study of Japanese atomic bomb survivors with recently revised dosimetry indicated very high relative biological effectiveness (RBE) of 25–80 (as point estimates) regarding cancer risk. Animal studies indicate RBE of 2–100 or even higher regarding cancer induction, which seem to have a peak around ~ 1 MeV. Evidence suggests that these values depend on the age and sex. Reported RBE regarding the effects on the lens of the eye is in a similar range and sometimes very high. Regarding other tissue reactions, reported RBE values range from 2–10. Experiments at the cellular level have reported RBE of 1–5 regarding cell killing, 2–20 regarding induction of mutations (with a peak at ~ 1 MeV), and ~ 1 regarding induction of DNA double strand breaks. A simulation study predicted that the RBE of induction of complex DNA breaks peaks at ~ 1 MeV with a value of ~ 17 . The complex breaks produced are likely to be far less in amount than simple DNA breaks, leading to a subtle increase in the yield of total DNA breaks; however, these complex damages may be very efficient in inducing mutations and cancer. Thus, the combination of the yield of complex DNA damage and its efficacy in inducing cancer is considered to underlie the high RBE of neutrons regarding cancer risk.

Keywords: neutrons, relative biological effectiveness, cancer risk, mutation, DNA damage

1. はじめに

放射線治療において中性子線は、粒子線や高エネルギーX線と物質の相互作用によって発生する。その生物効果は、エネルギーに大きく依存するが、低LET放射線と比較すると概して高い傾向がある。また、電荷を持たず透過力が高いことから被ばくの範囲は広くなる。そのため、中性子線の人体への影響は関心の高い問題である。

1.1 放射線の生体影響の分類

放射線による健康への影響は、組織反応（以前は確定的影響と呼ばれたもの）と確率的影響に大別される。組織反応にはしきい値が明瞭に存在し、急性障害、胎児の発生障害、晩発障害の一種である白内障等がある。一方、確率的影響には、晩発障害の一種であるがんや白血病（血液系の細胞のがんの一種）と、子孫への影響である遺伝性障害があって、そのしきい値は明瞭でない。

組織反応は、一定以上の細胞が機能を喪失することで臓器機能が低下して現れるため、大多数の細胞が健全な状態を保てるような低い線量では出現しないと考えられる。一方、確率的影響は、遺伝子変異を持つ単一の細胞から発生

しうる影響であるため、しきい値が明瞭でないと考えられている。

原子力事故のような例は別として、現代の医療の現場において中性子線の線量が非常に高くなることは考えにくく、主な関心は確率的影响であると思われる。

1.2 中性子線の放射線加重係数とRBE

全身の確率的影响の大きさを表現するツールが実効線量であるが、その計算過程においては吸収線量に放射線加重係数を乗じる。中性子線の放射線加重係数はエネルギーの連続関数であり、 10^{-2} MeV以下と 10^3 MeV以上では約2.5で、その中間の1 MeVで最大値20.7をとる¹⁾。この形状は理論的というより経験的に導かれている。この関数は確率的影响に関する生物学的効果比 (relative biological effectiveness, RBE) に基づいているとICRPは説明している¹⁾。

1.3 中性子線生体影響研究に関する動向

我が国では1999年に東海村JCO臨界事故が起こり、中性子線の被ばくが社会の関心を集めた。放射線医学総合研究所（放医研、現在の量子科学技術研究開発機構）では、

* 連絡著者 (corresponding author) 量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所放射線影響研究部 [〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1] Department of Radiation Effects Research, National Institute of Radiological Sciences, National Institutes for Quantum Science and Technology, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan E-mail: imaoka.tatsuhiko@qst.go.jp

JCO事故を受けた国の施策により低線量影響実験棟が2003年に竣工したが、これは生物実験用中性子線発生装置 NASBEE (Neutron-exposure Accelerator System for Biological Effect Experiment に由来する名称) を擁し、衛生管理の行き届いた動物実験施設を併設する、世界に類を見ない施設である。この施設を用いて2006～2016年で発達期被ばく影響研究プログラムが実施され、放射線治療の安全を目指した小児被ばく影響の研究が進展した。この研究は量子科学技術研究開発機構でも引き続き実施されている。

一方、欧州連合ではANDANTEプロジェクトが2012～2015年に実施され、放射線治療の安全をめざした線量評価、生物影響、疫学の総合研究が進展した。

1.4 本稿の構成

本稿では、中性子線の個体レベルにおける発がん影響を初めに述べ、続いてそれらの元になる細胞・分子レベルの影響を説明する。その際、国際がん研究機関(IARC)が2000年に発行したモノグラフ²⁾に主に基づきつつ、2000年代以降の国内外の研究で得られた最新の知見等もまじえて紹介する。

2. 個体レベルの疾病リスクに関する知見

全般的な傾向として、発がんや眼の水晶体への影響のRBEは2～100以上と高い場合が多く、それ以外の正常組織障害に関しては2～10未満と比較的小さい場合が多い。

2.1 ヒトにおける発がん

いくつかのヒト集団の中性子線への被ばく線量を見ると、集団線量では宇宙に由来する自然放射線の被ばく量が圧倒的に多いが、一人あたりの線量では原子力労働者や航空機乗務員・添乗員の被ばく量が比較的多い²⁾。中性子線への被ばくによる人体の発がんの影響を調べるためには、比較的高い線量の中性子線に被ばくした人間集団を研究する必要があるが、そのような集団は多くない。

2.1.1 原爆被爆者研究

広島・長崎に落とされた原子爆弾の核分裂放射線の大部分は γ 線であるが、少量の中性子線も含まれる。

初期の研究では、放射線量あたりのがんリスクが広島で長崎より高かったことと、原爆における中性子線の含量が広島と長崎で異なると考えられたことから、それらを統合して中性子線の発がん影響のRBEを推定する試みが行われた²⁾。しかし、放射線量の推定の改良が進むにつれ、中性子線の含量は全線量の2%以下と低いことがわかり、これを利用した中性子線RBEの推定の信頼性は高くないとされるようになった^{2), 3)}。

中性子線と γ 線の線量の比は、両都市間のほか、爆心地からの距離、爆心地に対する体の向き等による個人差があ

る。近年、線量推定の改訂により、この情報が利用できるようになった。これと最新のがんリスクの情報を統合した解析により、本方法で推定される中性子線RBEの信頼性は、かつてより改善された⁴⁾。その推定値は臓器により25～80という高いものであるが、95%信頼区間も下は10から上は190までと広い (Table 1, 左)。以前より改善されたとはいえ、さらなる不確実性の低減が必要だといえる。

2.1.2 その他の疫学研究

中性子線の被ばくを受けるその他の集団として、原子力産業従事者、速中性子線や高エネルギーX線(光核反応による中性子線を含む)によるがん治療を受けた患者、宇宙線由来の中性子線を受ける航空乗務員等がある。しかし、いずれも中性子線の線量に比べて他の放射線が多い、人数が少ない等の理由により、中性子線RBEの推定には不向きであるとされる²⁾。

近年では、欧州のANDANTEプロジェクトにおいて、陽子線治療を受けた患者の二次がんリスクの解析によって中性子線RBEを推定することに関するフェージビリティ研究が実施された。その結果、正常組織の中性子線量は低いため、数十年の追跡によってRBEが求められるとは考えにくいという結論が得られている⁵⁾。

2.2 実験動物における発がん

2000年前後までに行われた動物実験(主にマウス、ラット、稀にウサギ、サル)の結果がIARCモノグラフにまとめられている²⁾。これら約20報の研究は主に1 MeV前後、1～数百 mGyにおける実験であり、報告されている約40個の中性子線RBEの推定値は、2前後から100までといった範囲にある (Table 1, 右)。この中には、RBEの値がマウスの性別によって異なるというものがある。また、Fig. 1Aには、同モノグラフにまとめられたデータを、横軸に中性子線エネルギーをとってグラフで表現した。

発がん等の確率的影響に関しては、被ばくがない場合にも疾病の発生がかなり多くあるため、低線量被ばくの小さな影響を自然発生の頻度と区別して定量することは、一般に困難である。放医研では近年、特殊な遺伝子組換えマウスに誘発された脳腫瘍のゲノムを解析することによって、低線量であっても放射線被ばくに起因する脳腫瘍を特定する技術を開発した⁶⁾。この技術とNASBEEを併用した実験によって、マウスの脳腫瘍による死亡に関する低線量中性子線のRBEを求めることに成功した⁷⁾。その値は、最も感受性の高い出生後1日で21.5であり、その前後ではそれよりも低かった⁷⁾。

また、乳腺の放射線発がんへの感受性は、思春期前後で特に高いことが知られる。放医研のNASBEEを用いた実験では、ラットの乳がん罹患に関するRBEの被ばく時年齢への依存性を調べている。この実験では、乳児期、幼若期、思春期直後に被ばくしたラットの乳がん罹患のRBE

Table 1 Estimates of neutron RBE regarding carcinogenesis

Organ	Atomic bomb survivors ⁴⁾	Animal studies ^a		
	RBE (95% CI)	Energy (MeV)	Dose (Gy)	RBE
All organs	—	3.1	0.125–1	5–8
Breast	25 (10, 50)	1 and 2.5	1.8–5.5	3–4
		—	0.001	33
		0.5	0.001	15
		2.43	0.001	100
Brain	35 (10, 80)	2	0.05–2.0	7.5–26.3 ^{b, 8)}
Thyroid	40 (15, 90)	2	0.025–0.5	7.1–21.5 ^{b, 7)}
Bone marrow	45 (15, 95)	—	—	—
		1 and 5	0.001	1.8
		—	0.001	2.8, 13
		0.4	0–0.4	2.3
Lung	50 (15, 115)	—	0.001	19, 23–24
		1.6–2.1	0.016–0.1	30–50
		—	0.1–0.25	25–40
		7.5	<1	4.5 and 7.4 ^c
Liver	60 (20, 135)	0.4	0.09–0.17	13–28 ^b
		2.13	0–2.0	15 and 2.5 ^c
Intestine	80 (20, 190)	—	0.5–1.0	2–8 ²³⁾

^a Information is cited from IARC²⁾ unless otherwise indicated. ^b Depends on age at exposure. ^c Male and female, respectively. —, not reported.

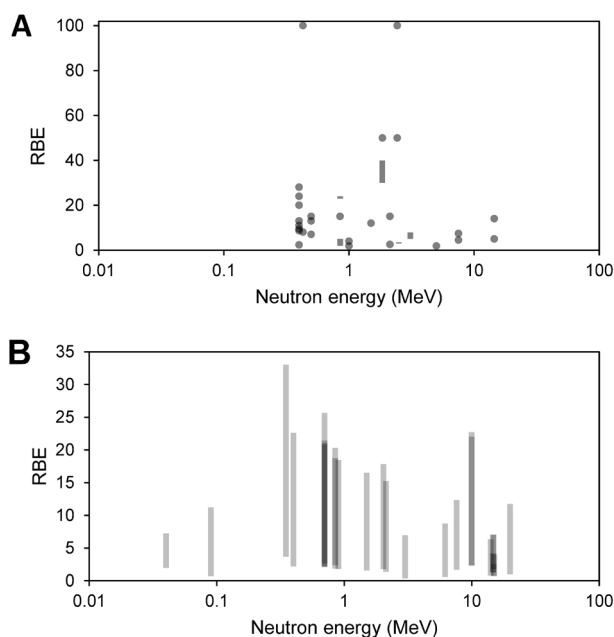


Fig. 1 Relative biological effectiveness (RBE) reported in experiments. (A) Induction of tumors in animals. (B) Induction of chromosomal aberrations. Values (dots) and ranges (vertical bars) obtained in a single experiment are indicated, in which overlaps are shown by darkening of the color. Based on data in IARC²⁾

が7.5, 9.3, 26.1であることが報告され⁸⁾, やはり, 最も感受性の高い時期のRBEが最も高かった. 発生した乳がんの性質やゲノム異常に, γ 線誘発がんや自然発生がんとの違いは見つかっていない^{9), 10)}.

2.3 子孫への世代を超えた影響

ヒトにおいて放射線による世代を超えた影響の存在を示した信頼性の高い研究はなく, 中性子線に関してもそれは同じである. マウスにおいて, 累積0.4, 0.5 Gyの²⁵²Cf核分裂中性子(2.13 MeV)を照射した雄の子孫で, 新規の突然変異が発生する確率が上昇したとの報告^{11), 12)}, 累積0.5~1 Gyの加速器による単色中性子線(0.2, 0.6 MeV)を照射した雄マウスの子の数の減少や子世代における発がんの増加が認められたとする報告¹³⁾がある.

2.4 眼の水晶体への影響

実験動物の研究で推定されたRBEの値が, IARCモノグラフにまとめられている²⁾. ヒトで得られた知見も合わせて表にまとめた(Table 2). それによると, RBEの値は1 Gy前後では一桁のオーダーであるが, 数mGyにおいては200以上となる場合もある.

2.5 その他の組織反応

IARCモノグラフでまとめられたデータによると²⁾, ヒトやマウス, ラット, サルにおいて, 皮膚, 造血系, 呼吸器, 中枢神経系, 精巣, 腎臓の障害に対する中性子線のRBEが報告されている. エネルギーの範囲は1~14 MeVであり, RBEの値は2~8.6である²⁾. 放医研では, 胎児を10 MeV中性子線で照射した後の神経系障害に先行する神経細胞アポトーシスの誘導を調べている. RBEの値は線量に依存するが, 線量0における極限が最大値であり, その値(RBE_Mと呼ぶ)を9.8と推定している¹⁴⁾.

3. 細胞レベルの実験による知見

DNAは情報を持った分子であり、その情報は細胞の活動の要である。放射線は、DNAに二重鎖切断等の損傷を作る。DNAの切断が修復されないまま残存すると、細胞は死に至ると考えられる。細胞はDNA切断を再結合して修復することができるが、誤った修復をすることでDNAの情報に誤りが生じる。DNA情報の変化を突然変異（あるいは単に変異）と呼ぶ。生存や増殖に必須の遺伝子に突然変異が起こって機能なくなると、やはり細胞は死に至る。こういった細胞死が、上記の様々な正常組織障害（発がんを除く）の原因となる。また、細胞が死にこそしなかったが、細胞増殖の制御を行っている遺伝子に突然変異が起こった場合、その細胞が無限に増殖してがんとなる可能性が生じる。つまり、発がんに関係の深い細胞レベルの現象は、主に突然変異である。眼の水晶体の影響がどのように生じるかについては議論がある。

ここでは、細胞死、突然変異、DNA損傷に関する中性子線の影響について述べる。

3.1 細胞死

放射線生物学において細胞死は、コロニー形成法によって調べるのが一般的である。この方法は、培養細胞が生存・増殖してある程度の大きさに至ったもの（コロニー）の数を計測し、非照射の場合の値からの変化を相対値で表

現する。Table 3にいくつかのコロニー形成実験で得られたRBEの値の例を示した。その値はエネルギーに依存するが、おおむね5以下であり非常に高くはない。

これらは不死化した培養細胞で行われた実験である。近年、個体の発がんは組織幹細胞と呼ばれる細胞から発生すると考えられるようになり、ANDANTEプロジェクトではヒトの乳腺から採取した組織幹細胞で同様のコロニー形成実験を行った。その結果は、エネルギー 0.56~17 MeVでのRBE_Mが1~2.5というものであり、おおむね5以下という意味では培養細胞実験と矛盾しない結果であった¹⁵⁾。マウス神経幹細胞の実験では核分裂中性子のRBEが最大で9.7とやや高いが、その値は0 Gy付近では5に近づく¹⁶⁾。

3.2 突然変異

突然変異の一種に染色体異常がある。これはDNA二重鎖切断の再結合の誤りによって、顕微鏡レベルで観察可能な染色体の変化が生じる現象である。原子力事故や速中性子線治療によって中性子線に被ばくした人を観察した研究では、最大17年後までリンパ球の染色体異常の増加が観察されている²⁾。突然変異に関する実験で得られた中性子線のRBEについては、1から20以上の範囲にわたっており非常に高い値も含まれる²⁾ (Fig. 1B)。なお、X線が誘発する染色体異常は2つの切断点を誤って再結合したと考えられる形状のものが多く、中性子線が誘発する染色体異常では、3つ以上の切断点が誤って結合されてきたと考

Table 2 Estimates of neutron RBE regarding defect of the lens of the eye

Study	Energy (MeV)	Dose (Gy)	RBE
Cataract in patients receiving fast neutron therapy ²⁴⁾	7.5	2.2	2.5
Lens opacification in mice ²⁵⁾	0.43	0.001	330
		1	6
Lens opacification in mice ²⁶⁾	14	0.01–0.38	9–21
Lens opacification in rats ²⁷⁾	0.44	0.002	250–500
		0.01	50–100
		0.05	10–20

Table 3 Examples of estimates of neutron RBE regarding cell killing

Cell line used	Energy (MeV)	RBE	Definition of RBE
V79 (hamster) ²⁸⁾	0.11	3	10% survival ^a
	0.22–0.43	5	
	0.66–1	4	
	2	3	
	6	1.7	
	15	1.5	
L-929 (mouse) ²⁹⁾	3.5	1.5	10% survival
HeLa (human) ³⁰⁾	— (thermal)	2.2	Ratio of D_0 values
V79 (hamster) ³¹⁾	2.3	3.55	10% survival
AL (fusion of human and hamster) ³²⁾	0.33	5.2	10% survival
	14	1.8	
L5178Y (mouse) ²¹⁾	6	2.0	10% survival

^a Ratio of neutron and reference radiation doses that give 10% survival as compared to nonirradiated control.

えられる複雑な異常の割合が高い¹⁷⁾。

突然変異の発生頻度が非常に低いこと、突然変異のある細胞は生き残らないことが多いことから、染色体異常よりも小さな突然変異を調べるには工夫が必要である。そのような手法の一つとして、細胞に薬剤感受性を与える遺伝子に注目し、薬剤存在下で生存できるようになった細胞の数をコロニー形成法で調べるというものがある。この方法でも10~20程度の高いRBE値が観測されている (Table 4)。

以上は培養細胞で行われた実験であるが、誘発された突然変異は発がんの原因になると考えてよいのだろうか。量子科学技術研究開発機構では、動物に中性子線を照射して発生したがんのDNAを調べている。その報告によると、中性子線が誘発したと考えられるがんでは介在欠失と呼ばれる突然変異（2つの切断点を誤って再結合することで発生したと考えられる）によって発がんに関連する遺伝子が異常となっている場合が多く、中には3つ以上の切断点を誤って結合したような複雑な異常も見られたとしており、培養細胞レベルの知見との整合性がある^{7), 18)}。

3.3 DNA損傷

DNA損傷（特にDNA二本鎖切断）に関する実験で得られた中性子線のRBEは、主に1前後と低い (Table 5)。中性子線によるDNA二本鎖切断の生成には直接作用の寄与が比較的大きいと考えられるが、間接作用による酸化的な塩基損傷も多く生じており、細胞にとって修復困難な複雑な損傷（特にクラスターDNA損傷と呼ばれる、複数の損傷が近接する損傷）が多く生成されるという実験的証拠もある¹⁹⁻²¹⁾。

Table 4 Estimates of neutron RBE regarding induction of mutations

Cell line used	Gene	Energy (MeV)	RBE
L5178Y (mouse) ³³⁾	<i>Hprt</i>	2.13	>10
M5S (mouse) ³⁴⁾	<i>Hprt</i>	2.13	4.9-7.4
TK6 (human) ³⁵⁾	<i>TK, HPRT</i>	4.2	10
AL (fusion of human and hamster) ³²⁾	<i>a1</i>	0.33	30
		0.43	19 ^a
		0.68	15 ^a
		2.0	13 ^a
		14	4.2

^a Read on the graph in the original paper.

Table 5 Estimates of neutron RBE regarding induction of DNA double strand breaks

Cells used	Method of measurement	Energy (MeV)	RBE
HeLa (human) ³⁰⁾	Neutral filter elution	— (thermal)	2.6
Reticulocyte (mouse) ³⁶⁾	Micronucleus	— (fission)	1.9
Epithelioid (human) ³⁷⁾	Neutral filter elution	0.85	1
V79 (hamster) ³¹⁾	Neutral filter elution	2.3	1
L5178Y (mouse) ²¹⁾	Neutral filter elution	6	0.4
Yeast ³⁸⁾	Pulsed-field gel electrophoresis	14	2.5

ANDANTEプロジェクトでは、中性子線によるDNA二本鎖切断クラスター（近接したDNA二本鎖切断）の生成に関するシミュレーション研究が行われた²²⁾。その結果によると、物質との相互作用によって中性子線が生成する二次粒子として、低エネルギーでは電子が主であるが、1 MeV前後を境として反跳陽子が主となる。反跳陽子の電離密度は、中性子のエネルギーが1 MeV以下で最も高く、1 MeV以上ではエネルギーと共に低くなる。その結果、DNA二本鎖切断クラスターの生成に関するRBEは1 MeV前後で最大（約17）となる。同様に、核変換で放出される重陽子は10 MeVより高いエネルギーでエネルギー依存的に増加し、その電離密度がエネルギーと共に低くなる結果、DNA二本鎖切断クラスターの生成に関するRBEは20 MeV前後にもう1つのピーク（約14）を持つ。この形状は、発がんや染色体異常の実験で得られたRBE値のエネルギー依存性とよく類似している。

4. ま と め

以上より想定される中性子線の生物学的影響の骨子をFig. 2にまとめた。中性子線と物質の相互作用によって生成される反跳陽子や重陽子は、高い密度の電離によって、修復の困難な複雑なDNA二本鎖切断を作ると考えられる。その生成量は、単純なDNA損傷に比べるとそれほど多くないと考えられ、DNA二本鎖切断の全体量、その結果としての細胞死や組織反応（確定的影響）のRBEを著しく高めるほどではない。しかし、突然変異や発がんに対しては複雑な損傷が大きく寄与しているため、そのRBEは著しく高くなると想定される。このように、発がんのRBEは、複雑なDNA損傷の生成量とその発がんへの寄与度の両者によって決定されるのかもしれない。発がんのRBEは性別や被ばく時の年齢に依存するという結果を述べたが、これも「複雑DNA損傷」の発がんへの寄与度が年齢によって異なると考えれば説明がつく。

最後に、今後の中性子線生物影響研究の展望について私見を述べたい。まず、最近の原爆被爆者のがんリスクの研究で提示された20以上のRBEが妥当なものであるかという検証が要る。そのために、この研究の詳細を公開して検証することが重要であるほか、複雑なDNA損傷の生成量と発がんへの寄与を定量的に証明してRBEの成り立ちを説明することが本質的課題だと考えられる。また、水晶体

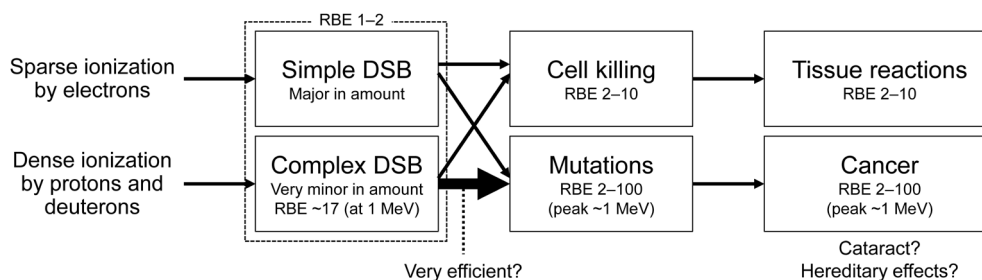


Fig. 2 Summary of the possible mechanism underlying the high relative biological effectiveness (RBE) of neutrons. DSB, DNA double strand breaks

への影響のRBEが高いメカニズムは不明であり、複雑なDNA損傷の生成との関係を中心に明らかにすべきであろう。子孫への影響についても知見が少なく、実験的証拠の蓄積とともに、原爆被爆者研究における最新の中性子線量評価を使った再解析が有効であろう。

謝辞

本稿においては、量子科学技術研究開発機構のNAS-BEE及び低線量影響実験棟動物実験施設を使用して得られた結果も紹介した。施設の維持管理に尽力された関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) ICRP: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37: 1-332, 2007
- 2) IARC: Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons, 2000, International Agency for Research on Cancer, Lyon
- 3) Little MP: Estimates of neutron relative biological effectiveness derived from the Japanese atomic bomb survivors. Int. J. Radiat. Biol. 72: 715-726, 1997
- 4) Cordova KA, Cullings HM: Assessing the relative biological effectiveness of neutrons across organs of varying depth among the atomic bomb survivors. Radiat. Res. 192: 380-387, 2019
- 5) Trott KR: Special radiobiological features of second cancer risk after particle radiotherapy. Phys. Med. 42: 221-227, 2017
- 6) Tsuruoka C, Blyth BJ, Morioka T, et al.: Sensitive detection of radiation-induced medulloblastomas after acute or protracted gamma-ray exposures in Ptch1 heterozygous mice using a radiation-specific molecular signature. Radiat. Res. 186: 407-414, 2016
- 7) Tsuruoka C, Kaminishi M, Shinagawa M, et al.: High relative biological effectiveness of 2 MeV fast neutrons for induction of medulloblastoma in Ptch1^{+/-} mice with radiation-specific deletion on chromosome 13. Radiat. Res. 196: 225-234, 2021
- 8) Imaoka T, Nishimura M, Daino K, et al.: Age modifies the effect of 2-MeV fast neutrons on rat mammary carcinogenesis. Radiat. Res. 188: 419-425, 2017
- 9) Moriyama H, Daino K, Imaoka T, et al.: Neutron-induced rat mammary carcinomas are mainly of luminal subtype and have multiple copy number aberrations. Anticancer

Res. 39: 1135-1142

- 10) Nishimura M, Daino K, Fukuda M, et al.: Development of mammary cancer in γ -irradiated F₁ hybrids of susceptible Sprague-Dawley and resistant Copenhagen rats, with copy-number losses that pinpoint potential tumor suppressors. PLoS One 16: e0255968, 2021
- 11) Dubrova YE, Plumb M, Gutierrez B, et al.: Transgenerational mutation by radiation. Nature 405: 37, 2000
- 12) Barber R, Plumb MA, Boulton E, et al.: Elevated mutation rates in the germ line of first- and second-generation offspring of irradiated male mice. Proc. Natl. Acad. Sci. U S A 99: 6877-6882, 2002
- 13) Watanabe H, Toyoshima M, Ishikawa M, et al.: Paternal monoenergetic neutron exposure results in abnormal sperm, and embryonal lethality and transgenerational tumorigenesis in mouse F1 offspring. Oncol. Rep. 23: 1351-1360, 2010
- 14) Ishida Y, Ohmachi Y, Nakata Y, et al.: Dose-response and large relative biological effectiveness of fast neutrons with regard to mouse fetal cerebral neuron apoptosis. J. Radiat. Res. 47: 41-47, 2006
- 15) European Commission: Multidisciplinary evaluation of the cancer risk from neutrons relative to photons using stem cells and the induction of second malignant neoplasms following paediatric radiation therapy. <https://cordis.europa.eu/project/id/295970/> (accessed: March 26, 2022)
- 16) Posypanova G, Ratushnyak M, Semochkina Y, et al.: Response of murine neural stem/progenitor cells to gamma-neutron radiation. Int. J. Radiat. Biol. 2022 Mar 31: 1-12. doi: 10.1080/09553002.2022.2055802. Epub ahead of print.
- 17) Boei JJ, Vermeulen S, Mullenders LH, et al.: Impact of radiation quality on the spectrum of induced chromosome exchange aberrations. Int. J. Radiat. Biol. 77: 847-857, 2001
- 18) Moriyama H, Daino K, Ishikawa A, et al.: Exome of radiation-induced rat mammary carcinoma shows copy-number losses and mutations in human-relevant cancer genes. Anticancer Res. 41: 55-70, 2021
- 19) Pogozelski WK, Xapsos MA, Blakely WF: Quantitative assessment of the contribution of clustered damage to DNA double-strand breaks induced by ⁶⁰Co gamma rays and fission neutrons. Radiat. Res. 151: 442-448, 1999
- 20) Pang D, Nico JS, Karam L, et al.: Significant disparity in base and sugar damage in DNA resulting from neutron and electron irradiation. J. Radiat. Res. 55: 1081-1088, 2014
- 21) Sakai K, Suzuki S, Nakamura N, et al.: Induction and subsequent repair of DNA damage by fast neutrons in

- cultured mammalian cells. *Radiat. Res.* 110: 311–320, 1987
- 22) Baiocco G, Barbieri S, Babini G, et al.: The origin of neutron biological effectiveness as a function of energy. *Sci. Rep.* 6: 34033, 2016
 - 23) Ellender M, Harrison JD, Meijne E, et al.: Intestinal tumours induced in Apc (Min/+) mice by X-rays and neutrons. *Int. J. Radiat. Biol.* 87: 385–399, 2011
 - 24) Roth J, Brown N, Catterall M, et al.: Effects of fast neutrons on the eye. *Br. J. Ophthalmol.* 60: 236–244, 1976
 - 25) Bateman JL, Rossi HH, Kellerer AM, et al.: Dose-dependence of fast neutron RBE for lens opacification in mice. *Radiat. Res.* 51: 381–390, 1972
 - 26) Di Paola M, Bianchi M, Baarli J: Lens opacification in mice exposed to 14-MeV neutrons. *Radiat. Res.* 73: 340–350, 1978
 - 27) Worgul BV, Medvedovsky C, Huang Y, et al.: Quantitative assessment of the cataractogenic potential of very low doses of neutrons. *Radiat. Res.* 145: 343–349, 1996
 - 28) Hall EJ, Novak JK, Kellerer AM, et al.: RBE as a function of neutron energy. I. Experimental observations. *Radiat. Res.* 64: 245–255, 1975
 - 29) Erichsen EA, Baker ML, Moss AJ, Jr., et al.: Survival of mouse L-929 cells following neutron irradiation. *Radiology* 119: 467–469, 1976
 - 30) Maki H, Saito M, Kobayashi T, et al.: Cell inactivation and DNA single- and double-strand breaks in cultured mammalian cells irradiated by a thermal neutron beam. *Int. J. Radiat. Biol. Relat. Stud. Phys. Chem. Med.* 50: 795–809, 1986
 - 31) Fox JC, McNally NJ: Cell survival and DNA double-strand break repair following X-ray or neutron irradiation of V79 cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 54: 1021–1030, 1988
 - 32) Hei TK, Hall EJ, Waldren CA: Mutation induction and relative biological effectiveness of neutrons in mammalian cells: Experimental observations. *Radiat. Res.* 115: 281–291, 1988
 - 33) Nakamura N, Sawada S: Reversed dose-rate effect and RBE of 252-californium radiation in the induction of 6-thioguanine-resistant mutations in mouse L5178Y cells. *Mutat. Res.* 201: 65–71
 - 34) Komatsu K, Sawada S, Takeoka S, et al.: Dose-rate effects of neutrons and gamma-rays on the induction of mutation and oncogenic transformation in plateau-phase mouse m5S cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 63: 469–474, 1993
 - 35) Kronenberg A, Little JB: Molecular characterization of thymidine kinase mutants of human cells induced by densely ionizing radiation. *Mutat. Res.* 211: 215–224, 1989
 - 36) Kagawa N, Shimura M, Takai A, et al.: Relative biological effectiveness of fission neutrons for induction of micronucleus formation in mouse reticulocytes in vivo. *Mutat. Res.* 556: 93–99, 2004
 - 37) Peak MJ, Wang L, Hill CK, et al.: Comparison of repair of DNA double-strand breaks caused by neutron or gamma radiation in cultured human cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 60: 891–898, 1991
 - 38) Potter T, Kohnlein W: Pulsed-field gel electrophoresis of chromosomal DNA of *Saccharomyces pastorianus* after exposure to x-rays (30–50 keV) and neutrons (14 MeV). *Radiat. Environ. Biophys.* 40: 39–45, 2001

著者紹介

今岡 達彦 (いまおか・たつひこ)

(現職名) 量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所グループリーダー

放射線被ばくの生体への影響を研究している。国際放射線防護委員会タスクグループ111通信委員, 日本放射線影響学会副理事長, 東京都立大学客員教授を務める。

解説

〈連載：教育委員会企画〉

腫瘍学分野における PET 研究 [第3部]

三本拓也^{*1}, 高畠 賢², 井上一雅², 福士政広^{2,3}¹帝京大学 中央RI教育・研究施設²東京都立大学 健康福祉学部 放射線学科³つくば国際大学 医療保健学部 診療放射線学科

PET Research in Clinical Oncology

Takuya MITSUMOTO^{*1}, Masaru TAKABATAKE², Kazumasa INOUE², Masahiro FUKUSHI^{2,3}¹ Department of Radioisotope Research Center, Teikyo University² Department of Radiology, Faculty of Health Sciences, Tokyo Metropolitan University³ Department of Radiological Sciences, Tsukuba International University

Positron emission tomography (PET) in nuclear medicine is especially used for diagnosis in clinical oncology, and PET/CT examination using ¹⁸F-FDG is very useful for staging and therapy evaluation of cancer. The excellent property of PET diagnosis is that the functional information of cells can be evaluated quantitatively, but it also has the problem that its quantitative value fluctuates depending on image reconstruction conditions and body movements/respiratory movements. In this paper, we summarize the PET research that has been conducted so far in clinical oncology, and also introduce our researches for improve the quantitiveness.

Keywords: PET, PET/CT, FDG, SUV, oncology

はじめに

悪性新生物（腫瘍）は、厚生労働省の調査より死亡原因1位であり、医療費に関しては全体の1割を占めている。腫瘍の診断に関しては、臨床症状、病理診断や画像診断などによって総合的に行われる。従来の画像診断では、腫瘍の悪性度評価は、Computed Tomography (CT)やMagnetic Resonance Imaging (MRI)などの形態画像によって行われてきたが、形態による評価のみでは限界があった。現在は、「分子イメージング」による分子生物学的な情報を個々の腫瘍で得ることが可能となり数多くの研究が行われている。「分子イメージング」の中核である陽電子放射断層撮影 (Positron Emission Tomography: PET)は、個々の症例・病変に対して非侵襲的に分子生物学的情報を提供し治療方針に貢献する。

本稿では、これまで取り組まれてきた腫瘍学分野におけるPET研究や著者らが定量性を改善するため行った研究などに関して紹介する。

1. PETに関して

PETは、体内に投与したPET薬剤の集積をStandardized Uptake Value (SUV)といった指標を用いることで細胞の活動性を定量的に評価可能である。

PET診断は、腫瘍学、循環器、脳神経の3つの分野で使用されているが、大部分は腫瘍学分野となる。この理由は、

検査・画像解析におけるマンパワーとPET薬剤合成におけるサイクロトロン設置が問題である。循環器領域では虚血性疾患の診断のため薬剤負荷を行う必要があり循環器医の立ち会いが必要である。また血流情報を画像化するためのPET薬剤は、サイクロトロンを用いて合成しなければならない。脳神経領域も同様に様々なPET薬剤が必要でありPET画像を定量解析する手法も動脈採血や動体解析を伴うため専門的な施設で行われているのが現状である。

腫瘍学分野におけるPET薬剤も様々な存在するが、臨床で最も用いられるのはグルコース代謝を反映する2-¹⁸F-fluoro-2-deoxy-D-glucose (FDG)^{(1), (2)}である。¹⁸Fで標識されたFDGは、半減期が約110分とポジトロン核種の中でも長いので製薬会社からのデリバリーにも対応しておりPET装置を有する施設で広く使用されている。一般的なPET装置の空間分解能は約5mmであるので微小病変検出というより、転移・再発診断や薬物療法による治療効果判定の役割が大きい⁽³⁾。本稿で紹介する研究についてもFDGを用いたものである。

2. PET装置に関して

PET装置には、PET、PET/CT、PET/MRIの体幹部をイメージングする装置と乳房などに限定した乳房専用装置などがある。現在のPET装置の大部分は、コストや汎用性の観点から形態診断に優れるComputed Tomography

* 連絡著者 (corresponding author) 帝京大学 中央RI教育・研究施設 [〒173-8605 東京都板橋区加賀 2-11-1]
Department of Radioisotope Research Center, Teikyo University, 2-11-1, Kaga, Itabashi-ku, Tokyo 173-8605, Japan
E-mail: tmitsumoto@med.teikyo-u.ac.jp

(CT)と組み合わせたPET/CT装置である。

一般的なPET装置は、BGOやLSOといった無機シンチレータとシンチレータからの微弱な蛍光を増幅する光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)によって構成される。PMTは、磁場の影響が大きいためPET/MRIではPMTの代わりにフォトダイオードのシリコン光電子増倍管(Silicon Photomultiplier: SiPM)を用いる。最近のPET/CT装置もSiPMを用いた半導体PET/CTが増加傾向にある。SiPMは高価であるがファトンカウンティング技術によりPMTと比べ空間分解能が向上する⁴⁾。乳房専用PET装置は、対向型のタイプ(Positron Emission Mammography: PEM)とリング型のタイプ(dedicated breast PET: db-PET)の2種類に分類される^{5)~7)}。

3. SUVに関して

一般的なSUVは下記の式で示される。簡単に述べるとPET薬剤が体内に均一に分布(SUV=1)したと仮定した量に対するPET薬剤の集積量で示されることになる。人体の比重を1としたとき、無単位となる。

$$SUV_{bw}(\text{g/ml}) = \frac{\text{組織放射能量(Bq) / 組織容量(ml)}}{\text{投与放射能量(Bq) / 体重(g)}}$$

SUV body weight (SUVbw) は、関心領域 (Region of Interest: ROI)におけるPET薬剤の取り込みを、投与量と患者の体重で標準化した指標であり、一般的なSUVを指す。SUVbwは、体重で標準化されるため肥満になるほど体脂肪の影響によって臓器などが過大評価される。これは、FDGのようなPET薬剤は、脂肪への取り込みが低いためである。この対策として体重の代わりに除脂肪体重や体表面積で標準化したSUV lean body mass (SUVlbm)やSUV body surface area (SUVbsa)が検討されたが汎用性がないため本邦では受け入れられておらず、研究的な使用がされている^{8)~10)}。除脂肪体重を算出する推定式は男女間で異なりモデルも欧米式である。我々が検討した研究では、女性は良好な結果を得られたが男性では、実際の除脂肪体重に比べ推定式によって算出された除脂肪体重は高くなる固定的な誤差を生じる結果であった¹¹⁾。

SUVの種類については、ROIの設定によって名称が異なる。病巣におけるROI内の最大ピクセル値を示すSUVmaxやROI内の平均ピクセル値を示すSUVmeanなどがある。SUVmeanは閾値を設けて求める。抽出方法は、ROI内の最大値にパーセンテージを設定する相対的方法と数値を直接指定して抽出する絶対的方法に分けられる。SUVmeanは抽出された領域内ピクセルの平均値となる。SUVmaxは簡易的な指標であり細胞レベルで評価したい分子イメージングにとっては理想的な指標であるため診断で使用されるが1ピクセルのみによって定義されることに注意が必要である。近年では最大値に近い平均値である

SUVpeak¹⁰⁾が使用される。SUVpeakとは、SUVmaxを中心に3次元関心領域 (Volume of Interest: VOI)であるなら1cm³、2次元関心領域のROIでは、SUVmaxが存在する断面でSUVmaxを中心に直径1.2cmの円領域を設定して得られる平均値であり、画像再構成パラメータやノイズによるSUVの変動を低減することが可能である。

4. PETイメージングにおける分解能や定量性

PETイメージングは、体内に投与されたポジトロン核種から発生する消滅放射線を同時計測し画像化する。PETにおける画質は、空間分解能で定義され定量性に直結する。総合分解能をFWHM_{tot}、ポジトロンレンジ(陽電子の飛程)をFWHM_p、ポジトロン角度揺動による非共線性をFWHM_N、検出器の有限寸法をFWHM_D、検出器の相互作用をFWHM_Bとし α を画像再構成の因子とした場合以下の式で示される¹²⁾。

$$FWHM_{tot} = \alpha \times \sqrt{FWHM_p^2 + FWHM_N^2 + FWHM_D^2 + FWHM_B^2}$$

PETイメージングにおける定量性は、上記の空間分解能に加え技術的要因、生物学的要因、物理的要因の3つで変動することがBoellaardらによって報告されている¹³⁾。技術的要因は、計測精度のためのPET装置とドーズキャリブレーションとのクロスキャリブレーション、減衰補正のためのPET装置と関連機器の正確な時間設定、PET薬剤を正確に投与するための投与機器精度などをいう。物理的要因は、PETイメージングにおける画像再構成パラメータの設定、造影剤を使用した際の影響、画像解析におけるROIの設定などをいう。生物学的要因に関しては、上述した体格の影響のほか、血糖値、イメージングまでの待機時間、イメージング中の呼吸運動であり、体内動態など人体に関わるものをいう。

特に物理的要因である画像再構成や生物学的要因である呼吸の変動などがPET画像に影響を与える大きな因子となる。

5. 画像再構成

PET画像の画像再構成は、統計学的手法である逐次近似画像再構成法のOrdered Subset Expectation Maximization (OSEM)法がベースとなっており、時間差を利用して検出位置の精度を向上させる技術(Time Of Flight: TOF)や点広がり関数(Point Spread Function: PSF)を用いることで部分容積効果を軽減する分解能補正などが組み込まれる^{14)~17)}。画像再構成において、より正確な定量結果を得るためには、理論的には反復回数を増やすことが有効である^{18), 19)}。しかし反復回数の増加は、信号の増強と同様にノイズの増強をもたらすため描出能を高めるためには、コントラストとノイズの関係を考慮する必要がある

る²⁰⁾。近年では、ノイズのみの強調を緩和する係数を用いた統計学的方法も利用される⁴⁾。特に分解能補正は、図1に示すとおりSUVを著しく変化させるため注意が必要となる。

6. 呼吸性移動による影響

PETイメージングでは、安静呼吸下で行われるため呼吸の動きを含んだ累積画像となる。したがって、病変は、図2に示すように呼吸停止時と比較し実際より大きく描出され、SUVは低下する。この問題を改善する方法が呼吸同期イメージングである。呼吸同期イメージングは、位相

同期：Phase法と振幅同期：Amplitude法の2種類に大別される^{21), 22)}。呼吸のモニタリングは、赤外線追跡カメラを用いたVarian社のReal-time Position Management (RPM)システムなどを通して行われる。

Phase法は、正確な位置精度、病変や臓器の移動量などについて評価が可能である。ただし、呼吸位相の分割数に応じてカウントが分割され、また4D-CTが必要であるため呼吸の制御と被ばくの問題がある。呼吸の制御に関しては、PETおよびCTのイメージング中に得られた呼吸波形がRPMシステムで良好に認識できれば精度の高い画像が得られるが現実的には呼吸波形は安定しない。これは、睡

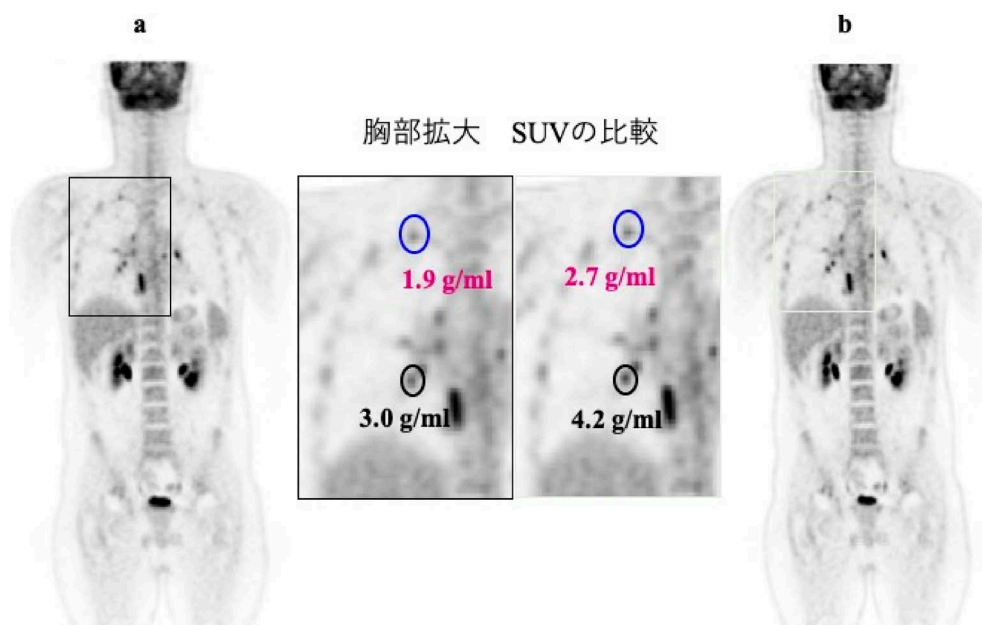


図1 分解能補正の効果に関して

aは分解能補正無し、bは分解能補正有りの画像である。分解能補正によってSUVが向上するが、過補正している場合もあり注意が必要である。視覚的に定性評価する場合にはよいが定量的な評価を行う場合には誤差を考慮した工夫が必要となる。SUVpeakを用いることでSUVmaxの過剰な補正を軽減可能。

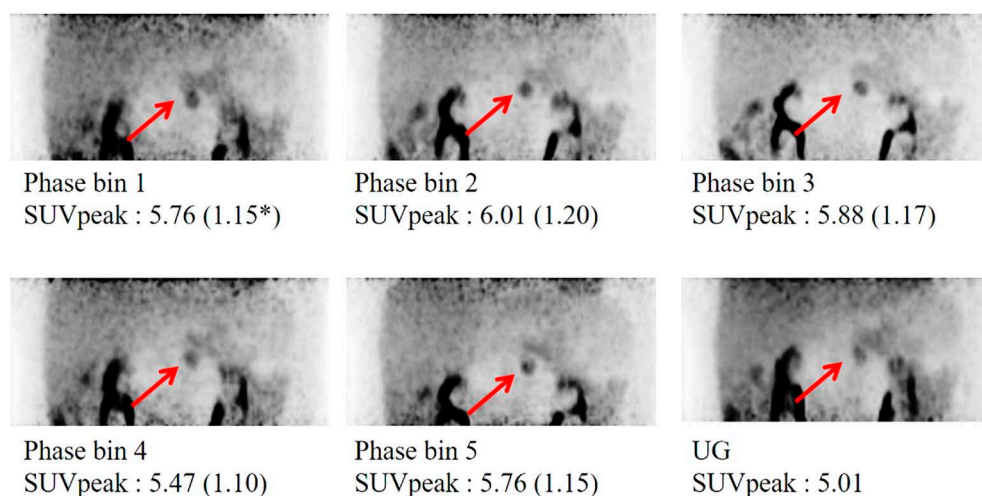


図2 肺癌患者における呼吸変動を表した最大強度投影画像⁷⁾

右下に示すUGは、呼吸同期がない通常の検査で得られるPET画像。呼吸の影響によって、病変はボケSUVの値は減少する。呼吸の位相によってSUVは変動する。

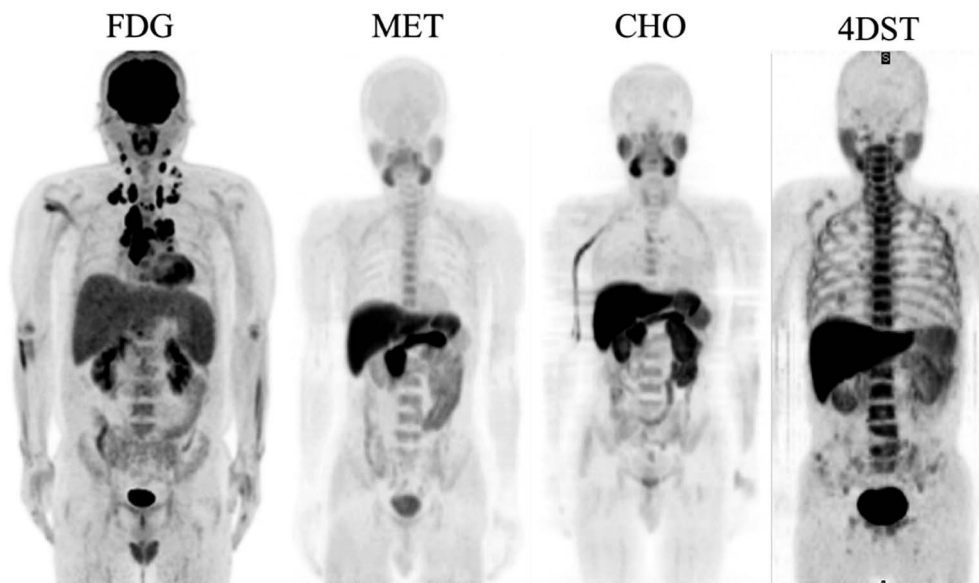


図3 全身MIP画像

FDGの分布と異なり脳の集積は低い。4DSTはDNA合成を反映するので骨髄などの集積が高い。

眠による影響や患者自身が呼吸の状態を認識できないなどいくつかの理由が考えられる。そこで、我々は患者自身に呼吸波形を投影する視覚フィードバックに基づいたイメージングを提案し定量性の改善を行った。通常の呼吸同期イメージングに比べ、呼吸同期精度が向上し病変の定量性改善に有効であった²³⁾。

Amplitude法に関しては、Phase法に比べ、カウントが得られること、4DCTを必要としないため、被ばく量を抑えられるがコントラストはPhase法に比べ若干劣る。これまでの呼吸同期イメージングは、セットアップなどによる検査時間の増加、被ばく量の増加などの理由によって研究など特殊なケースでしか行われていなかったが、最近では、これらの問題を改善した技術が用いられ通常の臨床においても呼吸同期イメージングが可能となった^{24), 25)}。

7. PET薬剤について：FDGとその他の薬剤

現在のPET検査には、ブドウ糖代謝を反映するFDGが主に用いられている^{1), 2)}。FDGの集積度は腫瘍の悪性度を比較的良く反映し、治療前診断、治療後評価などに関して臨床的に有用性が認められたことから、本邦では2002年に保険承認され、グルコース代謝を指標とする機能画像診断が実用化した。

FDGは様々な腫瘍に用いられ腫瘍診断に必須の薬剤であるが、あくまでもグルコース代謝を反映した分布を示すため生理的集積の高い脳や尿路系、また炎症への取り込み等が診断精度に影響を及ぼす問題がある。FDG単独での診断はある程度限界があり、このような問題を補うため新しいPET薬剤が求められている。FDG以外の製剤は、アミノ酸代謝イメージングのメチオニン (MET)、膜脂質代謝イメージングのコリン (CHO)、核酸代謝イメージング

であるFLTや4DSTである^{26)~29)}。さらに、低酸素イメージング剤であるFMISOなどが挙げられる³⁰⁾。それぞれの全身MIP画像を図3に示す。基本的にはFDGで診断が難しい領域で使用されるため、脳腫瘍や前立腺がんに適用されるが、診断目的に応じてPET薬剤の選択を行う必要がある。

8. PET診断

PETイメージングは、全身の画像を一度の検査で得ることが可能であるので、はじめに述べたように微小病変検出というより、転移・再発診断や薬物療法による治療効果判定に利用される。特に悪性リンパ腫における治療効果判定の有効性は高い。FDGを用いたステージングおよび治療効果判定の基準であるLugano分類に則り診断が行われる³¹⁾。図4に悪性リンパ腫の治療におけるモニタリングを示す。治療期間中におけるinterim PETも予後予測に有効である³²⁾。

ここで、PET診断の方法について述べる。PET診断は、視覚的に評価する定性評価とSUVを用いた定量評価で行われる。定量評価に関しては、ほぼSUVmaxが用いられる。これは、第3節「SUVに関して」で解説した理由に加えて、誰がROIを設定しても病変を含んでいれば計測できる単純な指標であるためである。これまでのPET研究の多くはSUVmaxによる評価であり良悪性鑑別や予後予測などのエビデンスが構築された。しかしSUVmaxは、装置の性能向上や画像再構成技術の向上によっていくらかでも変動してしまうため、最近の研究では、誤差を軽減するSUVpeakと一緒に測定される。特に2010年頃から半導体PET装置の登場や画像再構成法の進歩から微小病変などのSUVは、従来と比較し倍以上変動するようになったの

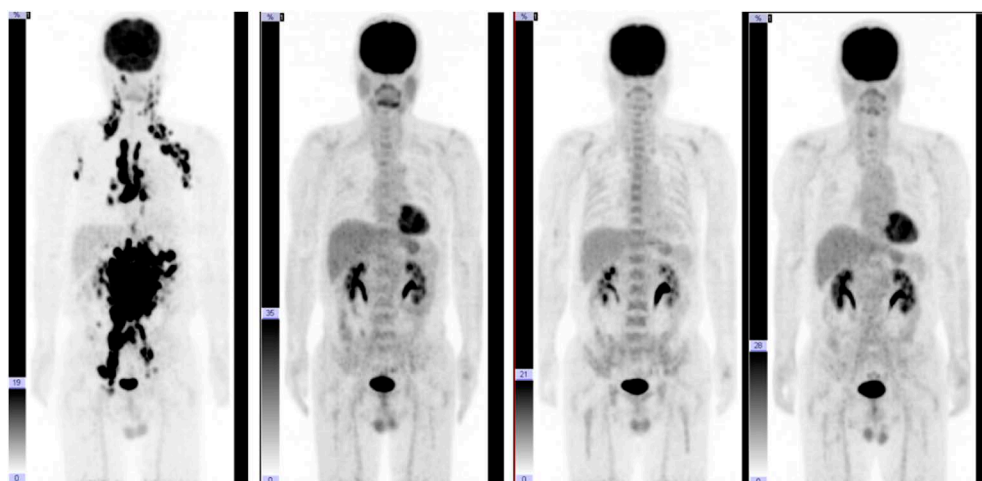


図4 悪性リンパ腫の症例
化学療法後の治療効果判定のモニタリングにFDG-PETは有効である。

で数値のみに頼るのは危険である。装置などをアップデートした際には、ファントム評価や臨床評価によって従来装置との違いを把握しておく必要がある。

さらにSUVmaxの限界について述べると、腫瘍領域内に含まれるボクセルの最大値のみを反映した指標であることから、活動性病変の広がりや治療後の残存活動性病変の程度を正確に把握することが難しい。そこで代謝腫瘍体積 (Metabolic Tumor Volume: MTV) が定量指標として使用されている。MTVはSUVmeanで定義される領域となるので、放射性薬剤が集積した体積で定義され病変全体で診断することが可能である。SUVmaxを用いた診断法に比べ治療効果判定と予後予測に有効であることが報告されている³³⁾。このような背景から最近の研究論文では、SUVmaxに加えてSUVpeakやMTVなどの新しい指標が使用されている。

PET診断と治療を組み合わせたセラノスティクスに関しては、 ^{177}Lu -PSMAなどがありPETイメージング用の ^{68}Ga と β 線を放出する治療用RIである ^{177}Lu とを組み合わせたRI標識PSMA (Prostate Specific Membrane Antigen) リガンドによる前立腺がんに対する研究が行われている^{34), 35)}。

9. 乳房専用PET装置による乳がん診断

乳房専用装置PET装置を利用した研究は主に欧米で行われている。乳がんの生存率は、T1b (0.5cm以上1.0cm未満) とT1c (1.0cm以上2.0cm未満) の間に有意差があり、死亡率を低下させるためには、1cm以下の直径を有する小さい病変を早期に特定することが極めて重要となる^{36)~38)}。

乳房専用PET装置は、微小病変検出のための研究開発が行われ1994年に初めて発表された。微小のシンチレータを採用することで高い空間分解能 (1.0mm~2.0mm) を

実現する。db-PETイメージングの描出能および定量性に関しては、全身用PETイメージングと比較して高いSUVが得られることが報告されている^{39), 40)}。

我々の評価においても全身用イメージングのグループと比較して約2.2倍高いSUVが得られた (図5)。局所進行乳がん患者では、治療戦略を個別化するために、腫瘍のサブタイプを評価するため生検が行われる^{41), 42)}。乳がんは、異なる生物学的特性を有するサブタイプからなっており薬物治療による反応性や予後が異なるためサブタイプの同定も重要である。Moscosoらは、db-PETの高分解能画像を用いることで特徴量を利用するテクスチャ分析が乳がんのサブタイプ同定に有効である可能性を報告している⁴³⁾。また、乳房専用PETイメージングは、病気の早期診断を可能にするだけでなく、治療に対する腫瘍の早期反応を決定することにおいても技術進歩しており今や治療を最適化するための重要な要素となる可能性がある。乳房専用PETイメージングでは、PET薬剤の集積量を定量可能であるため集積量を数値化しモニタリングすることでネオアジュバント療法 (術前薬物療法) の治療効果判定への利用が期待されている^{44), 45)}。

放射線治療への応用や今後の研究に関して

細胞の機能情報を反映するPET画像を放射線治療計画に利用する機会が増加している。これは、PET画像を使用する事で、標的描出精度の向上による局所制御率の改善を期待するものであり、その可能性はすでにいくつかの論文により報告されている^{46), 47)}。

放射線治療では、肉眼的腫瘍体積 (Gross Tumor Volume: GTV)、臨床標的体積 (Clinical Target Volume: CTV)、計画標的体積 (Planning Target Volume: PTV) などの輪郭描出に基づき治療計画が実施されるため、正確に病変の進展範囲を把握することが重要である。

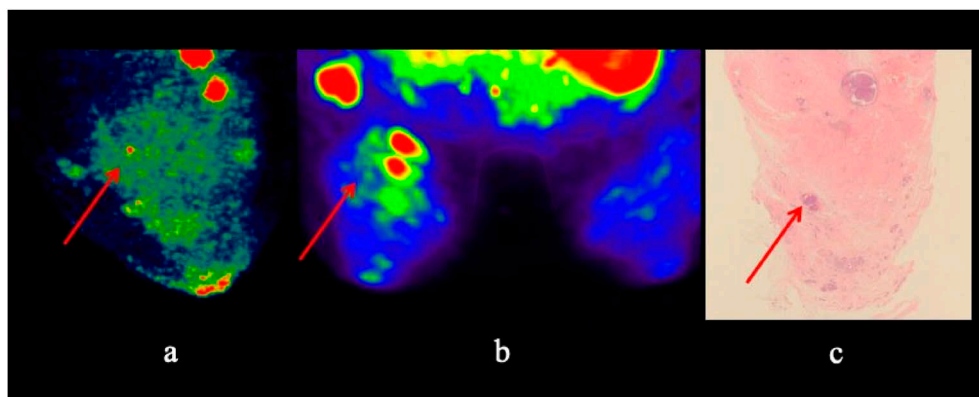


図5 乳がん症例における描出能の違い

症例は、DCIS (T2N0M0, ステージIIA) でありdb-PET画像(a), 全身用PET画像(b)およびHE染色標本(c)を示す。db-PET画像は、全身用PET画像と比較して腫瘍の形状をより詳細に視覚化し、娘結節まで描出することが可能。

放射線治療計画における輪郭描出においては、放射線治療医の個人差が指摘されているが、従来のCT画像を利用した形態情報のみに基づく輪郭描出と比較して、PET画像を用いることにより、形態情報へ機能情報を付加して評価できるため、個人差の収束が期待できる。Kajitaniらは、頭頸部がん症例における原発巣精査で、PET画像に基づくGTVの感度が96%であったのに対してCT画像に基づくGTVは81%であったと述べ、CT単独よりPETを併用したほうが望ましいと報告している⁴⁶⁾。また、対象15名のうち10名においてPET画像を利用したGTVは、CTのみのGTVより範囲が小さく、放射線治療医4名によるGTVの標準偏差は、優位に低かったと報告している。Zhengらの報告に関しても、非小細胞肺癌症例において、4名の放射線治療医による輪郭入力の変異を軽減するのにPET画像は有用であり、特に無気肺症例において、顕著であったと報告している⁴⁷⁾。

MTVを描出する方法は、大きく3つに大別されており①手動で描出する方法：現状のゴールドスタンダード、②SUVに閾値を設定した方法、③機械学習や深層学習を利用した方法である。SUVに閾値を設定した方法は、腫瘍の形状や画像再構成法のパラメータで変動するため診断目的に応じて最適な方法を選択する必要があり標準的計測法は存在しない。

我々もGTVやMTVの計測精度を向上させるため、これまでに定量値に閾値を用いる様々な方法の検証を行った。SUVの誤差を抑制したSUV_{peak}を用いた新しい方法を提案し描出精度向上の有効性を報告したが個々の病変毎に最適化することには限界もあった⁴⁸⁾。機械学習に関しては、Stefanoらが報告しており、頭頸部がん症例においてPET画像に機械学習を適用し自動描出したがPET画像のみでは、CT画像やMRI画像を用いた方法と比較して空間分解能が劣るため解剖学的情報が乏しいとの結果であった⁴⁹⁾。機械学習においても多施設からの異なる画像データを使用してトレーニングとテストをする必要が多くあり構築が困

難となる。対して、深層学習では、機械学習の主観的な特徴抽出・選択の代わりに、特徴を自動的に抽出可能であることが利点である。Huangらの報告では、頭頸部がん症例においてPET/CT画像を用いた自動描出を深層学習によって行い、これまでの報告と比較して高い精度で描出に成功した⁵⁰⁾。PubMedなどを参考にすると最近のPET研究に人工知能(Artificial Intelligence: AI)を利用した報告が増加しており特に深層学習による研究が多い。深層学習では正解とする教師データからトレーニングによって特徴量を自動的に作成する特性があるので閾値を用いた方法や機械学習に挙げたような問題を解決し、未知の因子にも対応することが可能かもしれない。深層学習を用いた研究が今後も多く行われていくことが予想される。

ま と め

本稿では、PETの特徴や腫瘍学分野におけるPET診断の役割などを解説した。PET画像は、分子生物学的情報を反映し診断・研究の目的に応じて評価方法は様々である。PET画像を取り扱う上で注意しなければならないのは、画像再構成パラメータなどによって画質は容易に変化することである。つまり画質が変わるということは、定量性が変わることであるのでPETイメージングの条件は、ファントム評価および臨床評価によって決めたら一定の条件で行っていく必要がある。SUVを用いた診断、不均一性などの構造解析を行うテクスチャ解析やAIを用いた機械学習・深層学習に適用するPET画像は再現性が大変重要である。さらに、定量性の変動に加えて核医学検査特有のノイズや生理的集積などに起因した画質への影響なども考慮して適切にPET画像を取り扱う必要がある。

参考文献

- 1) Brown RS, Leung JY, Kison PV, et al.: Glucose transporters and FDG uptake in untreated primary human non-small cell lung cancer. J. Nucl. Med. 40: 556–565, 1999

- 2) Kubota K: From tumor biology to clinical PET: A review of positron emission tomography (PET) in oncology. *Ann. Nucl. Med.* 15: 471–486, 2001
- 3) Son SH, Lee SW, Jeong SY, et al.: Whole-body metabolic tumor volume, as determined by (18)F-FDG PET/CT, as a prognostic factor of outcome for patients with breast cancer who have distant metastasis. *AJR Am. J. Roentgenol.* 205: 878–885, 2015
- 4) Teoh EJ, McGowan DR, Macpherson RE, et al.: Phantom and clinical evaluation of the bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm Q. Clear on an LYSO PET/CT system. *J. Nucl. Med.* 56: 1447–1452, 2015
- 5) Vercher-Conejero JL, Pelegrí-Martínez L, Lopez-Aznar D, et al.: Positron emission tomography in breast cancer. *Diagnostics (Basel)*. 5: 61–83, 2015
- 6) Moliner L, Gonzalez AJ, Soriano A, et al.: Design and evaluation of the MAMMI dedicated breast PET. *Med. Phys.* 39: 5393–5404, 2012
- 7) Teixeira SC, Rebollada JF, Koolen BB, et al.: Evaluation of a hanging-breast PET system for primary tumor visualization in patients with stage i–iii breast cancer: Comparison with standard PET/CT. *AJR Am. J. Roentgenol.* 206: 1307–1314, 2016
- 8) Yeung HW, Sanches A, Squire OD, et al.: Standardized uptake value in pediatric patients: An investigation to determine the optimum measurement parameter. *E. J. Nucl. Med.* 29: 61–66, 2002
- 9) Sugawara Y, Shulkin BL, Zasadny KR, et al.: Standardized uptake values in pediatric patients: Variations with patient characteristics and methods for correction. *J. Nucl. Med.* 41: 196, 2000
- 10) Wahl RL, Jacene H, Kasamon Y, et al.: From RECIST to PERCIST: Evolving considerations for PET response criteria in solid tumors. *J. Nucl. Med.* 50(Suppl 1): 122S–150S, 2009
- 11) Mitsumoto T, Kubota K, Kotaka K, et al.: Standardized uptake value lean body mass (SUVlbm) in the FDG imaging. *Jpn. J. Clin. Radiol.* 60: 797–804, 2015
- 12) Lecomte R: Novel detector technology for clinical PET. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 36(Suppl 1): S69–85, 2009
- 13) Boellaard R: Standards for PET image acquisition and quantitative data analysis. *J. Nucl. Med.* 50(Suppl 1): 11S–20S, 2009
- 14) Zimmermann PA, Houdu B, Césaire L, et al.: Revisiting detection of in-transit metastases in melanoma patients using digital (18)F-FDG PET/CT with small-voxel reconstruction. *Ann. Nucl. Med.* 35: 669–679, 2021
- 15) Surti S, Karp JS: Application of a generalized scan statistic model to evaluate TOF PET images. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 58: 99–104, 2011
- 16) Alessio AM, Stearns CW, Tong S, et al.: Application and evaluation of a measured spatially variant system model for PET image reconstruction. *IEEE Trans. Med. Imaging* 29: 938–949, 2010
- 17) Panin VY, Kehren F, Michel C, et al.: Fully 3-D PET reconstruction with system matrix derived from point source measurements. *IEEE Trans. Med. Imaging* 25: 907–921, 2006
- 18) Dey J, King MA: Theoretical and numerical study of MLEM and OSEM reconstruction algorithms for motion correction in emission tomography. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56: 2739–2749, 2009
- 19) Parra L, Barrett HH: List-mode likelihood: EM algorithm and image quality estimation demonstrated on 2-D PET. *IEEE Trans. Med. Imaging* 17: 228–235, 1998
- 20) Boellaard R, Krak NC, Hoekstra OS: Effects of noise, image resolution, and ROI definition on the accuracy of standard uptake values: A simulation study. *J. Nucl. Med.* 45: 1519–1527, 2004
- 21) Erdi YE, Nehmeh SA, Pan T, et al.: The CT motion quantitation of lung lesions and its impact on PET-measured SUVs. *J. Nucl. Med.* 45: 1287–1292, 2004
- 22) van Elmpt W, Hamill J, Jones J, et al.: Optimal gating compared to 3D and 4D PET reconstruction for characterization of lung tumours. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 38: 843–855, 2011
- 23) Mitsumoto T, Minamimoto R, Sunaoka F, et al.: The clinical utility of phase-based respiratory gated PET imaging based on visual feedback with a head-mounted display system. *JBr J. Radiol.* 92(1098): 20180233, 2019
- 24) Walker MD, Bradley KM, McGowan DR: Evaluation of principal component analysis-based data-driven respiratory gating for positron emission tomography. *Br J. Radiol.* 91(1085): 20170793, 2018
- 25) Minamimoto R, Mitsumoto T, Miyata Y, et al.: Evaluation of a new motion correction algorithm in PET/CT: Combining the entire acquired PET data to create a single three-dimensional motion-corrected PET/CT image. *Nucl. Med. Commun.* 37: 162–170, 2016
- 26) Hatazawa J, Ishiwata K, Itoh M, et al.: Quantitative evaluation of L-[methyl-c-11] methionine uptake in tumor using positron emission tomography. *J. Nucl. Med.* 30: 1809–1813, 1989
- 27) Hara T: 11C-choline and 2-deoxy-2-[18F] fluoro-D-glucose in tumor imaging with positron emission tomography. *Mol. Imaging Biol.* 4: 267–273, 2002
- 28) Francis DL, Visvikis D, Costa DC, et al.: Potential impact of [18F] 3'-deoxy-3'-fluorothymidine versus [18F] fluoro-2-deoxy-D-glucose in positron emission tomography for colorectal cancer. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 30: 988–994, 2003
- 29) Toyohara J, Nariai T, Sakata M, et al.: Whole-body distribution and brain tumor imaging with (11)C-4DST: A pilot study. *J. Nucl. Med.* 52: 1322–1328, 2011
- 30) Hugonnet F, Fournier L, Medioni J, et al.: Metastatic renal cell carcinoma: Relationship between initial metastasis hypoxia, change after 1 month's sunitinib, and therapeutic response: An 18F-fluoromisonidazole PET/CT study. *J. Nucl. Med.* 52: 1048–1055, 2011
- 31) Cheson BD, Fisher RI, Barrington SF, et al.: Recommendations for initial evaluation, staging, and response assessment of Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma: The Lugano classification. *J. Clin. Oncol.* 32: 3059–3068, 2014
- 32) Radford J, Illidge T, Counsell N, et al.: Results of a trial of PET-directed therapy for early-stage Hodgkin's lymphoma. *N. Engl. J. Med.* 372: 1598–1607, 2015
- 33) Hyun SH, Ahn HK, Kim H, et al.: Volume-based assessment by (18)F-FDG PET/CT predicts survival in patients with stage III non-small-cell lung cancer. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 41: 50–58, 2014
- 34) Kratochwil C, Giesel FL, Stefanova M, et al.: PSMA-targeted radionuclide therapy of metastatic castration-resistant prostate cancer with 177Lu-Labeled PSMA-617. *2J Nucl. Med.* 57: 1170–1176, 2016
- 35) Rahbar K, Afshar-Oromieh A, Jadvar H, et al.: PSMA theranostics: Current status and future directions. *Mol.*

- Imaging 17:1536012118776068, 2018
- 36) Ichizawa N, Fukutomi T, Iwamoto E, et al.: Long-term results of T1a, T1b and T1c invasive breast carcinomas in Japanese women: Validation of the UICC T1 subgroup classification. *Jpn. J. Clin. Oncol.* 32: 108–109, 2002
 - 37) Hogan MP, Goldman DA, Dashevsky B, et al.: Comparison of 18F-FDG PET/CT for systemic staging of newly diagnosed invasive lobular carcinoma versus invasive ductal carcinoma. *J. Nucl. Med.* 56: 1674–1680, 2015
 - 38) Hellingman D, Teixeira SC, Donswijk ML, et al.: A novel semi-robotized device for high-precision 18F-FDG-guided breast cancer biopsy. *Rev. Esp. Med. Nucl. Imagen Mol.* 36: 158–165, 2017
 - 39) Nishimatsu K, Nakamoto Y, Miyake KK, et al.: Higher breast cancer conspicuity on dbPET compared to WB-PET/CT. *Eur. J. Radiol.* 90: 138–145, 2017
 - 40) Mitsumoto T, Uno K, Irie M, et al.: The potential of dedicated breast PET with a ring-type scanner: Basic evaluation and clinical experience. *Radioisotopes* 67: 309–319, 2018
 - 41) Hellingman D, Teixeira SC, Donswijk ML, et al.: A novel semi-robotized device for high-precision 18F-FDG-guided breast cancer biopsy. *Rev. Esp. Med. Nucl. Imagen Mol.* 36: 158–165, 2017
 - 42) Hsu DF, Freese DL, Levin CS: Breast-dedicated radionuclide imaging systems. *J. Nucl. Med.* 57(Suppl 1): 40S–45S, 2016
 - 43) Moscoso A, Ruibal Á, Domínguez-Prado I, et al.: Texture analysis of high-resolution dedicated breast 18 F-FDG PET images correlates with immunohistochemical factors and subtype of breast cancer. *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging* 45: 196–206, 2018
 - 44) Rousseau C, Devillers A, Sagan C, et al.: Monitoring of early response to neoadjuvant chemotherapy in stage II and III breast cancer by [18F] fluorodeoxyglucose positron emission tomography. *J. Clin. Oncol.* 24: 5366–5372, 2006
 - 45) Soldevilla-Gallardo I, Medina-Ornelas SS, Villarreal-Garza C, et al.: Usefulness of positron emission mammography in the evaluation of response to neoadjuvant chemotherapy in patients with breast cancer. *Am. J. Nucl. Med. Mol. Imaging.* 8: 341–350, 2018
 - 46) Kajitani C, Asakawa I, Uto F, et al.: Efficacy of FDG-PET for defining gross tumor volume of head and neck cancer. *J. Radiat. Res.* 54: 671–678, 2013
 - 47) Zheng Y, Sun X, Wang J, et al.: FDG-PET/CT imaging for tumor staging and definition of tumor volumes in radiation treatment planning in non-small cell lung cancer. *Oncol. Lett.* 7: 1015–1020, 2014
 - 48) Koyama K, Mitsumoto T, Shiraishi T, et al.: Verification of the tumor volume delineation method using a fixed threshold of peak standardized uptake value. *Radiol. Phys. Technol.* 10: 311–320, 2017
 - 49) Stefano A, Vitabile S, Russo G, et al.: An enhanced random walk algorithm for delineation of head and neck cancers in PET studies. *Med. Biol. Eng. Comput.* 55: 897–908, 2017
 - 50) Huang B, Chen Z, Wu PM, et al.: Fully automated delineation of gross tumor volume for head and neck cancer on PET-CT using deep learning: A dual-center study. *Contrast. Media. Mol. Imaging* 2018: 8923028, 2018

解説

医学物理若手の会の紹介および若手を対象とした 本邦の医学物理教育・医学物理士養成システムに関するアンケート調査： 2021年版

伊良皆 拓^{*1,2}, 金城優志^{1,3}, 田中創大^{1,4}, 恒田雅人^{1,5}, 平島英明^{1,2}

¹ 医学物理若手の会

² 京都大学医学部附属病院 放射線治療科

³ 琉球大学大学院 医学研究科 放射線診断治療学講座

⁴ 量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所 物理工学部

⁵ 千葉大学大学院 医学研究院 MR画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座

Introduction of Young Researchers' Association of Medical Physics and Questionnaire Survey on Medical Physics Education and Medical Physics Training System in Japan for Young Researchers in 2021

Hiraku IRAMINA^{*1,2}, Masashi KINJO^{1,3}, Sodai TANAKA^{1,4}, Masato TSUNEDA^{1,5}, Hideaki HIRASHIMA^{1,2}

¹ Young Researchers' Association of Medical Physics

² Department of Radiation Oncology and Image-Applied Therapy, Graduate School of Medicine, Kyoto University

³ Department of Radiology, Graduate School of Medical Science, University of the Ryukyus

⁴ Quantum Medical Science Directorate, National Institutes for Quantum Science and Technology

⁵ Graduate School of Medicine, Chiba University

Details of Young Researchers' Association of Medical Physics (YRAMP) was introduced. In addition, several questionnaire surveys on medical physics education (MPE) or medical physicist training system (MPTS) in Japan have been conducted, none have targeted the current status and issues of MPE and MPTS. The purpose of this study was to investigate those from the perspective of researchers and students under 35-year-old (y.o.). The questionnaire survey was conducted between 14th September to 14th October 2021, for 112 members of the Young Researchers' Association of Medical Physics via Google Forms. The questionnaire was in two parts: MPE (Part1) and MPTS (Part2). Three subparts were constructed in Part1: Classroom lecture, Clinical training, Education course accredited by Japanese Board of Medical Physicist Qualification. Out of a total of 126 questions, 38 were mandatory to be answered. No personal information was collected. Ninety-three members (83.0%) were answered. The age structure of the respondents was as follows: 18–21, 22–26, 27–30, and 31–35 y.o.=5.4%, 36.6%, 39.8%, and 18.2%. Of the respondents, 74.2% and 11.8% answered that they first heard of “medical physics” or “medical physicist” when they were undergraduate students and in high school or younger, respectively. In Classroom lecture, 61.3%, 17.2%, and 21.5% of the respondents answered that they were “satisfied” or “moderately satisfied”, “dissatisfied” or “moderately dissatisfied”, and “Not sure” with the current MPE, respectively. In Clinical training, Education course, and MPTS, 58.1%, 21.5%, and 20.4% of the respondents answered that they were “satisfied” or “moderately satisfied”, “dissatisfied” or “moderately dissatisfied”, and “Not sure”, respectively. In both MPE and MPTS, approximately 88% and 51% of the respondents answered that “holding lectures and study sessions for high school and undergraduate students” and “utilizing YouTube” would be useful in promoting MPE and MPTS in Japan, respectively. The results of the questionnaire survey will provide useful data for MPE and MPTS in Japan.

Keywords: questionnaire survey, medical physics education, medical physicist training system, clinical training, young investigators

1. はじめに

2006年にがん対策の一層の充実を図るため、「がん対策基本法」が制定された。その一環として、がん医療専門職人材育成の必要性が論じられた。2007年度には、文部科学省により「がんプロフェッショナル養成プラン（第1期がんプロ）」が開始された。これは全国18拠点94大学

が参加し、特に不足している人材（薬物治療、放射線治療、緩和医療）の養成を目的とした。各地で大学が連携して教育体制を構築し、多数の人材養成を達成し高い評価を得ている。2012年度には「がんプロフェッショナル養成基盤推進プラン（第2期がんプロ）」が開始され、全国15拠点100大学が参加した。第2期がんプロでは、教育改革に研究者養成、地域連携も加えた幅広い人材養成を目的とし、

* 連絡著者 (corresponding author) 京都大学医学部附属病院 放射線治療科 [〒606-8507 京都府京都市左京区聖護院川原町 54]
Department of Radiation Oncology and Image-Applied Therapy, Graduate School of Medicine, Kyoto University, 54 Shogoin-Kawaharacho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8507, Japan
E-mail: iramina@kuhp.kyoto-u.ac.jp

基盤構築（講座整備，教員配置）に重点が置かれた。2017年度からは「多様な新ニーズに対応する『がん専門医療人材（がんプロフェッショナル）』養成プラン（第3期がんプロ）」が開始され，全国11拠点81大学が参加しており，ゲノム医療や希少がんおよび小児がんに対応できる医療人材，ライフステージに応じたがん対策を推進する人材の養成を目的としている。

放射線治療における医療人材においては，第1期がんプロから育成が行われてきた。特に，医学物理士においてもその重要性が認識され，32の大学で医学物理士養成のためのカリキュラムが確立された。2012年からは，医学物理士認定機構 (Japanese Board for Medical Physicist Qualification, JBMP) により，医学物理学教育のための修士課程，博士課程，臨床研修課程の認定を開始した（認定医学物理教育コース，以下，教育コース）。2022年時点で修士課程25コース，博士課程13コース，臨床研修課程2コースが認定され，本邦の医学物理教育および医学物理士養成に大きく寄与している¹⁾。Kadoya et al. は2015年および2017年に，本邦における医学物理教育および医学物理士養成システムの教育成果，キャリアパスに関する調査を行い，本邦の医学物理教育および医学物理士養成システムが医学物理士養成に寄与しているという報告を行った^{2), 3)}。しかし，実際に各大学の学部課程，修士課程，博士課程における具体的な教育方法や内容，医学物理臨床研修の方法や内容，医学物理士養成システムの内容，それらに対する満足度を調査した報告はない。また，Kadoya et al. の報告から5年が経過し，本邦の医学物理教育および医学物理士養成システムの現状は変化している可能性がある。一方で，2017年には全国各地で医学物理分野において研究を行う若手や，医学物理に興味のある若手の交流の場を目的として，「医学物理若手の会」が有志により設立された⁴⁾。

そこで本稿では，まず医学物理若手の会について紹介する。また，医学物理若手の会のネットワークを利用し，35歳以下の研究者・学生を対象として，本邦の医学物理教育および医学物理士養成システムの現状と満足度を調査した結果を報告する。

2. 医学物理若手の会について

2.1 医学物理若手の会設立の経緯

医学物理若手の会は，全国各地において医学物理分野で研究を行う若手や，医学物理に興味のある若手の交流の場を目的として2017年に設立された。毎年4月に行われる日本医学物理学会学術大会に併せて，若手同士横のつながりを持つことを目的に交流会を開催したのがきっかけである。その後，本格的に会の設立に着手し，2018年4月の第1回医学物理若手の会ミーティングにおいて，会長・副会長・運営委員5名（会長，副会長含む）が選出された。

さらに，会に参加したい人は若手であるため，なるべく費用が発生しないように運営していく旨をそのミーティングの参加者全員で共有した。それにしたがって，入会費や年会費等は一切かからないこととした。

2.2 医学物理若手の会の基本統計

会員になるための条件は次の3つである：①35歳以下であること，②研究に意欲のある方，③Googleアカウントを持っていること。①については，博士号取得後10年未満を見越して設定した。②については，「医学物理学」が放射線医学の高精度化に資する学問であることから設定した。③については，当会がGoogleの無料サービスを活用することで，上述の通り一切特別な費用を徴収しない運営形態としているためである。特に，「医学物理若手の会会員限定ポータルサイト」は，無料のGoogle sitesを利用しており，高品質な情報を提供している。

2022年1月現在，当会には117名の会員が所属している。図1(a)に会員の所属（地方別）を示す。関東地方が最も多く，次いで関西地方，中部地方となる。この分布は，文部科学省の第3期がんプロをおおよそ反映していると考えられる。がんプロの育成事業の中に「医学物理士」の養成も行う大学院があるが，四国地方の大学は医学物理士養成に参画しておらず，医学物理士の認知度が低いため，当会においても会員がいないと考えられる。図1(b)に会員の年齢構成を示す。若手の会の名の通り，20代の会員がバランスよく在籍している。図1(c)に会員の系統を示す。医学物理士認定機構が認定する医学物理士には，診療放射線技師免許を持たない理工系学部出身の方（理工系）と，免許を持つ放射線技術系学部出身の方（放射線技術系），医師免許を持つ方や上記に属さない方（その他）の3種類存在することに鑑み，当会でもグループ分けを行った。それぞれの割合は，理工系：放射線技術系：その他=25.6%：69.2%：5.2%である。図1(d)に，会員の社会人種別・学年構成を示す。特筆すべきは，学部課程学生が14名在籍していることである。学部課程から医学物理教育を行っている大学は存在しないため，全国的には学部生の医学物理の認知度はまだまだ低い状況である。しかし，当会会員からの紹介などで当会に参加いただいている方も多く，次世代の医学物理を担うであろう学生たちに参加いただいている。図1(e)に，教育コースに所属したことがあるかまたは現在所属しているかどうかの分類を示す。教育コースを経験している会員は33名で，経験者目線から各コースの特徴を情報共有することができる。図1(f)に，会員の取得資格（複数回答可）を示す。図1(c)で放射線技術系が70%近くを占めていることを反映し，診療放射線技師免許を持っている会員は60.7%である。医学物理士として認定されている会員は35.9%である。したがって，当会は「医学物理士」教育にも資すると考える。図1(g)に，会員の国内

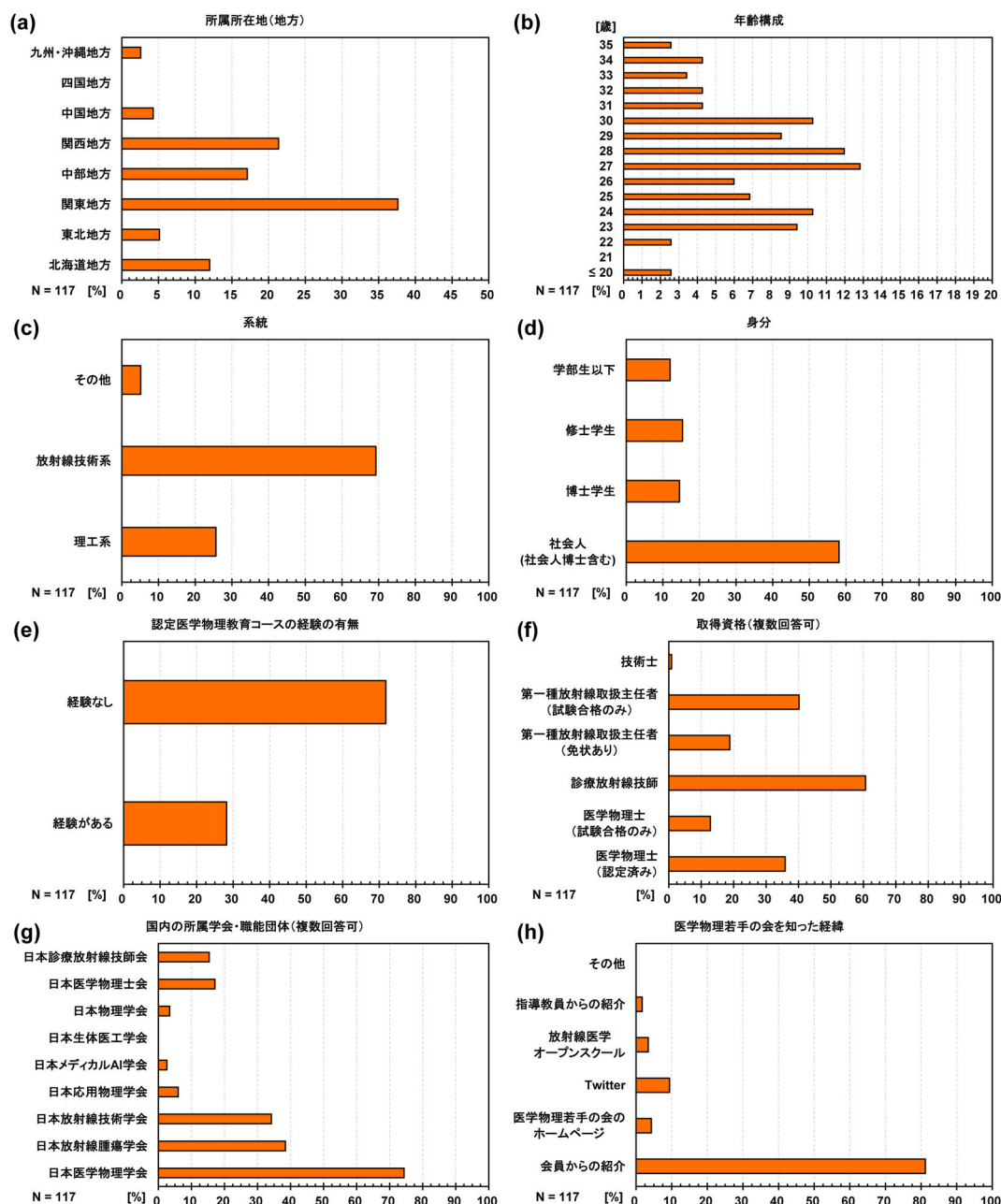


図1 医学物理若手の会の基本統計 (2022年1月時点)

の学会・職能団体の所属状況を示す。74.4%は医学物理学会に所属している。一方で、15.4%は学会などに所属していないため、関連する学会からの医学物理に関する情報をすぐに受け取ることができない。当会はそのような方たちへの情報発信が可能である。図1(h)に、当会を知った経緯を示す。ほとんどの方が、会員からの紹介となっている。当会の一般公開用コンテンツは、ホームページ(<http://igakubutsuri-wakate.kenkyuukai.jp>) および Twitter (https://twitter.com/YRAMP_MedPhys) を利用している。「若手の会」と銘打っている通り、今後は若手の方々が利用するコンテンツをリサーチし、情報発信していくことが重要であると考え。

2.3 医学物理教育における医学物理若手の会の役割

当会は、医学物理を志す若手に必要と思われる情報を会員限定ポータルサイトにて公開している。①認定医学物理教育コース一覧およびそれぞれの大学院の入試申込締切日・入試日、②医学物理系の学会・研究会スケジュール、③医学物理士認定試験情報、④医学物理関係資料(公開されている国内・海外のガイドライン)、⑤医学物理関係学術論文サイト、⑥当会の基本統計、⑦会員の学位論文や発表スライド、⑧会員名簿(公開可とした情報のみ)。学部生のうち、とくに理工系の方は教員からの情報提供が少なく、自身で調べるほかない。しかし、当会が提供している情報を活用すれば、スムーズに医学物理の世界に挑戦でき

と考える。

3. アンケート調査について

医学物理若手の会に所属する会員112名（2021年10月

14日時点）を対象とし、メーリングリストを利用しアンケートを依頼した。回答有効期間は2021年9月14日から10月14日までとした。アンケートは二部構成とした。第一部は「医学物理教育」に関する質問群で、座学編・臨床研修編・

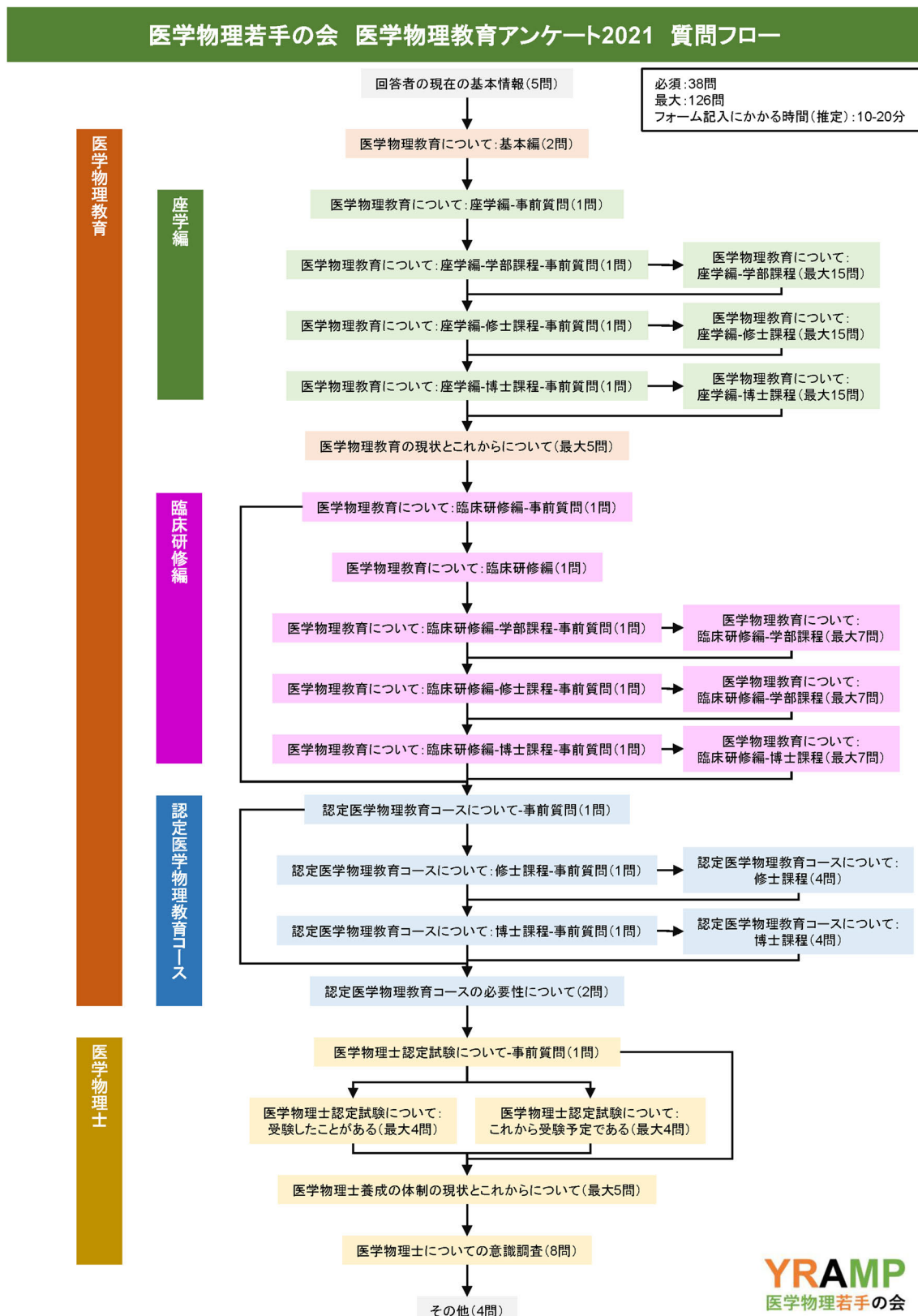


図2 回答候補者に送付した本アンケートの質問フロー

認定医学物理教育コースと細分化した。第二部は「医学物理士」に関する質問群とした。アンケートはGoogleフォームを利用したWeb回答形式とした。本アンケートは匿名とし、医学物理若手の会の名簿と照会すると個人が特定可能となる、所属の都道府県などの情報は収集していない。図2に、実際に回答候補者に送付した本アンケートの質問フローを示す。全126問の内、回答必須の質問は38問とした。臨床研修の経験の有無や認定医学物理教育コースへの所属の有無等で、回答が必要な質問数が変化する。

4. アンケート調査結果

4.1 回答者の基本情報

回答有効期間中に、93名（医学物理若手の会会員の内83.0%）から回答を得た。図3に、回答者の(a)年齢構成、(b)学生や社会人などの身分、(c)最終学歴、(d)取得資格（複数回答可）を示す。22～26歳および27～30歳が76.3%（93名中71名）を占め、18～21歳も5.4%（93名中5名）が回

答した。社会人が59.1%を占めるが、修士・博士大学院生が29.0%、学部生は11.8%だった。診療放射線技師免許取得者は63.4%、認定医学物理士は35.5%だった。自身を理工学系だと答えた回答者は26.9%、放射線技術系だと答えた回答者は72.0%だった。

図4に、回答者が「医学物理」や「医学物理士」を知った(a)時期、(b)経緯を示す。74.2%の回答者が大学生の時に知り、11.8%は高校生以前に「医学物理」や「医学物理士」を知っていた。知った経緯の上位は、「高校や大学の授業」が39.8%、「指導教員からの紹介」が24.7%、「インターネットでたまたま見た」が12.9%だった。

4.2 医学物理教育

医学物理教育として座学と臨床研修に分け、また学部課程・修士課程・博士課程におけるそれぞれについてアンケートを行った。

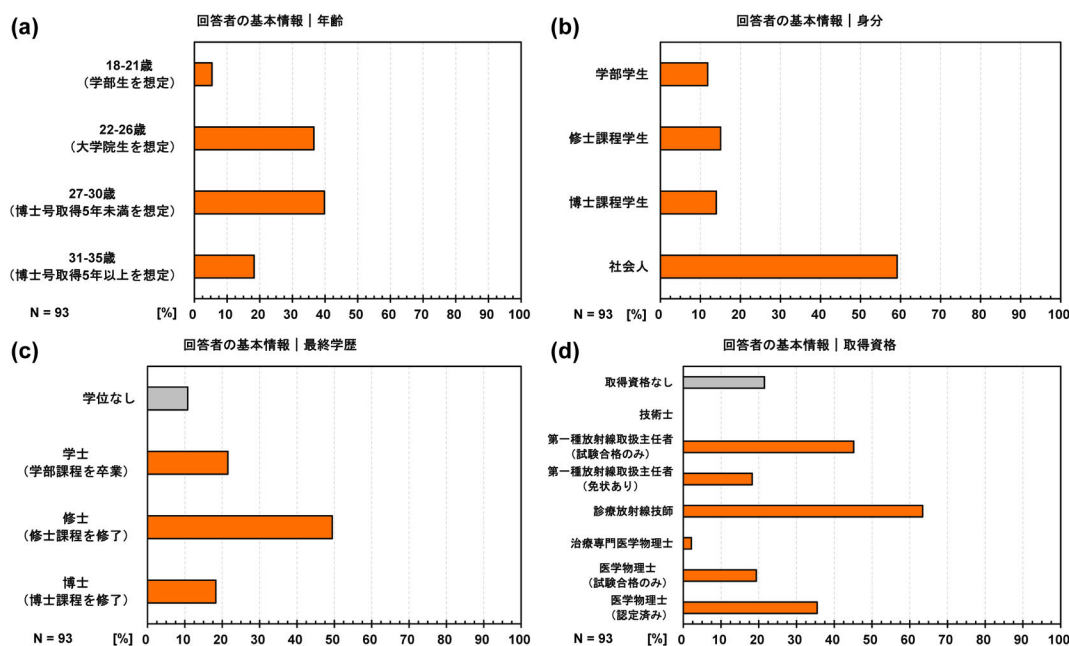


図3 回答者の基本情報
(a) 年齢構成, (b) 身分, (c) 最終学歴, (d) 取得資格（複数回答可）

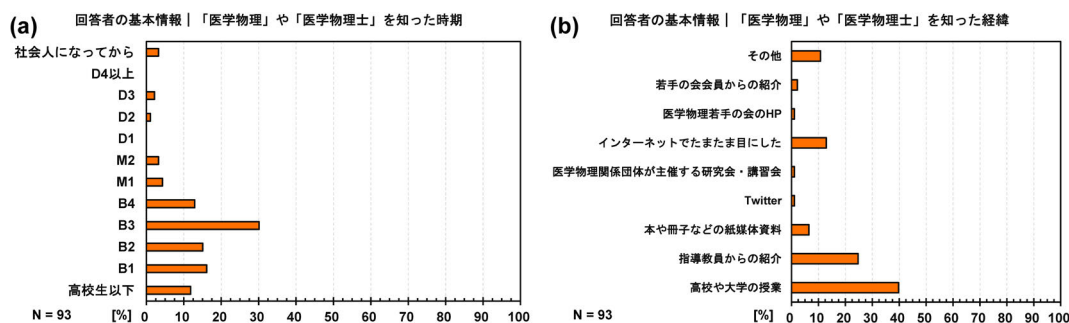


図4 回答者の基本情報
「医学物理」や「医学物理士」を知った (a) 時期, (b) 経緯 (B: 学部, M: 修士, D: 博士)

4.2.1 医学物理教育：座学編

医学物理士認定機構の医学物理士認定試験出題基準に従い、「物理工学系科目」と「医学生物系科目」と分類しアンケートを行った。物理工学系科目については、さらに力学や電磁気学などの基礎物理科目を「物理工学系科目（基礎系科目）」、放射線治療学など放射線に関する科目を「物理工学系科目（放射線系科目）」と細分化しアンケートを行った。

図5に、各科目を初めて学んだ時期を示す。各科目ともに学部課程で初めて受けた割合が多かった。図6に、物理

工学系科目（基礎系科目）の教育内容の満足度（b）学部課程、（d）修士課程、（f）博士課程

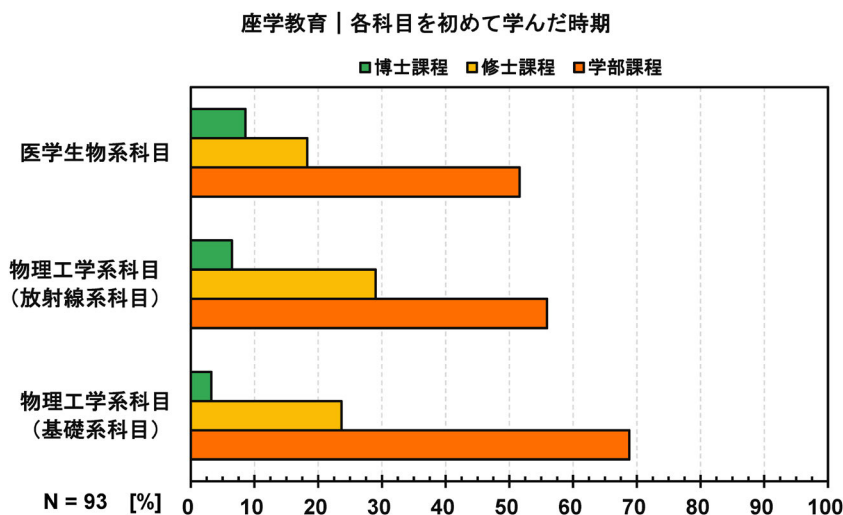


図5 座学教育：各科目を初めて学んだ時期

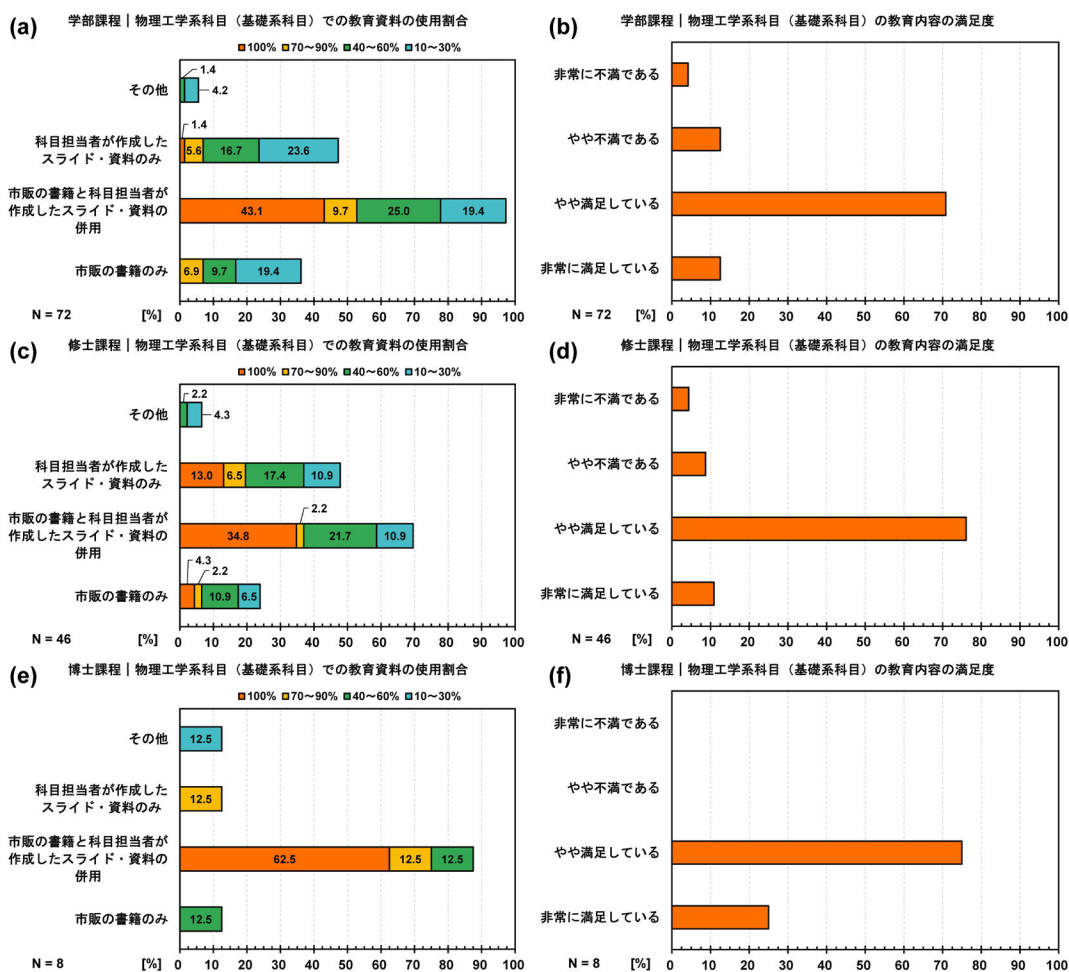


図6 物理工学系科目（基礎系科目）での教育資料の使用割合 (a) 学部課程, (c) 修士課程, (e) 博士課程
物理工学系科目（基礎系科目）の教育内容の満足度 (b) 学部課程, (d) 修士課程, (f) 博士課程

工学系科目（基礎系科目）での教育資料の使用割合：(a) 学部課程，(c) 修士課程，(e) 博士課程を示す。教育資料として「市販の教科書のみ」，「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」，科目担当者が作成したスライド・資料のみ」，「その他」と分類し，物理工学系科目（基礎系科目）に含まれる全科目で上記の分類が100%となるように回答を求めた。各課程で最も使用割合が多かった教育資料は，「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」であり，学部課程で97.6%，修士課程で69.6%，博士課程で87.5%だった。内訳としては，使用割合が100%＝全ての物理工学系科目（基礎系科目）で「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」である，が最も多かった。また，教育に対する満足度：(b) 学部課程，(d) 修士課程，(f) 博士課程を示す。「やや満足している」，「非常に満足している」は学部課程で83.3%，修士課程で87.0%，博士課程で100%だった。「やや不満である」，「非常に不満である」とした理由として，「医学と物理のつながりが全くなかった」，「単位のための履修となった」，「放射線技術系出身者を想定した系統的な講義の構成となっていない」など，機械的に理学部や工学

部の授業を履修したことが見受けられる。特に学部課程において，上記の評価が多かった。不満点への改善策として，「医学物理コース内で理工学系の講義を完結すること」，「放射線技術系出身者向けの講義体系を確立すること」などが挙げられた。

図7に，物理工学系科目（放射線系科目）での教育資料の使用割合：(a) 学部課程，(c) 修士課程，(e) 博士課程を示す。各課程で最も使用割合が多かった教育資料は，「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」であり，学部課程で90.8%，修士課程で71.4%，博士課程で90.9%だった。内訳としては，使用割合が100%＝全ての物理工学系科目（放射線系科目）で「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」である，が最も多かった。また，教育に対する満足度：(b) 学部課程，(d) 修士課程，(f) 博士課程を示す。「やや満足している」，「非常に満足している」は学部課程で93.8%，修士課程で95.9%，博士課程で90.9%だった。「やや不満である」，「非常に不満である」とした理由として，「現場との乖離が見られる」，「市販書籍の情報が古い」，「教員の講義資料が診療放射線技師国家試験対策に特化した内容が多い」などが

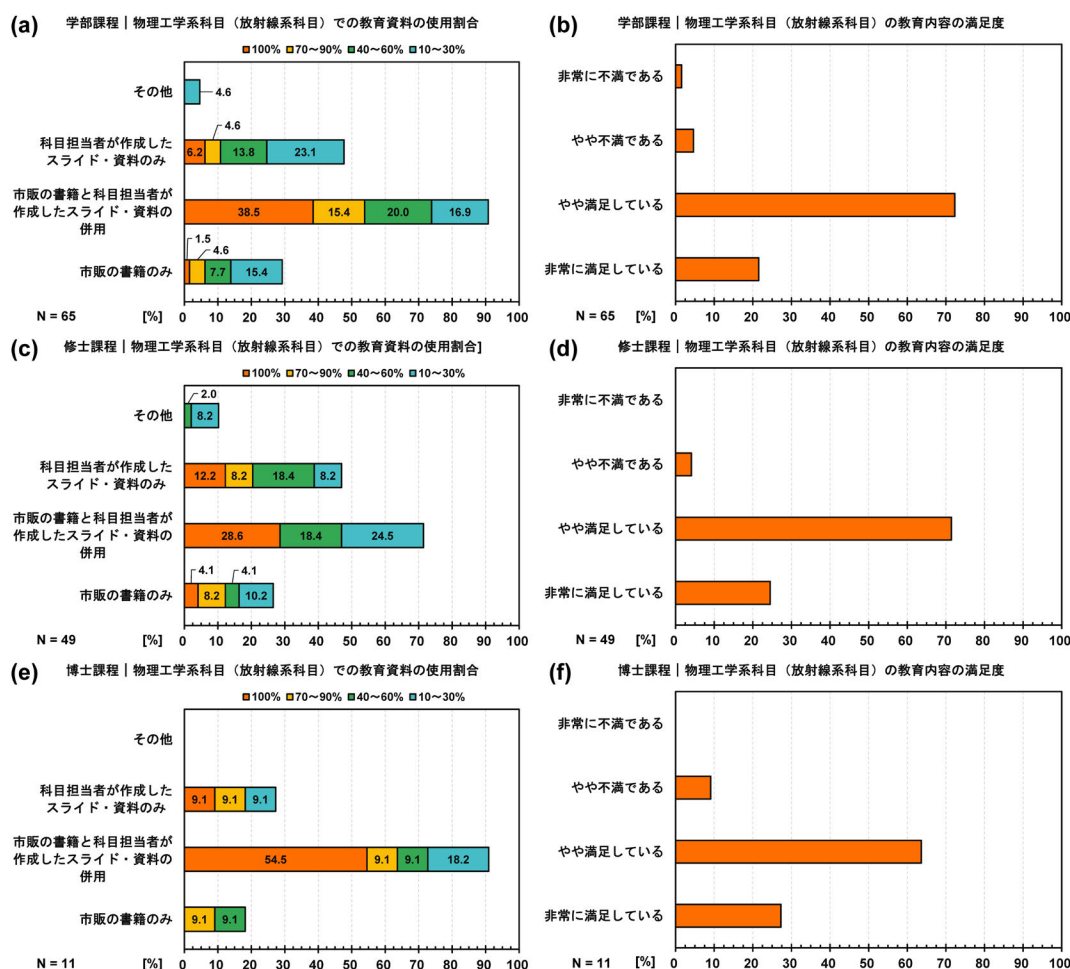


図7 物理工学系科目（放射線系科目）での教育資料の使用割合 (a) 学部課程，(c) 修士課程，(e) 博士課程
物理工学系科目（放射線系科目）の教育内容の満足度 (b) 学部課程，(d) 修士課程，(f) 博士課程

挙げられた。不満な点への改善策として、「現場で働く現役の医学物理士・診療放射線技師がオムニバス形式で講義を行う」、「市販書籍の改訂を頻繁に行う」などが挙げられた。

図8に、医学生物系科目での教育資料の使用割合：(a)学部課程、(c)修士課程、(e)博士課程を示す。各課程で最も使用割合が多かった教育資料は、「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」であり、学部課程で94.9%、修士課程で77.8%、博士課程で58.3%だった。内訳としては、使用割合が100%＝全ての物理工学系科目（放射線系科目）で「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」である、が最も多かった。博士課程では、「科目担当者が作成したスライド・資料のみ」も58.3%だった。また、教育に対する満足度：(b)学部課程、(d)修士課程、(f)博士課程を示す。「やや満足している」、「非常に満足している」は学部課程で98.3%、修士課程で94.4%、博士課程で83.3%だった。「やや不満である」、「非常に不満である」とした理由として、「選択できる授業が少ない」が挙げられた。

図9に、(a)現状の日本の医学物理教育（座学）に満足

しているか、および(b)医学物理をより普及させるための方法、の結果を示す。「やや満足している」、「非常に満足している」は61.3%、「やや不満である」、「非常に不満である」は17.2%、「分からない」は21.5%だった。「やや不満である」、「非常に不満である」とした点として、「教科書などの体系が整っていない」、「地域や年代により教育が一貫しておらず、物理士そのものの像がぼんやりしすぎている」、「理工系大学では放射線物理学や放射線治療について学べる機会が非常に少なく、医学物理士を知る機会も少ない」、「診療放射線技師ベースの教育プログラムだと感じた」、「医学や生物の授業が少なく理工系出身者にとってはハードルが高い」、「教育シラバスは形式上であり、実情はほぼ自習となっていた」などが挙げられた。解決策としては、「理工系大学でも医学物理関連の授業を開講し、この分野についてのセミナーを理工系学部生に受講してもらう」、「医学物理について、世間での認知が高まると状況が変わってくると思う」などが挙げられた。

医学物理をより普及させるための方法で、「最も有用」とされたものは、「高校生や学部生向けの講演会や勉強会を開催する」、「一般向けの公開講座を増やす」、「YouTube

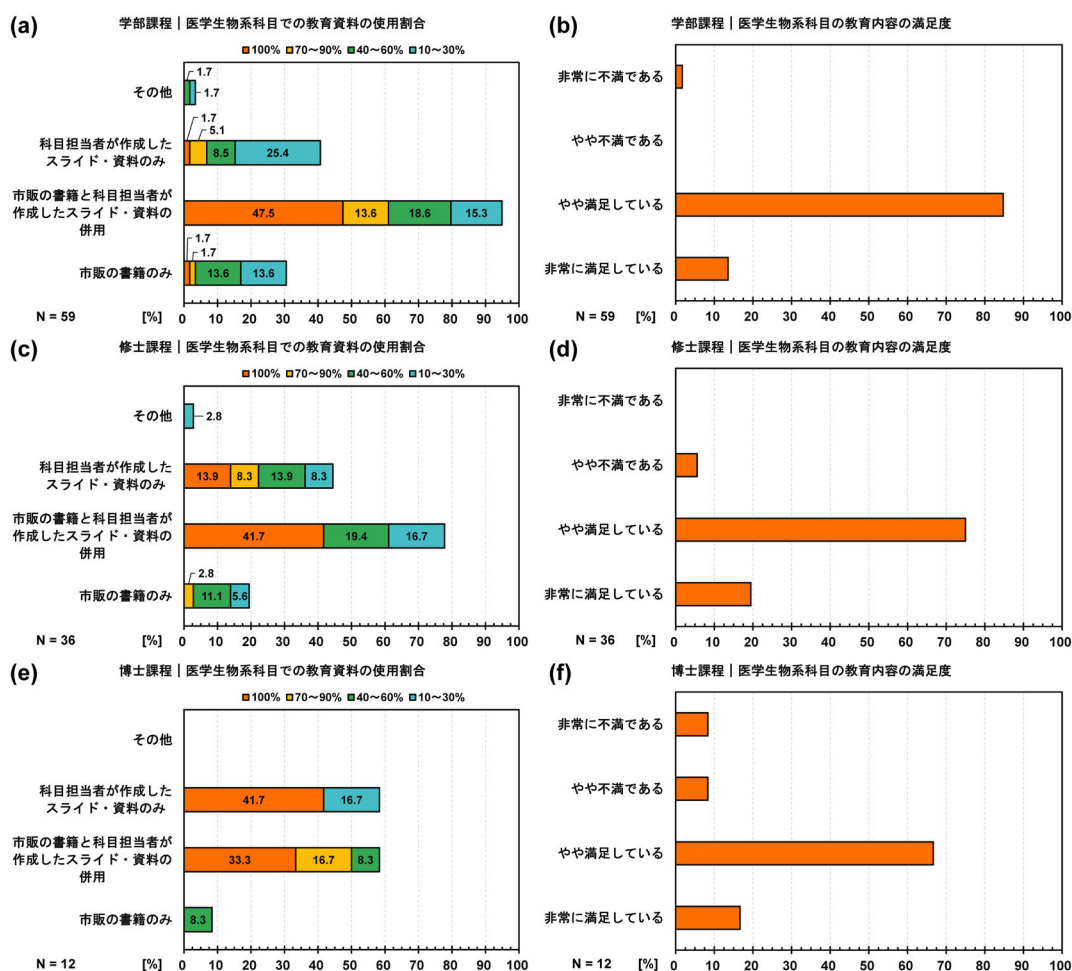


図8 医学生物系科目での教育資料の使用割合 (a)学部課程、(c)修士課程、(e)博士課程
医学生物系科目の教育内容の満足度 (b)学部課程、(d)修士課程、(f)博士課程

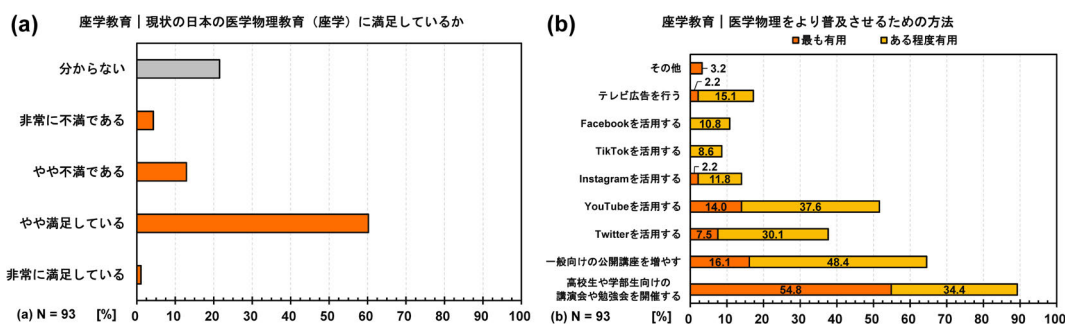


図9 座学教育

(a)現状の日本の医学物理教育（座学）に満足しているか, (b)医学物理をより普及させるための方法

を活用する」の順で多かった。「ある程度有用（複数回答可）」だとされたものは、「一般向けの公開講座を増やす」、「YouTubeを活用する」、「高校生や学部生向けの講演会や勉強会を開催する」の順で多かった。

4.2.2 医学物理教育：臨床研修編

大学・大学院教育課程における医学物理の臨床研修に関するアンケートを行った。臨床研修とは、大学病院や一般病院、がんセンターなどの放射線医学の現場で、医学物理業務を行うこと、と定義した。診療放射線技師養成課程などにおける、授業の一環としての実験・実習は含んでいない。回答者（93名）のうち、4.3%（4名）、25.8%（24名）、15.1%（14名）が、それぞれ学部、修士、博士課程で臨床研修を受けたと回答した。臨床研修期間（時間数ではない）、研修形式（座学 [医学物理業務について会議室などで説明を受けること]、オン・ザ・ジョブトレーニング (OJT) [実際の業務を担当者と一緒に行いながら説明を受けること、または自身も実際に行うこと]、見学 [担当者からの説明はなく、ただ見ているだけ]、複数回答可)、OJTでの研修内容、OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合、満足度、に分けてアンケートを行った。OJTの研修内容は、放射線治療計画から照射までを11項目に分けた。OJTでの研修内容と、OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合の回答の総数は同じとなる。

図10に、学部課程で臨床研修を受けた回答者（4名）のアンケート結果を示す。臨床研修期間は、「半年未満」が100%だった（図10(a)）。回答者の内、50%（2名）がOJTを受けていた（図10(b)）。11項目の研修内容のうち、全ての項目で最低1名は研修を受けており、50%程度の資料が用意されていたという回答があった（図10(c), (d)）。ここで、「OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合」というのは、①～⑫の各研修項目において、項目内に含まれる様々な研修全てに説明資料が用意されていた場合を100%としている。満足度では、「やや不満である」とした理由として、「ただ見ているだけだった」という回答があった（図10(e)）。

図11に、修士課程で臨床研修を受けた回答者（24名）のアンケート結果を示す。臨床研修期間は、「半年未満」が29.2%、「半年以上1年未満」が37.5%、「1年以上」が33.3%だった（図11(a)）。回答者の内、79.2%がOJTを受けていた（図11(b)）。受けた研修内容は、「⑧立案されたプランの品質保証(QA)の実施」が84.2%、「⑫装置 (TPS, リニアック問わず) の品質管理(QC)」が84.2%、「⑦立案されたプランのプランチェック」が78.9%の順で多かった（図11(c)）。最も少なかったのは、「④標的のコンツールリング (GTV, CTV, PTV問わず)」で15.8%だった。用意されていた説明資料の割合は、全ての研修内容で「0%」および「10～30%」が多かった（図11(d)）。説明資料が「100%」用意されていた割合が多い研修は、「⑧立案されたプランの品質保証(QA)の実施」で15.8%、「⑫装置 (TPS, リニアック問わず) の品質管理(QC)」で10.5%だった。満足度では、「やや満足している」、「非常に満足している」が91.7%だった（図11(e)）。

図12に、博士課程で臨床研修を受けた回答者（14名）のアンケート結果を示す。臨床研修期間は、「半年未満」が7.1%、「半年以上1年未満」が21.4%、「1年以上」が71.4%だった（図12(a)）。回答者の内、92.9%がOJTを受けていた（図12(b)）。受けた研修内容は、「⑥強度変調放射線治療(IMRT)プランの治療計画」が92.3%、「⑧立案されたプランの品質保証(QA)の実施」が92.3%、「⑩症例検討会への参加」が84.6%の順で多かった（図12(c)）。最も少なかったのは、「④標的のコンツールリング (GTV, CTV, PTV問わず)」で30.8%だった。用意されていた説明資料の割合は、修士課程と比較して、「⑤強度変調放射線治療(IMRT)以外のプランの治療計画」、「⑥強度変調放射線治療(IMRT)プランの治療計画」、「⑦立案されたプランのプランチェック」、「⑧立案されたプランの品質保証(QA)の実施」、「⑪装置 (TPS, リニアック問わず) のコミッションニング」、「⑫装置 (TPS, リニアック問わず) の品質管理(QC)」で「40～60%」が多くなっていた（図12(d)）。満足度では、「やや満足している」、「非常に満足している」が92.9%だった（図12(e)）。

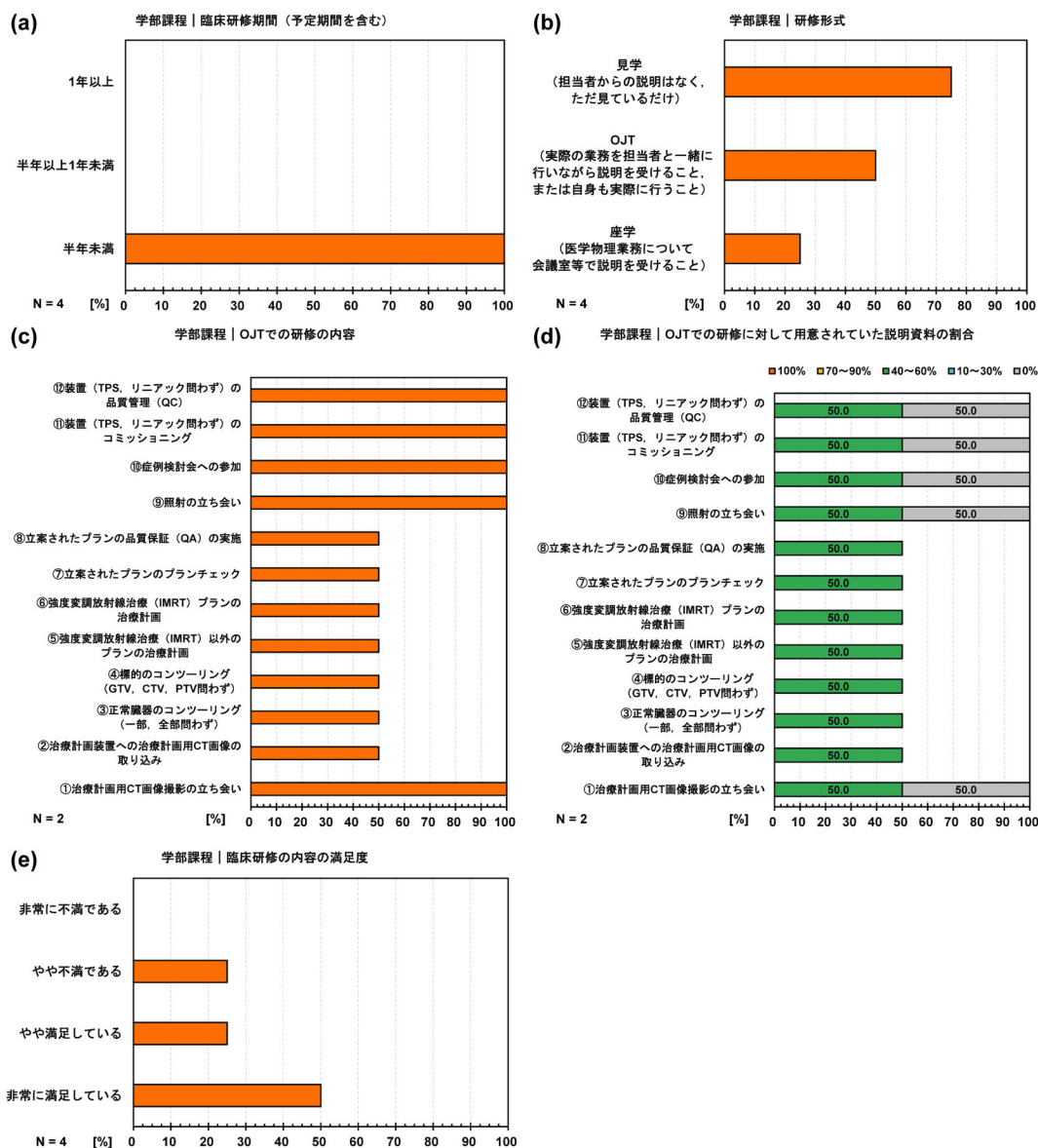


図10 臨床研修-学部課程

(a) 臨床研修期間, (b) 研修形式, (c) OJTでの研修の内容, (d) OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合, (e) 臨床研修の内容の満足度

4.3 認定医学物理教育コース

教育コースについてアンケートを行った。回答者 (93名) のうち, 54名が現在・過去問わず教育コースに在籍しており, そのうち74.1% (40名), 7.4% (4名), 18.5% (10名) が, それぞれ修士課程のみ, 博士課程のみ, 修士および博士課程にて教育コースに在籍していた。医学物理業務の臨床研修を担当する教員数, 医学物理業務の臨床研修を担当する教員のうち, 実際に直接教育を受けた教員数, 医学物理業務の臨床研修を担当する教員のうち, 理工学系の学位を取得している教員数, 医学物理士認定試験への対策に分けてアンケートを行った。

図13に, 修士課程で教育コースに在籍していた回答者 (50名) のアンケート結果を示す。医学物理業務の臨床研修を担当する教員数は, 「2~3名」が48.0%, 「4~5名」

が24.0%, 「1名」が20.0%だった (図13(a))。医学物理業務の臨床研修を担当する教員のうち, 実際に直接教育を受けた教員数を, 医学物理業務の臨床研修を担当する教員数で分けた結果を示す (図13(b))。ほとんどの回答者が「全員から教育を受けた」としているが, 「2~3名」および「4~5名」の一部, 「6~7名」については, 一部の教員からは教育を受けなかったと回答した。医学物理業務の臨床研修を担当する教員のうち, 理工学系の学位を取得している教員数は, 医学物理業務の臨床研修を担当する教員数が多いほど割合が大きくなった (図13(c))。医学物理士認定試験への対策については, 多くの回答者が「認定試験対策の授業や指導」, 「認定試験対策講習会への援助があった」と回答した (図13(d))。一方, 「授業や指導は特になかった」とした回答者は, 担当教員が「1名」で63.6%, 「2~3名」

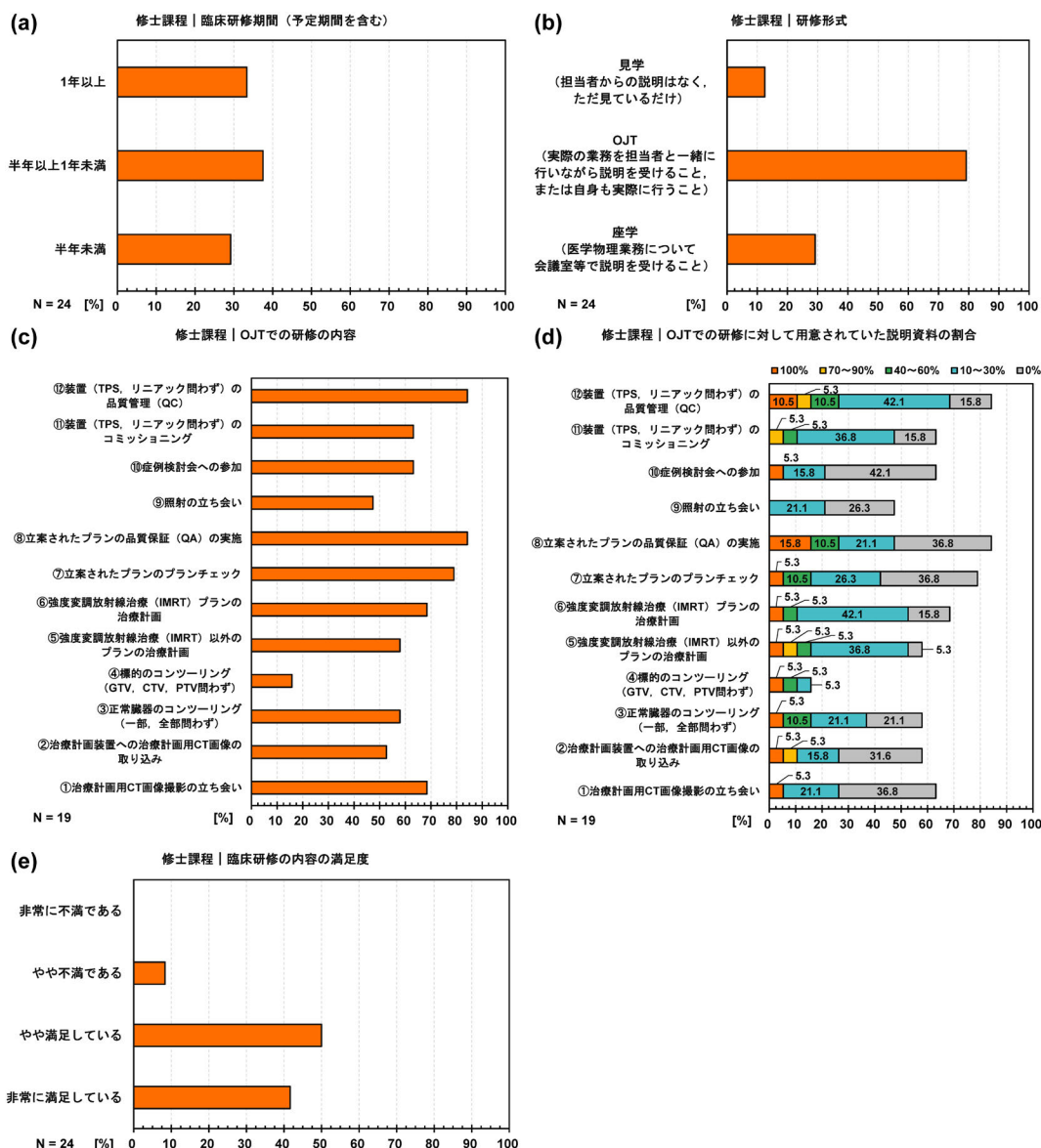


図11 臨床研修-修士課程

(a) 臨床研修期間, (b) 研修形式, (c) OJTでの研修の内容, (d) OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合, (e) 臨床研修の内容の満足度

で32.1%, 「4~5名」で37.5%だった。

図14に、博士課程で教育コースに在籍していた回答者 (14名) のアンケート結果を示す。医学物理業務の臨床研修を担当する教員数は、「4~5名」が42.9%, 「2~3名」が21.4%, 「1名」が21.4%だった (図14(a))。医学物理業務の臨床研修を担当する教員の内、実際に直接教育を受けた教員数を、医学物理業務の臨床研修を担当する教員数で分けた結果を示す (図14(b))。ほとんどの回答者が「全員から教育を受けた」としているが、「2~3名」および「4~5名」の一部、「6~7名」については、一部の教員からは教育を受けなかったと回答した。医学物理業務の臨床研修を担当する教員の内、理工学系の学位を取得している教員数は、「4~5名」いても0%である場合が33.3%だった (図14(c))。医学物理士認定試験への対策については、

「認定試験対策の授業や指導」はなく、「授業や指導は特になかった」とした回答者が多かった (図14(d))。

図15(a)に、認定医学物理士教育コースが医学物理士養成に寄与していると思うか、について、教育コースの経験の有無で分けた結果を示す。「やや寄与していると思う」、「大きく寄与していると思う」は74.2%, 「あまり寄与していないと思う」、「まったく寄与していないと思う」は9.7%, 「分からない」は16.1%だった。「やや寄与していると思う」および「大きく寄与していると思う」の回答者のうち、認定コースを経験していない回答者は24.8%であり、一定の評価が得られた。図15(b)に、認定医学物理士教育コースへの進学を勧めるか、について、教育コースの経験の有無で分けた結果を示す。「勧める」は67.7%, 「勧めない」は6.5%, 「分からない」は25.8%だった。認定コー

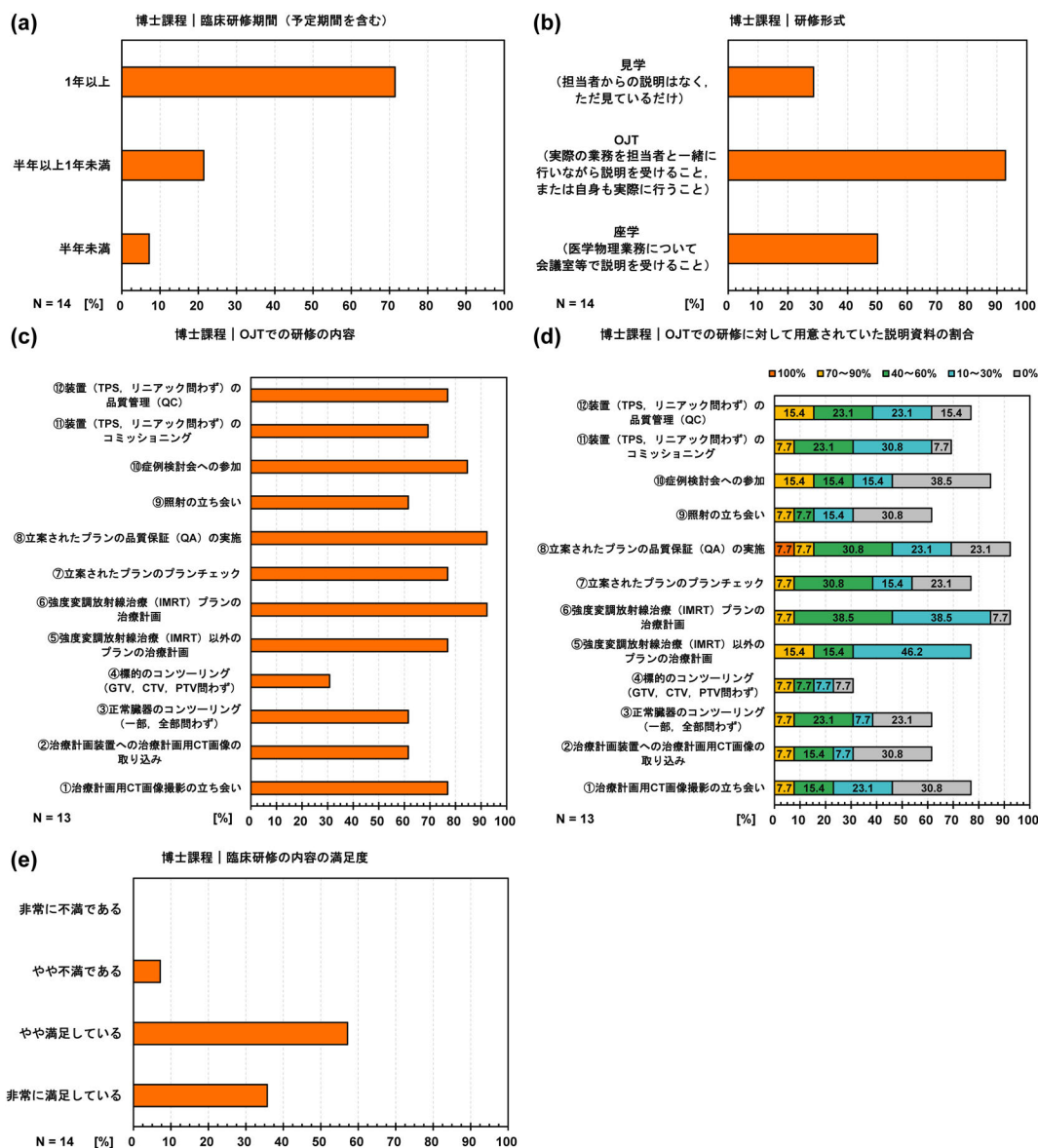


図12 臨床研修-博士課程

(a) 臨床研修期間, (b) 研修形式, (c) OJTでの研修の内容, (d) OJTでの研修に対して用意されていた説明資料の割合, (e) 臨床研修の内容の満足度

ス経験者は46.2%が「勧める」と回答している。

4.4 医学物理士認定試験

医学物理士認定機構が主催する医学物理士認定試験に関して、回答者 (93名) のうち、68.8%が「受験したことがある」、25.8%が「これから受験予定である」、5.4%が「受験する気はない」と回答した。「受験する気はない」という回答者を除き、どのような試験対策が最も効果的だと思うか、試験対策に有用なツール (一部、複数回答可)、についてアンケートを行った。

図16(a)に、どのような試験対策が最も効果的だと思うか、の結果を示す。受験経験者、受験予定者合わせて75.0%が、「まず過去問を解き、解きながらわからないところを随時調べていく」が最も効果的だと回答した。図

16(b)に、試験対策に有用なツール (一部、複数回答可)、の結果を示す。受験経験者は、「公開されている過去問」(47.7%), 「過去問解説サイト」(19.3%), 「認定試験対策講習会」(13.6%)の順で、「最も有用」または「ある程度有用 (複数回答可)」と回答した。受験予定者は、「医学物理教科書シリーズ」(45.4%), 「公開されている過去問」(39.7%), 「過去問解説サイト」(34.0%)の順で、「最も有用」または「ある程度有用」と回答した。受験経験者または受験予定者が「最も有用」だと回答したツールは、それぞれ「公開されている過去問」(34.1%)または「医学物理教科書シリーズ」(40.9%)であり、違いが見られた。

4.5 医学物理士養成システム

本邦の医学物理士養成システムについて、満足度、医学

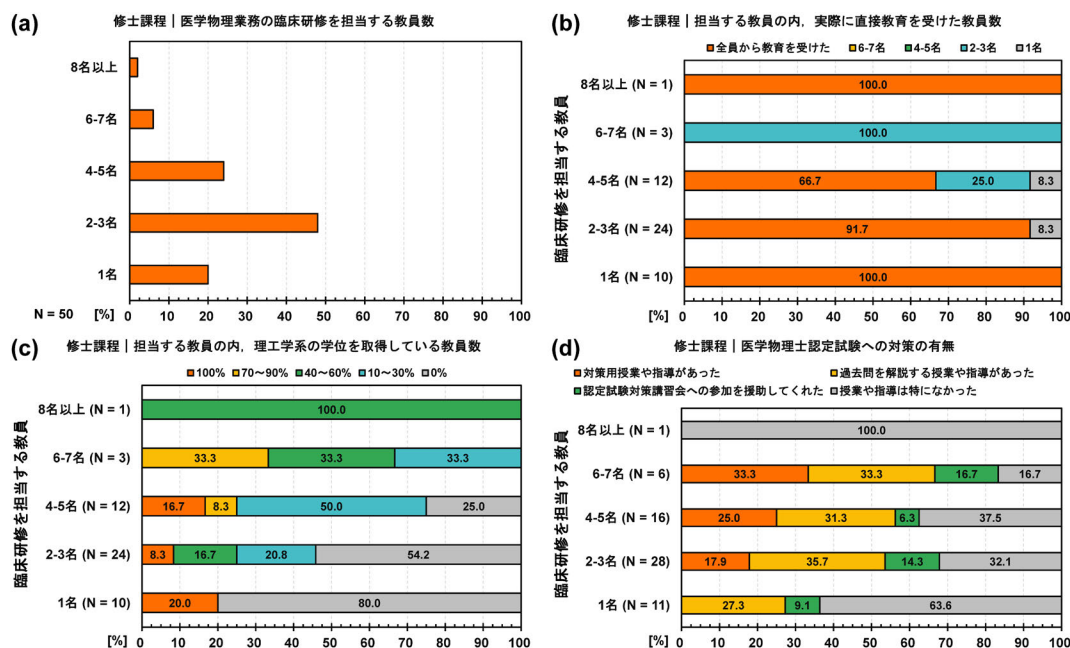


図13 認定医学物理教育コース-修士課程

(a) 医学物理業務の臨床研修を担当する教員数, (b)(a)の担当する教員の内、実際に直接教育を受けた教員数, (c)(a)の担当する教員の内、理工学系の学位を取得している教員数, (d) 医学物理士認定試験への対策の有無

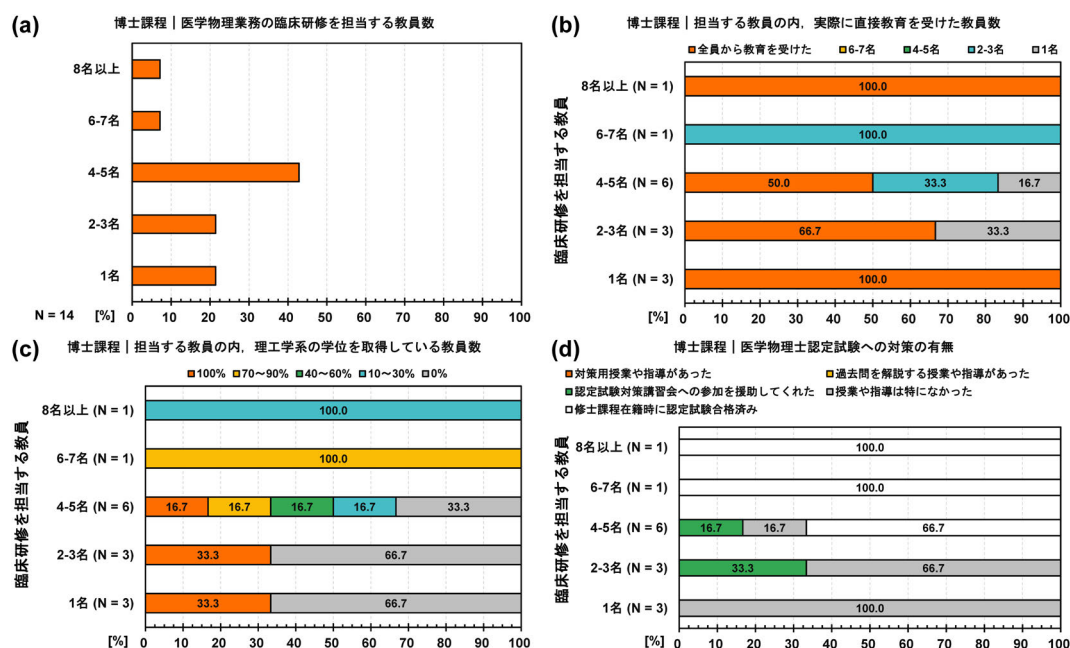


図14 認定医学物理教育コース-博士課程

(a) 医学物理業務の臨床研修を担当する教員数, (b)(a)の担当する教員の内、実際に直接教育を受けた教員数, (c)(a)の担当する教員の内、理工学系の学位を取得している教員数, (d) 医学物理士認定試験への対策の有無

物理士をより普及させるための方法, についてのアンケートを行った。

図17(a)に、現状の日本の体制への満足度, についての結果を示す。「やや満足している」、「非常に満足している」は58.1%, 「やや不満である」、「非常に不満である」は21.5%, 「分からない」は20.5%だった。図9(a)の座学教育の満足度と同様, 「やや不満である」、「非常に不満であ

る」が約20%だった。「やや不満である」、「非常に不満である」とした点として, 「教育コース間で臨床研修の格差がある」, 「レジデントコースを増やすべきである」, 「試験対策講習会の受講料が高額である」, 「教育コース以外の学校の試験に対する授業などが少ない」, 「臨床業務を指導できるスタッフが不足している」, 「講習会を探しづらい」, 「情報が纏まっておらず, 学会ホームページがわかりづら

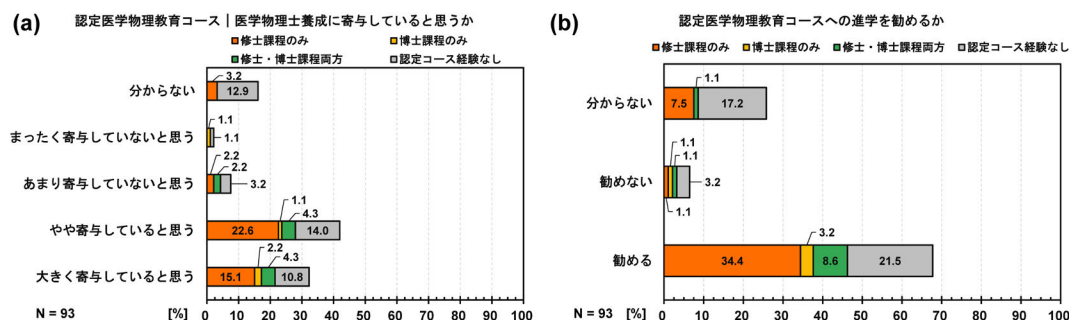


図15 認定医学物理教育コース

(a) 医学物理士養成に寄与していると思うか, (b) 認定医学物理教育コースへの進学を勧めるか

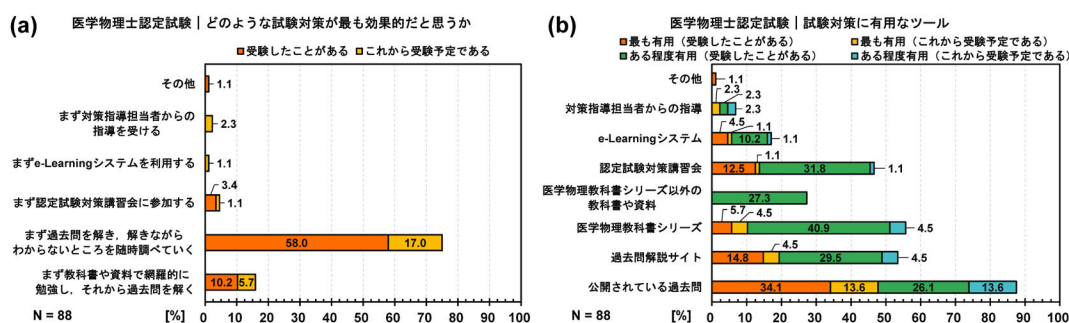


図16 医学物理士認定試験

(a) どのような試験対策が最も効果的だと思うか, (b) 試験対策に有用なツール

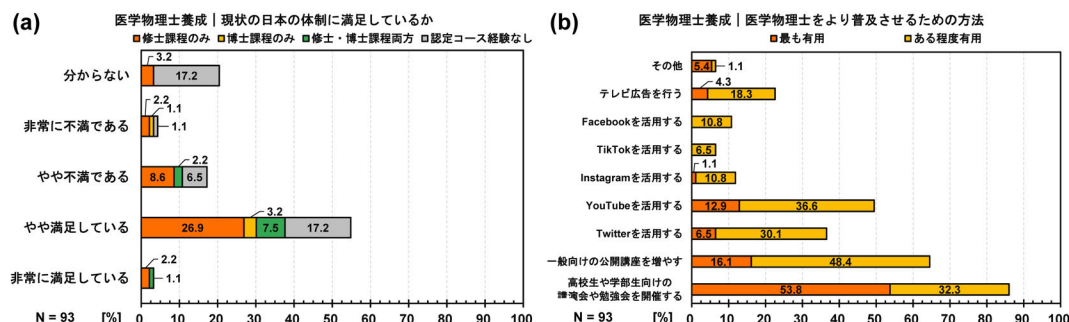


図17 医学物理士養成

(a) 現状の日本の体制に満足しているか, (b) 医学物理士をより普及させるための方法

い」などが挙げられた。解決策としては、「教育コース間の教育内容を共有する場を設ける」、「教育コースの新規認定・更新認定の要件に、臨床研修の実態を含めて審査を行う」、「試験対策講習会の受講料の見直し」、「医学物理士のポジションの安定（国家資格化等）」、「養成コース以外の学校の試験対策授業を増やす」、「臨床業務を指導する専任スタッフの拡充」などが挙げられた。

図17(b)に、医学物理士をより普及させるための方法、についての結果を示す。「最も有用」だとされたものは、「高校生や学部生向けの講演会や勉強会を開催する」、「一般向けの公開講座を増やす」、「YouTubeを活用する」の順で多かった。「ある程度有用（複数回答可）」だとされたものは、「一般向けの公開講座を増やす」、「YouTubeを活用する」、「高校生や学部生向けの講演会や勉強会を開催する」

る」の順で多かった。これは、図9(b)の医学物理をより普及させるための方法の結果と同様である。

4.6 医学物理士の役割

93名の回答者が医学物理士に関して、医学物理士の給与、放射線腫瘍医や診療放射線技師との業務の違いについて、アンケートを行った。

図18(a)に、医学物理士についての質問事項の結果を示す。「医学物理士は国家資格ではないことを知っていたか?」については、100%が「知っていた」と回答した。「がん診療連携拠点病院等の指定要件見直しに関する報告書（平成30年7月31日）」において、医師以外に配置すべき医療従事者として「医学物理士」が挙げられていることを知っていたか?については、66.7%が「知っていた」と

回答した。「医学物理士として働いている方の中に、診療放射線技師業務と兼務している場合もある、ということを知っていたか？」については、95.7%が「知っていた」と回答した。回答者が医学物理を志す若手であるため、割合が大きくなったと考えられる。

図18(b)に、同年代の診療放射線技師と比較した場合の医学物理士の給与、についての結果を示す。「とても高いと思う」は0%、「やや高いと思う」は24.7%、「変わらないと思う」は49.5%、「やや低いと思う」は19.4%、「とても低いと思う」は6.5%だった。

放射線腫瘍医や診療放射線技師と比較して、図18(c)医学物理士が行う割合が50%より大きい、(d)医学物理士が行う割合が同等、(e)放射線腫瘍医と比較して医学物理士が行う割合が50%未満、(f)診療放射線技師と比較して医学物理士が行う割合が50%未満、と思う業務の結果を示す。医学物理士が行う割合が50%より大きいと思う業務について、回答率が50%を超えるものは「⑥強度変調放射線治療(IMRT)プランの治療計画」、「⑦立案されたプランのプランチェック」、「⑧立案されたプランの品質保証(QA)

の実施」、「⑩装置(TPS, リニアック問わず)のコミッショニング」、「⑪装置(TPS, リニアック問わず)の品質管理(QC)」、「⑫医学物理に関する研究」、「⑬医学物理士の教育」だった。放射線腫瘍医と比較して医学物理士が行う割合が50%未満と思う業務について、回答率が50%を超えるものは「④標的のコンツリーング(GTV, CTV, PTV問わず)だった。診療放射線技師と比較して医学物理士が行う割合が50%未満と思う業務について、回答率が50%を超えるものは「①治療計画用CT画像撮影」、「⑨照射業務(患者呼び入れ, セットアップ, 照射)」だった。

4.7 医学物理を志す若手の交流および利用しているSNSやネットサービスについて

大学間の学生同士の交流の機会を増やすべきか、という質問に対し、94.6%が「増やすべきだと思う」と回答した。交流会を設ける方法として、学術大会と併催するか独立させるか、形式は対面かオンラインか、に分けてアンケートを行った。図19(a)に、学生同士の交流方法、についての結果を示す。74.2%が「対面形式」が良いと回答した。学

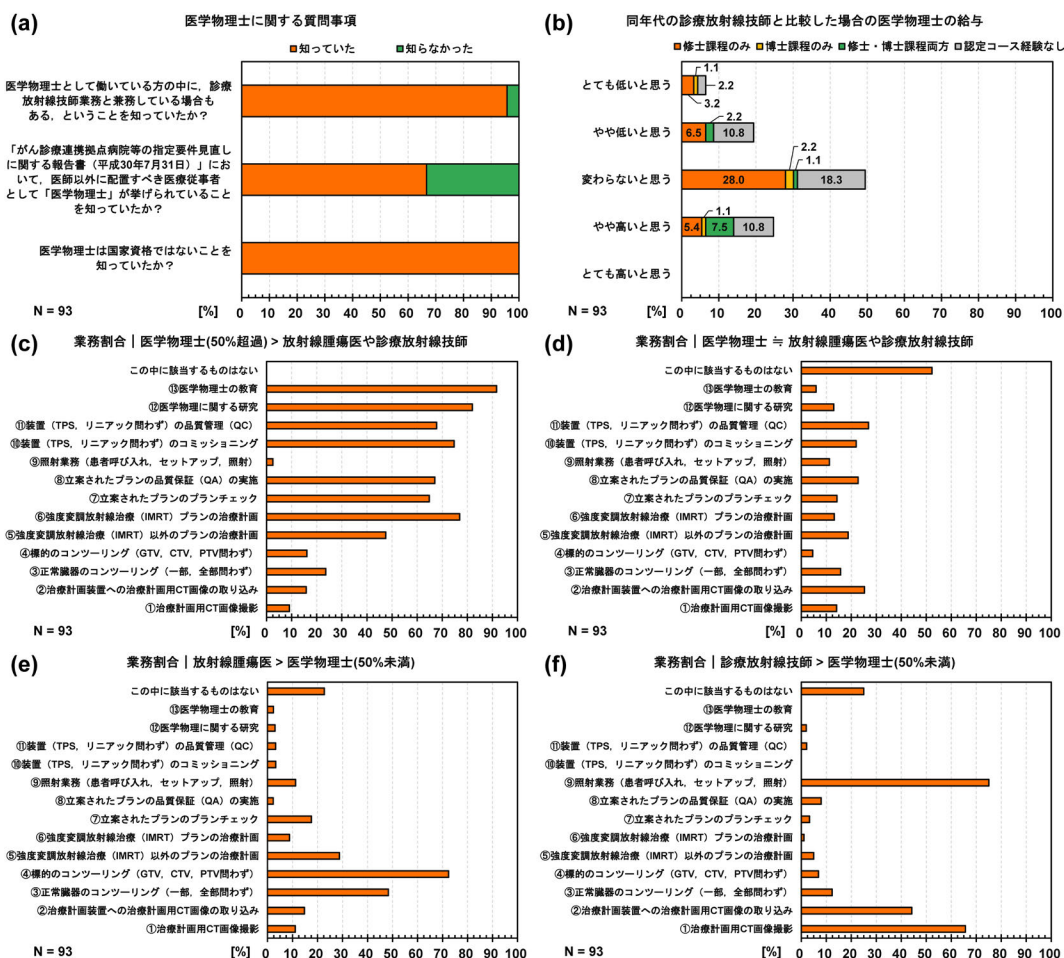


図18 医学物理士に関する質問 (a)医学物理士に関する質問事項, (b)同年代に診療放射線技師と比較した場合の医学物理士の給与, 医学物理士の業務割合 (c)放射線腫瘍医や診療放射線技師と比較して医学物理士が行う割合が50%超過であるもの, (d)放射線腫瘍医や診療放射線技師と比較して医学物理士が行う割合が同等であるもの, (e)放射線腫瘍医, または(f)診療放射線技師と比較して医学物理士が行う割合が50%未満であるもの。

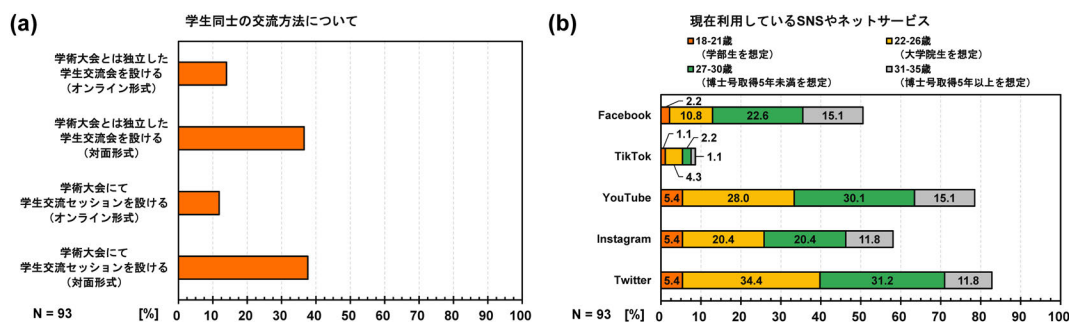


図19 医学物理を志す若手の交流および利用しているSNSやネットサービス
(a)学生同士の交流方法について、(b)現在利用しているSNSやネットサービス

術大会と併催か独立させるのかについては、対面形式かオンライン形式化にかかわらず同等だった。

図19(b)に、現在利用しているSNSやネットサービス(複数回答可)の結果を示す。「Twitter」が82.8%、「YouTube」が78.5%、「Instagram」が58.1%の順で多かった。年齢構成別でみると、18～21歳(学部生を想定)および22～26歳(大学院生を想定)では、「Twitter」,「YouTube」,「Instagram」の順で多かったが、27～30歳(博士号取得5年未満を想定)では、「Twitter」,「YouTube」,「Facebook」,31～35歳(博士号取得5年以上を想定)では、「YouTube」,「Facebook」,「Twitter」および「Instagram」の順だった。年齢が若い回答者は「Twitter」,「YouTube」,「Instagram」の利用率が高く、「Facebook」の利用率が低いことがわかった。

5. 考 察

医学物理若手の会の所属会員に対してアンケートを実施し、質問を医学物理教育：座学編，医学物理教育：臨床研修編，医学物理教育：認定医学物理教育コース，医学物理士に分類し，まとめた。

5.1 回答者の基本情報

本アンケートは、90名を超える35歳以下の若手から回答が得られた本邦初のものである。回答者のうち18～21歳(学部生を想定)が5.4%、22～26歳(大学院生を想定)が36.6%と、これから職業として医学物理士を志すと考えられる若手から、回答が得られた意義は大きい。回答者のうち社会人が59.1%と大きな割合を占めるが、最終学歴が修士である回答者が49.5%であることより、大半の社会人は修士課程のみを修了した社会人だと考えられる。回答者の系統(理工学系、または放射線技術系)が、現在の認定医学物理士の内訳と同様の傾向であることがわかった。後述するが、様々な技術が複雑化・高精度化している現在、理工学系出身者の医学物理士を増やすことは重要だと考える。

図4によると、11.8%の回答者が高校生以前に「医学物理」や「医学物理士」を知っているが、さらなる認知度向上のために、高校生以下に対して周知活動を行うべきと考

える。また、知った経緯として「高校や大学の授業」が39.8%、「指導教員からの紹介」が24.7%だった。これは、放射線技術系学生は「医学物理」や「医学物理士」について大学在学中に知る機会があるといえるが、放射線の医療応用に関する授業がない理工学系大学では、知る機会がないといえる。理工学系出身者の医学物理士を増やすために、放射線技術系学部のない大学でいかに周知が行えるか検討する必要がある。

5.2 医学物理教育

5.2.1 医学物理教育：座学編

図5(a)の物理工学系科目(基礎系科目)、物理工学系科目(放射線系科目)、医学生物系科目について、理工学系出身者は学部課程において医学生物系科目を受ける機会が少なく、対して放射線技術系出身者は物理工学系科目(基礎系科目)を受ける機会が少ないため、修士課程や博士課程にて初めて受けたと回答したと考えられる。

図6, 7, 8より、各課程において各科目の講義でどのような教育資料が使用されているか、またそれぞれの満足度がわかる。いずれの課程、科目においても、「市販の教科書と科目担当者が作成したスライド・資料の併用」を行っている講義が多く、科目担当者によって書籍の内容を要約・補足されていることがわかる。「科目担当者が作成したスライド・資料のみ」である講義の割合も多く、科目担当者が資料作成に時間を割いていることがわかる。満足度では、いずれの課程、科目においても、「やや満足している」、「非常に満足している」が80%を超える回答が得られている。しかし一方で、「やや不満である」、「非常に不満である」とした回答者からは、単位をとるための受講となり医学物理の講義体系が整っていないなどのコメントがあった。現在、学部課程に医学物理を専門的に教育するコースは存在しない。また認定医学物理教育コースにおいても、理工学系科目と医学生物学系科目の受講は、各大学での理工学系学部と保健学系学部の講義を受講する体制となっていると考えられる。

医学物理をより普及させるための方法では、高校生や学部生などこれから大学や大学院に進学すると考えられる方

や、一般の方に向けた講演会などが求められている。また若い世代に向けた情報発信は、利用者が多くいると考えられるTwitterやYouTubeなどの活用が期待される。

5.2.2 医学物理教育：臨床研修編

「臨床研修」には、診療放射線技師養成課程における、授業の一環としての実験・実習は含んでいない。前述の通り、現在本邦には学部課程にて医学物理を専門的に教育するコースは存在しないが、学部課程で医学物理の臨床研修を受けた、という回答が4.3%（4名）あった。修士課程で臨床研修を受けたとの回答が多かったのは、修士課程のみ認定されている認定教育コースが、博士課程のみ認定されているコースと比較して多いためと考えられる。

研修形式としてはOJTが多く、回答者は実際の医学物理業務を行っていると考えられる。一方で、担当者からの説明がなくただ見ているだけの見学も行われており、OJTへの切り替えが望まれる。研修内容としては、修士課程においても一連の放射線治療計画や立案された計画の品質保証、装置の品質管理等にも携わっていることがわかる（図11）。研修内容の全体的な割合としては博士課程の割合が高く、より実践的なOJTとなっていることがわかる（図12）。修士課程、博士課程いずれにおいても、各研修内容に対して説明資料が用意されており、学生が取り組みやすい環境が整備されていると考えられる。満足度は、「やや満足している」、「非常に満足している」がほとんどである。西尾らは2008年の『放射線治療における医学物理士・放射線治療品質管理士に関するアンケート調査結果報告』において、「各大学からOJTを主軸とした教育を受けた人材が毎年数名ずつ輩出されるシステムの構築」が重要であると述べており⁵⁾、本結果はOJTを主軸とした臨床研修が本邦で広く構築されていることを表していると考えられる。

5.3 認定医学物理教育コース

類似するアンケート調査として、2014年度に一般財団法人医学物理士認定機構が実施した「医学物理教育コースにおける医学物理士の養成実態に関するアンケート（養成実態アンケート）」がある³⁾。このアンケートは二部構成となっており、第一部が教育コースに対しての質問、第二部が養成された修了者に対しての質問だった。養成実態アンケートでは、「教育に従事している医学物理士教員数」は4人、2人、1人、3人の順で多かった。本アンケートでは「臨床研修を担当する教員数」としてアンケートをとったところ、修士課程では「2～3人」が最も多く、博士課程では「4～5人」が最も多かった。しかし、図13(b)、14(b)に示す通り、実際に指導を受けた教員数が、申告した担当する教員数より少ない場合がある。詳細は不明だが、担当している教員全員からの指導が行われることが望ましいと考える。「臨床研修を担当する教員数」が「1人」である場合、図13(d)、14(d)に示す通り、医学物理士認定

試験への対策の有無に関するアンケート結果では、「授業や対策は特になかった」の割合が他の教員数より多かった。したがって、教員数が1人では適切な医学物理士養成が行われていないと考えられる。加えて、他の教員数の場合でも、「授業や対策は特になかった」の回答が得られた。医学物理の教育を専門的に行うコースである以上、何らかの対策が行われるべきであり、この回答数はゼロとならなければならないと考える。

教育コースの寄与については、図15に示す通り74.2%の回答者が寄与していると回答した。また67.7%の回答者が、教育コースへの進学を勧めると回答しており、教育コースの有用性が2021年時点で35歳以下の研究者・学生に浸透していると考えられる。

5.4 医学物理士認定試験

これから医学物理士を目指す若手にとって、認定試験対策をどのように行えばよいか知ることは重要である。受験経験者が最も効果的だと思う、まず行うべき試験対策は、過去問を解き分らないところは随時調べる、だった。体系的な教育が行われていない以上、この方法が有用であると考えられる。試験対策に有用なツールとしては、上記の通り過去問が最も有用で、また2017年より公開された過去問開設サイトも有用であると考えられる^{6),7)}。その他、体系的にまとめられた『医学物理教科書シリーズ』や、認定試験対策講習会も有用であると考えられる。

5.5 医学物理士養成システム

図16(a)より、58.1%の回答者が現状の本邦の医学物理士養成体制に満足していると回答している。一方で、3.5.にて述べたように、様々な不満と感じられている点が挙げられている。特に「講習会を探しづらい」、「情報が纏まっておらず、学会ホームページがわかりづらい」について、これらが改善されることで、これから医学物理士を志す学生はより必要な情報にアクセスしやすくなると考えられる。

医学物理士をより普及させるための方法では、4.2.1.と同様にYouTubeやTwitterの活用が期待されている。どちらも20代の利用率が高く、情報発信力が高いコンテンツを利用するべきだと考える。

5.6 医学物理士の役割

回答者が考える、同世代の診療放射線技師と比較した場合の医学物理士の給与は、同等かもしくは低いと考えられている結果が得られた。一方で、遠山らが報告した『2014年度医学物理士就労状況アンケート報告』では、同世代の診療放射線技師と比較した場合の医学物理士の給与は、平均で60.2万円高いという結果が得られており、乖離が見られる⁸⁾。

医学物理士の業務割合は、治療計画やプランチェック、装置のコミッショニングや品質管理、研究、教育など、およそ実際に本邦の医学物理士が行っている業務と一致している。これは、大学院での教育や公開している情報が、広く学生や若手研究者に普及しているためと考えられる。

5.7 医学物理を志す若手の交流および利用しているSNSやネットサービスについて

2020年に始まる新型コロナウイルス感染症の世界的な拡大により、2022年現在においても対面形式の学術大会への参加機会が少なくなっている。学術大会への参加は、学生にとって同世代とのつながりを持てる貴重な機会である。昨今のオンライン形式の学術大会において、オンライン交流会が開催される場合もあるが、やはり対面形式に勝るものではなく、それはアンケート結果にも示されている。また学術大会とは独立した対面形式の交流会も求められており、今後地域別の交流会の開催なども検討が必要である。

年代別のSNSやネットサービスの利用率について、総務省がまとめた『令和2年度情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書概要』によると、10代では「YouTube」, 「Instagram」, 「Twitter」の順で、20代では「YouTube」, 「Twitter」, 「Instagram」の順で利用率が高い⁹⁾。本アンケートにおいても、18~21歳や22~26歳については同様の結果だったため、今後この年代に向けて情報発信をする際は、これらのサービスを積極的に利用することが推奨される。

6. 結 語

医学物理若手の会について紹介した。また、2021年時点で35歳以下の若手に対し、医学物理に関する様々なアンケート結果をまとめた。それにより、若手から見た本邦の医学物理に関する現状が明らかになった。今後も数年ごとにアンケートを実施し、情報を更新していきたいと考える。本アンケート結果が、本邦の次世代の医学物理教育・医学物理士養成に寄与することを期待する。

謝辞

アンケート実施にあたり、医学物理若手の会会員の皆様には、ご協力頂き誠にありがとうございました。本邦の医学物理教育・医学物理士養成に関わる皆様には、本アンケート結果を基に、更なる質の向上のご検討をお願い申し上げます。結果の詳細情報が必要な場合、ご連絡いただければ対応可能です。

付記

本アンケート調査の一部は第123回日本医学物理学会学術大会（2022年4月神奈川県横浜市）にて発表した。恒田雅人が所属するMR画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座は、エレクトラ株式会社の寄附金にて支援されている。

参 考 文 献

- 1) 医学物理士認定機構 認定医学物理教育コース一覧, https://www.jbmp.org/course_educational/decision/ (2022年1月17日アクセス)
- 2) Kadoya N, Karasawa K, Sumida I, et al.: The current status of education and career paths of students after completion of medical physicist programs in Japan: A survey by the Japanese Board for Medical Physicist Qualification. *Radiol. Phys. Technol.* 8: 278–285, 2015
- 3) Kadoya N, Karasawa K, Sumida I, et al.: Educational outcomes of a medical physicist program over the past 10 years in Japan. *J. Radiat. Res.* 58: 669–674, 2017
- 4) 医学物理若手の会, <http://igakubutsuri-wakate.kenkyuukai.jp> (2022年1月17日アクセス)
- 5) 西尾禎治, 芦野靖夫, 大西 洋, 他: 放射線治療における医学物理士・放射線治療品質管理士に関するアンケート調査結果報告. *J. Jpn. Soc. Ther. Radiol. Oncol.* 20: 29–35, 2008
- 6) Sakai M, Kubota Y, Kubo N, et al.: Evaluating the certification examination for medical physicists in Japan via questionnaire survey and access analyses. *The Kitakanto Med. J.* 70: 379–385, 2020
- 7) 過去問で学ぶ医学物理士試験対策, <https://sakai-m.showa-gunma-u.ac.jp/> (2022年1月17日アクセス)
- 8) 遠山尚紀, 岡本裕之, 西尾禎治: 2014年医学物理士就労状況アンケート報告. *医学物理* 36: 2–17, 2016
- 9) 総務省, 『令和2年度情報通信メディアの利用時間と情報行動に関する調査報告書概要』, https://www.soumu.go.jp/main_content/000765258.pdf (2022年1月17日アクセス)

施設紹介

帝京大学大学院医学物理士コースの紹介

古徳純一^{*1}, 熊谷 仁², 上原隆三², 白石憲史郎³

¹ 帝京大学大学院医療技術学研究所

² 帝京大学医学部附属病院放射線科

³ 帝京大学医学部放射線科学講座

Introduction of Medical Physics Course at Teikyo University

Jun'ichi KOTOKU^{*1}, Shinobu KUMAGAI², Ryuzo UEHARA², Kenshiro SHIRAISHI³

¹ Graduate School of Medical Care and Technology, Teikyo University

² Central Radiology Division, Teikyo University Hospital

³ Department of Radiology, Teikyo University School of Medicine

1. 施設概要（放射線治療室／ 放射線治療品質管理室との連携による）

帝京大学大学院医学物理士コースは、帝京大学大学院に隣接した帝京大学医学部附属病院の放射線治療部門と連携して教育および研究活動を実施している。最初に、施設の概要を紹介しよう。

帝京大学医学部附属病院放射線治療部門（以下、当部門）では、放射線治療品質管理室が独立して設置されており、医学物理士認定機構認定の常勤の医学物理士が2名在籍している（図1）。当部門の常勤物理士は表1に示す治療装置や、治療計画装置および品質管理機器を駆使して日々臨床業務に従事している。主たる業務は、放射線治療計画、品質管理・保証活動、研究活動、マネジメントである。医学物理士コースに属する学生は、臨床に従事する医学物理士に必要な素養を、常勤物理士とのOn the Job Trainingを通じて身につける。

放射線治療装置は2台のリニアック（Elekta社製Versa HDTM、Elekta社製SynergyTM）が稼働している（図2）。当部門では、幅広い領域の3D-CRTをはじめ、多数のVMATやSRTなどの高精度放射線治療を展開している。現在、当部門の放射線治療総数と高精度放射線治療の件数は年々増加傾向である（図3（a））。多種多様な症例に対してVMATを適用しているため（図3（b））、まんべんなく多様な疾患カテゴリーの治療計画に触れ合うことができる。

これらの治療計画を立案する治療計画装置は、本邦で流通している主要な治療計画装置がほぼ網羅されており（表1）、それぞれの特徴を加味した計画立案を身につけることができる。患者個々に最適な治療計画を提供するためには、放射線腫瘍医との議論が欠かせないが、当部門では放射線腫瘍医との距離が近く相談しやすい環境が用意されている。

放射線治療機器や患者治療計画の品質管理は、主に常勤医学物理士が実施する。測定機器を自由に利用できる環境であるため、品質管理に関わる測定は、学生の要望や必要に応じて日程の調整や研究内容に即した手法の追加など、柔軟に対応する体制を敷いている。なお当部門では、SynergyTMの機器更新が数年以内に予定されている。更新期間中は、通常の品質管理項目に加え、新規治療装置や関連機器、新規治療フローのコミッショニングの経験も実習に組み込むことを想定している。

放射線治療品質管理室は部門の運営やマネジメント業務にも深く関与している。数年先を見据えた部門全体の成長戦略を策定し、他業種（放射線腫瘍医、診療放射線技師）と協力して成長戦略を具現化させる施策を提案する。一般的に臨床領域の医学物理士の活動内容は他職種と比較して見えにくく、理解されにくい面がある。そのため他職種スタッフや部門、病院と深いコミュニケーションをとり、自身の業務や臨床上の立ち位置を明らかにしてゆく活動も極めて重要と考えている。治療計画や測定などの個々の業務を覚えるだけにとどまらず、学生自身がどのような立ち位



図1 放射線治療品質管理室のスタッフ（左：熊谷仁物理士，右：上原隆三物理士）

* 連絡著者 (corresponding author) 帝京大学大学院医療技術学研究所 [〒173-8605 東京都板橋区加賀2-11-1]
Graduate School of Medical Care and Technology, Teikyo University, 2-11-1 Kaga, Itabashi-ku, Tokyo 173-8605, Japan
E-mail: kotoku@med.teikyo-u.ac.jp

置の医学物理士として、今後活動してゆくかを考える機会を与えることを重要視している。

2. 研究教育活動

本学医学物理士コースでは、医学物理の基盤技術の開発

表1 帝京大学医学部附属病院 放射線治療部門の保有機器一覧

保有機器内容	保有機器名
放射線治療装置／ 密封小線源装置／ 周辺機器	Versa HD™ (Elekta) Synergy™ (Elekta) microSelectron HDR v2 (Elekta) Catalyst HD™ (C-RAD)
放射線治療計画装置	Monaco ver 5.5.10 (Elekta)×1 Raystation ver 10A (Raysearch)×1 Pinnacle ³ ver 9.14 (Philips)×4 Eclipse ver14 (Varian)×1 Oncentra Brachy (Elekta)×1
治療計画CT装置	Aquilion LB (キヤノンメディカル)
品質管理関連機器	電離箱線量計 (PTW) ダイヤモンド線量計 (PTW) 3次元水ファントム (PTW) 1次元水ファントム (PTW) 検証用3次元半導体検出装置 (ArcCheck/ Delta4) 2次元半導体検出器 (MapCheck)

と臨床に直結した研究・開発を両輪で行っている。毎週行われる研究ミーティングで、各自が進捗状況を報告して次の方向性を皆で議論しながら探っていく。本節では、最近の研究教育活動の具体的な例を紹介する。

2.1 医学物理の基盤技術開発に関わる研究

2.1.1 IVR治療下での放射線場と患者皮膚線量のリアルタイム可視化

身体中にカテーテルや針などを入れて、体内の臓器や血管への治療を行うインターベンショナルラジオロジー (IR) 下において、身体中のカテーテルの動きをモニターする目的で、X線透視などの画像診断装置が使われるが、患者の被ばく線量を、高精度にリアルタイムで表現する手段がないため、被ばく量が高くなりがちなのが問題であった。我々は、この問題を、リアルタイムモンテカルロシミュレーションの技術を用いて克服することに成功した¹⁾。このリアルタイムモンテカルロシミュレーションの技術を使えば、正しく物理計算された放射線の線量分布を仮想空間内でリアルタイムに体感することができる。我々は、IVR体験をできるバーチャルリアリティシステムの開発に成功した²⁾。さらに、これらの技術を、仮想と現実の融合を実現する複合現実 (MR) の技術と組み合わせることで、実際の患者皮膚面に投影された被ばく線量の情報を術



図2 帝京大学医学部附属病院のリニアック (左: Elekta Versa HD™, 右: Elekta Synergy™)

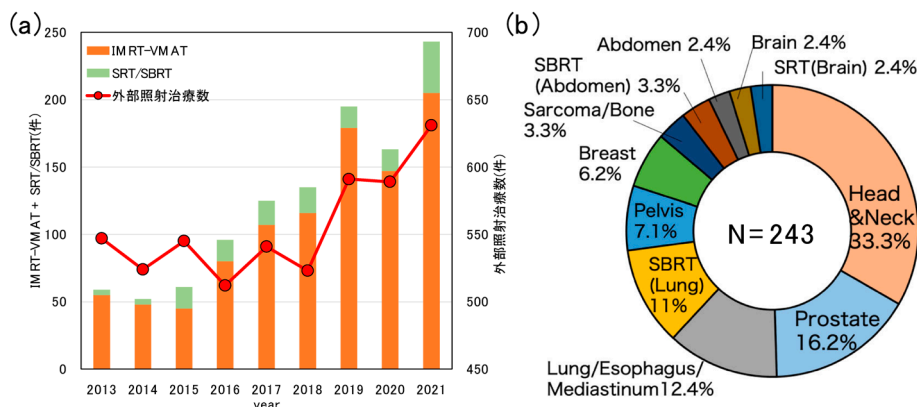


図3 (a) 帝京大学医学部附属病院の治療件数と高精度放射線治療件数推移, (b) 高精度放射線治療の部位内訳

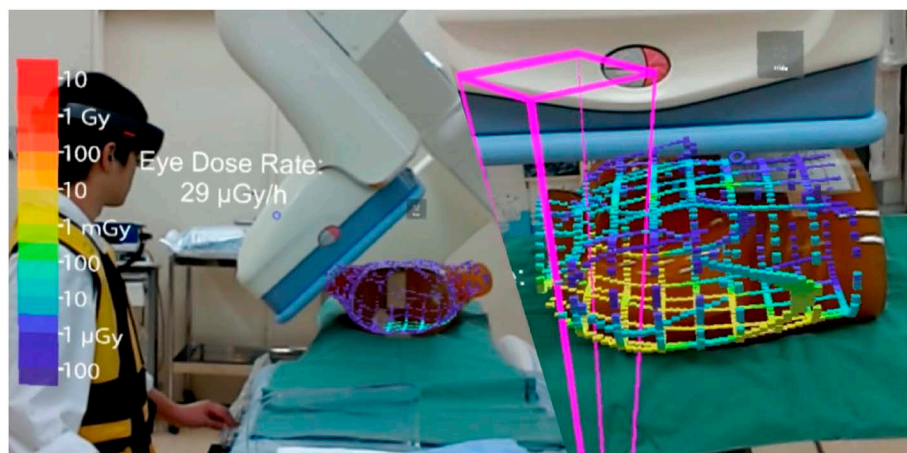


図4 IVRの被ばく線量のリアルタイム線量推定システム

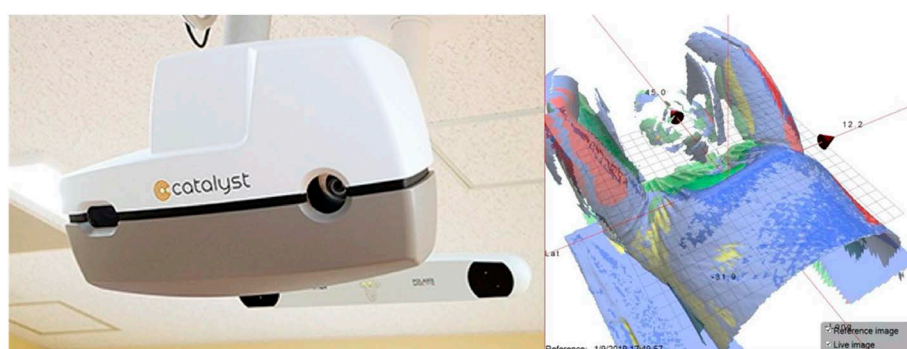


図5 体表面画像誘導装置Catalystの外観と体表面照合の例

中にリアルタイムに直接目に見ることができるシステムを世界で初めて開発した³⁾ (図4)。

2.1.2 ヒト表皮細胞の品質管理に応用可能な自動細胞トラッキング法の開発

我々のグループは、東京医科歯科大学と共同で、細胞同士が密に隣り合った表皮細胞に応用可能な新しい自動追跡システムを、個々の細胞の検出段階と、各々の細胞の追跡段階の2段階からなるアルゴリズムで構築した⁴⁾。本研究で用いた深層学習による画像認識と状態空間モデルによる物体追跡アルゴリズムを用いた自動細胞トラッキング法は、様々な細胞種に応用できる汎用性の高い技術である。iPS細胞を含む多くの幹細胞は、培養系でその状態に相關した運動パターンを示す可能性があることから、本研究成果は、再生医療に使用される培養ヒト幹細胞の品質管理法として広く応用が期待できる。

2.1.3 医療ビッグデータの因果探索

AI研究は現代社会において様々な分野で応用されているが、基本的に予測能力の高さを競うものがほとんどで、予測に用いられるモデルは必ずしも因果関係を反映しているものではなく、相関関係の記述にとどまっていることが大半である。データから因果関係を自動的に推定する方法は因果探索と呼ばれる。これまで様々な数理モデルが提案されてきたが、データの規模が小さいと因果関係の推定精

度が悪くなるため、現実の医療データに適用した成功例はこれまで報告されていなかった。大阪府保険者協議会および大阪府国民健康保険団体連合会の協力により、大阪府民60万人規模の健康診断データ（個人を特定できないように加工済み）の提供を受け、大阪大学と我々の研究グループは、これまでにない規模の医療ビッグデータに因果探索のAI技術、特にDirectLiNGAMと呼ばれる数理モデルを用いることで、健康診断で取得されたデータ間の因果関係の自動的な構築を行った⁵⁾。

2.2 臨床医学物理に関わる研究

当部門では、臨床に直結した研究・開発も積極的に展開している。一部の研究は各メーカーとの共同研究の体制を敷いている。

2.2.1 Catalystを利用したDIBH（深吸氣息止め）下における左乳腺PMRT-VMAT法の開発

当部門は体表面画像誘導装置の一つであるCatalyst HDTMを導入しており、Surface-IGRTを臨床導入している（図5）。左乳房切除術後の胸壁および領域リンパ節照射（Post Mastectomy radiotherapy: PMRT）は、3D-CRTでは標的に近接した心臓や肺への高線量投与を避けつつ十分な線量を投与することがしばしば困難となる。この問題を解決するためにVMAT法の選択が考えられるが、標的

と危険臓器の解剖学的な位置関係から、必ずしもVMAT法においても最適な治療計画が立案できるとは限らない。そこでDIBHにより心臓と標的間の物理的距離を確保したうえでVMAT法を行えば、最適な治療計画が設定できる。

我々はCatalyst HDTMを活用したDIBH-PMRT-VMATの安全な施行方法を確立するために、DIBH時の息止め再現性や安定性の解析、DIBHによる領域リンパ節の生理的な動きを勘案したマージンの設定、治療時間の短縮につながる効果的な治療計画の立案などを順次進めている。

2.2.2 汎用治療装置を利用した適応放射線治療法の開発

MRI画像を利用した即時型適応放射線治療（On-line Adaptive Radiotherapy: On-line ART）装置が国内で展開しつつあるが、汎用治療装置によるOff-line/On-line ARTもまた、症例によっては必要な技術であると考えている。近年の放射線治療計画装置は、ARTを実施するための要素技術である、非剛体レジストレーション(Deformable Image Registration: DIR)や、電子密度マッピングの機能が充実しつつある。

汎用装置／汎用治療計画装置によるOff-line/On-line ARTの手法を確立するために、上記の要素技術の評価を行い、臨床症例に対する一連の手法を確立することを目標としている。当部門はART運用の最適な対象と考えられる頭頸部腫瘍や進行肺癌への照射例が多いため、実臨床症例を用いた検討が十分に実施できると期待できる。

2.2.3 スループット最大化を実現する治療スケジューリングシステム開発

放射線治療のスケジュール管理は、医療スタッフの経験と技量、患者都合を考慮して組まれていることが一般的であるが、このような流動的な要因に左右されないスケジューリングシステムの開発を行っている。これらを実現するために、各種患者情報や治療計画情報、治療情報をパラメータとしたときの、AIによる患者治療室占有時間を推定する学習モデルを構築する。現在はモデルを構築するためのパラメータである、患者情報や照射システムログからの治療情報の抽出を行うための、周辺システムの開発を行っている最中である。

2.2.4 3次元ゲル線量計を利用したVMAT/SRT計画の線量検証基盤の構築

VMAT/SRT治療計画などの小照射野に対する線量検証測定は、現状の半導体3次元検証測定器では線量計の低空間分解能や応答特性に限界があり、測定結果の信頼性は十分に保証できていない。本研究では、上記の問題を解決する線量計として期待されている、3次元ゲル線量計を利用した治療計画線量分布を計測するシステムと、その臨床利用基盤の構築を実施する。開発された3次元ゲル線量計の基礎物理特性と、複数の照射部位（頭頸部癌、前立腺癌、肺癌、脳腫瘍）に対する治療計画を利用した臨床特性を検証する。

3. 医学物理を志す皆さんへ一言

医学物理分野は、現在、様々な科学と技術の重要な実験場であるとともに、革新的な診断や治療への応用を実現する分野です。本学では、特に数理やハイパフォーマンスコンピューティングをベースとした研究の実践に強みがあります。我こそはと思う若人は、是非、見学に訪れてください。また共同研究の提案も歓迎します。

参考文献

- 1) Takata T, Kotoku J, Maejima H, et al.: Fast skin dose estimation system for interventional radiology. J. Radiat. Res. 59: 233–239, 2018
- 2) Takata T, Kondo H, Yamamoto M, et al.: Immersive radiation experience for interventional radiology with virtual reality radiation dose visualization using fast monte carlo dose estimation. Interventional Radiology 5: 58–66, 2020
- 3) Takata T, Nakabayashi S, Kondo H, et al.: Mixed reality visualization of radiation dose for health professionals and patients in interventional radiology. J. Med. Syst. 45: 2021
- 4) Hirose T, Kotoku J, Toki, F, et al.: Label-free quality control and identification of human keratinocyte stem cells by deep learning-based automated cell tracking. STEM CELLS 39: 1091–1100, 2021
- 5) Kotoku J, Oyama A, Kitazumi K, et al.: Causal relations of health indices inferred statistically using the DirectLiNGAM algorithm from big data of Osaka prefecture health checkups. PLoS One 15: e0243229, 2020

連載コラム シカゴ通信

民主主義の歴史を持つギリシャと神秘的なインド

〈Chicago Report〉 Greece and India with Proud History

歴史と伝説の宝庫ギリシャ

シカゴ大学放射線科では、ギリシャ出身の放射線科医と頭部血管造影のステレオ撮影技術の共同開発研究に関係していました。そこで30年程前にギリシャを訪問したことがありましたが、今回は家族同伴のギリシャ訪問でした。ギリシャは世界史の中でも極めてユニークな過去を持っていますが、そのことをよく知っている方はそう多くはありません。まずギリシャの歴史はエジプトの歴史に続く時代から始まっています。しかし、現代社会にも影響を与えているギリシャの民主主義などの歴史は紀元前12世紀頃から始まり、紀元前3世紀頃のアテネでは、ソクラテス、プラトン、アリストテレスなどの哲学者や芸術家達によって後世に残る作品が制作されています。しかし紀元前1世紀頃にはローマ帝国の領地になり、その後1830年代に独立するまで約2000年もの間、他国の支配する地域だったのです。このような歴史を眺めると、人間と人間社会の独立性は極めて強く異民族支配は長期的には実現しないと思われる。

ギリシャの世界遺産と歴史は、ギリシャ中に分散していますが、多くのものはアテネの周辺に位置しています。ギリシャの面積は日本の約3分の1で、山と島が多く、島の数は3,300、人の住む島は約200、人口は約1,100万人です。ギリシャ訪問の後、シカゴ郊外の近所の“行きつけ”のホットドッグ屋を訪ねましたが、その店の主人は私の着ているギリシャからのTシャツを見て、「私はギリシャ人だ。貴方はどの島に行った？ 良かったか？」と質問攻めにあいました。そこで彼はギリシャ人であることがわかったので

すが、ギリシャの素晴らしさは、小さな島々にあることを知りました。30年前にもアテネから島めぐりのツアーに参加したのですが、一日中舳先で潮風にあたっていたのに、夕方には潮風にあたった様子は全くなく“さらり”とした皮膚から地中海では塩分濃度が極めて低いのだとわかりました。日本近海では、塩分濃度がかなり高く日焼けした皮膚の上に塩が残っているのを経験しています。

アテネにあるギリシャ全盛期の古代遺跡のハイライトはアクロポリス遺跡のパルテノン神殿（写真1～3）です。この神殿は、横31m、縦70m、柱の高さ10mで15年の歳月を費やし紀元前432年に完成した大理石の建造物ですが、度重なる戦争や地震のため酷く傷んでいます。しかし、当時をしのぶことはできます。この遺跡は復元中ですが、30年前とあまり変わらないようなので、完成にはかなり長時間を要すると思います。

パルテノン神殿の美しさの秘密は、建築設計にあると言われています。この神殿は、直線と平面の組み合わせではなく、曲線と曲面の組み合わせでできています。ドリア式と呼ばれる列柱は細い上部ですが柱の中間には膨らみがあり、屋根を支えるために柱は内側に少し傾いています。写真1のパルテノン神殿の全景を眺めると神殿の築かれた巨大な基礎土台が補強も含めてしっかりと見事に構築されているのがわかります。この基礎を作り上げるのにも相当の年数を要したと想像できます。

アクロポリス遺跡には、パルテノン神殿以外にも数々の神殿や劇場があります（写真4、5）。イロド・アディコス音楽堂（写真4）は、夏の間にコンサート、オペラ、ギリシャ古典劇などが上演されています。



写真1 ギリシャのパルテノン神殿と壮大な基礎土台部分

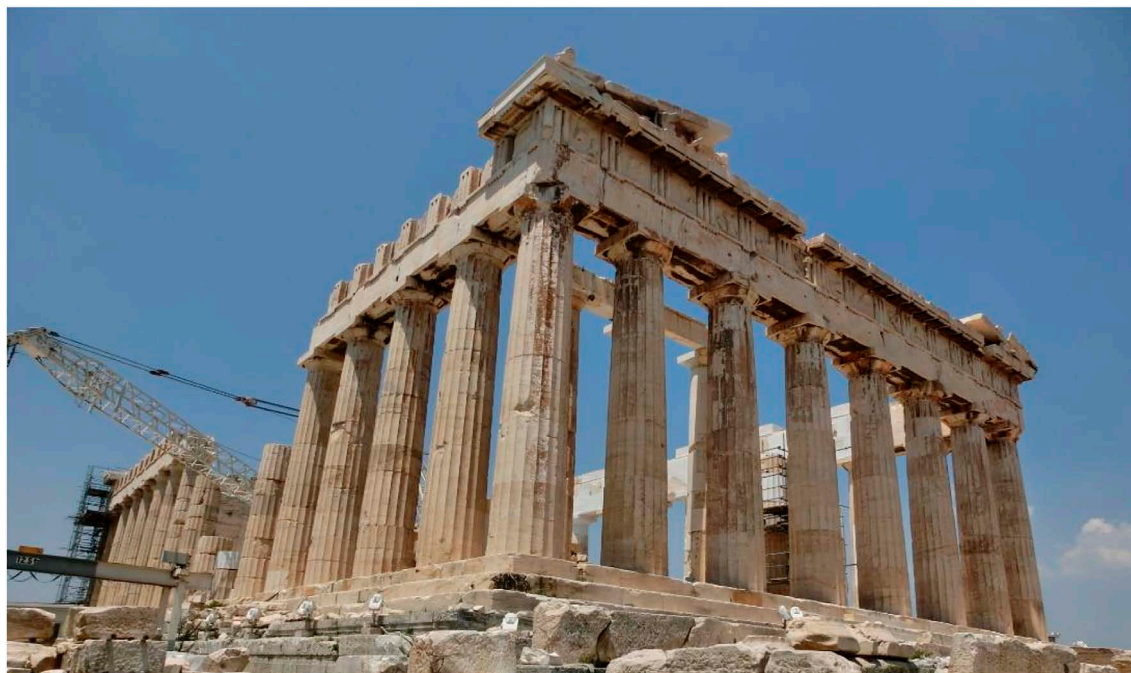


写真2 復元中のパルテノン神殿

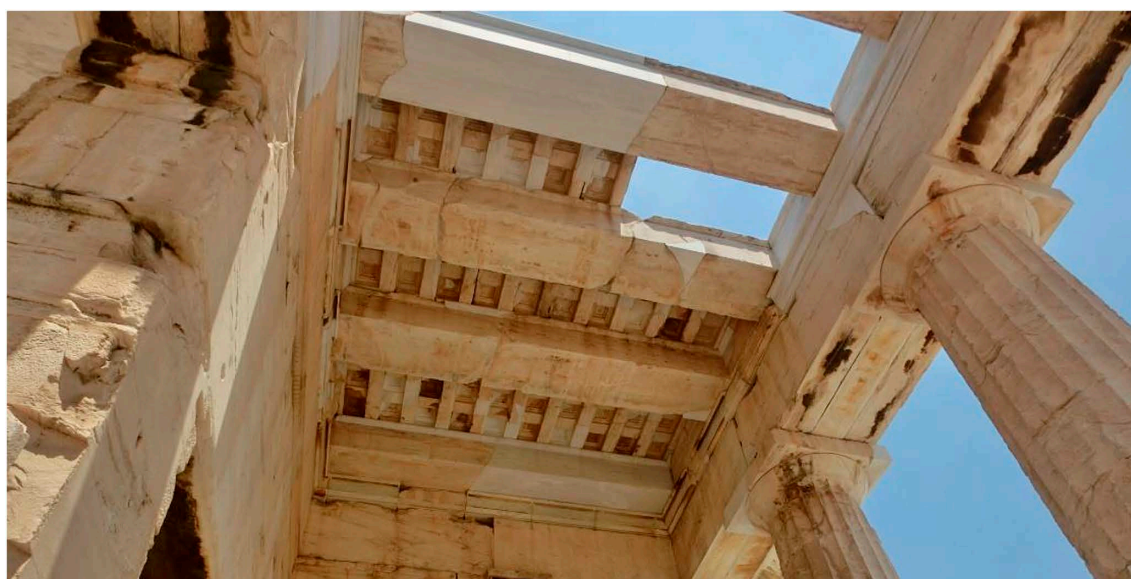


写真3 アクロポリスに残存する構造物の一部

ギリシャの多数の遺跡から出土した多くの美術品は、ギリシャ国立美術館に展示されています。有名なのは、馬に乗る少年の銅像（写真6）やアフロディテとパン（牧羊神）の像（写真7）です。これらの美しく見事な彫刻や多数の美術工芸品が2000年以上も前に制作されたのには本当に驚きです。しかもほぼ完璧に保存されています。しかし、フランスのルーブル美術館に展示されている世界的に有名

なミロのビーナス像は両腕の部分が壊されています。ギリシャ文明の素晴らしい彫刻や出土品を見るにはギリシャを訪問する必要があります。ルーブル美術館や他の美術館に展示されているギリシャ彫刻などは、ギリシャにあるほぼ無傷な彫刻とは比較にならないほど無残に破壊されているか、レベルの異なる美術品に思えます。

アテネから西へ約85kmの位置にあるコリントス運河を

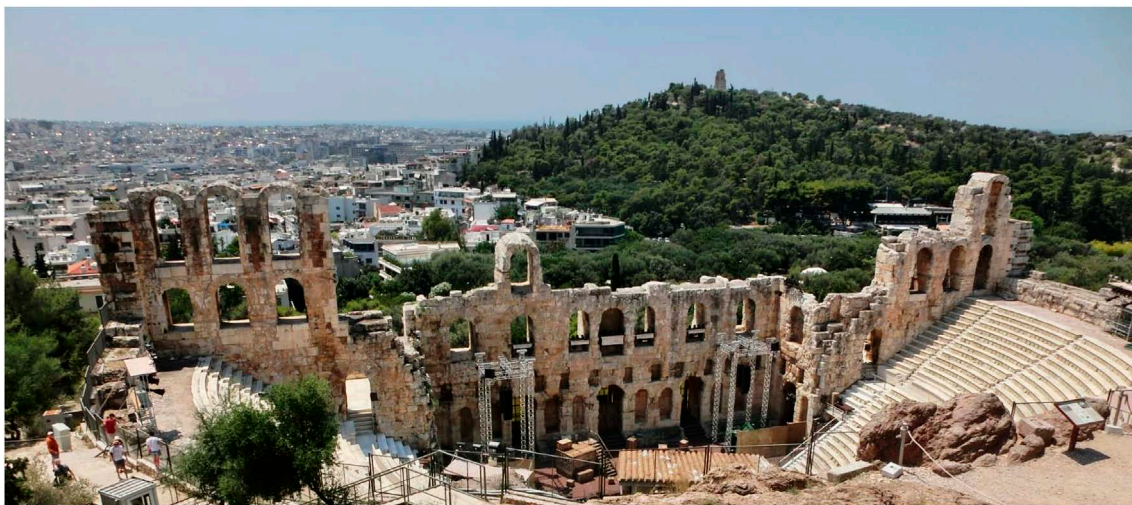


写真4 パルテノン神殿から眺めるイロド・アディコス音楽堂、円形劇場とアテネ市内



写真5 アテネ市内とディオニソス円形劇場（古代アテネの劇場：1万5千人収容）

境にして広がる巨大なペロポネソス半島はギリシャ古代文明の故郷です。ペロポネソス半島には、紀元前13世紀に生まれたミケーネ文明があり、トロイ戦争の英雄アガメムノンが眠ることでよく知られています。オリンピック発生の地オリンピア、アテネに対抗する他の都市国家スパルタなどきらびやかな過去を誇る場所が多数あります。

ギリシャの西側のイタリア側の海からアテネに物資を運ぶには、巨大なペロポネソス半島を迂回して航海することが必要です。しかしこの航海には何日もかかったと思いますので、古代人は船を陸上にあげ人力でアテネ側の海まで担いでいったそうです。これは大変な努力だと思います。そ

こで現在はコリントス運河ができています。コリントス運河（写真8）は、幅23m、高さ80m、長さ6,343mで、これを初めて見た方はアッと息をのむような衝撃にかられます。このように巨大な運河を人類が作り出せることは大変な驚きです。

ミケーネ遺跡は、ドイツの考古学者ハインリッヒ・シュリーマンによって発掘され、それまで神話の世界と考えられていた出来事が、歴史的事実であることを証明したのです。紀元前16世紀頃バルカン半島を南下してクレタ文明を引き継ぎ独自の文化を作り上げたのがミケーネ文明で、王は堅固な城壁に囲まれた宮殿に住み農業や牧畜を中心に



写真6 アテネの国立美術館の古代ギリシャ彫刻：
馬に乗る少年のブロンズ像，1928年アルテミシオンの海底で発見

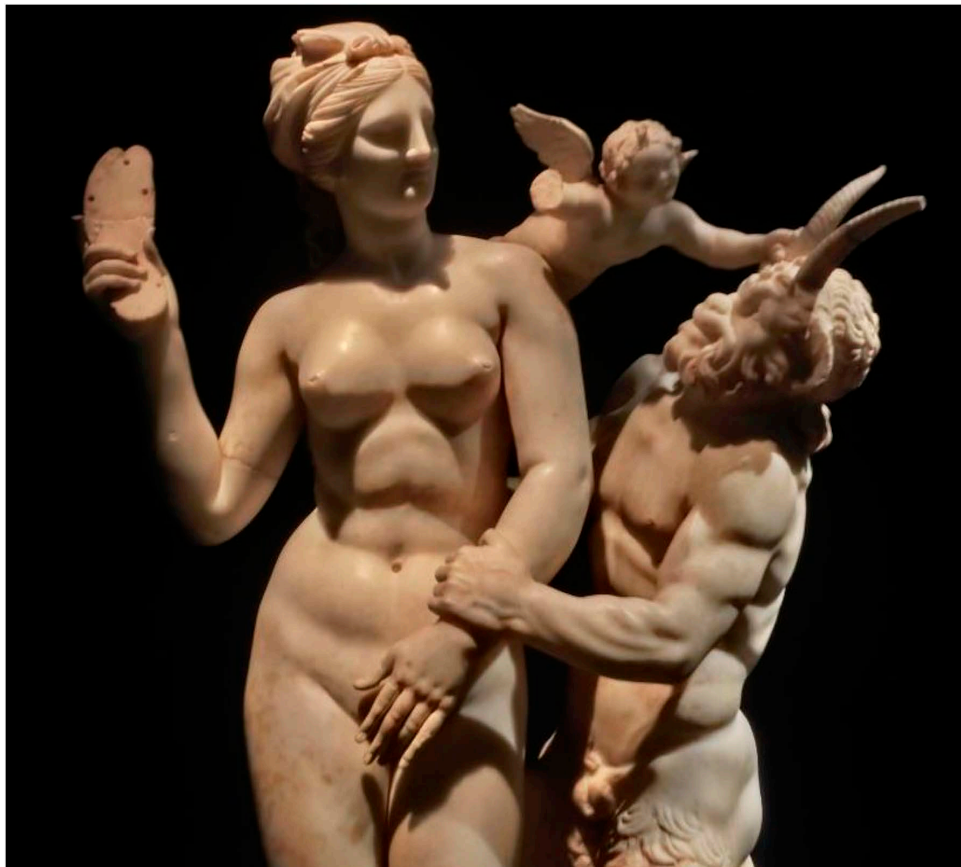


写真7 アテネの国立美術館の古代ギリシャ彫刻：
アフロディテとパン（牧羊神）の像，1904年ミロス島で出土



写真8 コリントス運河「高さ80m, 幅23m, 長さ6,343m」

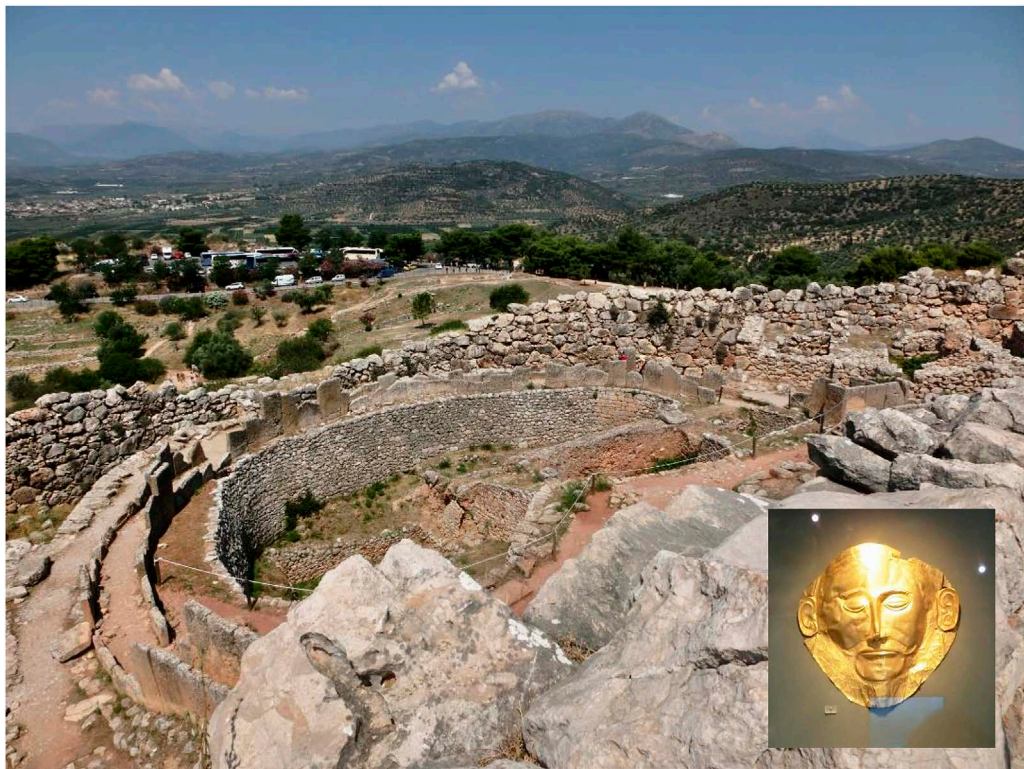


写真9a 紀元前13世紀ミケーネ文明やトロイ戦争の英雄アガメムノンの眠る古代ギリシャ都市ミケーネ
写真9b アガメムノンの黄金のマスク



写真 10 エピダヴロスの古代ギリシャ円形劇場

して貿易活動も行っていたようです。ミケーネ時代の最盛期は、紀元前 14 世紀頃で東はシリア、西はシチリア島と貿易を行っていたそうです。ミケーネの城塞（写真 9a）は丘の上に建てられ、まさにアクロポリスの原型と言えるものだったそうです。なだらかな坂道を登ってゆくとミケーネの象徴の獅子の門が見えてきます。その後、円形墓地、王宮（宮殿）、貯水池などがあります。ギリシャ神話によれば、ゼウスとダナエの息子ペルセウスがミケーネを造りその地を治めた後、ミケーネの王アガメムノン（写真 9b、有名な黄金のマスク）はギリシャ軍の総指揮官としてトロイ戦争に出陣します。その後戦争には勝利したのですが、トロイの王女を愛人として連れて帰国したために、「妻が夫を殺し、子が母親を殺す」近親殺人の伝説を含むミケーネの悲劇として知られているのです。

ギリシャでは、夏の間ほとんど雨が降らないので屋外劇場が利用でき、古代から屋根のない屋外劇場が用いられています。ミケーネの近くのエピダヴロスの古代劇場（写真 10）は、ギリシャに残る古代劇場の中で最も保存状態が良くほぼ原形をとどめています。観客席は丘の斜面を利用して作られており、上階席からも舞台でのささやきが聞こえるほどの音響効果を持ち、どの席からもしっかりと舞台を見渡すことができます。観光客に対しては、舞台中央でマッチを擦る音はどの席でも聞こえるとのデモが盛んで、多数の燃えかすマッチが散らばっています。

神秘的なインド

アジア・オセアニア地域の医学物理に関する国際会議がピンクシティーと呼ばれるジャイプルで 2017 年に開かれインド訪問が実現しました。インドは、米国、中国、ロシアなどと同様に巨大な国ですので、観光などの訪問先は多数ありますが、ゴールデン・トライアングルと呼ばれる北インドの主要 3 都市、デリー、ジャイプル、アーグラを訪問しました。デリーからジャイプルへは飛行機で移動し、ジャイプルからタージ・マハル訪問にはハイヤーで片道 500 キロを往復しました。この旅行を通じてインドは広大な国であることと、物凄い人口を抱えていることが強く印象に残りました。途中で出会った米国の旅行者は、この 3 都市をハイヤーで回る予定と聞きましたが、次回はそのような予定も可能と感じました。

デリーでは、1640 年代に第 5 代皇帝シャー・ジャハーンによってアーグラからデリーに遷都した「赤い砦」と呼ばれる広大な城（写真 11）を見学する予定でしたが、あまりに多くの観光客がいるため内部の見学をあきらめました。その後、デリーの浅草と呼ばれるチャンドニー・チョウク地区（写真 12）を訪問し、インドの複雑で混沌とした様子の一端を眺めた感じがしました。デリー郊外のクトゥブ・ミーナール（写真 13）は、世界遺産の一つでインド最初のイスラム王朝（13 世紀）の建築物群です。インド訪問中は、最悪の大気汚染でホテルからの視野は酷いものでしたが、タクシー運転手は全く気にしていないので慣れっこになっているのが明らかです。しかし地元の新聞では、多くの外交官の家族はインドを離れて避難してい



写真11 ムガル帝国のパワーを誇る赤い城ラル・キラーと多数の観光客

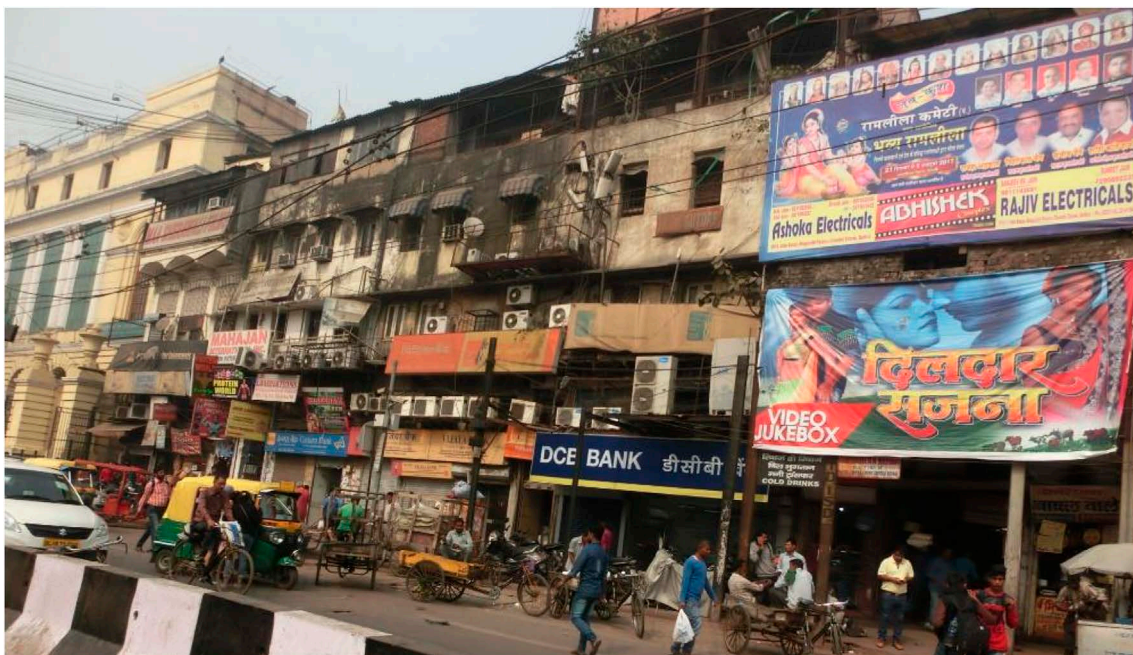


写真12 デリーの浅草・庶民の街チャンドニー・チョウク

ました。デリーから飛行機で離陸約10分後には、薄黄色の汚染空気層を離れて透明な上層に移動してゆく様子が明確に観察できたのは大変な驚きでした。

ジャイプルはデリーから約300km離れた場所のピンク

シティと呼ばれる都市です。この街の郊外の丘の上には、美しく見事なアンベール城(写真14, 15)があります。城の中には膨大な庭園や噴水があり、王様のマハーラージャは夜ごと開かれる宴を眺めて楽しんでいたそうです。



写真 13 デリー観光のハイライト、クトゥブ・ミーナール

アンベール城の上にはジャイカル要塞（写真 14 の左上）があります。城の上から周囲を眺めると、近くの山の峰には中国の万里の長城と同じような石の構造が見られたのには驚きました。違う国でも同じアイデアの構造物を考えたとは仮定したのですが、あるいは中国から学んだのかもしれない。

ジャイプル滞在中に、ホテルのハイヤーを利用して 500km 離れたタージ・マハルを日帰り訪問することが可能だとわかり実行しましたが、料金は極めて妥当なものでした。驚いたことには、この長距離ドライブの間に山を見たことがないことです。そこでインドは豊かな国と想像しましたが、実際には人口が多く貧しい方が多いことには驚きました。

インドのタージ・マハルは、エジプトのピラミッド、ペルーのマチュピチュ遺跡と並んで最も人気のある世界遺産です。タージ・マハルは、ムガル帝国の皇帝シャー・ジャハーンが「愛妃ムムターズが 38 歳の若さで亡くなった」ことを悲しみ、ムガル帝国の国力を傾け世界各地から宝石と職人を取り寄せ 22 年の歳月と膨大な費用をかけて建設した巨大な墓です。タージ・マハルの正門入口（写真 16）を通り過ぎると、いきなり白大理石に輝く「ハッと息をのむような感激」を覚えるほどの巨大で豪華な建造

物がタージ・マハル（写真 17）です。以前から写真を見て知ってはいましたが、本物の印象は「説明が困難」と思えるほど素晴らしい感激でした。世界遺産の中でも特別な位置を占めていることは明らかでした。

インド訪問からシカゴに戻って数か月後、週刊誌 TIME に驚く記事が掲載されたのにはびっくりでした。その記事によるとタージ・マハルと皇帝や愛妃に関する映画がインドでほぼ完成したらしいのです。しかし、インドのヒンズー教の過激派の一部から「この映画はインドの歴史を正しく表現していない」とし、映画を上映する「映画館は全て焼き討ちにする」、「映画監督、主演男優、主演女優は刀で首を切り落とす」との公開脅迫状が出て、3 人は直ちに身を隠したそうです。このニュースにはとても驚きましたが、その後どのように解決したのか結果を知りません。しかし、世界史の中には、多くの激しい宗教対立がありますが、最近でも存在することが明らかだと思います。インドには、多数の宗教が存在しますが、ヒンズー教徒は 81%、イスラム教徒が 13% で、長い間イスラムの支配者がいたのは明らかで、ヒンズー教徒の猛烈な反発は理解できると思います。ジャイプルのホテルでは料理長と仲良しになり、毎晩我々の食べられる程度の辛さの夕食とワインを楽しみました。タージ・マハルへの一日旅行では、サンドイッチ



写真 14 砂漠の国に君臨したマハラージャが建設した優雅で繊細なアンベール城



写真 15 アンベール城内の美しい庭園で夜ごと宴会開催

とバナナのランチを用意してくれ、インド人と親しくなった素晴らしい経験でした。

(2022年5月11日記 土井邦雄*)

土井邦雄^{1,2}

¹ シカゴ大学

² 群馬県立県民健康科学大学

Kunio Doi^{1,2}

¹ The University of Chicago

² Gunma Prefectural College of Health Sciences

*E-mail: k-doi@uchicago.edu



写真 16 アーグラーにあるタージ・マハルへの正門入口

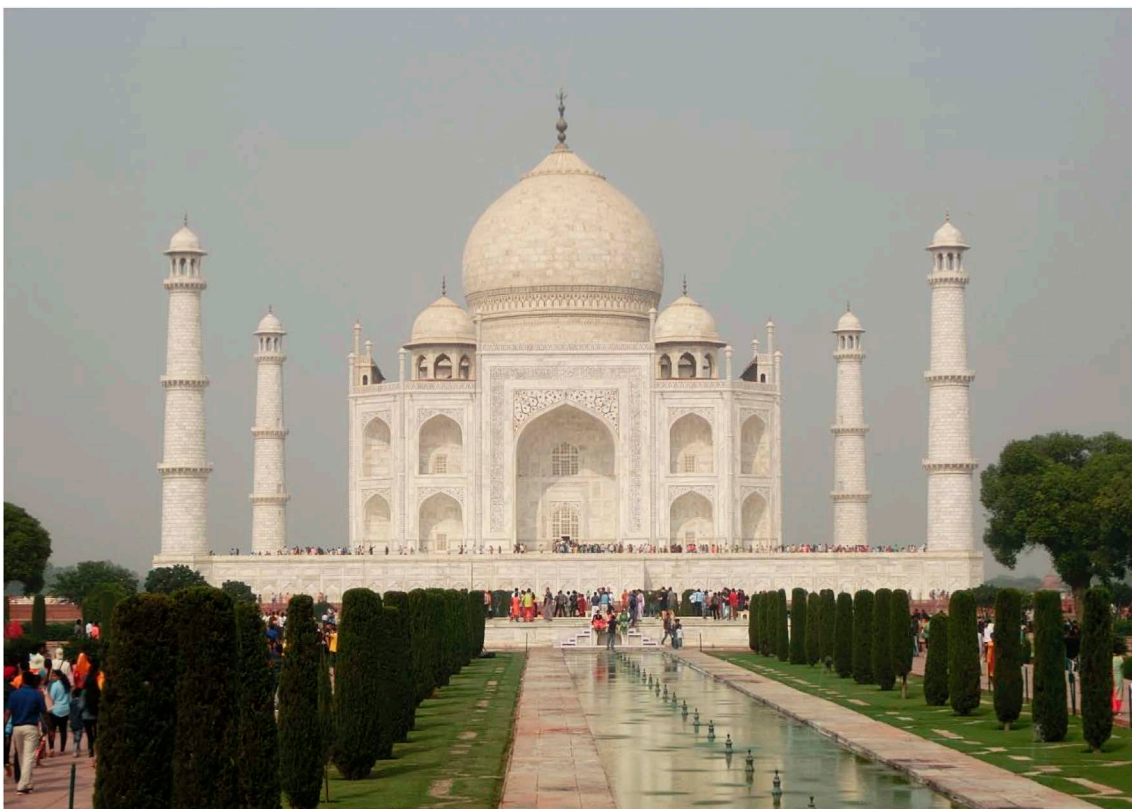


写真 17 王妃のための巨大な墓である豪華なタージ・マハル



シカゴ通信・バックナンバー

1. 世界の高層建築—パナマシティ, 香港, ドバイ—. 医学物理 41: 68-72, 2021
2. 高層建築のない世界—バルト3国, コスタリカ, アイルランド, ベルギーの古代インカ, 古代エジプト—. 医学物理 41: 166-176, 2021
3. 世界の島国—ニュージーランド, インドネシア, タヒチ, バルカン半島諸国—. 医学物理 41: 201-213, 2021
4. 世界に誇れるスイスの素晴らしい山岳. 医学物理 42: 55-62, 2022
5. 民主主義の歴史を持つギリシャと神秘的なインド. 医学物理 42: 110-120

編集後記

本号（医学物理 第42巻2号）の発刊にあたり、ご多忙の中、ご執筆いただいた著者の先生方に深く感謝いたします。巻頭言にもあるように、本号と次号は放射線防護委員会企画として中性子に焦点を当てた連載であり、「医学物理分野に必要な中性子の基礎知識」と題した特集号となっています。中性子に関しては、専門分野でエネルギー区分や名称が異なる点や、電荷を持たないことによる物理的性質・生物学的効果の特殊性等により、少し難しい印象があると感じている方も多いのではないのでしょうか。そのためか、中性子をkey wordにしている研究者は少ないのが現状です。本特集号は放射線防護に主眼を置いてはおりますが、会員の方々にとって中性子の特性を学び直すきっかけとなり、研究へ踏み出す第一歩になればとの思いを込めた企画です。連載前半となる本号は「中性子の基礎知識」に関して物理と生物に分け、2名の先生にご執筆いただきました。非常に膨大で多岐にわたる内容を、コンパクトでわかりやすくまとめていただいております。中性子に馴染みの少ない方でも情報がすんなり入ってくると思います。本号が会員のみなさまの研究・臨床・教育にお役に立てば幸いです。次号は「臨床現場における中性子」をテーマに、各種放射線治療における中性子のふるまいや防護に関しての解説となっております。次号の発刊を楽しみにしていただください。

（編集委員 磯辺智範）

Japanese Journal of Medical Physics

Editorial Board

T. Hasegawa (Chief)
Y. Anetai
F. Araki
T. Isobe
N. Kanematsu
R. Kohno
M. Sakai
S. Sato
S. Sugimoto
Y. Takahashi
A. Nohtomi
M. Hashimoto
T. Fujisaki
T. Magome
N. Matsufuji
S. Minohara
Y. Mori
H. Watabe
T. Yamada

JJMP Secretariat:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 358-5
Yamabukicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

JJMP Editorial Office:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 332-6
Yamabuki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

Japanese Journal of Medical Physics [JJMP] is published four times per annual volume by the Japan Society of Medical Physics.

JJMP is indexed in Index Medicus and MEDLINE on the MEDLARS system.

医学物理

編集委員長

長谷川智之（北里大学）

編集委員

姉帯 優介（関西医科大学）
荒木 不次男（熊本大学）
磯辺 智範（筑波大学）
兼松 伸幸（量子科学技術研究開発機構）
河野 良介（量子科学技術研究開発機構）
境 麻未（倉敷中央病院）
佐藤 清香（エレクトラ（株））
杉本 聡（順天堂大学）
高橋 豊（大阪大学）
納富 昭弘（九州大学）
橋本 成世（北里大学）
藤崎 達也（茨城県立医療大学）
馬込 大貴（駒澤大学）
松藤 成弘（量子科学技術研究開発機構）
荻原 伸一（神奈川県立がんセンター）
森 祐太郎（筑波大学）
渡部 浩司（東北大学）
山田 崇裕（近畿大学）

公益社団法人日本医学物理学会事務局：

〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5
（株）国際文献社内
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

公益社団法人日本医学物理学会編集事務局：

〒162-0801 東京都新宿区山吹町332-6
（株）国際文献社内
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

本誌は年1巻とし、1号、2号、3号及び4号として発行します。

本誌の研究論文、資料、特集のレポート等はMEDLINEで検索できます。

賛 助 会 員 名

エ レ ク タ 株 式 会 社	株 式 会 社 通 商 産 業 研 究 社
株 式 会 社 応 用 技 研	東 洋 メ デ ィ ッ ク 株 式 会 社
加 速 器 エ ン ジ ニ ア リ ン グ 株 式 会 社	長 瀬 ラ ン ダ ウ ア 株 式 会 社
住 友 重 機 械 工 業 株 式 会 社	ユ ー ロ メ デ ィ テ ッ ク 株 式 会 社
株 式 会 社 千 代 田 テ ク ノ ル	公 益 社 団 法 人 日 本 生 体 医 工 学 会

目 次

巻 頭 言

JSMP 放射線防護委員会企画

学会誌特集「医学物理分野に必要な中性子の基礎知識」

米内俊祐 65

〈連載：放射線防護委員会企画〉

解 説

中性子の基礎知識：物理

前畑京介 67

中性子線の生物学的影響：概説

今岡達彦 73

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

腫瘍学分野における PET 研究 [第3部]

三本拓也, 高島 賢, 井上一雅, 福土政広 80

解 説

医学物理若手の会の紹介および若手を対象とした

本邦の医学物理教育・医学物理士養成システムに関するアンケート調査：2021年版

伊良皆 拓, 金城優志, 田中創大, 恒田雅人, 平島英明 88

施設紹介

帝京大学大学院医学物理士コースの紹介

古徳純一, 熊谷 仁, 上原隆三, 白石憲史郎 106

連載コラム：シカゴ通信

民主主義の歴史を持つギリシャと神秘的なインド

土井邦雄 110

編集後記 121

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会

FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。