

医|学|物|理

Japanese Journal of Medical Physics

2022

Vol. 42

4

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

JSMP

Japan Society of Medical Physics



令和 4年
第42巻 4号



日本医学物理学会機関誌

目 次

解 説

医学物理の歴史

遠藤真広 201

施設紹介

徳島大学大学院保健科学研究科医学物理学コースの紹介

芳賀昭弘 212

連載コラム：シカゴ通信

ポルトガル，ハンガリー，南アフリカ，タイランド

土井邦雄 215

編集後記 231

【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

REVIEW

History of Medical Physics

Masahiro ENDO 201

INTRODUCTION OF RESEARCH FACILITY

Introduction to Medical Physics Course in Tokushima University

Akihiro HAGA 212

COLUMN: Chicago Report

Portugal, Hungary, South Africa, and Thailand

Kunio DOI 215

EDITOR'S NOTE 231

解説

医学物理の歴史 (注1), (注2)

遠藤真広*

医用原子力技術研究振興財団

History of Medical Physics

Masahiro ENDO*

Association for Nuclear Technology in Medicine

医学物理は、がん治療にラジウム放射線の利用が行われるようになったとき、作業者の被ばく防護などその安全な取扱法を開発することから始まった。そして、第2次世界大戦の終了までには、これに加えて放射線によりがんを安全かつ確実に治療する方法の開発や治療効果を評価するために必要な放射線投与量の定量化（線量計測）を対象とするようになった。第2次世界大戦中の原子力技術の急速な発展により、大戦後には原子炉で生産される放射性同位元素（RI）を大量に利用できるようになり、RIの医学利用として核医学が始まった。その装置の開発や臨床利用には放射線計測やRIの取り扱いに対する知識や技術が必要とされ、核医学物理が医学物理に加わった。1972年のCTの発明は、臨床医学全体に大きなインパクトを与え、またその頃からMRI装置の開発が始まった。これにより、従来は必ずしも医学物理の領域と見なされていなかったCTやMRIの開発やその画像特性の研究が放射線診断物理として医学物理の領域に加わるようになった。このレビューでは医学物理の歴史の概略を述べ、欧米最初の medical physicist についても触れる。また、我が国の医学物理の始まりと世界的研究開発について簡単に紹介する。

キーワード：放射線診断物理，放射線治療物理，核医学物理，日本の医学物理，歴史

1. はじめに

医学と物理学は古い時代から関係し、物理学の原理は疾病の診療において使われてきた。例えば、ヒポクラテスは、水分の含有量で色が変わる染料で染めた布を少し湿らせてから患者の皮膚にあて、正常部との乾き方の差による色の違いから病変部の広がりやを推定したという。これは原始的なサーモグラフィーといえる。レオナルド・ダ・ヴィンチは関節の働きを力学により説明し、また近視や遠視の光学的研究を行い、コンタクトレンズの原理を発見している点で、世界最初の medical physicist という称号をその長い肩書きリストに加えることもできないことではない¹⁾。このようなことは歴史に散見されるが、物理学と医学が体系的に関わるようになったのは、19世紀末の放射線の発見とその医学応用の開始以来であるので、本稿はそこから医学物理の歴史を始めることにする。

図1は医学物理の領域とその拡大する様子を示したものである。医学物理は、最初、がん治療にラジウム放射線の利用が行われるようになった1900年代の初めに、作業者の被ばく防護などその安全な取扱法を開発するため始まった。そして、第2次世界大戦の終了までには、ラジウムガ

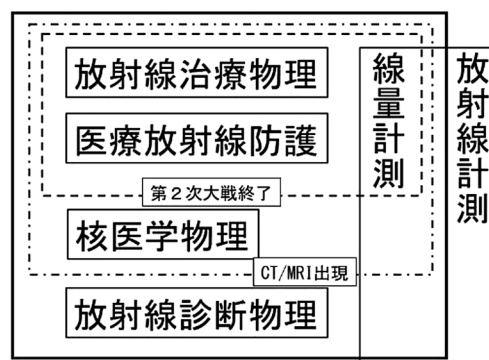


図1 医学物理の領域とその拡大

第2次世界大戦の終了以前には医学物理は放射線治療物理、医療放射線防護およびそれらに関連する放射線計測で構成されていた。大戦後、核医学物理が医学物理に加わり、そしてCTの出現が契機になり、放射線診断物理が加わった。

ンマ線やX線によりがんを安全かつ確実に治療する方法の開発や治療効果を評価するために必要な放射線の投与量の定量化（線量計測）を対象とする放射線治療物理を確立し、その構成に加えた。

第2次世界大戦中の原子力技術の急速な発展により、大戦後には原子炉で生産されるRIを大量に利用できるよう

* 連絡著者(corresponding author) E-mail: endo.masahiro@antm.or.jp

(注1) このレビューは、日本医学物理学会の許可を得て、Endo M: History of Medical Physics. Radiol. Phys. Technol. 14: 345–357, 2020 を翻訳し掲載したものである。This review is translated from “Endo M: History of Medical Physics. Radiol. Phys. Technol. 14: 345–347, 2020” and published with permission from the Japan Society of Medical Physics.

(注2) “medical physics” には、学問としての「医学物理学」とそれを学んだ人（医学物理士）の実践との両方を包含するニュアンスがあるため、本レビューでは“medical physics”を「医学物理学」ではなく、両者を含むものとして「医学物理」と訳している。また、“medical physicist”は、認定された専門家である「医学物理士」と「医学物理学者」や俗に「物理屋」とも言われてきた医学（主に放射線医学）の現場で働く物理学出身者の両方を意味している。本レビューでは、前者の意味に用いるときは「医学物理士」と訳したが、後者の意味に用いるときは“medical physicist”のままとした。

表1 医学物理の歴史

	放射線診断物理	放射線治療物理	核医学物理
1895	X線の発見		
1896		最初の放射線治療	
1898		ラジウムの発見	
1900年代初め		ラジウムによる治療の開始とその確立 ('20年代)	
1913	クーリッジ管の発明	英国と米国で medical physicist が誕生	核医学の提案 (1910年代)
1916	増感紙—フィルム系の商用化		
1920–30年代		深部X線治療装置の導入	
1930年代		マンチェスター法	
1930–40年代		粒子加速器の導入	
1950年代	X線テレビの開発と商用化	コバルト-60治療装置の導入と普及 ('60年代)	核医学の創始
		リニアックの導入と普及 ('70年代)	
1956			ガンマカメラの発明
1968ころ		ガンマナイフの発明	
1970		最初の専用線量分布計算機PC-12の導入	
1972	CTの発明		
1970年代半ば		粒子線治療の開始と3次元治療計画装置の開発	PET装置の開発
1970年代後半	MRIの開発と臨床開始 ('80年代)		
1981	FCRの発明		
1980年代後半		3次元原体照射の導入	
1990年代	FPDの開発		
1994		サイバーナイフの発明	
1990年代半ば		3次元治療計画装置の商用化	
1990年代後半		SBRTの導入	
1990年代末		IMRTの導入	
2000年初め		X線撮影装置搭載リニアックの商用化	

略語：CT: computed tomography, MRI: magnetic resonance imaging, FCR: Fuji Computed Radiography, FPD: flat panel detector, SBRT: stereotactic body radiotherapy, IMRT: intensity modulated radiotherapy, PET: positron emission tomograph

になった。そして、RIの医学利用により核医学が始まった。その装置の開発や臨床利用には放射線計測やRIの取り扱いに対する知識や技術が必要とされ、核医学物理が医学物理に加わった。1972年のCTの発明は、臨床医学全体に大きなインパクトを与え、またその頃からMRI装置の開発が始まった。これにより、従来は必ずしも医学物理の領域と見なされていなかったCTやMRIの開発やその画像特性の研究が放射線診断物理として医学物理の領域に加わるようになった。現在では、医学物理は図1に示すように放射線診断物理、放射線治療物理、核医学物理、医療放射線防護とそれらに関連する放射線計測から成り立っている。そして、これらの基礎となる画像・情報処理や放射線物理学を加える場合もある。しかし、本稿においては、著者の能力の限界と紙数の制限から基礎、放射線計測、医療放射線防護については言及せず、臨床に密接に関連した放射線診断物理、放射線治療物理、核医学物理の歴史を述べることにする。そして、放射線診断物理については、医学物理がまだ誕生していなかった時代になされたRöntgenのX線の発見にまでさかのぼって、そこから説明する。表1は本稿で説明する歴史上の出来事を示したものである。

2. 放射線診断物理

1895年11月8日にドイツの物理学者 Wilhelm Röntgen によりX線が発見された。X線の発見は科学技術の発展に

大きく寄与し、医学においてはこれにより放射線医学が創始された。図2は、RöntgenがX線を発見する際に使用していた実験装置の概念図である²⁾。図に示すようにこの装置では、誘導コイルにより発生する高電圧を陰極線管（クルックス管）の電極に印加する。すると、放電により生じる陽イオンが陰極に衝突し、多数の電子を放出させる。これらの電子は高電圧により加速され、陽極側のガラス壁に衝突しX線を発生させる。このX線を被写体に照射し、写真乾板を露光させたものが最初のX線写真である。Röntgenは、今では高校教育や大学教養部の学生実験で用いられるようなありさまの装置でX線を発見し、それにより最初のノーベル物理学賞を受賞する栄誉に輝いたのである。

クルックス管は、低圧気体放電を利用するため発生するX線は不安定であり、その強度も弱かった。それを改良したのがGeneral Electric Company(GE)の技術者 William Coolidgeである。彼は電流で加熱された陰極からの放出電子を用いるX線管（熱陰極管、クーリッジ管）を発明し、1913年に発表した。クーリッジ管の採用によりX線の出力は安定となり、また加熱電流を変化させることによりX線出力を任意に設定することも可能となった。熱陰極管の基本原理解は、現在の回転陽極X線管でも変わらない。

また、画像を記録する方法としては、Röntgenの用いた写真乾板は取扱いが不便なため、その頃から販売され始めていた写真フィルムに置き換えられた。そして、感度を上

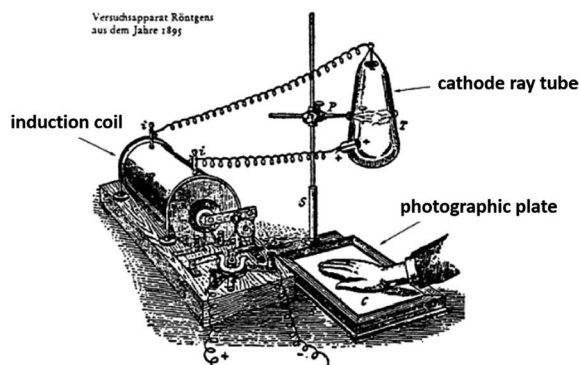


図2 Röntgenの実験装置の概念図

誘導コイルで発生した高電圧が陰極線管(CRT)に印加される。CRTの陽極側のガラス壁で発生したX線は、被写体を透過し写真乾板を露光させる。考古堂の許可を受け、文献2)より転載。

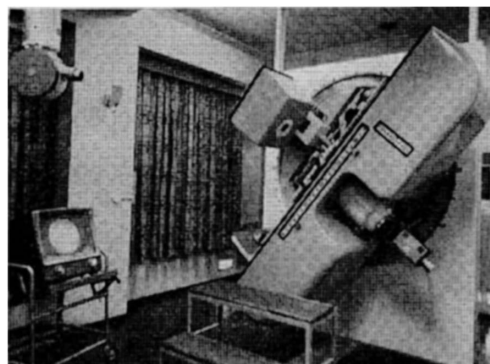


図3 日本で最初の遠隔制御式X線テレビ装置(1961)

撮影寝台の上部にX線管が配置され、下部にはイメージ・インテンシファイアー(II)と撮像管が配置されている。日本放射線技術学会の許可を受け、文献3)より転載。

げるため、蛍光物質(タンゲステン酸カルシウム)を塗布した薄いプラスチック板(増感紙)と併用されるようになった。1916年にイーストマン・コダックより両面乳剤塗布のX線フィルムと2重増感紙のシステムの販売が開始され、X線撮影の利便性は大幅に向上した。クーリッジ管とフィルム-増感紙システムの利用により、X線撮影技術の基本は完成した。その後も多くの技術的改良はあったが、次の根本的な改良は、1981年のフジコンピュータドラジオグラフィ(Fuji Computed Radiography: FCR)の発明まで待たねばならなかった。

一方、動く臓器をリアルタイムに観察するX線透視には、X線の発見とほぼ同時に使用が開始された蛍光板を直視する方法が、造影検査などに長く使用されていた。しかし、この方法では観察者の放射線被ばくが避けられないという問題があった。1950年代になり折から発展してきたテレビ技術を応用したX線テレビが開発され、商用化された。これにより観察者の放射線被ばくの問題は解決し、映像の記録や明るい環境での観察が可能になるなど多くのメリットが生まれた。

図3は日本で最初の遠隔制御式X線テレビ装置を示している³⁾。図に示すように撮影寝台の上部にX線管が配置され、下部にはイメージ・インテンシファイアー(image intensifier: II)と撮像管が配置されている。IIはX線を入力蛍光面で光に変換し、さらに電子に変換してから、加速縮小し、出力蛍光面で光に復元する電子管である。IIはX線テレビのキーコンポーネントであり、これと民生用テレビ技術が結びつくことにより、X線透視の革新が起こったといえる。

今まで述べてきたX線画像は、すべて3次元構造を持つ人体を平面に投影して2次元画像として観察するものであった。このような撮影法では3次元構造が重畳し、また低コントラストの対象は画像化されないため得られる情報は主に骨や肺など高コントラストのものに関してであっ

た。1930年代にはオランダの放射線診断医 Bernard Zeides des Platesにより断層撮影法が開発され、身体の長軸に平行な断面のX線画像の取得が可能となった⁴⁾。しかし、この方法では目的とする以外の断面の画像はぼかして重畳させるためコントラストが低下するという欠点があり、低コントラストの被写体の識別能は向上しなかった。このため、断層撮影法は胸部撮影において、骨と血管影を除去することにより肺病巣を可視化することができたが、他の分野での応用は限られていた。

消化管や血管など管腔臓器に対してはX線減弱係数の大きいヨウ素などを含む造影剤の使用により、その画像化が行われ、診断に有用な情報が得られた。しかし、脳や肝臓などの実質臓器の解剖学的情報を得ることは困難であった。

このようなX線撮影の限界を打ち破ったのがCTである。身体の横断面のX線減弱係数の分布を画像化するCTは、英国EMI社の技術者 Godfrey Hounsfieldにより発明され、1972年に公表された。CTの発明は、放射線医学においてX線の発見と並ぶ最大の出来事とされ、その後の放射線医学の発展に大きな影響を与えた。その功績により、Hounsfieldは先駆的な実験を行った Allan Cormackとともに1979年のノーベル医学・生理学賞を授与されている。図4は最初の商用CTであるEMI MK-1を示している。日本で最初に1975年に東京女子医大に設置されたものである。MK-1は頭部専用であり、2スライスを同時に撮影するが、スキャン時間は4分半であった。画像マトリックスは80×80であり、現在のCTの性能から考えると、まさに隔世の感がある。

CTが発表されたのとはほぼ同じころの1973年にニューヨーク州立大学の化学の教授であった Paul Lauterbur は身体内から発生する核磁気共鳴信号の画像化法を提案した⁵⁾。この方法は後に magnetic resonance imaging (MRI) と名付けられ、10年間ほどかけて開発が進んだ。そして、1980年代の前半には実用化され、X線CTに匹敵するほど

のインパクトを放射線医学に与えた。Lauterburは、世界で広く使われているイメージング法を開発したPeter Mansfieldとともに2003年のノーベル医学・生理学賞を授与された。

CTが出現するころまでの放射線診断機器の開発は主に電気技術者と放射線科医により担われていて、物理学研究者の関与はほとんどなかった。放射線画像特性についての物理的な研究も、PETの開発者でもあるMichel Ter-Pogossianが1967年に出版した放射線診断の物理的側面についての先駆的な教科書⁶⁾以外にはめばしいものはなかった。しかし、CTの出現やMRIの開発により放射線診断の中での物理学の役割への理解が深まり、医学物理の中にこれらを体系的に扱う放射線診断物理が成立した。

1970年代ではコンピューター技術の進歩を背景として、画像をデジタル化して画質を改善することも行われるようになった。放射線診断に用いられる画像については、CT画像はもともとデジタル画像であり、核医学画像も解像度やコントラスト分解能が低いため、デジタル化は比較的容易であった。しかし、X線写真は情報量が膨大なため、それほど容易ではなく、デジタル化の方法が模索されていた。

このような時に富士フィルムは、FCRを発明し、1981年に公表した。これは、イメージングプレート(imaging plate: IP)という輝尽性蛍光体を塗布した薄いプラスチック

基板にX線を照射し、その後レーザー光によりX線強度を読み取り、X線画像をデジタル化するものである。X線フィルムをデジタル化するのに比べて、はるかに迅速かつ高精度でデジタル化できるため、X線画像デジタル化の主要なツールとなった。純国産技術であり、放射線医学における我が国の最大の発明といえる。FCRの商品化により、X線画像のデジタル化は急速に進んだ。図5は1981年に販売されたFCRの一つであるCR-101を示す。相当に大きな装置であるが、カセットからIPを取り出しレーザーで読み取り、再びカセットに装填することを自動的に行う装置(左側と中央部)が大きな部分を占めている。また当時のコンピューター技術を反映して、画像処理などに用いるコンピューター(右側)も大きい。

FCRはIPに記録されたX線画像をオフラインで読み出すものであった。一方、X線画像を検出すると同時にデジタル化してオンラインで取り込む装置の開発が1990年代を通して行われた。フラットパネルディテクター(flat panel detector: FPD)である。

これは、急速に進歩していた半導体の微細加工技術を利用し、アモルファスシリコン(もしくはセレン)の薄膜上に光(もしくはX線)検出素子と信号の読み出し回路を形成した2次元X線検出器である。光検出器を形成したものは、蛍光板と重ねて使用され、間接型と呼ばれる。FPDは1990年代末に実用化され、IPを用いるコンピューテッドラジオグラフィーと競合しながら撮影で使用され、また透視においてはX線テレビに置き換わった。これによりX線テレビのキーコンポーネントであったIIは不要になったが、半導体(固体)が電子管に置き換わる大きな潮流のひとつの表れとすることができる。

3. 放射線治療物理

3.1 初期の放射線治療と医学物理の始まり

最初の放射線治療は、RöntgenによるX線の発見の翌年である1896年に早くも開始されている。このときは、放射線の生物学的作用がわかって治療を始めたわけではなく、当時、可視光などの光を照射して天然痘や皮膚結核を治療する光線療法が流行していて、その一つとして試みら



図4 世界最初のCTであるEMI社のMK-1の日本初号機は東京女子医大に1975年に設置された
キャノンメディカルシステムズ株式会社提供



図5 1981年に販売開始されたFCRの一つであるCR-101
図の左側と中央部の装置は、カセットからIPを取り出しレーザーで読み取り、再びカセットに装填する。図の右側の装置は画像処理とその保管を行う。富士フィルム株式会社提供

れた。ちなみに光線療法の創始者 Niels Finsen には、その功績により 1903 年のノーベル医学・生理学賞が授与されている。しかし現在の視点から見ると何でノーベル賞をもらえたのかという疑問がないこともない。昔のノーベル賞の中にはごくまれではあるが、おかしなものもあったようである。X 線照射により治癒する皮膚の良性疾患はまれにはあり、Siemens Healthineers「がんとの闘い」という WEB サイトには 1896 年に X 線照射により治癒したという有毛性色素母斑の少女の写真が原著から引用され、掲載されている⁷⁾。しかし、このように幸運の例はごくわずかであり、多くの再発や晩期有害事象などを含む試行錯誤の末、ようやく 1920 年ごろに X 線は皮膚癌に有効であるという知見が共通のものとなった。

放射線による治療が始まったのと同じ年の 1896 年に Henri Becquerel はウランウから目に見えない未知の線が自発的に放出され、金属などを透過し、空気を電離することを見いだした。放射線の発見として知られる科学史上の有名な出来事である。Currie 夫妻 (Pierre Curie と Marie Curie) は、ウランの原鉱石であるピッチブレンドからウランより強い放射線が放出されていることを見だし、1898 年にピッチブレンドに非常に強い放射線を放出するポロニウムそしてラジウムが含まれていることを発見し、1902 年にそれらが元素であることを示した。これらの功績により、1903 年に Currie 夫妻と Becquerel はノーベル物理学賞を受賞している。Marie Curie は 1911 年のノーベル化学賞も受賞している。

ラジウムは非常に強い放射線を放出したので、1900 年代の初めころから治療への応用が試みられた。X 線のように外部照射だけではなく、腔内照射、組織内照射、表面貼付なども行われた。Currie 夫妻 (Pierre の事故死後は Marie) は、ラジウムの治療利用に熱心であり、自ら作成したラジウムの貸し出しや、精製の指導を行った。ラジウムにより子宮頸癌や頭頸部癌など皮膚癌以外の癌も治癒させることができた。1920 年代には子宮頸癌の腔内照射、1930 年代には頭頸部癌の組織内照射が癌の治療法として確立している。

ラジウムによる治療開始は医学物理の始まりでもある。放射性同位元素であるラジウムの管理には、物理学の専門知識や実験技術が必要であり、1910 年代より欧米のラジウム治療を行う病院は、物理学の専門家を雇用するようになった。彼らは、ラジウムより生成するラドンを採取し、治療用線源とする作業も行った。物理学の専門家は臨床的な問題にも関与するようになり、1930 年代に放射線治療医 James Paterson と物理学の専門家 Herbert Parker は、臨床利用のため平面上の線量分布を均一とするラジウム針の (マンチェスター法、もしくは Paterson-Parker 法と呼ばれる) 配列を考案した⁸⁾。その後、このような放射線科医と医学物理士の共同作業はしばしば行われ、多くの成果

を産んでいる。

ラジウムの管理のため、英国の病院に常勤で雇用された最初の medical physicist は、Sidney Russ であり、彼は 1913 年にロンドンのミドルセックス病院に雇用された。そして、その後、病院での medical physicist の数は緩やかに増加し、1943 年に 53 名のメンバーで Hospital Physicists' Association を結成している⁹⁾。

一方、米国においてもヨーロッパでラジウムの取扱いを習得した William Duane が 1913 年よりハーバード大学に assistant professor として勤務するとともに、ボストンのハンチントン病院に在籍してラジウムの管理、特にラドンシードの作成を行った。彼はラドンシードの作成法を改良したが、それよりも X 線のエネルギーと波長の関係を示す Duane-Hunt の法則を発見したことで有名である。米国においても英国を追うように medical physicist の数は緩やかに増加し、1958 年に 127 名のメンバーで American Association of Physicists in Medicine (AAPM) を結成している⁹⁾。

3.2 治療用放射線の高エネルギー化

3.1 節の最初のパラグラフで述べてように 1920 年ごろには X 線は皮膚癌に有効であるという知見が共通のものとなった。しかし、当時の X 線技術では 100 kV 程度が X 線エネルギーの限界であり、それを超すと放電が起こるなどの問題が生じた。しかし、皮膚より深い臓器の腫瘍を治療するためには X 線のエネルギーを高くする必要がある。このため、1920～30 年代には、電気の絶縁に特別に注意を払って設計した最高エネルギー 200～500 kV の深部 (orthovoltage) X 線治療装置が開発され、臨床に使用された。これらの装置により頭頸部などの比較的浅い腫瘍は治療できるようになったが、体幹部の深部にある腫瘍の治療はなお困難であった。

500 kV 以上の X 線エネルギーを従来の方法で達成するのは困難であったので、1930 年代に折から発展してきた原子核物理学実験で使用されるようになった加速器が X 線の発生に用いられるようになった。その主なものは、コッククロフト型、ヴァンデグラフト型という静電加速器と共振変圧器型加速器であり、1～2 MV の X 線を発生することができた。図 6 はコッククロフト型粒子加速器を用いた治療装置を示している。この装置は 1936 年にロンドンのセント・バーソロミュー病院に設置され、世界で初めて 1 MV の X 線で患者治療を行った¹⁰⁾。また、1940 年代になるとベータトロンが開発され、治療にも使用された。ベータトロンにより 10～20 MV という X 線や電子線が使用できた。しかし、いずれも高価なため、普及が進まないうちにコバルト-60 治療装置に席を譲ることになった。

第 2 次世界大戦を契機として急速に発展した原子力技術により RI の大量生産が可能となった。これは臨床核医学を成立させ、またラジウムに代わる密封線源を供給するこ

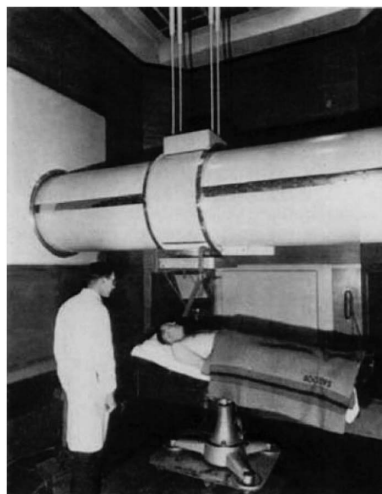


図6 1936年にロンドンのセイント・パーソロミュー病院に設置され、世界で初めて1 MVのX線で患者治療を行ったコッククロフト型治療装置

Copyright Clearance Center 経由で The British Institute of Radiology から許可を受け、文献10)より転載。

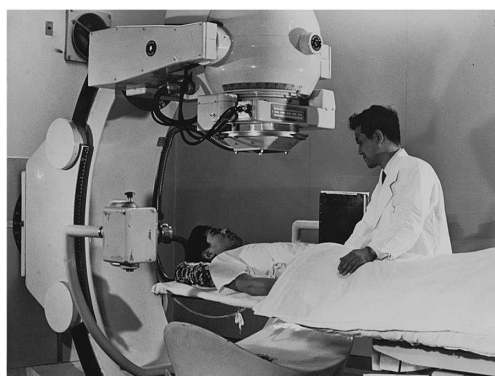


図7 コバルト-60 治療装置。線源は上部の遮蔽容器内に収納されていて、全体を体の中心軸の周りで回転できる

とにより、放射線治療を発展させた。特に大線量の ^{60}Co を用いた外部照射装置が1950年代に導入され、それまで高価なラジウム照射装置や加速器による以外は困難であった深部臓器の治療が可能となった。図7はコバルト-60治療装置を示す。線源は上部の遮蔽容器内に収納されていて、全体を体の中心軸の周りで回転できる。コバルト-60治療装置は、1960～70年代を通じて設置が進み、最盛期の1980年ころには国内で約500台が稼働していたが¹¹⁾、その後、急速にリニアックに置き換えられた。

リニアックは他の加速器と同様に1930年代に開発され、比較的重い原子核の加速には成功していた。しかし、当時は適当な高周波源がなかったため、陽子や電子などの軽い粒子の加速はできなかった。第2次世界大戦の際、レーダー用の発振器として開発された大強度のクライストロンやマグネトロンの利用により電子の加速が可能となり、1950年代に放射線治療用のリニアックが導入された。しかし、同じころ導入されたコバルト-60治療装置の陰に隠

れ、その普及が始まったのは1970年代であり、1980年代になるとコバルト-60治療装置を追い抜いて主力装置となった。

3.3 3次元原体照射から高精度放射線治療へ

1980年代の前半までリニアックの照射野は矩形が基本であり、照射を避けたい部位はブロックにより遮蔽した。照射法も対向2門照射など簡単なものが多かった。1980年代の後半になり、多葉コリメータ (multileaf collimator: MLC) が商用化され、また1990年代初めに出現したMLCを標準装備したリニアックにより照射野を任意に絞ることが容易となり、3次元原体照射 (three-dimensional conformal radiotherapy: 3D-CRT) が広く行われるようになった。3次元原体照射は、引き続き強度変調放射線治療 (intensity-modulated radiotherapy: IMRT) へ発展していく。

CTに端を発する逆問題の研究から、3D-CRTよりも線量集中性の良い照射法が開発された。IMRTである。専用機であるトモセラピーは、米国ウィスコンシン大学の医学物理士であるThomas Macieらにより発明され、2002年に商品化された。一方、汎用のリニアックを用いるIMRTはそれより早く1990年代末から始まっている。

放射線治療は正常組織の障害を少なくするため、腫瘍と正常組織の放射線に対する反応の差を利用する。このため、通常、1日1回、小線量 (2 Gy程度) を多数回 (30回程度) 繰り返して照射する。しかし、小さな病巣 (直径3 cm程度以下) に対しては多数方向から照射することにより、病巣部に大線量を照射する一方で周辺への線量を少なくして、小数回 (極端な場合は1回) の照射により治療する方法がある。定位放射線治療 (stereotactic radiotherapy: SRT) であり、SRTは最初、脳内の良性疾患の治療から始まった。1968年ころスウェーデン・カロリンスカ大学の脳外科医Lars Leksellらはガンマナイフを発明した。これは球殻状のシールド容器に多数のコバルト-60線源を配置し、細いコリメータを通して内側に向けてガンマ線を照射し、中心に集光する装置である。患者は球殻の中央の開口に頭部を挿入し、その中心に正確に病巣部を位置合わせする。病巣部を含む直径3 cm程度の球状の部位は完全に破壊されるが、その周辺の線量は少ないため正常に保たれる。導入当時は、2方向の造影撮影により病変部が正確に同定できる血管病変などの治療に用いられた。その後、CTやMRIの登場により脳内の腫瘍位置が同定できるようになったので、1980年ころから腫瘍の治療も適応となった。

一方、ロボットに搭載された小型リニアックを用いてSRTを行うサイバーナイフは米国スタンフォード大学の脳外科医John Adlerらにより発明され、1994年に米国で販売が開始された。当初は良性疾患の治療に対してのみ使用されたが、1999年にはがん治療への使用が認められた。そして、その後、呼吸移動する臓器を含む体幹部への適用

が承認された。ここで体幹部の定位治療を特に体幹部定位放射線治療という。2000年代の初めには汎用リニアックにもFPDを検出器とするX線撮影装置が搭載され、治療時の画像取得による正確な位置決めが可能となり、SRTが行われるようになった。

上記のIMRTとSRTに加えて、1990年代から病院環境での実施が可能となった粒子線治療（陽子線治療および炭素イオン線治療）を合わせて高精度放射線治療という。これらは標的に高線量を集中し、周辺の正常臓器の線量を下げることができる。標的線量を従来よりも大きくすることができるため、前立腺癌、頭頸部癌、肺癌、肝癌などで治療成績が向上し、放射線治療の適応を広げている。

3.4 治療計画装置の開発

放射線治療計画は、深部治療が可能なコバルト-60治療装置の導入によりその必要性が認識された。1950～60年代においては、シミュレータで照射野を決定し、曲げることが容易な低温ハンダの針金で体輪郭を取得する。そして、当時、利用可能であった画像技術（主にX線撮影）で得られた病巣部位を書き込み、重要臓器は横断解剖学の図譜から見当を付けて書き込んだ。そして、線量分布は中心断面に対して汎用計算機のバッチ処理で計算するか、ファントム中で測定した線量分布を重ねて作図により得ていた。1970年には最初の線量分布計算機PC-12（図8）が発売され¹²⁾、線量分布計算は便利になったが、その他の作業はあまり変わらなかった。

1980年代になると、線量分布計算機の機能は向上し、治療計画装置と呼ばれるようになった。また、体輪郭の取得や標的と重要臓器の入力にはCTが使われ始めた。しかし、使用されるCT画像は、1断面からたかだか数断面であり、3次元線量分布が精度よく計算できないため、標的中心断面など数断面の2次元治療計画を行うことがやっと

であった。一方、米国マサチューセッツ総合病院(Massachusetts General Hospital: MGH)では、1974年より癌の陽子線治療を開始したが、主任医学物理士のMichael Goiteinは陽子線治療の特色を生かすため、最初から3次元治療計画を指向し、1980年ころには自作の3次元治療計画装置を臨床利用していた。その機能は、CT画像上への標的・重要臓器の入力、バーチャル・シミュレーション、3次元線量分布計算とその表示、線量体積ヒストグラムの計算（少し後に加えられた腫瘍制御率、正常組織障害発生確率による評価）、digitally reconstructed radiograph (DRR)の計算などであり、現在の治療計画装置の基本となっている機能を備えていた。そして、治療のたびに撮影されるX線写真とDRRを比較して患者の位置を決めるため、画像誘導放射線治療 (IGRT) の先駆けでもあった¹³⁾。

1980年代の後半になるとMLCが商用化された。先進的な治療施設では、それをリニアックに取り付け、3D-CRTを試みた。その際に必要となる3次元治療計画装置はそれぞれ自作していた。米国の国立がん研究所はこれらの治療施設の研究者により作業グループを組織し、3次元治療計画装置の要件をまとめるプロジェクトを1980年代の最後の3年間に実施した。報告書はInternational Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics (Vol.21, No.1, 1991)の1冊にまとめられた。ここで記載された仕様にもとづく治療計画装置が1990代半ば以降に商品化されたが、本質的には1980年頃よりMGHで陽子線治療にルーチ的に使用されていたと同様のものであった。3次元治療計画装置により、3D-CRTが実施され、さらにソフトウェアを追加してIMRTが可能となった。2000年を過ぎるころにkV-X線撮影装置を搭載したリニアックが商用化されると、それに対応してIGRTを可能とするソフトウェアも追加された。

4. 核医学物理の歴史

核医学は、放射性トレーサー法を開発したハンガリーの化学者George de Hevesyにより、1910年代に提案された。そして彼は1923年に世界で初めてRIを生物トレーサーとして使用した。一方、米国の医師Hermann Blumgartにより放射性トレーサーが人体に初めて使用された。彼は、1927年に²¹⁴Biを使用して自分自身の血液循環時間を測定した。このため、2人は時に「核医学の父」と呼ばれることがある。しかしながら、核医学の臨床利用には豊富なRIが必要であった。

第2次世界大戦を契機として急速に発展した原子力技術によりRIの大量生産が可能となり、これを利用して臨床核医学（以下、「核医学」と記す）が1950年代の初めに創始された。初期の核医学では、体内に投与されたRIから放出されるガンマ線をシンチスキャナーで計測し、その2次元分布を作成することが行われた。シンチスキャナーは



図8 線量分布計算機PC-12

左から右にロー・シート変換機（輪郭入力のための電気機械的な入力装置）、キーボード、ストレージ・スコープおよびプロッターにより構成される。Radiological Society of North Americaの許可を得て、文献¹²⁾より転載。

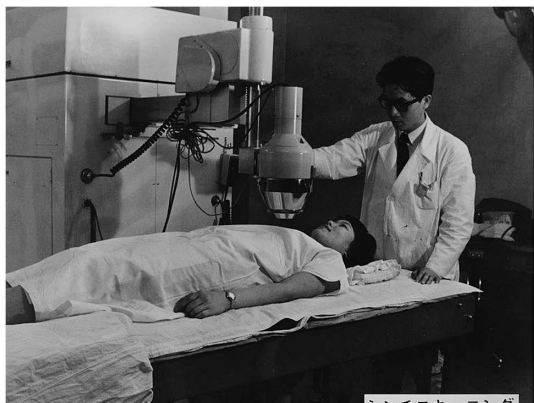


図9 シンチスキャナー
この装置は、シンチレーション検出器を走査しながらガンマ線を検出し、その強度に応じてフィルムを露光していくことによりRIの2次元分布を得る。

図9に示すようにシンチレーション検出器を走査しながらガンマ線を検出し、その強度に応じてフィルムを露光していくことにより2次元分布を得る装置である。シンチスキャナーの利用は、 ^{131}I の無機塩を投与して甲状腺疾患を診断することから始められ、その後、合成されるようになった様々な放射性医薬品により、脳、肝臓、腫瘍などの診断が行われた。核医学機器の開発やその臨床利用には、放射能計測の専門知識が必要なため、核医学の創設時から物理関係者が参画し、当初から核医学物理は医学物理の一部と考えられた。

シンチスキャナーは機械的な走査が必要なため、2次元分布の取得に時間がかかった。甲状腺のように小さい臓器の場合は容易に検査できたが、肝臓のような大きな臓器では検査は長時間を要し、患者の負担が大きかった。これを解決したのが、1956年の米国のLawrence Berkeley Laboratory Hal Angerによるガンマカメラ（アンガーカメラ、シンチカメラともいう）の発明である（図10）¹⁴⁾。ガンマカメラは、一つの結晶の発光を複数の光電子増倍管で検出し、それぞれの光電子増倍管の光量の重心計算により放射線の入射位置を求めている。ガンマカメラは時代とともに大視野となり、かつ高速化した。このため、核医学は静止画像から解剖学的情報を得るだけでなく、時間変化する画像から生理的情報を抽出する手段としても用いられるようになった。

陽電子が消滅するとき発生する2本のガンマ線を体外から同時計数することにより、人体内の情報を得るPETは1950年代前半の核医学の創始とおおよそ同じころ、Frank Wrenn, Gordon Brownellなどにより行われた。1960年代の初めには、S. Rankowitzはリング上に32個の検出器を配列して、1断面が撮像できる装置を試作したが、再構成ソフトウェアは未完であった。1970年代に入り、CTの出現により、再び開発が行われた。Michel Ter-Pogossianは六角形配列のプロトタイプPETTを1975年

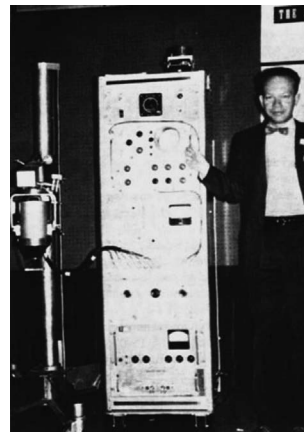


図10 最初のガンマカメラと開発者のHal Anger
この写真は最初、文献14)で公表された。©SNMML

に作成し¹⁵⁾、その共同研究者であったMichael Phelpsは1976年に人体撮影用のPETIIIを製作し、初めて人体のPET画像を得た。PETIIIはECATの名称で商品化され、PETによる核医学が始まった¹⁶⁾。その後、PETは多段化され、また高解像力化、高感度化が著しく、現在ではガンマカメラと並ぶ主要な核医学機器となっている。

5. 日本の医学物理

5.1 日本の医学物理の始まり

1934年11月、三井報恩会より寄贈されたラジウム5gが癌研究所（以下、癌研）に納入された。その価格は100万円であり、5千倍とも1万倍ともされる物価の変遷から考えると、今で言えば陽子線や重粒子線治療装置を寄贈したぐらいのインパクトがあったと思われる。

1935年に入り、癌研では、ラジウムの管理のため、物理学の専門家である三輪光雄を所員に迎えた。三輪は1928年に東京帝国大学（以下、東大）を卒業後、同大学、続いて東北帝国大学で物理学の研究に従事していたが、請われて癌研に入所した日本で最初のmedical physicistである。三輪はラジウムの管理を行うとともにラドンの採取装置を製作し、ラドン採取にあたった（図11）。このラドンシードは癌研だけでなく、国内の治療施設に供給された。三輪は1942年に東京文理大学（現筑波大学）教授に転任し、その後を影山誠三郎が継いだ。影山が大学に転じた後は、1950年に採用された尾内能夫が継ぎ、1973年に物理部が創設されると、その部長となった。

日本で2番目のmedical physicistである江藤秀雄は1935年に東大卒業後、鉄道中学の教師を経て、1938年に東大医学部放射線教室に採用された。江藤は治療だけでなく、診断機器の研究開発、放射線防護の研究など幅広く活動した。

第2次世界大戦の終了後、核医学の創設、コバルト治療装置の導入、結核検診の普及による放射線防護の問題解決などに対応するため、放射線医学における物理の専門家の

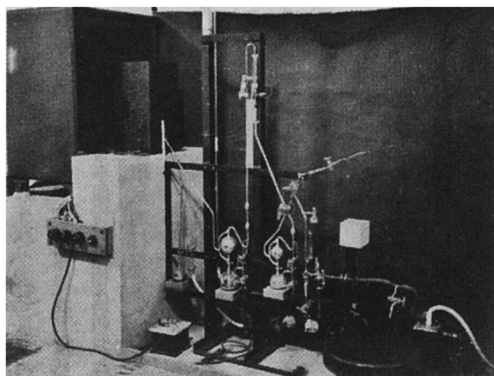


図11 癌研で使用されたラドン採取装置
尾内能夫博士提供



図12 最初の回転撮影装置
高橋正樹博士の許可により、文献20)より転載。

必要性が高まり、大学の放射線科に採用される物理学の専門家が徐々に増加してきた。また、電気試験所（現産業技術総合研究所）では放射線を担当する部局が創設された。これらの研究者、物理に興味を持つ放射線科医、診療放射線技師など約40名により1961年3月、日本医学放射線学会に物理専門部会が創設された。日本医学物理学会の起点である。専門部会長には江藤秀雄が就任した。

5.2 医学物理における我が国の世界的研究開発

この項では、著者の考える医学物理における我が国の世界的研究開発をあげる。他の方が選べば、別の選択になると思うので、著者の私見としてご容赦いただければ幸いである。放射線医学関係の学会を主な発表場所としたものは、次の5つである。

1. 回転撮影法（高橋信次（弘前大学）、1940年代後半）
2. 原体照射法（高橋信次（名古屋大学）、1960年代）
3. PET装置（田中栄一（放射線医学総合研究所（放医研））、1978年～）
4. FCR（富士フイルム株式会社、1981年）
5. HIMACプロジェクト（河内清光（放医研）他、1984年～）

また、放射線医学関係の学会以外では、

1. 超音波映像法の基礎研究（和賀井敏夫（順天堂大学）、1952年）¹⁷⁾
2. MRIの基礎研究（阿部善右衛門（北海道大学）、1973年）¹⁸⁾
3. ファンクショナルMRI（小川誠二（ベル研究所）、1990年）¹⁹⁾

ここで、3は日本ではなく米国で実施された。しかしながら、日本人の研究者により実施されたため、ここでは日本の業績に数えることにする。

放射線医学関係の学会以外の業績については、ここではこれ以上述べないので、文献を参照していただきたい。放射線医学関係の学会で発表されたものについては、既述の4を除いて簡単に説明する。

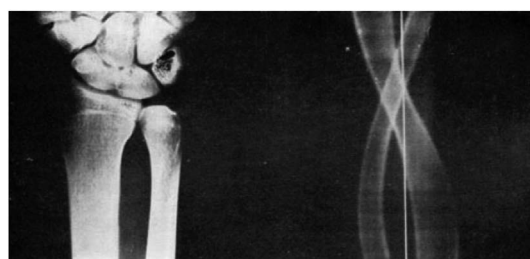


図13 X線写真（左図）と対応するシノグラム（右図）
高橋正樹博士の許可により、文献20)より転載。

弘前大学の放射線科教授であった高橋信次は、横断面のX線画像を撮影する手段として回転撮影法を考案し、1946年ごろに試験装置を製作した²⁰⁾。そして、1950年ごろにかけて、いくつかの方法で人体の横断面の撮影を行った。一つの方法では、図12に示すように被験者とX線フィルムを同期して回転させ、断面と平行なスリットを通して、フィルムに対して浅い角度（10°程度）でX線を照射する。これにより投影を逆投影したような画像となり、ぼけはあるものの横断像が得られる。他の方法では横断面と平行にX線を入射させ、それと同期してフィルムを回転軸方向に移動させることも行われた。これによりCTでいうシノグラムが得られる（図13）。シノグラムからの再構成は、CTでは正確なアルゴリズムを用いて計算機により行われるが、高橋の方法では光学的に逆投影された。このため、浅い角度の入射と同じようにぼけるので、手間の割にはメリットが少ないとされ、深くは検討されなかった。しかし、CTの基本原理は横断面の投影プロフィールを計測し、横断面を再構成するため逆投影することであるので、その点において高橋はCTの一端に達していた。CTにノーベル賞が授与された1979年においては、第2次大戦中とその後の研究情報交流の断絶もあり、彼の業績が十分に欧米諸国に伝わっていなかった。このため、Hounsfieldと同時に受賞したのは、Cormackだけであった。最初に道を切り開いた人を顕彰するというノーベル賞の方針を考えると、十分な情報により高橋の業績が評価されたのであれば、第



図14 日本で最初のPET装置Positologica-I (頭部専用)

3の受賞者になったと著者は考えている。その意味で高橋は大魚を逸したと言っても過言ではない。

高橋は1954年に名古屋大学教授に転任した。1957年に名古屋大学へ国産2台目の回転コバルト治療装置が導入された。そして、この装置にMLCを付加して、回転しながらMLCにより照射野を変化させる原体照射を実現し、それによる治療を1960年に開始した。また、1960年代前半には回転撮影により得られた横断画像により治療計画をルーチン的に行った。強度変調による線量分布の最適化こそ行わなかったが、IMRTの最新型であるVMATの原型が40年以上前に実現していたのである。1967年には、MLC付6 MVリニアックが導入され、さらに適応が拡大された。高橋はこの2つの功績を主な理由として、放射線科医の中ではただひとり1984年に文化勲章を受章している²¹⁾。

田中栄一は1950年に京都大学を卒業し、1957年に創設後間もない放医研に電気試験所より着任した放射線計測の専門家であり、1960年代には大視野ガンマカメラの開発に成功している。1970年代後半には、放医研サイクロトロンで生産されるポジトロン核種の利用を図るため、PET装置の開発を行い、1979年にBGO結晶を用いる頭部専用PET装置Positologica-Iを完成させた(図14)²²⁾。これは当時として最高分解能の装置であった。その後、1980年代には同じ方式の全身用多断層装置Positologica-II, IIIを完成させ、また世界最初の動物用PET装置Positologica-IVを完成させることにより、PETに関する核医学物理の発展に寄与した。国際医学物理機構(International Organization of Medical Physics: IOMP)設立50周年に際して、過去50年に顕著な業績をあげたmedical physicist 50人の1人に選ばれている。

河内清光は1963年に東海大学を卒業、直ちに放医研に入り、電子線線量分布の計算法や陽子線スキャンニングの研究を行っていたが、1980年ころよりHIMACプロジェク

トの立ち上げに関与し、1984年の同プロジェクト開始以来、実質的なプロジェクトリーダーとして、その建設を成功させた²³⁾。HIMACは重粒子線治療の先がけとなり、重粒子線治療装置は、現在、世界で数十台が稼働している。また、HIMACは世界で最初に呼吸同期スキャンニング照射を行った重粒子線治療装置であり、多イオン同時照射などさらなる発展を見据えている。彼はIOMP設立50周年の際、過去50年に顕著な業績をあげたmedical physicist 50人の1人に選ばれている。

6. おわりに

本稿で述べたように、物理学は放射線利用を介して医学と固く結びつき、その結果成立した医学物理はCTやMRI、高精度放射線治療、核医学機器の誕生と発展およびその臨床利用に大きく貢献し、医療の高度化とそれによる人類の健康増進や福祉の向上に寄与した。この関係は今後も変わらず、人工知能などの新技術の適用により、医学物理はさらに活躍の場を広げるものと期待される。

参考文献

- 1) Keevil SF: Physics and medicine: A historical perspective. *Lancet* 379: 1517–1524, 2011
- 2) Nitske WR (山崎岐男訳): X線の発見者レントゲンの生涯. 1989, 考古堂, 新潟
- 3) 松田 一: X線テレビジョン研究の10年 (IV. X線テレビジョンの臨床的諸問題). 日本放射線技術学会雑誌 Special 5巻: 81–91, 1970
- 4) Littleton JT: Conventional tomography in perspective—1985. *Radiographics* 6: 336–339, 1986
- 5) Lauterbur PC: Image formation by induced local interactions: Examples employing nuclear magnetic resonance. *Nature* 242: 190–191, 1973
- 6) Ter-Pogossian MM: Physical aspect of diagnostic radiology. 1967, Hoeber Medical Division, Harper & Row Publishers, New York
- 7) Siemens Healthineers: がんとの闘い. <https://www.siemens-healthineers.com/jp/news/battle-against-cancer.html> (Accessed Oct. 5, 2021)
- 8) Paterson R, Parker HM: A dosage system for interstitial radium therapy. *Br. J. Radiol.* 11: 252–266, 1938
- 9) Cohen M, Trott NG: Radiology, physical science, and the emergence of medical physics. *Med. Phys.* 22: 1889–1897, 1995
- 10) Innes GS: The one million volt x-ray therapy equipment at St. Bartholomew's Hospital, 1936–1960. *Br. J. Radiol.* 22(Suppl): 11–16, 1988
- 11) 尾内能夫: 放射線治療の歴史—わが国における物理・技術を中心として—. 日本腫瘍誌 5: 229–244, 1993
- 12) Mohan R, Holt JG, Laughlin JS, et al.: Incorporation of a minicomputer as an intelligent terminal in a treatment planning system. *Radiology* 110: 183–190, 1974
- 13) Endo M, Mori S: Michael Goitein (1939–2016): Inventor of three-dimensional planning systems with image-guided beam delivery for radiation therapy. *Radiol. Phys. Technol.* 14: 1–5, 2021
- 14) Myers WG: The Anger scintillation camera becomes of

- age. J. Nucl. Med. 20: 565–567, 1979
- 15) Kanno I, Takahashi M, Michel YT: Michael M. Ter-Pogossian (1925–1996): A pioneer of positron emission tomography weighted in fast imaging and Oxygen-15 application. Radiol. Phys. Technol. 13: 1–5, 2020
 - 16) 野原功全: ポジトロン・エミッション・トモグラフィ 1. 原理と概要. RADIOISOTOPES 42: 189–198, 1993. https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes1952/42/3/42_3_189/_pdf/-char/ja (Accessed Oct. 5, 2021)
 - 17) 和賀井敏夫: 超音波医学. 順天堂医学 36: 176–188, 1990. https://www.jstage.jst.go.jp/article/pjmj/36/2/36_176/_pdf/-char/ja (Accessed Oct. 5, 2021)
 - 18) 阿部善右衛門, 田中邦雄, 堀田正生: 核磁気共鳴現象を利用した体外よりの生体計測の研究. 計測自動制御学会論文集 10: 290–297, 1974. https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr1965/10/3/10_3_290/_pdf/-char/ja (Accessed Oct. 5, 2021)
 - 19) Ogawa S, Lee TM, Kay AR, et al.: Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. Proc. Natl. Acad. Sci. 87: 9868–9872, 1990
 - 20) Takahashi S: Rotation radiography. 1–164, 1957, Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo. http://www.jsrt.or.jp/web_data/historicalrecord/rpt_takahashi_simple.pdf (Accessed Jul. 28, 2021)
 - 21) Doi K, Morita K, Sakuma S, et al.: Shinji Takahashi, M.D. (1912–1985): Pioneer in early development toward CT and IMRT. Radiol. Phys. Technol. 5: 1–4, 2012
 - 22) Nohara N, Tanaka E, Tomitani T, et al.: Positologica: A positron ECT device with a continuously rotating detector ring. IEEE Trans. Nucl. Sci. 27: 1128–1136, 1980
 - 23) Kawachi K, Kanai T, Endo M, et al.: Radiation oncological facilities of HIMAC. J. Jpn. Ther. Radiol. Oncol. 1: 19–29, 1989

施設紹介

徳島大学大学院保健科学研究科医学物理学コースの紹介

芳賀昭弘*

徳島大学大学院医歯薬学研究部医用画像情報学分野 医学物理WG長

Introduction to Medical Physics Course in Tokushima University

Akihiro HAGA*

Medical Image Informatics, Biomedical Sciences, Tokushima University

1. 沿革

徳島県は「阿波国」時代から近畿と繋がる四国の玄関口で、商業・企業が盛んな歴史があります。徳島における医療機関の歴史は古く、1870年に関寛斎先生の功績により設立された「徳島藩立医学校」に端を発します。徳島大学医学部は、1943年に「徳島県立徳島医学専門学校」として設立され、戦後の1949年5月に四国最初の国立大学医学部となりました。医学部がある蔵本キャンパスには背後に眉山が横たわりそこから眺める徳島市の眺めは壮大で(図1)、学問研究の場として最適な環境に取り囲まれています。

徳島大学保健学科は蔵本キャンパスを構成する3つの学科のうちの1つ(他は医学科、栄養学科)として2001年10月、徳島大学医療技術短期大学部からの改組・転換によって創立し、今年で21年目を迎えました。大学院は2006年4月に保健科学教育部が設置され、保健学科の卒業生内8人が進学するところからのスタートでしたが、現在では入学人数が定員27名を上回る規模に至っています。組織名称は2022年度に保健科学研究科と改名されています。本保健科学研究科は医用情報学領域・看護学領域・医用検査学の3つの領域からなり、医学物理学コースは医用情報学領域に設置されています。本学大学院における医学

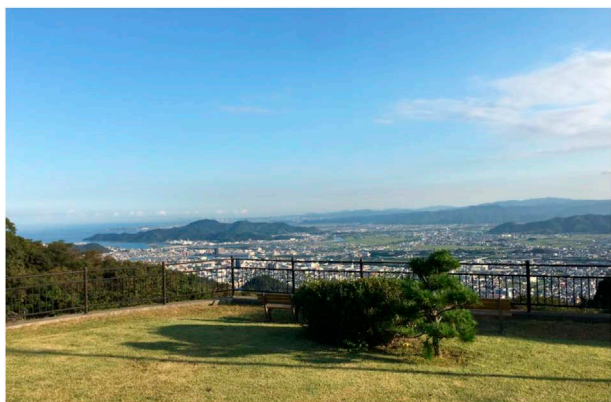


図1 眉山公園からの眺望

物理学コースの歴史は比較的長く、がん対策基本法が制定された2007年に始まる文部科学省のプロジェクト「がんプロフェッショナル養成プラン」の中国・四国高度がんプロ養成基盤プログラム医学物理学コースに端を発します。2012年度には、徳島大学大学院保健科学教育部の修士(保健学)課程において医学物理士の養成に向けた修士課程コースが開講し、2019年度に医学物理士認定機構の審査に合格、中国・四国では広島大学に次いで2つ目、大学院生在籍数では中国・四国で最大規模の医学物理士認定機構の認定コースとして認められるに至りました。医学物理学コース開講当初、受入予定人数は1名/年でしたが、認定コース初年度として迎えた2019年度には1年で9名のコース受講希望者が出るなど大変な人気を博しています。それにつられるように本コースが設置されている医用情報科学領域の大学院進学希望者も年々増加しており、2022年度の大学院進学者は過去最高の14名、その全員が医学物理学コース受講者となっています(表1)。博士後期課程への進学希望者の増加、さらには隣接する徳島大学病院における臨床研修や共同研究において、益々の発展が期待される状況です。

2. 教育

医学物理学コースでは、後述する徳島大学大学院保健科学研究科医用情報科学領域9専門に属する教員14名が中心となり教育にあたっています。また、共通コアカリキュラムでは、中国・四国高度がんプロ養成基盤プログラムで開講するe-learningによって、徳島大学の教員以外が担当する講義も受講できます。医用情報科学領域に属する教員

表1 徳島大学大学院医学物理学コース受入れ状況

入学年度	医学物理学コース履修生数
2017年度	4名
2018年度	2名
2019年度	9名
2020年度	4名
2021年度	11名
2022年度	14名

* 連絡著者 (corresponding author) 徳島大学大学院医歯薬学研究部 [〒770-8503 徳島市蔵本町3丁目18-15]
Biomedical Sciences, Tokushima University, 3-18-15, Kuramoto-cho, Tokushima City, Tokushima 770-8503, Japan
E-mail: haga@tokushima-u.ac.jp

の内、医学物理士資格を持つ教員数は現在のところ1名ですが、将来構想として複数の有資格者による教育の充実化を目指しています。徳島大学病院では2010年度に放射線診療品質管理センターを設置し、主に放射線治療に関する品質管理業務を専属で行う人員がすでに配置されています。将来的には医学物理士資格者がそのポストを併任しつつ医学物理士の臨床研修を実施できるようにしたいと考えています。

3. 研究室紹介

本領域博士前期課程は高度な画像診断・治療技術を修得し、技術革新に対応できる人材の養成を目指し、医用情報理工学分野と放射線科学分野の2分野を設けており、それぞれ5つおよび4つの計9研究室があります（放射線科学分野先端医用評価学の研究室は現在休室中）。前者の研究室を主宰する教員は皆理工系出身であるため、研究室の雰囲気は理工系のそれに近いものがあります。後者の研究室を主宰する教員は徳島大学病院にも在職しており、臨床のニーズに応えた研究が可能です。またこの両分野と徳島大学病院で研究クラスターを立ち上げ、医療に関連する基礎と応用の研究を拡げています。産業技術総合科学研究所、核融合研、大阪大学核物理研究センターやウーロンゴン大学（オーストラリア）、コロンビア大学（アメリカ）、北京航空航天大学（中国）など国内外の大学研究施設との交流も活発に行っており、コロナ禍の中においても長期滞在や定期ミーティングなどで人材交流を深めています。国外からの留学生も現在2名受け入れています。

医学物理学コース修了生の中には、在籍中に医学物理士試験に合格しながらインパクトファクターの比較的高い雑誌にも筆頭著者としてアクセプトされる学生もあり、活発に研究活動を行っています。社会人学生も積極的に受け入れており、遠隔での指導経験も豊富です。進学に興味のある方はメールや電話などで各研究室にコンタクトしてください。以下は各研究室の紹介です（大学院の募集要項にも書かれている内容です）。

医用情報理工学

・医用画像物理学（芳賀・金澤研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/iyohoshasen/medical-imaging-information/

概要：研究課題は次のとおり：(1)ベイズの理論に基づく医用画像の生成に関する研究、(2)医用画像から極限まで抽出し得る情報について分析し、最新の機械学習を利用した画像診断・治療支援・予後予測に関する研究、(3)画像生成・画像分析の基礎をなす物理学の研究、(4)モンテカルロ計算モデル（特に重粒子線治療領域の核破砕モデル）の開発。

・先端医用画像機器工学（吉永・児島研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/iyohoshasen/medical-imaging-equipment/

概要：医学診断において画像は重要な役割を果たしており、画像構築法の開発・改良によって診断支援に大きく貢献できる。高品質の再構成画像および有効性の高い診断・治療法を構築することを課題とし、(1)非線形動的特性を積極的に利用した高速・高品質CT画像再構成法、(2)非線形力学系の分岐解析に基づくIMRT計画の設計法、(3)結合神経振動子系の時空間同期現象を用いた画像領域分割法、などを研究開発する。

・核医学治療・核化学（阪間研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/iyohoshasen/radiation-science/

概要：核・放射化学的手法を中心とし、超重元素の科学、環境放射能、放射線防護学、無機分析化学における先端基礎研究を行う。環境および生体試料・材料などを分析対象とし、元素・放射能濃度や同位体比に関わる動態研究を行う。さらに、医療分野の品質管理測定システム開発や原子力災害由来の放射性核種の除去技術、粒子・放射線輸送計算コードPHITSの先端応用研究を行う。

・放射線障害分子医学（森田・西山研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/iyohoshasen/biomedical-science-technology/

概要：放射線を始めとするゲノム障害ストレスに対する細胞の応答機構の解明、および放射線防護や放射線治療成績の向上に資する生物学的制御法について、先端的な生命科学の手法を用いて研究を行う。

・脳機能画像解析学（河野研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/iyohoshasen/radiation-science/

概要：fMRIの撮像技術、実験デザイン、統計的解析手法およびfMRIを用いた感情調整の神経生物学的メカニズムの研究を行う。

放射線科学

・医用画像解析学（高尾・富永研究室）

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/shinryo_hoshasen/medical-image-analysis/

概要：MRIやCTなどの医用画像を用いた骨関節、骨格筋および心臓領域の半定量的解析を行い、生理的变化や病態の解明を行う。



図2 本学医学物理学コースの将来構想

2019年に医学物理士認定機構の認定を受けた博士前期課程コースが開設された(中央右)。近い将来、徳島大学病院と連携し、臨床研修を取り入れた博士後期課程コースの開設を目指す(右端)。

・代謝・機能画像情報解析学(大塚研究室)

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/shinryo_hoshasen/imaging-nuclear-medicine/
概要: 核医学的手法を用いてシングルフォトンおよびポジトロントレーサーについて、基礎および臨床研究を行い、機能・代謝の観点から病態の解明を行う。

・放射線治療(生島・佐々木研究室)

https://www.tokushima-u.ac.jp/med/health_science/course/shinryo_hoshasen/radiation-therapy/
概要: 難治性がんに対する新規治療戦略の構築を目的とし、機能画像を用いた放射線治療効果予測に関する研究を行う。

4. 将来構想

医学物理学コースの拡充が、徳島大学大学院保健科学研究科の目標の一つとなっています。そのために、臨床研修を可能とする博士後期課程コースを新たに開設することを目指しています(図2)。

5. 医学物理を志す者へ一言

徳島大学大学院医学物理学コースは、3節で紹介した保健科学研究科医用情報学領域の9専門のどの研究室に所属していても履修することができるコースです。各研究室とも大変活発に研究活動をしており、活気に満ち溢れています。近年では当コース教員が全学および医療系のデータサイエンス・AI研究・教育にも携わっており、最先端の研究教育に触れられる機会が多くあります。社会人学生も歓迎しています。

一人ひとりの教員が、一人の学生に対して親身になって研究の指導をしています。また、博士前期課程は基礎学力を積み上げる期間にもなっており、年度によってはコース学生の自主的な輪講ゼミが開催されています。医学物理士試験対策の時もありますが、機械学習や量子物理学など深い学問的興味に誘われて立ち上がったこともあり、そのような雰囲気大切にしたいと考えています。興味を持った人は遠慮なくコンタクトしてください。やる気に溢れる皆さんの当コースへの応募を心よりお待ちしております。

連載コラム シカゴ通信

ポルトガル，ハンガリー，南アフリカ，タイランド

〈Chicago Report〉 Portugal, Hungary, South Africa, and Thailand

海鮮料理のポルトガル

ポルトガルの人口は約1,000万人で、面積は日本の約4分の1と極めて小さな国です。しかし、ポルトガルは、ヨーロッパを拠点としてアメリカや全世界に航海を始めた最初の国です。例えば、1498年にアフリカの喜望峰をまわってインドのカルカッタに初めて到達したのはポルトガルのバスコ・ダ・ガマです。南米のマゼラン海峡を発見したマゼランもポルトガル人です。その後スペインやヨーロッパ各国が世界航海を始め、ポルトガルは南米のブラジルを植民地としますが、それ以外の南米はすべてスペイン

が占領したのです。そこでブラジルは現在ポルトガル語が公式言語ですが、その他の南米諸国はすべてスペイン語が公用語です。これは奇異に感じるかもしれませんが、歴史的に明確な理由があるのです。

ポルトガル本国の領土はスペインに囲まれているので、スペイン各地から容易にポルトガルを訪問することができます。我々はスペインのサンチャゴ・デ・コンポステーラから自動車でポルトガルの北部に以前入国したことがあります。国境でのチェックはありませんでした。2015年にはスペインのバルセロナでの国際会議CARSの後にポルトガルのリスボンを訪問しました。

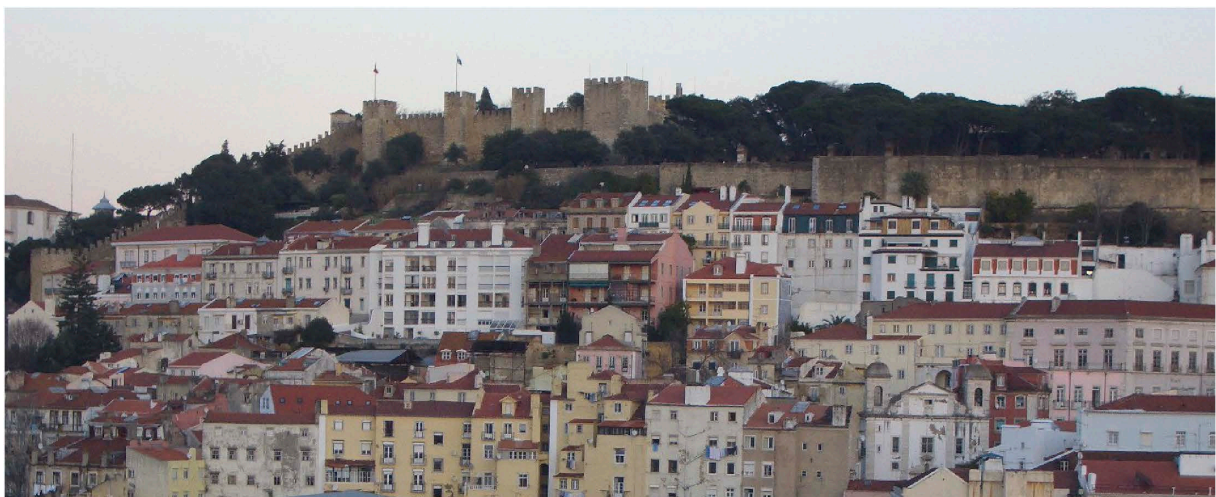


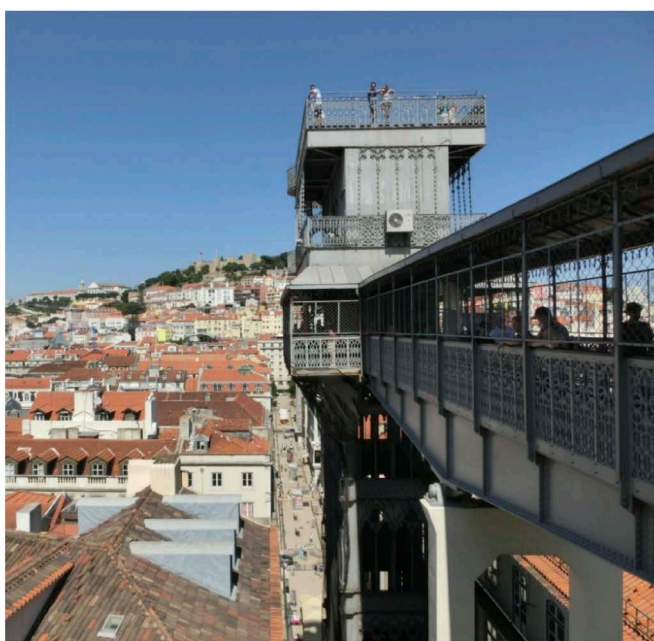
写真1 リスボンの街とサン・ジョルジュ城



写真2 リスボンのロシオ広場：左寄りの広場角の上方付近に素晴らしい海鮮料理屋街



(A) 下側の通り（雨天撮影）



(B) 上側の通り（反対側から晴天撮影）

写真3 サンタ・ジェスタの街の有料エレベーター



写真4 船の出入りを監視するテージョ川岸に建つ要塞、ベレンの塔

リスボンは起伏の激しい街で市内には七つの丘があると言われています。この地形が影響したと思われるのは、1755年11月1日の大地震です。倒壊した建物は9,000、津波の高さは12.5m、犠牲者は6万人と記録されています。地震の影響をあまり受けなかったアルファマ地区は、現在も、それ以前のイスラム支配の影響を強く残している街並みだそうです。現在のリスボンには、勿論そのような地震被害の様子は全く感じられませんが、地震被害に苦しむ日本と若干の共通点があると感じます。

リスボンの街を見下ろす高台にあるのが、サン・ジョルジュ城です（写真1）。この城はローマ人によって要塞として建設され、その後、西ゴート族、イスラム教徒、キリスト教徒など城の居住者は次々に変わったのですが、現在は公園になっています。ここからはリスボンの街の素晴らしい全景を眺めることができます。

リスボンの街の中心に近いロシオ広場（写真2）には、ホテルが多数あり、バスや電車の乗り場なども大変便利です。近所には驚くほど素晴らしい海鮮レストラン街があり



写真5 ムーアの城跡



写真6 ユーラシア大陸最西端のロカ岬灯台

ます。なお、リスボンの市内観光には、石畳の狭い道路をゴトゴト走る市電が素晴らしいです。ゆっくり走るのも、多くの市民生活を眺めることもできます。特に利用価値のあるのはアルファマを一周する電車です。市内には低いところと高いところを短距離で結ぶケーブルカーが3路線あり、これも便利です。また、道路の真ん中から垂直に有料エレベーター（写真3）がありますが、多分世界で唯一の公共道路の有料エレベーターだと思います。

リスボンの街は海の近くの巨大なテージョ川の河口の近

くに位置しています。この変わった地形のせいで1755年の大地震で巨大な津波が襲ったのかもしれませんが。このテージョ川の入り口にあるのがベレンの塔（写真4）です。この塔は船の出入りを監視する要塞として16世紀の初めに建てられたそうです。この建物は、一見すると周囲に他の建造物がないせいか大きく見えないのですが、6階の構造で、水牢、砲台、兵器庫、国王の間、食堂、王族の居室からなっています。この塔は長い間「帰れないかもしれない男達を見送り、またリスボンに戻れた幸運な仲間を出迎



写真7 古くからの漁師町カスカイス



写真8 ポルトガルの魚料理

えた」のです。その後リスボンから遠く離れた日本で、明治時代初期に日本を離れる時、更に戻れた時に駿河湾海上から「富士山を眺め世界に渡航した日本の若い開拓者達」の抱いた感情と共通のものがあつたのではないかと想像します。

リスボンの街の近くの山、海岸、古い城郭を、電車やバスで日帰り観光することは容易です。リスボンの西28kmにシントラという山あいの町があります。ここは王様の避暑地の宮殿や貴族の立派な館のあつた所で世界遺産になっています。更に、ここには7世紀ごろにムーア人によって築かれたムーアの城跡（写真5）があります。しかし、12世紀に当時の王様によって落城され、現在は僅かな城壁が残っています。ここからはシントラの街と大西洋をながめることができます。

東のロシアから始まり、アジアとヨーロッパを含む世界

最大のユーラシア大陸の西の先端は、ポルトガルの口カ岬（写真6）です。高さ140mの断崖の上に「ここに地果て、海始まる」とのポルトガルの詩人の有名な石碑が建っています。ここがヨーロッパの最西端と理解するのは感慨深いことだと思います。

リスボンに戻る途中で、カスカイスと言う漁師町（写真7）に立ち寄りましたが、日本の漁師町と海の雰囲気は似ています。しかし町の建物はレンガや石でできている立派な家が多く日本の漁師町とは大分異なり、ここはリスボンの近くの有名な観光地になっているそうです。

ポルトガルとスペインの海鮮料理は日本のものとは大きく異なっていますが、とても美味しく楽しむことができます（写真8）。多くの食材が使われますが、タコ、イカ、タラなど多くの魚やマテ貝はとても美味しいです。ただし、刺身は期待できません。特に、タラの料理は想像でき

ないほど種類が多く豪華で、すごくおいしいです。特にスペイン・マラガのタラ料理専門店に行った時には、6人がそれぞれ異なった料理を注文し全員がそれぞれを味見したのですが、驚いたことには全員がすべての料理を素晴らしいと評価したのです。この地域では、天井から吊るした“乾燥したタラ”が大量に売っていますが、水に浸して“柔らかく戻して”から料理するのです。私が子供の頃の日本では乾物屋があり、“ミガキニシンと呼ばれる乾燥ニシン”が家庭で利用されていました。冷蔵庫のない時代に人間の知恵が考え出した魚の長期保存法でした。一方、ニシンはスウェーデンや北欧ではスズケやオイルズケで長期保存しています。これもすごくおいしいので、シカゴではカンズメ、ビンズメ、プラスチック容器入りを時折楽しんでいます。世界各地でそれぞれ異なった“魚の長期保存を工夫”していたのは大変興味ある事実です。

ハンガリーのブダペストとドナウ川

私が高校時代の国際ニュースの一つは1956年のハンガリー動乱です。ソ連の戦車が続々とハンガリーの首都ブダペストに侵入するニュース映画を見て、第2次世界大戦終結からまだ11年後の日本で、戦争の恐怖を忘れていなかったのです。ハンガリー動乱当時、多くの家庭にはまだテレビがありませんでした。私の家族は1945年8月1日富山市の米軍B29による大空襲で全焼被災（学長の回顧

録、インナービジョン社、2014年）していましたので、戦争の怖さは身にしみていたのです。その後、ハンガリー動乱のことは長い間忘れていましたが、1969年にシカゴに移動し、1975年に自宅を購入した時、隣に住む隣人がハンガリーからの移民だと聞いてびっくりしたのを覚えています。更に、隣のフェンセル一家は、避難民で2度とハンガリーに戻れないと聞き、世界における厳しい現実を理解しました。このような状況が、我々の米国シカゴ到着当初の経験でした。それ以来私はハンガリーに興味を持っていました。

一方、ハンガリーでは1989年頃に民主化が進み、共産党独裁から複数政党制の民主国家への体制転換が起こります。その後急速に西側に接近して、1999年にはNATOに2004年にはEUに加盟したのです。したがって、現在はハンガリーを自由に訪問することができます。

そこで、2013年にはドイツ・ベルリンでのCARS国際会議の後に、ハンガリーを家族で訪問したのです。ハンガリーは人口約1,000万人で、面積は日本の約4分の1の小国です。そこでヨーロッパの支配者が変わるたびに、ハンガリーは絶えず支配国に従ってきた悲劇の歴史を持っているのです。しかし、1867年にオーストリア・ハンガリー二重帝国が成立し、オーストリア・ハプスブルグ家のフランツ・ヨーゼフとエルジェーベト（独名エリーザベト、愛称シシイ）はハンガリー王と王妃として戴冠式を行ったの



写真9 1849年完成のドナウ川に架かるブダペストの有名なくさり橋（吊り橋、長さ380m）



写真10 ドナウ川に架かるエルジェーベト橋、遠方の橋はくさり橋：左側がブダ、右側がペスト



写真11 ゲッレールトの丘から眺めるハンガリーの旧王宮（現在、美術館や博物館）、後方のブダ丘陵地帯に分散する住宅と遠方の山岳

です。シシイは身長173cm、体重48kg、ウエスト50cmで絶世の美女だったためにヨーロッパ全土で賞賛され、乗馬の腕前は国際大会に出場するほどで、騎馬民族の国ハンガリーを愛し、難しいと言われるハンガリー語を完全にマスターし、ハンガリーの独立運動を支持していたため、ハンガリー国民に大変慕われていたそうです。ウィーンやブダペストの街や空港では、今でもシシイの写真入りのチョコレートのお土産を入手できます。

ハンガリーの首都ブダペストは、ブダと呼ばれる西側の丘陵地帯とペストと呼ばれる東側の平坦な部分からなっており、両側を分けるのがドナウ川です。以前、川を渡る両側の交通は、夏は渡し船を利用し、冬季に川が完全に氷結すると徒歩で渡れたそうです。そこでドナウ川に橋を架ける計画は以前からあったのですが、1849年に完成したのです。そのために、当時最先端のロンドン橋の設計者を招き計画したので、その時代最高レベルの釣橋（くさり橋；写真9）が完成したのです。しかし、この橋は第2次世界大戦や他の局地戦争でも破壊され、修復後、現在の姿になっています。ドナウ川には、その後、皇妃の名を付けた

装飾的なエルジェーベト橋（写真10）が架けられたのですが、第2次世界大戦で破壊されたために、現在のようなシンプルな設計で再建され、今ではこの設計がより好まれているそうです。ブダペストのドナウ川には、現在7つの橋があります。ドナウ川は、ヨーロッパで2番目に長い川で領域は17カ国にわたり、その巨大さは多くの日本人には多分想像が困難と思います。川の深さと水の流量は、日本の川の数倍程度と推測します。

旧王宮（写真11）と反対側のドナウ川岸辺に建つハンガリー国会の建物（写真12）は、世界でも珍しい建築です。これを設計したハンガリーの建築家は世界各地を回り、様々な異なる様式を取り入れた折衷主義を設計の基本としたのです。写真正面手前の横長の建物はイギリス国会議事堂ウェストミンスター宮殿にとても似ています。その後方中央のドームはイタリア・フローレンスの聖母教会・ドゥオーモと間違えるかもしれません。その左右と前方左右にある4本の尖塔を持ち平らな屋根の構造物はドイツやフランスの家屋に似ています。そこでこのハンガリー国会議事堂は折衷主義の傑作と言われています。



写真12 ハンガリーの国会議事堂、建築設計の折衷主義の傑作



写真13 漁夫の砦にある初代ハンガリー国王イシュトヴァーンの騎馬像（二重の十字架を持つ）

王宮の丘（写真11）には、旧王宮、博物館、美術館や教会等多数の観光場所がありますが、高台で見晴らしの良い“漁夫の砦”には初代ハンガリー国王イシュトヴァーンの銅像（写真13）があります。漁夫という名称は、以前ドナウ川の漁師組合があったからだそうです。ハンガリーは海のない国ですが、ドナウ川ではキャビアの取れるチョウザメやオオナマズ等の巨大な淡水魚も釣れるそうです。大きなチョウザメは2人がかりで持ち上げるほどです。イシュトヴァーンは、「二重の十字架」を手にしていることで有名です。二重になっているのはハンガリー王国を築いたことと、キリスト教をこの地に導入し国内大司教の決定権をローマ法王から与えられたことを意味するとのことで

す。この二重の十字架は、ハンガリー国旗にも採用されています。

ブタペストの西側は旧王宮の後ろあたりから比較的低い山の丘陵地帯が始まっています。この地域は現在ブダペストの高級ベッドタウン（写真14）のようです。市の中心から約10km以内の範囲ですので市民にとっては素晴らしい自宅を持つことができ、日本では想像が難しいほど、通勤は便利だと思われます。

ハンガリーの食事はドイツ料理に似ていますが、とても美味しくいただくことができます。以前日本でハンガリー料理のビーフシチューを好きでしたので、本場のビーフシチューを賞味したかったのですが、現在はそのような

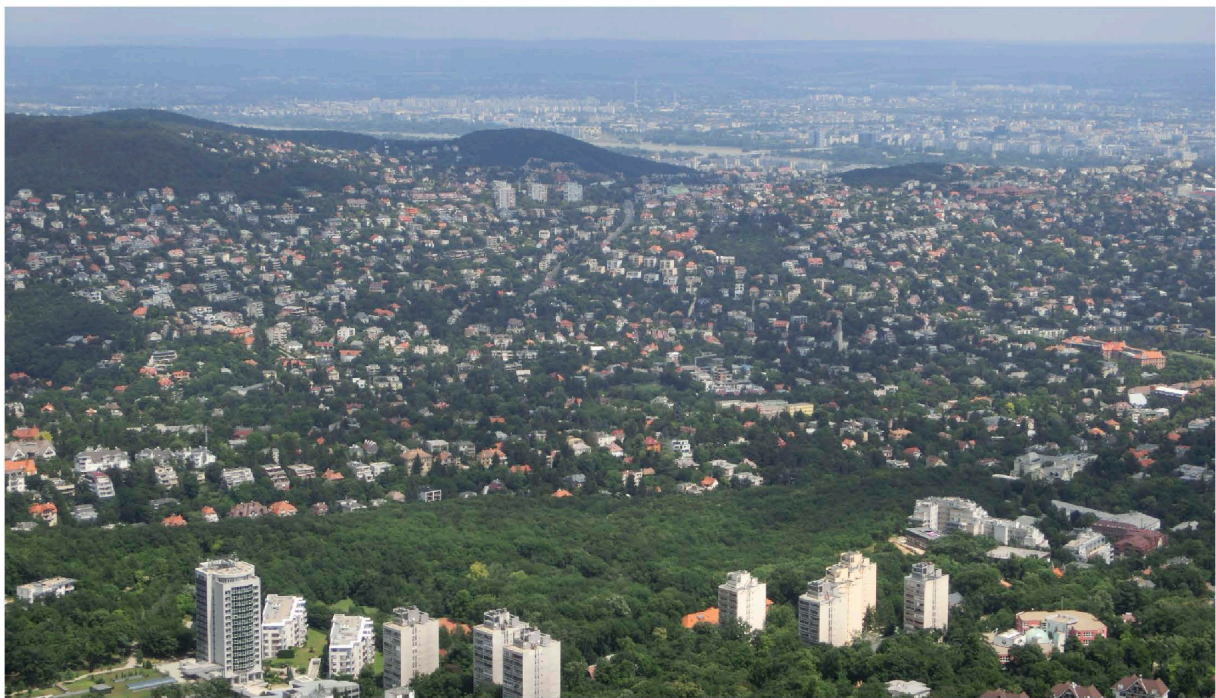


写真14 ブタペストから西10km以内の郊外丘陵地帯の住宅街



写真15 ドイツで有名な白アスパラガス料理

“こってりしたシチュー”ではなく、あっさりした米国のミネストローネのようでした。しかし、前橋では洋食屋のビーフシチューを最近でも楽しむことができます。本場と考えていたハンガリーで消失したのは残念ですが、若い時にビーフシチューを習った日本のシェフが、以前と同じ味を日本に残してくれているのは大変ありがたいです。

私はシカゴで韓国料理のカルビについて似たような経験をしています。カルビは焼き肉としてとても美味しく、骨のついた焼き方がシカゴの韓国料理屋では残っています。しかし、最近10年程の韓国のカルビは骨を切り落として焼くのです。多分合理化のためと思いますが、従来の方がシカゴに残っているのは素晴らしいと思っています。

写真15は、ドイツで有名なアスパラガス料理です。この料理は、5～6月頃のアスパラガスの採れる時期しか賞味できませんが、実に素晴らしい料理です。これはアスパラガスをゆでてホワイトソースで食べる高級料理で、ビーフステーキと同等の値段です。高級レストランでは、写真のアスパラより倍の太さ3～4本程度で、スゴク美味しいです。

南アフリカの素晴らしい自然と動物

私は中学3年の時に大阪府の箕面中学校に在籍し、修学旅行で四国の屋島と金比羅宮を訪ねたのを記憶しています。その時、屋島と同じ構造の平らな山で、世界で一番有

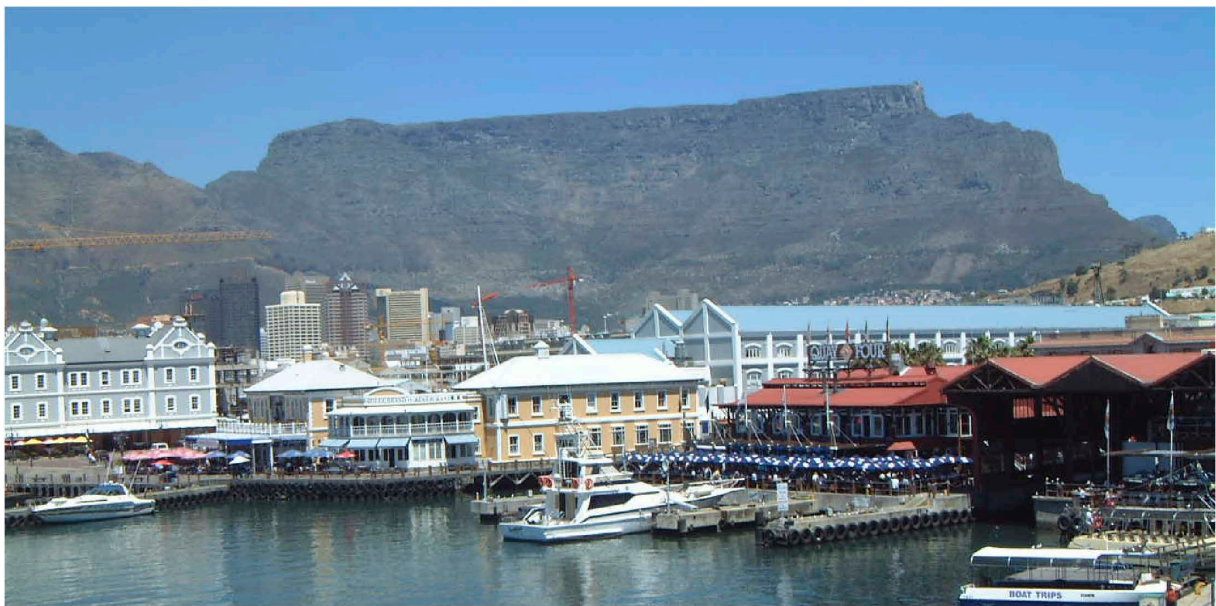


写真 16 ケープタウンのテーブル・マウンティンとヴィクトリア&アルフレッド・ウォーターフロント、ケープタウンの街はその間にひろがる

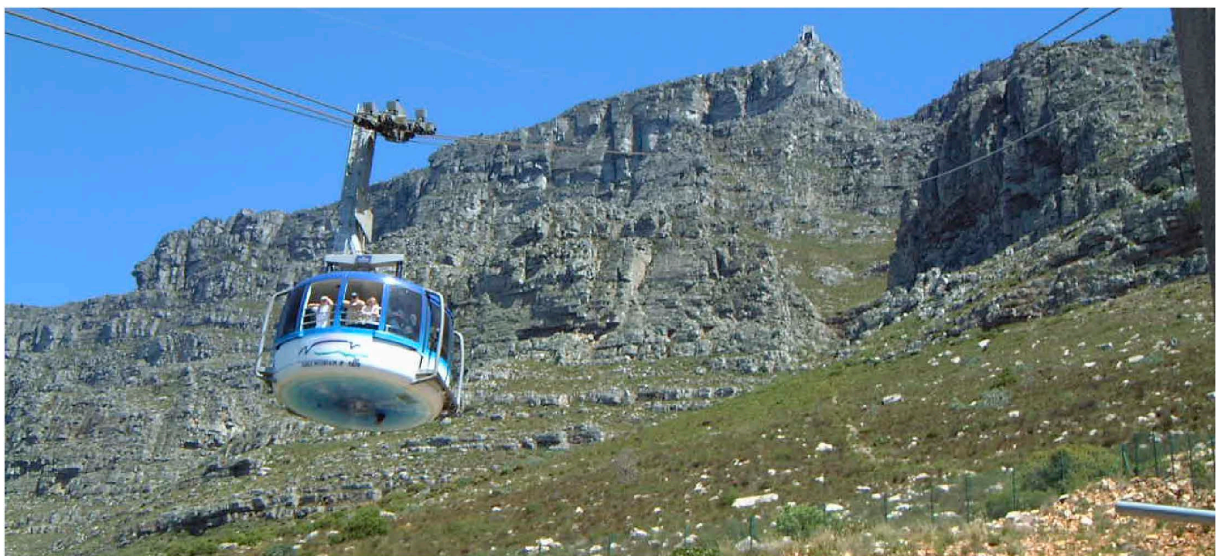


写真 17 テーブル・マウンティンへのケーブルカー

名なのは南アフリカの巨大なテーブル・マウンティンだと教えられました。その印象は強烈で忘れることはありませんでしたが、「一度見てみたい」との好奇心はズーッと潜在していました。

南アフリカのケープタウンでは2000年にICRU委員会が開催され、家族と一緒に参加することを決めました。この会議には、シカゴ大学のカール・バイボーニヤやアルゴンヌ研究所の井口道生先生も出席し、胸部写真（ICRUレポートNo. 70, 2003：日本語翻訳、胸部X線写真の画質、日本放射線技術学会出版）が主テーマの一つでした。南アフリカに関する以下の私の記事の内容は、主として歴史や

自然と環境に関するものですので、現在にも当てはまると思っています。

南アフリカは、ヨーロッパ人に発見されてから長期間にわたって極端な白人支配が続いていました。よく知られている“アパルトヘイト”と呼ばれる白人至上、黒人排斥運動は強力なものでした。私の少年時代には、この問題の解決は不可能にも思えました。しかし、指導者ネルソン・マンデラ達によって、南アフリカは“青天の霹靂”の変化を遂げたのです。マンデラは、27年にも及ぶ投獄にも負けず白人社会に打ち勝ち、1996年に初の国民総選挙で大統領に選出されたのです。この努力は、多くの残酷で複雑な

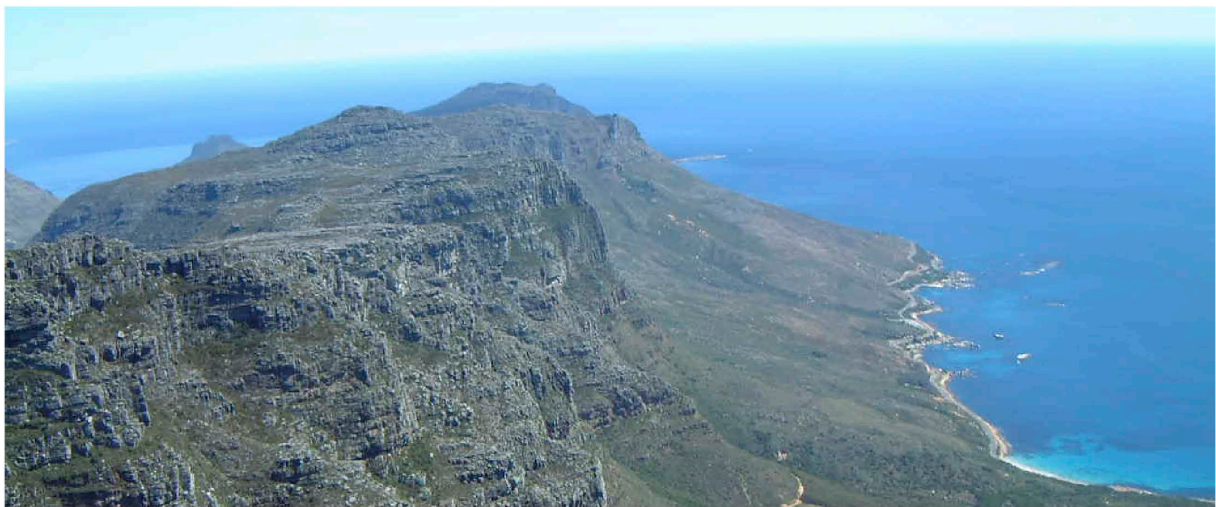


写真18 テーブル・マウンティンから喜望峰の方向の眺望, 右は大西洋, 左はインド洋



写真19 ケープタウンの南郊外クリフトンとカンブスベイ, 穏やかな気候の高級リゾート地

世界史の中では極めて稀な出来事です。そこでマンデラがノーベル平和賞を受賞したことは、多くの方に理解されると思います。この南アフリカの変化は、国際的な経済制裁や軍需物資の供給停止などの国際世論の影響が大きかったと考えられています。

南アフリカの面積は日本の大体3倍の大きさで、人口は約4,000万人です。そこで自然が溢れる国であることは明らかです。人種は黒人が75%, 白人は15%です。とても驚くのは公式言語が11もあることです。言語は人類の3大発明(言語, 貨幣, 車輪)の一つですが、交通手段の限られていたアフリカでは、地域ごとにそれぞれの言語が考案・発達したと想像できます。しかし、その言語が現在も公用語として通用しているのは大変な驚きです。南アフリカには、金、ウラン、ダイヤモンドなど世界で最も豊富な

鉱山資源のあることが有名で、この国の主要な輸出品です。

テーブル・マウンティン(写真16)は、岩盤でできており1,067mの高さです。観光客はロープウェイ(写真17)を利用して頂上に到着できます。頂上には、ヒヒ、鹿、ジャコウネコなどが生息しているそうです。ここからの眺めは抜群で、ケープタウン市内を見下ろすだけでなく、喜望峰の方向へ連なる岩山の絶景(写真18)を眺めることができます。

ケープタウンの郊外に、クリフトンとカンブスベイ(写真19)と呼ばれる世界的に著名な高級リゾート地があります。町の背後にはテーブル・マウンティンから続いている12の岩山があり、南東から吹く強い風を遮っているため、比較的に穏やかで、美しい白砂の海岸のため、1年中海水浴や日光浴ができるそうです。



写真20 ケープ半島のボルダーズ・ビーチにいる多数のペンギン



写真21 南アフリカ・ワインの中心地、ワインランドの風景

ケープタウンから南に延びるケープ半島には多数の観光スポットがあるので、観光客のための多くのツアーがあります。その中には、多数のペンギンが生息しているボルダーズ・ビーチ（写真20）や多数のオットセイのいるホウト湾があります。更に、半島の先端付近は巨大な喜望峰自然保護区になっており、多くの動物や植物が保護されています。動物には、シマウマ、シカ、マングース、ダチョウ、マントヒヒなどが含まれます。近くの海では、イルカやオットセイが泳いでいるそうです。ツアーの終点は、歴史的に有名な喜望峰(Cape of Good Hope)です。

南アフリカは、現在ワインの産地としても有名です。ケープタウンの創設者は17世紀に上陸したのですが、ケープ地方の気候がワインの産地であるスペインやフラン

スに似ていることに気がついたのです。そこでワイン作りが始まったのですが、ヨーロッパからの移民の努力が大きかったようです。多数のワインルート（写真21）がありますが、周囲は1,000～1,500m程の山々で囲まれた地帯です。我々の訪問した当時、現地のワインは1本1ドル程度ですが、保険料1ドル、米国への送料1ドルで、合計3ドルです。しかし、米国で購入すると1本6ドル程度です。そこで多くの観光客は、ダース単位の買い物をしていました。現在は、当時よりも高価だと思います。

南アフリカ訪問の圧巻は、クルーガー国立公園の訪問と公園内にある“素晴らしく快適な”スククーザ・キャンプでの滞在です。このアフリカ風の小屋の近くには夜中に動物が近寄るので注意が必要です。この公園は、ヨハネスブ

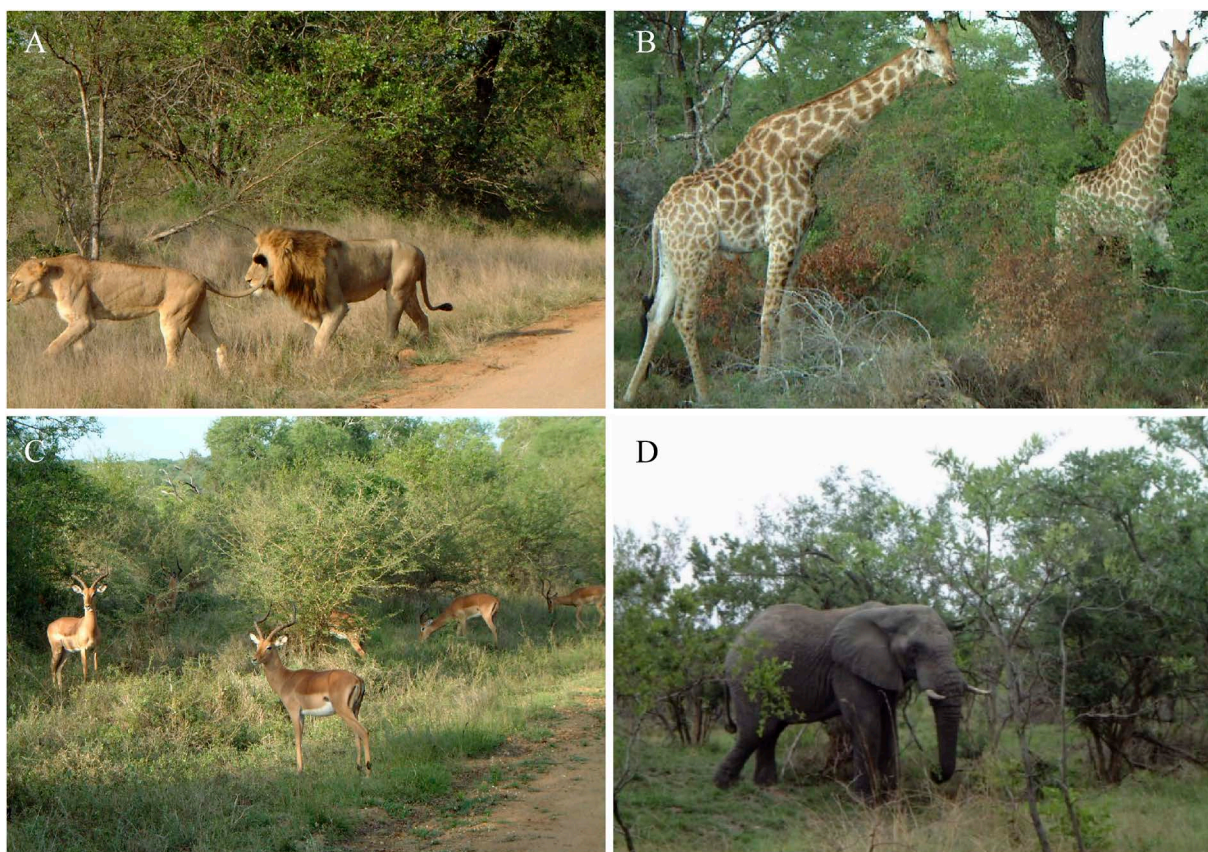


写真22 世界最大の動物自然公園クルーガー国立公園の動物：
(A)ライオン、(B)キリン、(C)インパラ、(D)ゾウ

ルグの北東に位置し、ケープタウンから飛行機で3時間の距離です。この巨大な公園は、四国程度の広大な低高原地帯で世界最大の動物自然公園です。ここに生息する野生動物の種類と数は世界最大で、インパラ15万頭、バッファロー2万頭、シマウマ2万頭、ゾウ6,000頭、ライオン1,200頭やヒョウ、キリン、サイ、ワニ、カバ、ダチョウなどが住み着いています。公園内はレンジャーの車で早朝から案内・移動します。レンジャーは絶えず仲間と連絡を取り、動物の居場所を探してくれます。ビッグ5と呼ばれる動物は、ゾウ、ライオン、サイ、ヒョウ、バッファローですが、少なくともゾウ、ライオンとキリン（写真22）には何度も遭遇し、多数のシマウマ、ハイエナや他の動物も近距離で見ることができ、川ではワニとカバを見つけ更に砂場のカバをしばらく観察できました。

南アフリカ訪問中の食事で驚いたのはイワシ6匹の焼き物でした。これは凄く美味しかったです。南アフリカの海では、オットセイやペンギンがイワシを餌にしているので、海に大量のイワシがいることは明らかです。そこで「人間にも!」と思っていたら、レストランのメニューにイワシが載っていたのです。しかしイワシの塩焼きではなく、レモンの味付けでした。一方、刺身や寿司は日本のものとは比較になりませんでした。ダチョウのステーキは、

ビーフステーキ・フィレミニョンとあまり変わらない感じがしました。

南アフリカ訪問中に気がついたのは、この国の黒人は米国の黒人とはかなり違うのです。南アフリカの黒人は、特に若い方はとても明るいのです。「何故米国の黒人とは違うのか」を考えていましたが、私の推測では「南アフリカは自分の国だ」という自信と自覚です。一方、米国の黒人は国籍を持っていますが、まだ本当に「同化できていない、あるいは同化させてくれない」と感じているからではないかと想像していました。

仏教の国タイランド

日本では、タイランドをタイと呼びますが、正式な名称は「タイランド」です。しかし「なぜ、日本では省略して「タイ」と呼ぶようになったか」の理由は明確ではありません。できるだけ早くこの間違いを修正するべきだと思います。私のこの記事ではタイランドと記述します。

タイランドは日本と同様に、西欧に占領されずアジアで独立を保った数少ない国です。その理由は明確ではありませんが、多分タイランドは仏教王国としてキリスト教侵略に強く抵抗したと想像できます。日本では、キリスト教侵略に対して鎖国政策で国を守ったのですが、タイランドで



写真23 タイランド・バンコクのチャオプラヤー川岸に建つ高層アパートやホテル



写真24 チャオプラヤー川の便利な“観光にも利用できる”水上バス

はどのようにして国を守ったのかは明確ではありません。しかし大変興味ある疑問だと思います。タイランドの現在の政治体制は、日本と同じ立憲君主制ですが、国王の国民への影響はかなり強いようです。これは、後述するタイランドの近代の歴史を考えれば、極めて納得のゆくことだと思います。我々がタイランドを訪問したのは、前国王が亡くなった直後でしたのでバンコクの街には黒衣装や黒リボンの方が多かったのには驚いた経験があります。

我々は、2016年に医学物理の国際会議がバンコックで開催され、タイランドを2度訪問するチャンスがありました。タイランドの面積は日本の約1.4倍で、人口は約7,000万人です。国民の94%の宗教は仏教です。しかしタイランドの人々の信仰心は、日本とはかなり異なるようです。そのために「キリスト教宣教師は布教することができなかった」と想像されます。そのような状況は起こりうると仮定できますが、ヨーロッパから派遣された宣教師達の歴史を調べる必要があるかもしれません。

バンコックには、チャオプラヤー川（写真23）という巨大な川が流れています。この川には水上バス（写真24）があり、終点までの往復利用は観光にも便利です。また、

市内電車や列車も容易に利用できます。バンコック市内ではタクシーやトゥクトゥクも便利です。チャオプラヤー川の両側には多数の高層ビル・アパートとホテルが立ち並んでいます。バンコックには多数の寺院がありますので、どの寺院を訪問するかは慎重に選択することが必要です。

タイランドの王室の建物とワット（寺院）・プラケオ王室寺院（写真25）は、チャオプラヤー川の近くの広大な敷地に位置しています。バンコックは、後述のアユタヤー王朝の崩壊の後、ビルマ（現ミャンマー）軍を追い払って、1780年代に新たな王朝の始まりとして建設されたのです。王宮は、膨大で近代的な西洋風の4棟の宮殿からできています。この敷地内にあるワット・プラケオはタイランドで最も格式の高い王室寺院です。その本堂にはエメラルド色のヒスイの仏像が祀られているためエメラルド寺院とも呼ばれているそうです。残念ながら撮影禁止のため写真を展示することができません。

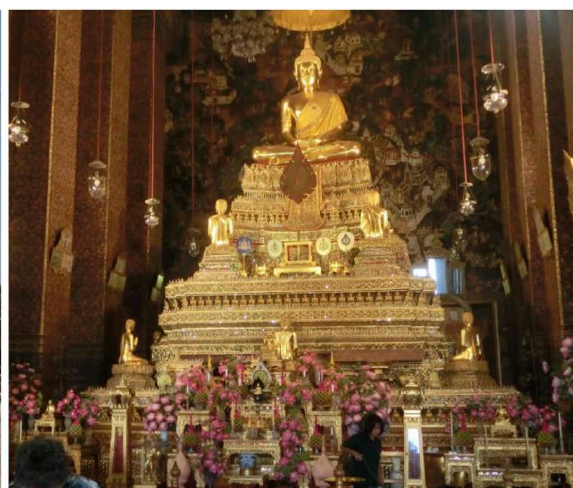
王宮の近くで約100年後に建設された現代的な仏教寺院ワット・ラーチャボピット（写真26A）があります。ここでは黄金に輝く仏像（写真26B）を撮影できました。バンコックには多数の寺院がありますが、チャイナタウンの



写真25 チャオプラヤー川から眺めるタイランドの王宮とワット・プラケオ



(A)



(B)

写真26 (A)ワット・ラーチャボピットと(B)本堂の仏像

ワット・トライミットの本堂には、巨大な金（純度60%）の仏像もあり、高さ3m、重量5トンもあるそうです。ワット・ポーには、横たわる巨大な寝仏（写真27）のあることが知られています。この寺院は、タイランド最初の大学（医学分野タイランド式マッサージ）のある寺としても有名だそうです。

バンコックを新しい首都として建設するについては、ビルマ（現ミャンマー）などの外敵に対する対策が極めて重要だったと思われます。そこで宮廷や新都市の外側に運河を巡らせ、12カ所の城塞と城壁を建設したそうです。現在、バーンラムプー運河の内側にブラ・スメン砦とマハーカーン砦の2カ所の城塞が残っています。更に、その運河の内側と外側にも別の運河（ロート運河、バドゥン・クルン・カセム運河）が作られていますので、当時の外敵に対する脅威は想像を絶するものだったと推測されます。

私は、少年時代に読んだ「徳川時代にタイランドに渡った山田長政という英雄の物語」を覚えていました。そこで、

その足跡の残るアユタヤーを訪問したのです。アユタヤーは、バンコックから列車で1時間ほどの距離で容易に日帰りできます。当時、1,500人ほどの日本人が住んでいたのですが、その後の鎖国政策のため全員引き上げたそうです。現在はほとんどその足跡はないのですが、記念館が残っていました。最近のインターネットによると、英雄山田長政はタイランドの映画になっているようです。アユタヤーは、現在のチャクリー王朝（1782～）の前のアユタヤー王朝（1351～1767）時代の首都で“ヨーロッパにも知られるほどの”繁栄した国際都市”だったそうです。しかし、ビルマ（現ミャンマー）との戦いで陥落したのです。ビルマはすべての仏像を破壊（写真28A）したそうです。有名な木の根に取り込まれた仏像の首（写真28B）は、この時に破壊されたものと思います。これは人間の歴史において「人間や宗教に対する憎しみや恨みがいかに根深いもの」であったかを示す一つの証拠と思います。しかし、アユタヤー王朝が陥落した後に、タイランドの次の国王は首

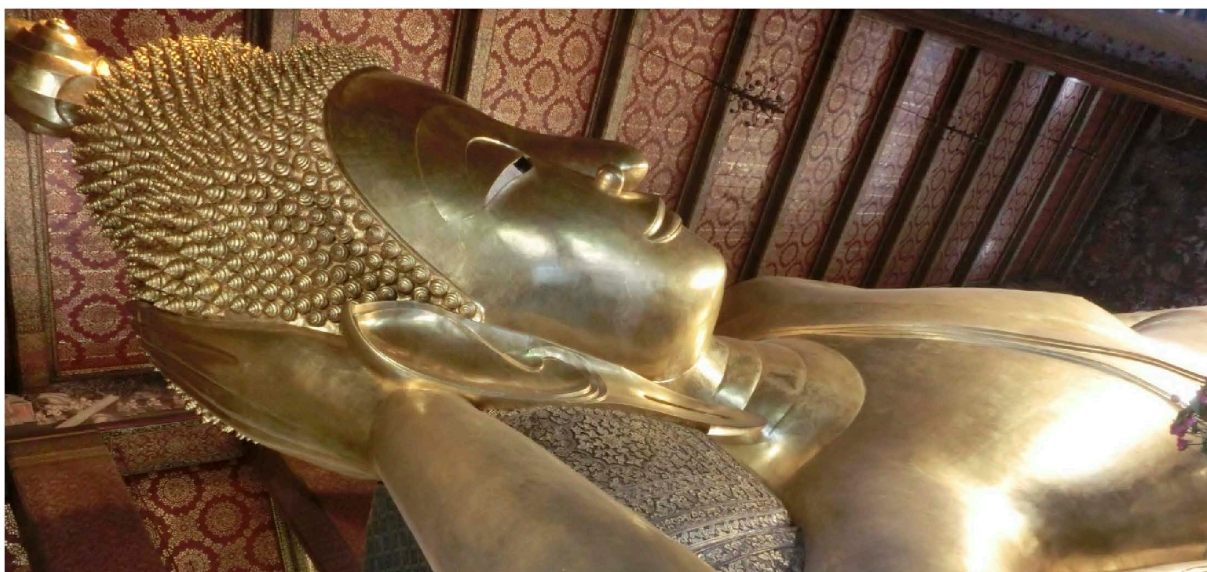


写真27 ワット・ポーにおける巨大な寝仏像



(A)



(B)

写真28 アユタヤーの(A)破壊された仏像と(B)木の根に取り込まれた仏像の首

都をバンコックに移し、ビルマを追い出して現在に至っているそうです。そこで、タイランドにおける国王に対する深い敬意と忠誠心を理解できると思います。

バンコック訪問中に、1957年の名作映画「戦場にかかる橋 Bridge on the River Kwai」で有名になったタイランドとビルマをつなぐ橋を見に出かけました。この橋はバンコックから130kmのカンチャナブリという場所にあり電車で訪問できます。この映画は第2次世界大戦中にビルマで捕虜になった英国軍兵士と日本軍人がクワイ河に木造の橋を架ける物語で、7個のアカデミー賞を受賞しテーマ曲「クワイ河のマーチ」は名曲です。多くの年配の方は聞いたことがあると思います。監督はローレンス・オリビエ、出演はアレック・ギネスと早川雪舟やウィリアム・ホールデンでした。青年時代に胸躍らせながら見た映画を楽しく思い出しました。

カンチャナブリへ向かう途中に、電車はメークローン市場を通過しましたが、“信じられない”珍しい光景を目撃しました。この市場では、線路の上に生鮮食料品や日用品が並べられ日よけがかけられていますが、列車の警笛が鳴ると線路上の品物は急いで脇に寄せられ、日よけは畳み込まれます。列車がゆっくり通過すると、再び品物が並べられるのです。この光景は、毎日4往復する列車が通過するたびに繰り返します。この珍しい市場は、大変な人気で多くの観光客や買物客が訪れるそうです。このような市場は世界中で唯一と思います。

最初のバンコック訪問の後、ヨーロッパや米国でよく知られている人気のあるプーケットを訪問し数日間滞在しました。プーケットは飛行機でバンコックから1時間ほどの距離で、気候の良い海辺のリゾート（写真29）ですので、ヨーロッパや中国など海外からの訪問客が多数でした。こ



写真29 プーケットの海岸沿いのリゾートホテル



(A)

(B)

(C)

写真30 新鮮な(A)海鮮材料、(B)焼き魚と(C)タイランド料理

ここではトライアスロン国際レースが毎年開催され何度も参加している次男は、我々の旅行には不参加でした。町では、バーベキューなどの海鮮料理（写真30）が多かったです。最新のニュースでは、ロシアのウクライナ侵略戦争のために、ロシアからの多数の観光客がプーケットに取り残され帰国できず困っているそうです。

（2022年11月6日記 土井邦雄*）

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、ペルーの古代インカ、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, 2022
6. ベトナム、カンボジア、ポーランド、アラスカ. 医学物理 42: 182-199, 2022
7. ポルトガル、ハンガリー、南アフリカ、タイランド. 医学物理 42: 215-230, 2022

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

編集後記

JSMP 会員にはとても嬉しいニュースでございます。Impact Factor (IF) を算出している Clarivate Analytics 社より RPT 誌に IF が付与されるという公式アナウンスを受けたとのことです。本誌では IF 獲得支援をしてみいりましたので、これまでの苦勞が実り一段落という心持ちでございます。前 Editor-in-Chief の土井先生による連載コラムは、回を追うごとに内容が充実してきており、当初の目的どおり、学術活動と世界のつながりを感じ取る貴重な読み物としてお楽しみください。また、本号には RPT 誌に掲載された医学物理の歴史に関するレビュー論文の翻訳記事を掲載しております。逆に、本誌に掲載した解説論文をベースに、世界へ向けて内容を充実させた英文レビュー論文の企画が RPT 誌において現在進行形で進められております。

(編集委員長 長谷川智之)

Japanese Journal of Medical Physics

Editorial Board

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

JSMP 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

JSMP 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
河野 良介 (国際医療福祉大学)
榮 武二 (筑波大学)
佐藤 清香 (エレクトラ)
杉本 聡 (順天堂大学)
高橋 豊 (医薬品医療機器総合機構)
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)
森 祐太郎 (筑波大学)
山田 崇裕 (近畿大学)
渡部 浩司 (東北大学)

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

目 次

解 説

医学物理の歴史

遠藤真広 201

施設紹介

徳島大学大学院保健科学研究科医学物理学コースの紹介

芳賀昭弘 212

連載コラム：シカゴ通信

ポルトガル，ハンガリー，南アフリカ，タイランド

土井邦雄 215

編集後記 231

【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。