

医|学|物|理

Japanese Journal of Medical Physics

2020

Vol. 40

2

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

JSMP

Japan Society of Medical Physics

教育委員会企画新連載スタート
サマーセミナー特集
施設紹介リニューアル



令和 2年
第40巻 2号



日本医学物理学会機関誌

目 次

巻 頭 言

医学物理 施設紹介企画

「極めろ，医学物理道！！—日本が誇る施設最前線—」

河野良介 45

〈サマーセミナー特集〉

解 説

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 開催報告

宇都宮悟，和田真一 46

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 参加報告

大澤阿紋 51

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 体験記

上村柊太 53

機械学習のための情報数学

古徳純一 55

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

重粒子線治療装置 HIMAC の建設とそのもたらしたもの—医学物理学の観点から—
第 1 部．治療開始まで (1975～1994)

遠藤真広 61

施設紹介

駒澤大学大学院医療健康科学研究科診療放射線学専攻

医学物理士養成コースの紹介

馬込大貴，藤田幸男，保科正夫，佐藤昌憲 68

編集後記 71

【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

Master the Medical Physics!! : Top Facilities that Japan Boasts to the World Ryosuke KOHNO.....	45
--	----

〈Special Issue: Summer Seminar 2019〉

REVIEWS

The JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019 Satoru UTSUNOMIYA, Shinichi WADA	46
A Participation Report of the JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019 Amon OHSAWA	51
A Participation Report of the JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019 Shuta KAMIMURA	53
Information Mathematics for Machine Learning Jun'ichi KOTOKU	55

〈Special Issue Series: Educational Committee〉

REVIEW

Construction of Heavy Ion Accelerator in Chiba (HIMAC) and Its Consequences —From Medical Physics Viewpoint: Part 1. Period until Treatment Start (1975–1994) Masahiro ENDO.....	61
--	----

INTRODUCTION OF RESEARCH FACILITY

Introduction of Medical Physics Course in Komazawa University Taiki MAGOME, Yukio FUJITA, Masao HOSHINA, Masanori SATO.....	68
--	----

EDITOR'S NOTE	71
---------------------	----

巻頭言

医学物理 施設紹介企画

「極めろ，医学物理道！！—日本が誇る施設最前線—」

河野良介

量子科学技術研究開発機構

時下ますますご清祥のこととお喜び申し上げます。このたびの新型コロナウイルスには心痛める日々が続いておりますが、一人一人が責任を持ち、「ONE TEAM」となって外出を控え、辛抱しましょう。我々なら勝てます！！

さて、今号から、日本医学物理学会の機関誌である「医学物理」内の「施設紹介」記事がリニューアルされる運びとなりました。「施設紹介」企画につきましては、昨年4月に編集委員会内にて施設紹介ワーキンググループ(WG)を立ち上げ、検討を重ねて参りましたが、このたび、新たな船出を迎えるに当たり、施設紹介WGを代表して私が巻頭言を執筆させていただくことになりました。「施設紹介」は、「医学物理」内の一企画に過ぎず、新しい船出と言ってもマイナーチェンジに過ぎないことから、巻頭言の執筆という大役は恐れ多いというのが正直なところでした。しかしながら、会員の皆さまに大いに本企画を知っていただき、今まで以上に関心を高めていただくためにも、このタイミングでお引き受けしたほうがよいと考えるに至った次第であります。

『医学物理』において「施設紹介」企画が始まったのは、今から5年前の2014年になります。春の学術大会では、JSMP教育委員会主催の医学物理教育コース交流会が催されているように、医学物理学研究者や医学物理士を目指す学生にとっては、教育研究機関や医学物理士養成機関として大学に対する関心が高いと感じています。また、医学物理研究者や医療機器メーカーにとっても、研究や技術開発を行う施設の研究活動に関心が高いとも感じています。それゆえ、編集委員会では、このような期待に応える必要があると常々感じておりました。

他方、JASTRO NEWSLETTERでは、「放射線技師・医学物理士のコーナー」として、日本医学物理士会会報でも、「臨床現場で活躍する医学物理士」として、施設紹介が行われている現状もあります。もちろん、各学会や団体により企画の意図や目的は異なっているとは想像されますが、「医学物理」内の「施設紹介」企画は、他誌とは明確に棲み分けをしたほうがよいのではないかとの声が上がっていることも認識しておりました。

そんななか、施設紹介WGは、「ONE TEAM」となって本企画の改革に乗り出しました。「極めろ，医学物理道！！—日本が誇る施設最前線—」を合言葉として、この言葉の意味するところは、日本医学物理学会の目指す、高い科学的水準に基づいた問題解決や新規技術開発、臨床研

究などを推進している施設から、その研究や技術開発の内容を広く学会員に伝え、臨床現場が抱える問題点の解決および医学物理学のさらなる発展に貢献することにあります。

本企画では、今までは執筆者の裁量に任せて自由に記事を書いていただいておりますが、今回からは、「施設の概要説明」や「教育活動」、「研究活動」、「研究者の日常」、「医学物理を志す者への一言」の計5項目について分けて執筆いただくように変更しました。これにより、各紹介施設が項目ごとに容易に対比できることも期待できるでしょう。具体的には、施設の歴史に、教員や研究者、学生の人数、保有している機器や装置などの施設に関する「概要説明」から、認定医学物理教育コースやセミナーなどの「教育活動」に加えて、今現在進めている研究やプロジェクトなどの「研究活動」も報告してもらおうと考えております。さらに、学生のために、「研究者の日常」に注目して、臨床業務や研究業務などのような1日を送っているかについて紹介いただきます。そして最後には、「医学物理を志す者への一言」をいただき、将来を担う学生や若手に医学物理の世界に飛び込んでもらえることを願っております。

このように、日本医学物理学会員の皆さまには、本企画の趣旨に是非賛同いただき、施設紹介記事を楽しんでいただければと思います。また、皆さまへは編集委員会から施設紹介記事に関する執筆依頼をさせていただくこともあるかとは思いますが、そのときはどうぞご協力のほどをよろしくお願い申し上げます。執筆される先生方には、刷り上がり6ページ(12,000文字)という制限はありますが、学生へのアピールや研究の発信を目的として、自施設に関する思いの丈を存分に述べていただければ幸いです。

末筆ながら、本企画を進めるに当たり、温かく見守り、ご支援くださった長谷川JSMP編集委員長ならびに編集委員の皆さまに、深くお礼申し上げます。そして、施設紹介WGの橋本成世委員、佐藤清香委員、秋元麻未委員には、お忙しいなか、企画の検討時から何度も話し合い、このような形で企画をまとめ上げることができましたことを、この場をお借りして、心より深く感謝申し上げます。本企画が末長く愛され、医学物理への関心を高めることに少しでも貢献し、医学物理の裾野が広がることを期待し、私からの巻頭言の言葉とさせていただきます。と思います。

最後に、皆さん、毎号必ず、施設紹介記事をクリックですよ！！

解説

〈サマーセミナー特集〉

JSMP医学物理サマーセミナー2019開催報告宇都宮悟^{*1}, 和田真一²¹新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野²新潟大学 名誉教授**The JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019**Satoru UTSUNOMIYA^{*1}, Shinichi WADA²¹ Graduate School of Health Sciences, Niigata University² Professor Emeritus of Niigata University**1. はじめに**

JSMP医学物理サマーセミナー2019は、2019年8月30日（金）～9月1日（日）の3日間の日程で、新潟県中魚沼郡津南町の高原リゾートホテル、ニュー・グリーンピア津南にて開催された。

会場のニュー・グリーンピア津南は、厚生省のグリーンピア計画¹⁾により、被保険者・年金受給者のための保養施設として全国13カ所に開設された年金資金運用基金所有、財団法人年金保養協会が運営する大規模年金保養施設の一つとして、1985年にオープンした施設で、その後、2001年政府の特殊法人整理合理化計画に基づき、2005年までに廃止が閣議決定されるなかで、年間利用者14万人（町内利用者を除く）を越え、地域に果たす役割が大きく、地元からの強い存続要望により、調整の結果、2005年に津南町への譲渡が決定され、株式会社津南高原開発に運営委託される形でニュー・グリーンピア津南としてリニューアルオープンした公設民営のリゾートホテルである^{1),2)}。115万坪の広大な敷地内には、8階建ての本館と東館（146室：529名収容）のホテル棟を中心に、屋外施設として、カナディアンハウス、コテージ、バンガロー、オートキャンプ場を含むキャンプ場、リフト4基とナイター設備を備えたプライベートスキーゲレンデ、自然観察の森、グランドゴルフ、パターゴルフ、ゴーカート、フィールドアスレチック、多目的グラウンド、ラウンドカーコース、サイクリングコース、釣り堀、バーベキューガーデン、屋外テニスコート、屋外プールなどの施設に、1,200台収容可能な駐車場が設備された多目的大規模リゾート施設といえる。屋内施設としては、体育館、屋内温水プール、ボーリング場、多目的ホール、バンケットホール、レストラン、大小宴会場、会議室、カフェテリアなどがあり、温泉大浴場は本館3階と東館8階（展望露天風呂、サウナ）の2カ所がある^{1),3)}。

2. 医学物理サマーセミナーの趣旨、プログラム

ホテル本館6～7階の多目的ホール（オーロラ；定員：330名）（Fig. 1）をメイン会場として、8月30日（金）午後1:20からの小澤修一教育委員会委員長の開校の挨拶により、2泊3日セミナー日程がスタートした。プログラムをTable 1に示す。

JSMP医学物理サマーセミナーは、2002年に、日本医学物理学会の新規事業として『医学物理士及び医学物理士をめざす人達の資質の向上を図ることを目的として、系統的な大学院レベルの医学物理講座を開講する』を趣旨としてスタートした⁴⁾。まだわが国に医学物理学の大学院教育プログラムが存在していなかったなかで、当時JSMP教育委員会金井達明委員長を中心に、医学物理学大学院教育カリキュラムコンテンツを議論し、2泊3日の夏季学校の日程で、3年間で1クールとし医学物理学の全分野をカバーする大学院課程レベルの医学物理コースを想定してプログラムが組み立てられた^{4),5)}。「系統的な大学院レベルの医学物理講座」の講義項目・内容は、AAPM report No. 44⁶⁾ (revised to AAPM report No. 79⁷⁾, 2002)を参考に選定され、3年間で同一会場とすることを基本に2016年まで15年間続いてきた⁵⁾。Table 2に2011～2013年の3年分の医学物理サマーセミナー（熊本-阿蘇）の講義科目一覧を示す⁵⁾。

一方、2007年に施行されたがん対策基本法に伴い、文部科学省の大学改革推進等補助金事業がんプロフェッショナル養成プランによるがん医療を担う専門医療人の養成支援が始まり、そのなかに、大学院医学物理教育プログラムと医学物理士人材養成が明確に位置づけられた^{8),9)}。

それまで、日本医学放射線学会の認定制度であった医学物理士認定制度は、2009年医学物理士認定機構(JBMP)の設立に伴い、JBMPによる認定へと移管され、さらに、2011年にJBMP医学物理教育カリキュラムガイドライン

* 新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野 [〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通2番町746]
Graduate School of Health Sciences, Niigata University, 2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata 951-8518, Japan
E-mail: sutsuno@clg.niigata-u.ac.jp



ホテル棟



セミナーメイン会場（多目的ホール：オーロラ）での講義

Fig. 1 ニュー・グリーンピア津南

Table 1 JSMP医学物理サマーセミナー2019プログラム

JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019			
会場	ニュー・グリーンピア津南	会期	2019年8月30日～9月1日
Day 1			
13:10	13:20	Welcome, Course Overview	
13:20	14:50	放射線生物学（青山英史先生）	
15:00	16:00	放射線治療領域の臨床研究—医学物理士へのメッセージ（青山英史先生）	
16:10	17:10	機械学習Ⅰ（古徳純一先生）	
17:20	18:20	機械学習Ⅱ（古徳純一先生）	
18:30		Banquet	
Day 2			
7:00	8:30	Breakfast	
9:00	10:00	放射線計測学Ⅰ（河内徹先生）	
10:10	11:10	放射線計測学Ⅱ（河内徹先生）	
11:20	12:20	放射線治療計画装置Ⅰ（線量分布計算）（橘 英伸先生）	
12:20	13:10	Lunch	
13:10	14:40	放射線治療計画装置Ⅰ（線量分布計算）（橘 英伸先生）	
14:50	15:50	画像工学Ⅰ（有村秀孝先生）	
15:50	18:20	Recreation（酒蔵バスツアー、ボーリング大会 or 自由時間）	
18:20	19:30	Supper	
20:00		Night Session	
Day 3			
5:30	6:30	Walking	
7:00	8:30	Breakfast	
9:00	10:00	画像工学Ⅱ（有村秀孝先生）	
10:10	11:10	MRIⅠ（山本 徹先生）	
11:20	12:20	MRIⅡ（山本 徹先生）	
12:20	12:30	Closing remark・記念撮影	

が発行され¹⁰⁾、2012年にJBMPによる医学物理教育コース認定が始まり、全国13大学に認定大学院医学物理士養成コースが誕生した^{11), 12)}。2007年の文部科学省事業によるがんプロ医学物理コースによる医学物理士の養成が全国の大学で始まり、2012年にはJBMPによる医学物理教育コース認定事業が始まったことにより、医学物理サマーセ

ミナーの趣旨・開催方法の見直しの必要性が問われていた。このような背景の中で、小澤修一教育委員長、サマーセミナー主担当委員：津藤真司委員、および、小野薫教育委員会担当理事の意向により、2017年からの3回の医学物理サマーセミナーの開催趣旨を『医学物理士及び医学物理士をめざす人達の資質の向上を図ることを目的として、

Table 2 2011～2013年医学物理サマーセミナーの講義項目と講師

2011	Radiation Protection and Safety Magnetic Resonance Imaging External Beam Radiation Therapy Electron Beams: Physics and Clinical Aspects Nuclear Medicine/PET-Imaging MV/CBCT(IGRT) Special Procedure and Techniques in Radiotherapy	赤羽恵一 (放射線医学総合研究所) 山本 徹 (北海道大学) 荒木不次男 (熊本大学) 荒木不次男 (熊本大学) 山谷泰賀 (放射線医学総合研究所) 隅田伊織 (大阪大学) 塩見浩也 (大阪大学)
2012	Basic Radiation Physics, Dosimetric Principles Brachytherapy: Physical and Clinical Aspects Conventional Planar Imaging Treatment Planning in External Beam Radiotherapy Mathematical Methods for Imaging in Medicine kV-CBCT(IGRT) Motion and Motion Management in Radiotherapy	納富明弘 (九州大学) 川村慎二 (宮崎大学) 松本政雄 (大阪大学) 垣花泰政 (琉球大学) 有村秀孝 (九州大学) 芳賀昭弘 (東京大学) 吉武忠正 (九州大学)
2013	Radiation Dosimeters, Calibration of Photon & Electron Beams Machines for External Beam Radiotherapy Acceptance Tests, Commissioning, QA External Beam Radiotherapy Basic Radiobiology Digital X-Ray Imaging, CT and 4DCT Ultrasound Imaging MV CT (RPT 197 Thomotheapy)	藤田幸男 (東北大学) 後藤正治 ((株)バリアンメディカルシステムズ) 宮部結城 (京都大学) 大屋夏生 (熊本大学) 市川勝弘 (金沢大学) 蜂谷弘之 (東京工業大学) 田村昌也 (近畿大学)

Table 3 2017～2019年医学物理サマーセミナーの講義項目と講師

2017	電離箱による線量計測 (放射線計測に役立つ空洞原理の詳細) 光子線の計測 (空洞原理理解に立脚した極小照射野・FFFビームの計測) 電子線I (電子線の物理および計測) 電子線II (電子線外部照射における治療計画) 放射線計測に必要な統計 (計測に役立つ統計の知識と不確かさの算出方法) 密封小線源線量計測の不確かさ (小線源標準計測の確立とユーザーによる線源強度計測) 温度上昇による水吸収線量の計測 (水吸収線量の国家標準) 放射線治療用線量計に用いられる電位計 (電位計の基本構造・原理と放射線治療用線量計の分離校正の動向) SPECT (SPECT装置の原理, 画像再構成法及び画像補正法) 中性子線I (中性子線の物理および計測) 中性子線II (中性子捕捉療法に関する計測) シンチレーションカメラ (シンチレーションカメラの原理・構造・補正法)	片寄哲郎 (千葉がんセンター) 片寄哲郎 (千葉がんセンター) 黒河千恵 (順天堂大学) 黒河千恵 (順天堂大学) 黒澤忠弘 (産業技術総合研究所) 黒澤忠弘 (産業技術総合研究所) 清水森人 (産業技術総合研究所) 清水森人 (産業技術総合研究所) 渡部浩司 (東北大学サイクロトロンセンター) 納富昭弘 (九州大学) 納富昭弘 (九州大学) 木原朝彦 (岡山理科大学)
2018	CT I (基礎), CT II (CTの品質管理) 放射線物理学I (基礎編), 放射線物理学II (臨床編) 四次元放射線治療I (基礎編), 四次元放射線治療II (応用編) 治療計画手法と照射技術I (基礎編), 治療計画手法と照射技術II (応用編) 粒子線I (基礎編), 粒子線治療 (応用編) PETI (基礎編), PETII (応用編)	市川勝弘 (金沢大学) 西尾禎治 (東京女子大学) 椎木健裕 (山口大学) 成田雄一郎 (青森新都市病院) 松浦妙子 (北海道大学) 山谷泰賀 (放射線医学総合研究所)
2019	放射線生物学 放射線治療領域の臨床研究 機械学習I, II 放射線計測学I, II 放射線治療計画装置I (線量分布計算アルゴリズム), II 画像工学I, II MRI I, II	青山英史 (新潟大学) 青山英史 (新潟大学) 古徳純一 (帝京大学) 河内 徹 (千葉がんセンター) 橘 英伸 (国立がん研究センター東病院) 有村秀孝 (九州大学) 山本 徹 (北海道大学)

より専門性に特化した医学物理講座を開講する』へと変更し、また、2015年3月に発刊した医学物理学会監修医学物理教科書シリーズ『放射線計測学』『核医学物理学』と、これに続き2019年までに発行された『放射線治療物理学』

『放射線診断物理学』『画像・情報学』の各章を参照したプログラム構成を採用する開催方法が試みられた。Table 3に2017～2019年の3年分の医学物理サマーセミナー (新潟・津南) の講義科目一覧を示す⁵⁾。



Fig. 2-a 8月30日 サマーセミナーセミナー受付



Fig. 2-b 8月30日 パーベキュー (Banquet)



Fig. 2-c 8月31日 Recreation, 酒蔵見学, 見倉橋



Fig. 2-d 8月31日 Night Session



Fig. 2-e 9月1日 Early Bird Walking AM 5:30~6:30



Fig. 2-f 9月1日 Closing Remark後の集合写真

医学物理学教科書編集ad hoc委員会遠藤真広委員長の『医学物理学教科書シリーズ』の発刊にあたって¹³⁾には次の記述『この教科書シリーズは、大学院レベルの内容とすることをねらいました。すなわち、確立した内容を医学物理学の観点から体系化して記載するだけではなく、その基礎の上に行われている最近の重要な研究の入口までをカバーすることをめざしました。したがって、本シリーズの第一の対象は、医学物理学を学ぶ大学院生であり、その人たちの行う「研究の導入口」となることを期待しています』とし、『しかし、それだけではなく、医学物理学およびその関連分野で働く研究者や医療技術者にとって、いままでに修得された知識や経験を整理し、体系化するガイドとしてご使用いただけるのではないかと考えています』がある。これらの記述は、2016年までの医学物理サマーセミナーの趣旨『系統的な大学院レベルの医学物理講座を開講

する』と、ある意味で一貫性のあるものにも思える。ただし、2017年から変更し採用された『専門性に特化した医学物理講座』の意味するところとの対比において、本セミナーの趣旨と内容構成については、今後も、検討が必要かもしれない。また、AAPMのSummer School^{14),15)}は、1969年に始まり、現在まで続いており、毎年夏季に5日間程度の日程で、一つのトピックスを中心にプログラムを構成している。本サマーセミナーの今後にも参考になるかもしれない。

3. 参加者と参加動機

JSMP医学物理サマーセミナー2019は、受講者は79名(正会員64名, 学生会員9名, 非会員4名), 講師6名とスタッフ6名の, 合計参加者91名により開催された。受講者の年齢分布は、20歳代27名(34%), 30歳代23名(29%),

40歳代17名(22%), 50歳代10名(13%), 60歳代2名(3%)であった。都道府県別分布は、新潟県:20名, 東京都:11名, 愛知県:7名, 大阪府:5名, 神奈川県:4名, 兵庫県:4名, 福井県:3名, 群馬県:3名, 富山県, 広島県, 埼玉県, 三重県, 北海道:各2名, 茨城県, 岐阜県, 宮城県, 京都府, 滋賀県, 千葉県, 長崎県, 長野県, 鳥取県, 徳島県, 福岡県, 福島県が各1名であった。受講者の68%は認定医学物理士であり, 医学物理士認定取得希望者は22%。参加動機(複数回答可)としては, 日常業務の基礎知識整理:52%, 医学物理士試験の知識整理:19%, 夏季リフレッシュ:16%, 参加者とのコミュニケーション・情報交換:48%, 物理士認定・更新単位取得:49%だった。また, サマーセミナー参加回数6回以上の参加者19%, 4回以上の参加者が28%となり, 30代までの若手の参加者が63%と多くを占めるが, 参加動機の回答結果が示唆するところでは, 幅広い年齢層からの参加者があり, 本サマーセミナーの性格を物語っているといえるかもしれない。

会場へのアクセスは, 無料送迎バスにより, 上越新幹線越後湯沢駅から50分程でホテルに到着し, 多くの参加者はそれを利用いただいた。参加者の分布は, 新潟県, 東京都, 愛知県, 大阪府, 神奈川県, 兵庫県で50%であったが, 北海道, 九州などからの参加も見られた。

4. レクリエーション, 他

2日目午後のレクリエーションでは, 酒蔵バスツアー(Fig. 2-c)を企画させていただき, 37名の方から参加いただいた。また途中, 新潟の橋50選に選定され, 平成18年カンヌ国際映画祭出品作品(西川美和監督, オタギリジョー主演)「ゆれる」の舞台にもなった「見倉橋」に立ち寄り, 酒蔵見学での試飲を前に, スリルを味わっていた(Fig. 2-c)。同時時間帯の企画, ホテル屋内でのボーリング大会も, 13名が参加し, セミナー中の運動不足解消に役立ったと思われる。また, 同日, 夕食後の8時から, 本館5階宴会場(98畳)で, サマーセミナー恒例のNight Session(Fig. 2-d)を開催し, 多くの参加者を楽しんでいただけたように思われる。3日目の早朝5:30発のWalkingには小澤委員長, 水野実行委員を始め, 若手参加者を含む12名が参加し, 奥信越の早朝の空気を満喫した(Fig. 2-e)。Fig. 2-fは最終日閉校式後の集合写真を示す。

5. おわりに

2017年から3年間, 新潟県中魚沼郡津南町のリゾートホテルを会場に, JSMP医学物理サマーセミナーの開催を現地委員として担当させていただいた。参加者から多くの暖かい言葉をいただき, 有意義な開催に役割を果たすことができたと感じている。講義をご担当いただいた講師の先生方, 参加いただいた受講者の皆様方に, 心からお礼申し上げたい。なお, このサマーセミナーのプログラム企画は,

日本医学物理学会教育委員会サマーセミナー実行委員(小澤修一委員長, サマーセミナー主担当:津藤真司委員, 水野秀之委員, 小野薫委員)各位によるものである。また, 開催に際して, 新潟大学医歯学総合病院放射線治療科医学物理グループと関係者各位に多くのご協力をいただいた。(株)津南高原開発ニュー・グリーンピア津南営業部営業課の中島裕貴氏に御世話になった。心より感謝申し上げる。

最後に, 医学物理サマーセミナー2019の開催報告の執筆の機会を与えてくださった, JSMP編集委員の皆さまにお礼申し上げます。

参考資料

- 1) Wikipedia- グリーンピア: <https://ja.wikipedia.org/wiki/グリーンピア> (2020/3/20アクセス)
- 2) 津南町ホームページ: <https://www.town.tsunan.niigata.jp/soshiki/somu/newgreenpia.html> (2020/3/20アクセス)
- 3) ニュー・グリーンピア津南: NEW GREENPIA tsunan, The four season guide, 2017
- 4) 公益社団法人日本医学物理学会ホームページ: サマーセミナー2002開催記. <http://www.jsmp.org/meeting/SummerSeminar/MedicalPhysicsSummerSeminar2002.htm> (2020/3/20アクセス)
- 5) 公益社団法人日本医学物理学会ホームページ: サマーセミナー. <http://www.jsmp.org/education/summerseminar.html> (2020/3/20アクセス)
- 6) AAPM report No. 44: Academic program for master of science degree in medical physics, 1993, <https://www.aapm.org/pubs/reports/detail.asp?docid=43> (2020/3/20アクセス)
- 7) AAPM report No. 79: Academic program recommendations for graduate degrees in medical physics, 2002. https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT_79.pdf (2020/3/20アクセス)
- 8) 文部科学省ホームページ: 平成19年度がんプロフェッショナル養成プラン応募要領, 平成19年3月. https://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/kaikaku/gan.htm (2020/3/20アクセス)
- 9) 文部科学省ホームページ: 平成19年度「がんプロフェッショナル養成プラン」の選定結果について. https://www.mext.go.jp/a_menu/koutou/kaikaku/gan.htm (2020/3/20アクセス)
- 10) 一般財団法人医学物理士認定機構ホームページ: 教育コース認定, 放射線治療分野の医学物理教育カリキュラムガイドライン2011年度版. http://www.jbpm.org/course_educational/institution/ (2020/3/20アクセス)
- 11) 一般財団法人医学物理士認定機構ホームページ: 認定医学物理教育コース. http://www.jbpm.org/course_educational/decision/ (2020/3/20アクセス)
- 12) 公益社団法人日本医学物理学会ホームページ: 医学物理教育プログラム. <http://www.jsmp.org/meeting/EducationCommittee/MedicalPhysicsGP-Program2012.pdf> (2020/3/20アクセス)
- 13) 遠藤真広, 松本政雄: 医学物理学教科書シリーズの刊行にあたって. 医学物理学会監修, 納富明弘編著, 放射線計測学, pp. iii, 2015, 国際文献社, 東京
- 14) AAPM Summer School: <https://w3.aapm.org/meetings/2020SS/> (2020/3/20アクセス)
- 15) AAPM Home page: https://www.aapm.org/publicgeneral/documents/AAPM_and_Medical_Physicists_Flyer.pdf (2020/3/20アクセス)

解説

〈サマーセミナー特集〉

JSMP医学物理サマーセミナー2019参加報告

大澤阿紋*

新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野

A Participation Report of the JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019

Amon OHSAWA*

Graduate School of Health Sciences, Niigata University

1. はじめに

2019年8月30日から9月1日までの3日間にわたり開催された、JSMP医学物理サマーセミナー2019に参加したので報告する。

2. 開催地

2017, 18年度に引き続き、新潟県中魚沼郡のニュー・グリーンピア津南にて開催された。上越新幹線越後湯沢駅から送迎バスで50分ほどのところで、施設のある津南町は日本最大級の河岸段丘や柱状節理をもつジオパークとして認定を受けている。施設は苗場山麓に位置しており標高が650mほどと高いため、下越の新潟市と比較しても体感的に数度涼しかった。残暑の厳しい8月末～9月での開催であったが、天気も大きく崩れることなく快適な環境下でセミナーに望むことができた。

3. セミナーの概況

3日間にわたり、さまざまな分野の先生方からご講演いただいた。

3.1 1日目(放射線生物学, 機械学習)

1日目は新潟大学の青山英史先生より放射線生物学の講義があった。放射線治療で用いられる分割照射について、なぜ分割するのか、また分割様式の意味について考える機会となった。症例とともに平易に説明していただき、理解が深まった。また、医学物理士の先生方へのメッセージとして新潟大学の医学物理グループについて触れていただき、今後臨床や研究に取り組むうえでの励みとなった。夕方からは帝京大学の古徳純一先生より機械学習に関して講義が行われた。筆者は今まで機械学習に接する機会がなかったため、数式の詳細まで理解できたわけではないが、学んだことは機械学習を用いて研究活動を行う際の指針としたい。

3.2 2日目(放射線計測学, 線量分布計算, 画像工学)

2日目の午前には千葉県がんセンターの河内徹先生より光子線・電子線計測についてお話しいただいた。標準計測法12に則った計測について、測定対象量や項目ごとの不確かさ、不確かさ低減の方法など再確認する機会を得た。国立がん研究センター東病院の橘英伸先生からは放射線治療計画装置の線量計算アルゴリズムや利用の実際についてご講演いただいた。ClarksonやSuperposition/Convolutionなどの線量アルゴリズムの原理、特徴の違いや実機でのコミッショニングの結果、Golden Beam Dataの利用などについて病院での実例をもとにお話しいただいた。夕方から最終日の朝にかけては九州大学の有村秀孝先生より画像工学の理論や技術を概説していただいた。画像形成やデジタル化の原理、直交変換、レジストレーションなど改めて確認するよい機会となった。レジストレーションの話題や各手法の利点、問題点は筆者の研究と関係が深く、興味深く拝聴させていただいた。

3.3 3日目(MRI)

最終日の最後の講義では、北海道大学の山本徹先生よりMRIに関するお話があった。MRI撮影での画像形成(特にk空間)の概念は筆者にとって理解が難しいものであるが、順を追って解説していただき、頭の中を整理し直すことができた。その他、画像コントラストがつく原理や撮像法、アーチファクト、応用技術などさまざまな点からMRIの基礎について学び直すよい機会となった。

4. ナイトセッション

講演に加えて2日目の夜にはナイトセッションが行われた。大学院生や現場で働かれている先生方からの研究報告が主で、演題は中性子シンチレーション検出器の開発、MRIを用いた研究など多岐にわたった。いずれの演題においても、酒どころ新潟の日本酒や地ビールなどと一緒に、活発な議論が交わされた。筆者が最も印象に残っているのは九州大学の有村先生がおっしゃっていた研究テーマ

* 新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野 [〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通2番町746]
Graduate School of Health Sciences, Niigata University, 2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata 951-8518, Japan
E-mail: b18r101j@gmail.com



Fig. 1 Mikura Bridge

設定の注意点である。研究のテーマと方法の両方に新規性を持たせるか、いずれも新規性がないものは避けるべき、という内容を、おはぎやツナマヨパンに例えて説明していただいた。今後の研究テーマや方法設定の際注意するようにしたい。

5. レクリエーション

2日目の午後にはレクリエーションとして、酒蔵見学ツアーとボーリング大会が開催された。酒蔵見学ツアーでは、見倉橋の見学と津南醸造の訪問・試飲会が実施された。見倉橋は映画やドラマのロケ地としても有名な木製の吊り橋 (Fig. 1) で、橋下には中津川溪谷が広がる絶景であった。津南醸造の訪問では専用米などの酒の原料、仕込み過程や貯蔵庫の様子を見学させていただいた。見学後には各種銘柄の試飲会も催され、参加された先生方の大半はさまざまな銘柄の日本酒を味わいほろ酔いになってバスに戻られたようだ。

なお、見倉橋から津南醸造に至る道中では豪雪の雪解け水によって長年浸食されてできた（と思われる）、大規模な河岸段丘が見られた。急峻な溪谷にへばりつくように道が存在しており、時期によっては熊が出没するような狭隘路にバスを走らせてくださった南越後観光バスの運転士さんには頭が下がる思いである。

6. おわりに

JSMP医学物理サマーセミナー2019の概略を報告させていただいた。最後までお読みくださった先生方に深く御礼申し上げます。また、サマーセミナー参加報告の原稿執筆の機会をいただきました新潟大学の宇都宮悟先生に心より厚く御礼申し上げます。

解説

〈サマーセミナー特集〉

JSMP医学物理サマーセミナー2019体験記

上村 柊太*

新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野

A Participation Report of the JSMP Medical Physics Summer Seminar 2019

Shuta KAMIMURA*

Graduate School of Health Sciences, Niigata University

1. はじめに

暑さのなかにも秋の気配を感じ始めた良い時期に、JSMP医学物理サマーセミナー2019がニュー・グリーンピア津南にて開催されました。私は地元の新潟県十日町市出身ということもあり、サマーセミナーへの参加を心待ちにしておりました。今回サマーセミナーに初めて参加させていただきましたのでご報告申し上げます。

2. 1 日目

1日目は、青山英史先生（現：北海道大学）の放射線生物学の講義で始まりました。分割照射の意義に焦点が当てられ、放射線と物質の相互作用から化学放射線治療に至るまで、幅広い内容の講義をしてくださいました。具体的な研究データが示され、分割照射は晩期障害の低減に重要であると改めて学びました。青山先生のご講演では、新潟大学に医学物理教育コースが設置された過程や、放射線治療において医学物理士が非常に重要な役割を担っていることを教えてくださいました。現在私は新潟大学の医学物理士養成コースに在籍しており、治療計画や線量測定の臨床実習を受けさせていただいております。これもひとえに青山先生をはじめとする大勢の先生方のおかげであることを実感しました。古徳純一先生（帝京大学）の機械学習の講義では、スパース回帰を例にとり、アニメのキャラクターなどを用いて機械学習の基本的な考え方をわかりやすく教えてくださいました。機械学習についてはブラックボックスという印象をもっておりましたが、講義を通じて、機械学習は実質的には数学の関数を用いた統計的な解析であるという印象が変わりました。夕食はバーベキュー形式の懇親会でした。懇親会では先生方から色々なお話をうかがうことができ、このような意見交換の場に参加した経験が少ないうちに私にとって非常に勉強になりました。

3. 2 日目

2日目も興味深い講義が行われました。河内徹先生（千

葉県がんセンター）の放射線計測学の講義では、外部放射線治療における光子線と電子線の水吸収線量の計測について、臨床現場で直面しうる課題をピックアップしながら講義をしてくださいました。線量測定では測定値が小さいため、不確かさを小さくするとともに正確な評価が重要であると学びました。放射線治療計画装置の講義では、コミッションングを通じた検証やゴールデンビームデータの利用、さらには線量計算および最適化計算のアルゴリズムについて、実験結果や論文を示しながら講義をしてくださいました。特に線量計算アルゴリズムについては大学院の講義で学んだばかりでしたので、理解を深めることができました。ナイトセッションでは地酒が提供され、セミナー参加者の方々が研究内容などの発表をしてくださいました。検出器の開発に携わっておられる先生の研究やMRIを用いて甘いリングを識別するという研究など、非常に興味深い発表でした。有村秀孝先生（九州大学）の発表では、研究に対する姿勢について「ツナマヨおにぎり」や「アンパン」などの身近なものを用いて教えてくださいました。強く印象に残っております。会場では忌憚ない意見が飛び交い、時に大爆笑が起こるなど和やかな雰囲気でした。

4. 3 日目

3日目は、画像工学とMRIの講義が行われました。有村先生の画像工学の講義では、深層学習や画像レジストレーションについて、最新の研究例を挙げて講義をしてくださいました。画像レジストレーションについては、腫瘍領域と正常組織領域の領域抽出、放射線治療直前の患者セットアップ、複数回の照射における線量分布の積算などに用いられていることを知り、放射線治療に不可欠な技術であることを学びました。サマーセミナーの最後は山本徹先生（北海道大学）のMRIの講義でした。画像形成原理やアーチファクト、安全管理などについて詳しく解説してくださいました。MRI検査に携わるうえで最も大切なことは、撮像原理を正しく理解して、検査室内に金属を持ち込まないというような安全管理を徹底することであると講義を通

* 新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野 [〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通2番町746]
Graduate School of Health Sciences, Niigata University, 2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata 951-8518, Japan
E-mail: b19r101c@mail.cc.niigata-u.ac.jp

して感じました。

5. おわりに

今回私がニュー・グリーンピア津南を訪れたのは、小学生の時のキャンプで訪れて以来でした。幼いころから慣れ親しんだニュー・グリーンピア津南に学術的なイベントで訪れることとなり、非常に感慨深かったです。また、講義で勉強させていただいた以外にも温泉や地元の食材を使った食事を堪能し、英気を養うことができました。2日目の夕食ではカニが食べ放題だったことも嬉しかったです。

今回私は初めてサマーセミナーに参加し、講義では学術

的な刺激を受け自然には心を洗われてと充実した3日間を過ごさせていただきました。サマーセミナーは、臨床現場で放射線治療に携わっておられる医学物理士や診療放射線技師の先生方、最先端の研究に携わっておられる研究者の先生方、医学物理について学ぶ学生にとって非常に重要なイベントとなっているのだと改めて実感しました。今回学んだことを活かして、今後も医学物理士養成コースでの実習や医学物理士認定試験に向けた勉強に臨みます。

最後に、講師の先生方、実行委員の皆様、そしてこのような機会をいただきました宇都宮悟先生に心より御礼申し上げます。

解説

〈サマーセミナー特集〉

機械学習のための情報数学

古徳純一*

帝京大学大学院医療技術学研究科

Information Mathematics for Machine Learning

Jun'ichi KOTOKU*

Graduate School of Medical Care and Technology, Teikyo University

This manuscript is a supplement to the machine learning course at JSMP Medical Physics Summer School held in 2019. The idea of Kulbuck-Leibler divergence, a key concept in machine learning, is introduced with mutual information.

Keywords: machine learning, mathematics, KL divergence, mutual information

1. はじめに

最近の放射線治療では、患者の位置合わせに非線形のレジストレーションを使うことが多くなってきた。ところで、レジストレーションというのは2つの画像を位置合わせするものなので、どのくらい2つの画像が合っているかの尺度が前もって必要である。同じ装置の画像なら、2乗和誤差でもよいかもしれないが、CTとMRIの位置合わせなど、大まかな構造は合っているはずだが、そもそも異なるものを表示している異なるモダリティ間の尺度としては、相互情報量という値が使われることが多い。いったい、相互情報量とはなんだろう？ 相互情報量を表面的な理解にとどめず、より深い段階から基礎づけようとする、KLダイバージェンスという概念にいきつく。KLダイバージェンスは、CT、MRIそれぞれの画素値の生起確率などの確率分布間の距離のようなものである。

考えてみれば、世の中の多くの問題は、2つの分布の近さを測ることが必要である。例えば、機械学習は、真実になるべく近いモデルを最適化によって求めようとするわけだが、2つの確率分布間の距離が近いとはどういうことだろうか？ 本稿では、確率変数が独立という一見わかりやすいが、実はわかりにくい概念の復習から始め、相互情報量をKLダイバージェンスを使って基礎づけてみよう。

2. 確率変数の独立性

まずは、わかっているようで実はわかりにくい、確率変数が独立であるということについて考えてみよう。CT画像とMRI画像の位置合わせの例で言えば、同じ患者の画像であるのだから、CTの画素値の分布とMRIの画素値の分布がまったく独立なら無関係な画像、独立でないなら関

係のある画像ということになる。位置合わせでは、関係が最大になるような位置を探すわけである。

2.1 条件付き確率

まずは、Fig. 1のような同時確率分布を考えてみよう。

定義2.1 (同時確率分布¹⁾) 2次元ユークリッド空間 $\mathbb{R}^2$ の中の領域 A が与えられたとき、確率変数 (x, y) が A に入っている確率 $P(A)$ が

$$P(A) = \iint_A p(x, y) dx dy \quad (1)$$

となるような関数 $p(x, y)$ が存在するなら、 $p(x, y)$ を同時確率密度関数という。

確率変数 x と y の同時確率分布関数 $p(x, y)$ を考えると、

$$\begin{aligned} p(x|y=y_1) &= \frac{p(x, y=y_1)}{\int p(x, y=y_1) dx} \\ &= \frac{p(x, y=y_1)}{p(y=y_1)} \end{aligned} \quad (2)$$

を、確率変数 x の条件付き確率密度関数という。今の例の場合には、確率変数 y を y_1 に固定したときの x の確率分布である。

条件付き確率密度関数を、視覚的に捉えるには、以下のような曲面 S

$$S = \{(x, y, z) | z = p(x, y)\} \quad (3)$$

を考え、この曲面の平面 $y=y_1$ による断面 (Fig. 2) を、積分したら1になるように規格化したもの (Fig. 3) を考えるとよい。

式(2)は

$$p(x|y) = \frac{p(x, y)}{p(y)} \quad (4)$$

と略記されることが多い。

* 帝京大学大学院医療技術学研究科 [〒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

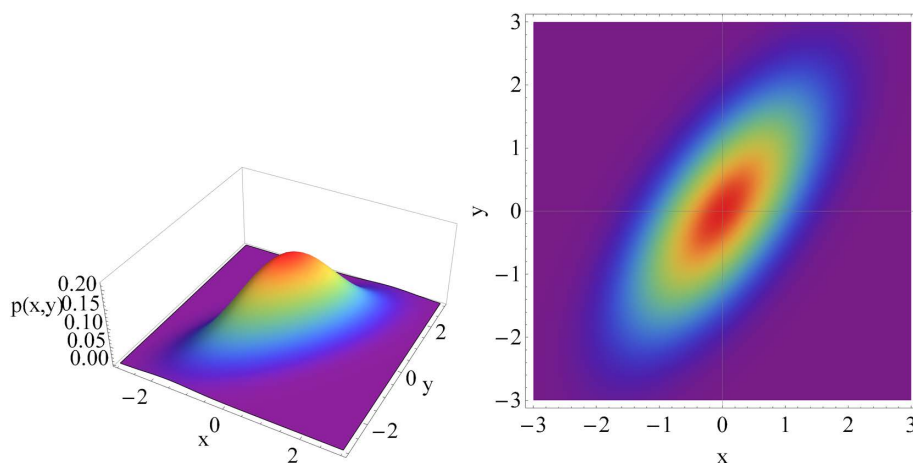


Fig. 1 同時確率分布

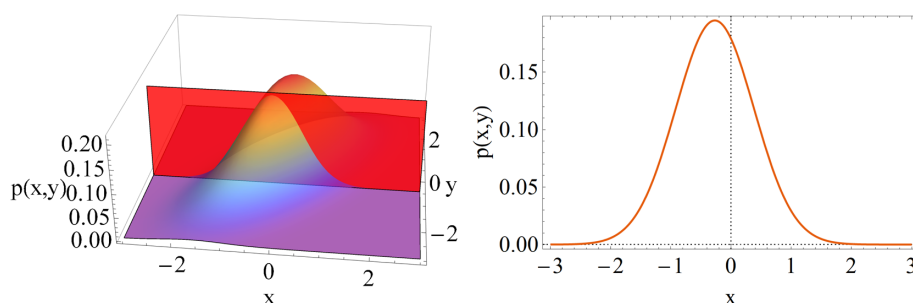


Fig. 2 Fig. 1の関数を平面 $y=-0.5$ で切った様子（左）と断面の切り口（右）

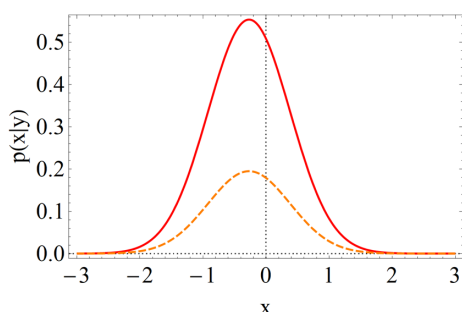


Fig. 3 Fig. 2の関数（破線）を、積分したら1になるように規格化した関数（実線）

2.2 確率変数の独立性

もし,

$$p(x|y) = p(x) \quad (5)$$

となるなら, これは y という情報のいかによらず, x の出方が同じであることを意味しているから, このとき, x と y は独立であるという. 式(4)と式(5)より,

$$p(x,y) = p(x)p(y) \quad (6)$$

が成り立つ. 式(5)の代わりに, こちらを独立性の定義に採用している教科書も多数ある.

確率変数が3つ以上の場合も, 同様に独立性を定義できる. 例えば, q 個の確率変数に関しては, 同時分布関数がそれぞれの確率変数の確率の積として表現できるので,

$$p(y_1, y_2, \dots, y_q) = p(y_1)p(y_2) \dots p(y_q) \quad (7)$$

となる.

それでは, 1変数確率分布が2個の場合に戻って, 独立かどうかを視覚的に判定してみよう. Fig. 4は, 先ほどの関数 (Fig. 2) を $y = -0.5$ と $y = -1.5$ の2つの平面で切った様子を表している. これをみると, そもそもグラフの最頻値の位置がずれてしまっており, この2つが定数倍で重なり合うことはない. したがって, この関数については, 独立性は成り立っていないと判断できる.

では, 次のFig. 5の例はどうだろう? Fig. 5は, 先ほどと形は似ているが, 原点の周りに対称な分布

$$p(x,y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2+y^2}{2}} \quad (8)$$

である.

この関数を, 異なる2平面で切った様子を表したものがFig. 6である. 今度は, 定数倍で重なるような気がする.

Fig. 7は, 式(2)の条件付き確率分布関数の定義に従い, Fig. 6の2つの関数を求めたものである. 両者は重なって

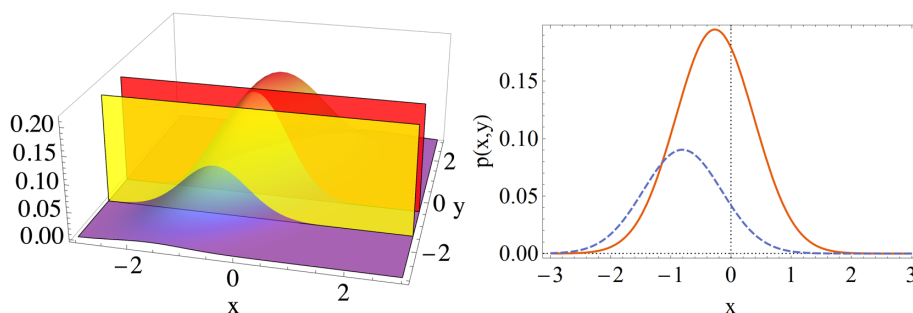
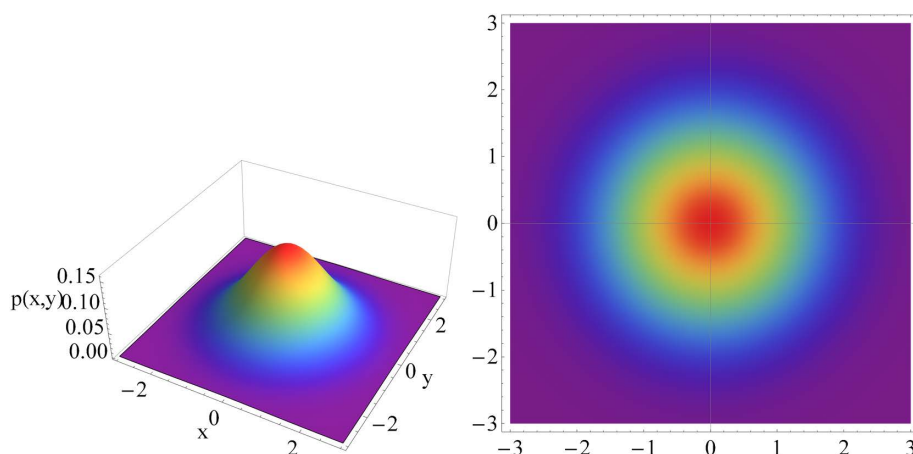
Fig. 4 $y=-0.5$ と $y=-1.5$ の2つの平面で切った様子 (左)とその断面の関数 (右)

Fig. 5 2つの確率変数が独立な同時確率密度関数の例

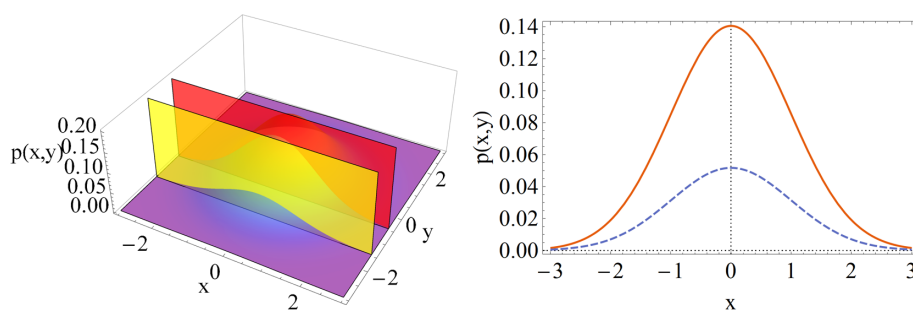


Fig. 6 Fig. 5の断面図

おり、同じ形をしている。これだけでは、まだすべての切り口が同じかどうか分からないが、実はこの関数はすべての切り口の条件付き確率分布関数が同じ

$$p(x|y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (9)$$

になる例で、確率変数 x と確率変数 y が独立な例である。

2.3 独立と相関

定義 2.2 (期待値) 確率密度関数 $p(x)$ を持つ確率変数 x があるとき、関数 $f(x)$ の期待値を

$$E(f(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)p(x)dx \quad (10)$$

と定義する。

定義 2.3 (2変数関数の期待値) 2変数関数 $f(x,y)$ の期待値も同様に、

$$E(f(x,y)) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y)p(x,y)dxdy \quad (11)$$

と定義する。

一般に、独立な確率変数 x,y があるとき、 $f(x)g(y)$ の期待値は、

$$\begin{aligned}
 E(f(x)g(y)) &= \iint_{-\infty}^{\infty} f(x)g(y)p(x,y)dx dy \\
 &= \iint_{-\infty}^{\infty} f(x)g(y)p(x)p(y)dx dy \quad (\text{式(6)より}) \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x)p(x)dx \int_{-\infty}^{\infty} g(y)p(y)dy \\
 &= E(f(x))E(g(y))
 \end{aligned} \tag{12}$$

となる。この結果を使えば確率変数 x と確率変数 y の共分散は

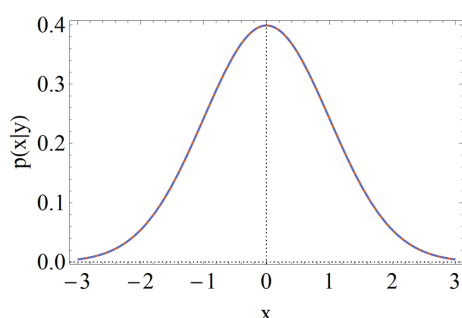


Fig. 7 Fig. 6の条件付き確率分布関数

$$\begin{aligned}
 E((x-E(x))(y-E(y))) &= E(xy) - E(x)E(y) \\
 &= E(x)E(y) - E(x)E(y) \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{式(12)より} \tag{13}$$

となるから、2つの確率変数が独立なら、その2つの確率変数は無相関であるといえる。

この主張の逆は成り立たず、無相関であっても独立とは限らない。例えば、Fig. 8左の散布図は、閉区間 $[-0.5, 0.5]$ 上の一様乱数に確率変数 x と y が従うとして作成した散布図である。この場合は文句なしに x と y は独立である。ここで、この散布図を45度回転したFig. 8右のような菱形の散布図が実験から得られた場合を考えよう。この場合は確率変数 x と y の共分散は0であるから無相関であるが、各軸で切った断面は定数倍で重ならないから、独立ではない。このように、独立というのは相関がないことよりも強い条件である²⁾。

3. KLダイバージェンス

前節までで、独立性のきちんとした定義と直感的なイメージはつかめたかと思うが、実際問題として、独立か独立でないかというのは0か1かのように2値に分けるのではなく、似ている似ていないのように、連続的な尺度で定

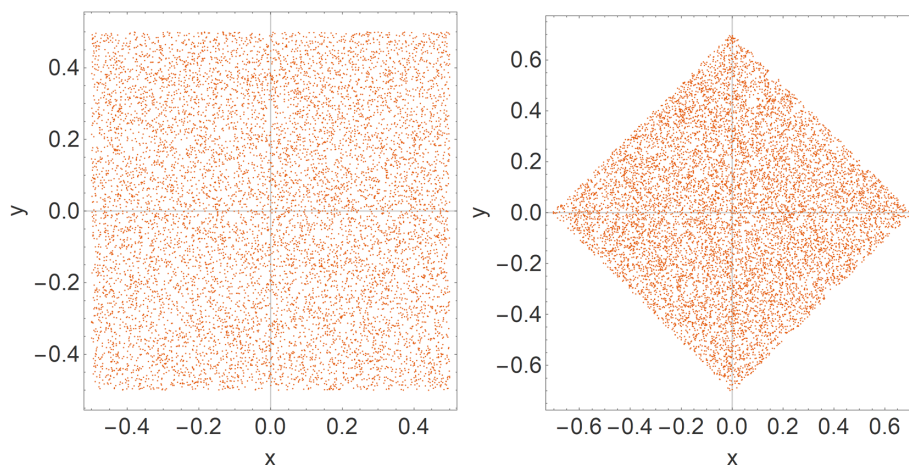


Fig. 8 確率変数 x と確率変数 y が独立な散布図（左）と無相関だが独立でない散布図（右）

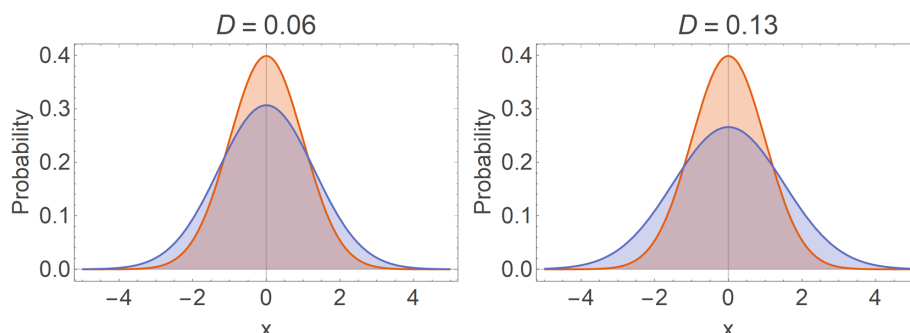


Fig. 9 2つの2変数ガウス分布間で計算したKLダイバージェンスの例。左のほうが2つの分布間が近いので、KLダイバージェンスが0に近い

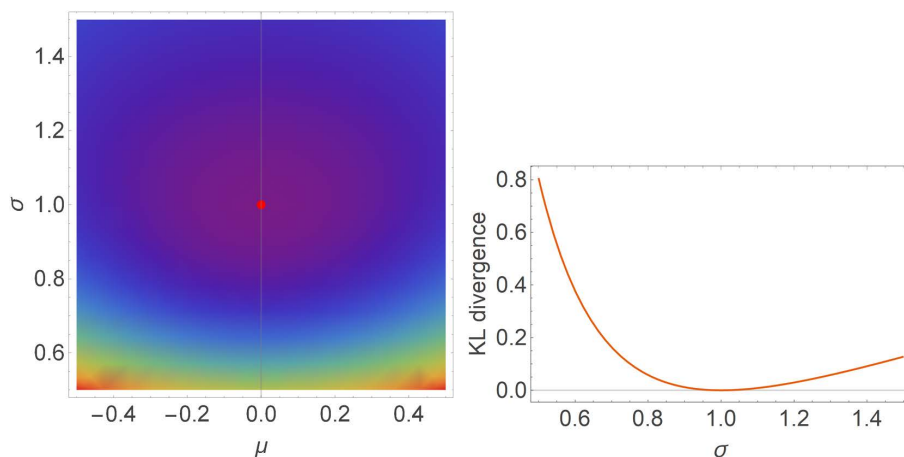


Fig. 10 KLダイバージェンスの可視化の例. 右は左のグラフの $\mu=0$ の断面を切ったグラフ

義したいというのが応用上の願いである. そこで登場するのが, 2つの確率分布がどれだけ近いかをはかるダイバージェンスという概念である.

定義 3.1 (KLダイバージェンスの定義¹⁾) q 個のスカラ値確率変数 $y_i, (i=1, 2, \dots, q)$ に対する 2つの確率密度関数 $p(y_1, y_2, \dots, y_q), q(y_1, y_2, \dots, y_q)$ があるとき,

$$D(p||q) = \iiint_{-\infty}^{\infty} p(y_1, y_2, \dots, y_q) \times \log \frac{p(y_1, y_2, \dots, y_q)}{q(y_1, y_2, \dots, y_q)} dy_1 dy_2 \dots dy_q \quad (14)$$

と定義された量を KL ダイバージェンスと呼ぶ.

KL ダイバージェンスに関しては, 次の性質が基本的である.

定理 3.1 (KLダイバージェンスの性質¹⁾)

1. 任意の確率密度関数 $p(y_1, y_2, \dots, y_q), q(y_1, y_2, \dots, y_q)$ について, $D(p||q) \geq 0$
2. $D(p||q) = 0$ ならば, $p(y_1, y_2, \dots, y_q) = q(y_1, y_2, \dots, y_q)$

KL ダイバージェンスは, 2つの確率分布間の距離をはかるようなものである. 情報理論や機械学習の世界でよく使用される. KL ダイバージェンスを, 2つの2変数ガウス分布で計算したのが Fig. 9 である.

上の例では, 2つの例だけを示したので, 片方の確率密度関数を標準正規分布にとり, もう一つのガウス分布の平均値 μ と標準偏差 σ を変えて, KL ダイバージェンスがどのようになるのかを示したのが Fig. 10 である. 図で赤く丸く印をつけてあるところが, ちょうど2つの分布が重なるところであり, このとき, KL ダイバージェンスは最小値 0 をもつ.

ここで, q 個のスカラ値確率変数 $y_i, (i=1, 2, \dots, q)$ があり, これらが互いに独立かどうかを問題にしたとしよう. 確率変数の独立の定義から, これらの確率変数が独立であったとすると, 同時分布関数がそれぞれの確率変数の確率の積として表現できるので,

$$p(y_1, y_2, \dots, y_q) = p(y_1)p(y_2)\dots p(y_q) \quad (15)$$

と書けるはずである. そこで, 先程の KL ダイバージェンスの定義における 2つの確率分布を, 同時分布関数 $p(y_1, y_2, \dots, y_q)$ と変数ごとの確率分布関数の積 $p(y_1)p(y_2)\dots p(y_q)$ にとり, これらの間の近さを測ればよさそうだとわかる.

そこで, 相互情報量を次のように定義する.

定義 3.2 (相互情報量の KL ダイバージェンスを使った定義) q 個のスカラ値確率変数 y_i からなるベクトルを

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_q \end{pmatrix}$$

とし, y_i が確率密度分布 $p(y_i)$ に従うとすると, これらの確率変数間の相互情報量 $I(\mathbf{y})$ を

$$I(\mathbf{y}) = D(p(\mathbf{y}) || p(y_1)p(y_2)\dots p(y_q)) \quad (16)$$

と定義する.

この定義からもわかるように, 相互情報量は, q 個の確率変数の同時確率分布がどの程度独立なときの分布よりも離れているかを表している. したがって, 0 に近いほどそれぞれの確率変数は独立であるといえることができる.

4. エントロピーと相互情報量

相互情報量の KL ダイバージェンスを使った定義は意味をつかみやすいが, 多くの文献では, エントロピーを使った形に書き換えた形式で紹介されることが多い. 実装もエントロピー表現を使ってされることが多いので, 関係を見てみよう.

定義 4.1 (エントロピー) q 個のスカラ値確率変数 y_i からなるベクトルを

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_q \end{pmatrix}$$

とするとき、これらの確率変数間のエントロピーを

$$H(\mathbf{y}) = - \int \cdots \int p(\mathbf{y}) \log p(\mathbf{y}) dy_1 \cdots dy_q \quad (17)$$

と定義する。

KLダイバージェンスを使って定義した相互情報量は、

$$\begin{aligned} I(\mathbf{y}) &= \int \cdots \int p(\mathbf{y}) \log \frac{p(\mathbf{y})}{\prod_{i=1}^q p(y_i)} dy_1 \cdots dy_q \\ &= \int \cdots \int p(\mathbf{y}) \log p(\mathbf{y}) dy_1 \cdots dy_q \\ &\quad - \int \cdots \int p(\mathbf{y}) \sum_{i=1}^q \log p(y_i) dy_1 \cdots dy_q \end{aligned} \quad (18)$$

ここで、

$$\begin{aligned} &\int \cdots \int p(\mathbf{y}) \log p(y_i) dy_1 \cdots dy_q \\ &= \int_{y_i=-\infty}^{\infty} \left(\int \cdots \int_{y_{j \neq i}} p(\mathbf{y}) dy_{j \neq i} \right) \log p(y_i) dy_i \\ &= \int_{y_i=-\infty}^{\infty} p(y_i) \log p(y_i) dy_i \\ &= -H(y_i) \end{aligned} \quad (19)$$

であるから、式(18)と式(17)、式(19)より、相互情報量は

$$I(\mathbf{y}) = -H(\mathbf{y}) + \sum_{i=1}^q H(y_i) \quad (20)$$

とエントロピーの和の形で書ける。この形を相互情報量の

定義として用いる文献は多い。

5. 情報幾何から見たKLダイバージェンス

最後に、KLダイバージェンスを幾何学の観点から捉えてみることにしよう。確率分布を分布の族としてみると、これら確率分布族全体は、多様体をなす。確率分布の推定とは、生成モデルのなす多様体への、真の確率分布からの射影のことであるとみなすことができる。

ユークリッド空間なら、この射影は正射影で問題ない。実際に最小2乗法は、ユークリッド空間上でのモデル空間への正射影と捉えることができる。しかしながら、一般に確率分布のなす空間は、ユークリッド的ではなく至る所曲がっている。この曲がり方に双対平坦という条件を課して、リーマン幾何の構造を持つ多様体として扱い、この多様体上である種の測地線にそった射影を考えるとうまくいくことがわかっている。KLダイバージェンスは、このような測地線を与える良い性質をもったダイバージェンス(2点間の分離度を表すもので距離の概念を拡張したもの)である。

このような視点は、50年ほど前、当時東京大学にいた甘利らによって提案された。甘利らは、微分幾何の枠組みで統計の推定を捉え直す情報幾何という分野を創始し、日本発の情報幾何学はいまなお世界中で発展が続いている³⁾。

参考文献

- 1) 渡辺澄夫, 村田 昇: 確率と統計—情報学への架け橋—, コロナ社, 2005
- 2) Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E, et al.: 詳解独立成分分析—信号解析の新しい世界—, 東京電機大学出版局, 2005
- 3) 甘利俊一: 情報幾何学の新展開, SGCライブラリ, サイエンス社, 2019

解説

〈連載：教育委員会企画〉

重粒子線治療装置 HIMAC の建設とそのもたらしたもの —医学物理学の観点から—

第1部. 治療開始まで(1975～1994)

遠藤真広*

医用原子力技術研究振興財団

Construction of Heavy Ion Accelerator in Chiba (HIMAC) and Its Consequences —From Medical Physics Viewpoint: Part 1. Period until Treatment Start (1975–1994)

Masahiro ENDO*

Association for Nuclear Technology in Medicine

解説の連載を始めるにあたって

放射線医学総合研究所（放医研）の重粒子線治療装置 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) による治療が始まったのは1994年6月であり、現在まで25年以上が経過している。しかし、装置の設計が始まったのは、その10年ほど前の1984年であり、放医研が興味を持ち検討を始めたのは1975年ころであるから、HIMAC に関わる研究はおおよそ半世紀近く継続している異例に長い研究プロジェクトといえる。本稿では、HIMAC 研究プロジェクトの経緯について、その前史から今後の発展の見通しに至るまでを主として医学物理学の観点から解説したい。

本解説は1年間かけて、4回にわたって連載する。それぞれの内容は、おおよそ以下のようにすることを予定しているが、書き進むにつれて多少、変更することがあるかもしれない。その場合はご容赦いただくようお願いしたい。第2部と第3部の期間は一部重複するが、ブロードビーム照射に関するものは第2部で記述し、スキャニング照射に関するものは第3部にまとめることにする。

第1部 治療開始まで(1975～1994)

第2部 ブロードビーム照射の高度化と普及型装置の開発
(1994～2010)第3部 スキャニング照射の開発と新治療棟の建設
(2006～)

第4部 臨床研究の概要と今後の展望

HIMAC では、臨床研究とそれに直接関連する装置開発や医学物理学など基礎研究以外にも、共同利用研究が行われてきた。共同利用研究は、HIMAC が日本に数少ない高エネルギーイオン加速器であることから、広く外部研究者

に利用の機会を提供して行われたものであるが、紙数の制限と著者の能力を越えることから、本解説では割愛したい。共同利用研究についてはHIMAC25周年を記念して、2019年に刊行されたRadioisotopes誌の68巻8号に特集として取り上げられ、WEB公開されているので、そちらを参考とされたい。同誌の68巻4号および6号には、特集の一環として本解説で取り上げる装置開発や医学物理学研究が、それぞれの担当者により解説されている。興味のある読者は、そちらも合わせて読まれることをお勧めする。

第1部. 治療開始まで(1975～1994)

第1部では建設開始までの動き（建設前史）、加速器の建設、SOBPの設計、治療システムの開発について概略を述べる。

1. 建設前史

HIMAC の設計を開始した1984年の約10年前の1975年に遡ると、米国のマサチューセッツ総合病院(Massachusetts General Hospital: MGH)とローレンスバークレイ研究所(Lawrence Berkeley Laboratory: LBL)は、それぞれ陽子線および重粒子線（この解説では、「重粒子線」という用語を陽子以外の原子核を高速に加速したビームの意味で使う）を用いてがんの治療を始めるところであった。MGHはハーバード大学のサイクロトロン(HCL)を用いて1974年から陽子線治療を開始し、LBLは1976年に184インチサイクロトロンへのリウムビームとBEVALACのネオンビームを用いて治療を開始している。

一方、放医研は、1975年に速中性子線治療を開始したが、そのころから次のプロジェクトとして陽子線や重粒子線を用いたがん治療を考えていた¹⁾。そして当時、粒子線治療に関連する2つの動きがあった。一つは、日米がん研

* E-mail: endo.masahiro@antm.or.jp

究協力プログラムに高LET放射線治療部会が設置され、1975年から1982年までに7回のセミナーが開催されたことである。これらのセミナーでは、速中性子線、負パイ中間子線、陽子線、重粒子線の臨床試行を実施している施設や、医療用へ転換する可能性を持つ施設の物理工学者、生物基礎医学者、医師などが参加し、粒子線治療の現状や将来計画などについて議論した。ここでは、上記の陽子線および重粒子線の臨床試行の状況が報告され、また、LBLからは新しい医療専用重粒子線治療施設の提案もあったが実現されなかった。この時、ニューマトロン計画を持っていた東京大学原子核研究所の平尾泰男教授は日本の医用重粒子線加速器の提案を行っている。平尾教授は後に放医研に移り、医用重粒子線研究部長としてHIMAC建設を指揮することになる。

もう一つは、科学技術庁が1978年から1979年にかけてわが国の粒子線治療をいかに進めるべきかについて日本医学放射線学会に調査研究を委託したことである。当時のマスコミは、負パイ中間子線治療の諸外国における取り組みを大きく取り扱っており、負パイ中間子線治療施設建設の是非を検討することが調査のねらいであったと思われる。しかし、委託を受けて学会で組織した委員会は、加速器技術、照射技術、各種粒子線の治療効果などの観点から2年間にわたって議論し、①陽子線、②重粒子線、③負パイ中間子線の順に装置建設を進めることが適切と報告した。

これらの状況を踏まえて、放医研は速中性子線治療の後継プロジェクトとして陽子線治療を候補にあげた。しかし、筑波大学と高エネルギー物理学研究所(KEK)がKEK内にある陽子ブースターシンクロトロンにより陽子線治療施設を建設することとなったため、重粒子線治療に目標を変更し、1980年「医用重粒子加速器」の報告書をまとめた。この報告書で採用した装置の原型は、京都の日米がん研究協力セミナーで平尾教授が提案した医用重イオン加速器(シンクロトロン)であった。医療用としてのこの加速器の仕様は、加速イオンは陽子からネオンとし、最大加速エネルギーは600MeV/u、ビーム強度は600rad·liter/min(現在の表記では6Gy(RBE)·liter/min)であった。ここで、Gy(RBE)·liter/minは粒子線治療関係者で使われるビーム強度の単位であり、例えば、1Gy(RBE)·liter/minであれば、1リットルの標的容積に1Gy(RBE)/minの線量率で照射できることを意味する。

そのようなとき、1984年から「対がん10カ年総合戦略」が開始されることとなり、重粒子線治療は「対がん10カ年総合戦略」において科学技術庁の目玉として取り上げられることとなった。そして「対がん10カ年総合戦略」の開始とともに重粒子線治療装置の建設プロジェクトもスタートすることとなり、概念設計、基本設計が1986年まで行われた。さらに詳細設計と装置建設が1993年まで続くことになる。

放医研では、プロジェクト開始以前から、さまざまな制度を利用して、研究員をLBLやMGHに送ったり、研究員を招聘したりして技術の習得に努めた。また、国際シンポジウムを開催し、設計案に対する意見を求めた。両施設の協力、特にLBLの協力は、HIMACプロジェクトが順調に開始されるうえで大きな役割を果たした。

2. 加速器の建設

2.1 HIMACの仕様

1986年まで行われた概念設計と基本設計により、HIMACの仕様が決められた。まず、医学的な要求としてTable 1が与えられ、それを実現する加速器仕様としてTable 2が決められた²⁾。そして、装置の構成はTable 3に示すものとなった。ここで、最もユニークな点は、シンクロトロンを2重としたことである。これは装置の冗長度を大きくし、故障や仕様未達に備える意味であると説明されたが、実際には将来の装置の発展に備えることを意図していた。そして、この意図は最初の想定とは同じではないが、後述の新治療棟へのビーム供給を上リングで行い、元の照

Table 1 Medical requirements²⁾

Particle Species	He to Ar
Penetration Range	30 cm in tissue
Dose Rate	5 Gy(RBE) · liter/min
Max. Field Size	22 cm ϕ
Beam Direction	Vertical & Horizontal

Table 2 Accelerator specifications²⁾

Ion Species	He to Ar
Maximum Energy	800 MeV/u (for $\epsilon = 0.5$)
Minimum Energy	100 MeV/u (for $\epsilon = 0.5$)
Beam Intensity	2.0×10^9 pps/ring (for C)
Duty Factor	20%/ring
Repetition Rate	0.5 Hz/ring

Table 3 Configuration of HIMAC

Ion Source	PIG & ECR
Injector Linac	RFQ (8/800 keV/u) Alvarez (Drift Tube) Type (0.8/6 MeV/u)
Main Accelerator	Double Synchrotrons
Beam Delivery	Wobbler Method
Treatment Room	A: Vertical B: Horizontal & Vertical C: Horizontal
Patient Positioning	6 Axes Treatment Couch Horizontal & Vertical Digital X-ray TV

射室には下リングからビーム供給を行うことにより実現したといえる。また、ビーム照射法はLBLにならない、ワプラーを用いるブロードビーム法とし、拡大ブラッグピーク(SOBP)の形成にはリッジフィルターを用いることとした。Fig. 1に装置の建築模型を示す³⁾。治療に用いられたA(垂直)、B(水平/垂直)、C(水平)以外、基礎研究のための物理、生物、2次ビームの3照射室が設けられている。

2.2 建設の経緯

1987年に実施部局として医用重粒子線研究部(部長に平尾泰男東大教授が就任)が発足し、1986年までに決められた基本設計にもとづき詳細設計と製作が開始された。また、建設費用の再見積が行われ、それまでの200億円強という建屋込みの建設予算が大幅に増加したが、当時の大蔵省の理解により320億円という予算が認められた。

基本設計ができたと言っても実際に製作するためには不明な部分もあり、開発研究を行い、その結果を詳細設計と製作に反映するという方針により作業が進められ、1987

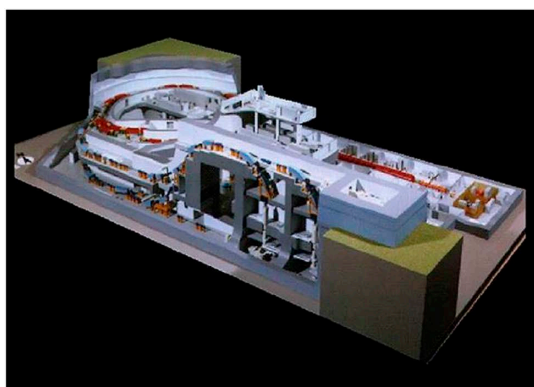


Fig. 1 Architectural model of HIMAC facility

年に入射系、1988年に主加速器1、1989年にビーム輸送系など、1990年に主加速器2、治療照射系、制御系が発注された。そして、1992年3月の入射系の機器搬入を皮切りに1993年3月までにはすべての装置が搬入された。1993年中に装置の組立・調整・試運転が順調に進行し、1993年11月にはシンクロトロンへのビーム供給が可能となり、12月中には治療室直前までのビーム供給が可能となった。そして、1994年2月には治療照射室での照射が可能となり、3月には放射線使用施設の使用前検査を受検し合格している。

最初に治療を行う粒子については、1993年中にRBEを考慮した生物学的な線量分布が最もよい炭素線とすることが決められた。また、使用エネルギーは水平ビーム290MeV/u(飛程15cm)、400MeV/u(飛程25cm)、垂直ビーム290MeV/u(飛程15cm)、350MeV/u(飛程20cm)と決められ、治療準備をこれらの実現に集中することとなった。炭素に決めたことには、線量分布が良いという上記の理由以外に比較的軽い粒子から始めて、その後、ネオンなど重い粒子も試みるという含みもあったが、炭素線の臨床試験が好成績であったため、重い粒子を試みることはなかった。しかし、最近、標的内に等LETの分布を作る提案がなされ、そのためには重い粒子の照射も必須であるとされている。治療に用いる粒子の種類については、なお検討すべき問題が残っているといえる。

一方、建屋については1988年12月に着工し、1993年10月に竣工している。建屋の完成を待たずに装置の搬入・組立が行われているが、全体工期の短縮や搬入路の確保のためであり、以後の治療装置の先例となった。Fig. 2は建屋建設中(1991年1月)の航空写真である。建屋は放射線遮蔽などの観点から、大部分が地下に建設されている。写真はその最も深い部分(地下20m)の基礎部分を示し



Fig. 2 Aerial photograph of HIMAC building under construction (January 1991)

ていて、シンクロトロン基礎の構造がよくわかる。

3. 拡大ブラッグピーク (SOBP) の設計

重粒子線治療の特徴は、重粒子線のRBEがエネルギーにより変化し、下流ほど大きくなることである。したがって、深さ方向にビーム幅を広げる拡大ブラッグピーク (spread out Bragg peak: SOBP) では生物効果を一定にするために、物理線量は下流ほど小さくする必要がある。HIMACプロジェクト開始当時、これを系統的に行う方法はわかっていなかったが、金井らの努力により、治療開始までには一応の解決を見た。ここでは金井らの論文^{3)~6)}を引用することにより、その概略を述べる。

3.1 mixed beamの生物効果

SOBPは異なるLETのビームを重ね合わせたものであるから、ここでの問題は「異なるLETのビームを混合したとき、そのRBEを求めるにはどのようにしたらよいか」ということである。

金井らは放医研のサイクロトロンにより、①18.5MeV/uの⁴Heの加速、②12MeV/uの³Heと¹²Cの同時加速を行った。そして①については吸収体の厚さを変え、②については周波数の微妙な違いでそれぞれの核種を選択的に取り出し、mixed beamにより細胞照射を行った。

Fig. 3はその結果を示したものである^{2), 3)}。ここで、図の横軸はmixed beamの線量平均LETを示す。(以下、特に断らない限り、LETは線量平均LETを意味する。) また、青塗りの三角は18.5MeV/u ⁴Heの入射部とブラッグピーク付近でのV79細胞の生残率曲線をLQモデルで表した時の係数 α であり、白抜きの三角は両者のmixed beamの結果である。赤塗りの丸の低いLETのほうは12MeV/u ³Heで、高いLETのほうは12MeV/u ¹²Cを照射したときの細胞のレスポンスであり、白抜きの丸は2つのビームを交互に照射した時のmixed beamの結果となった。この結果から、やや強引ではあるがmixed beamでは青い直線上もし

くは赤い直線上に細胞レスポンスが来る。すなわち、mixed beamの α はそれぞれのビームの α を線量で加重平均したものになるとしてモデルが組み立てられた。

このモデルにより、mixed beamの生残率を $S_{\text{mix}}(D)$ とすると

$$S_{\text{mix}}(D) = \exp(-\alpha_{\text{mix}}D - \beta_{\text{mix}}D^2) \quad (1)$$

と書け、係数は

$$\alpha_{\text{mix}} = \sum f_i \alpha_i \quad (2)$$

$$\sqrt{\beta_{\text{mix}}} = \sum f_i \sqrt{\beta_i} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 f_i は*i*番目のビームの物理線量の割合である。

3.2 SOBPの実証

対象とする実験系(培養細胞など)の α と β のLETに対する関係がわかれば、前項の式(1)~(3)により、任意のmixed beamの生残率を求めることができるので、それを用いて、SOBPを設計することができる。具体的には、拡大ピーク部の生残率が一定になるような f_i を決め、そのような重みを与えるリッジフィルターの形状を求める。なお、このときFig. 4に示すような物理線量分布と生物線量分布が得られる。これらの分布は第4節で述べる治療計画において線量分布計算に用いられる。

設計されたSOBPが意図どおりに作られているかを確認するため、当時、重イオン加速器として国内では唯一使用可能であった理研のリングサイクロトロンにおいて、135MeV/uの炭素ビームを用いてさまざまな生物実験が行われた。

これらについて、ここで詳述はせず最も重要な1例のみを示す。Fig. 4はV79細胞を用いたSOBP設計を示したものである^{3), 4)}。図の赤色の線が物理線量、黒色の線がLET、緑色の線がmixed beamの計算から求められたRBE、青色の線がRBEに物理線量をかけて得られた生物

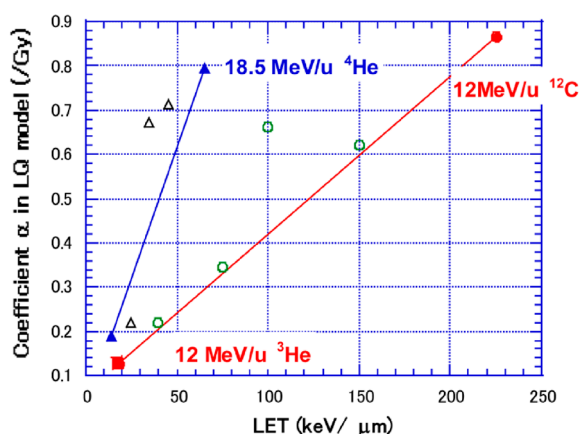


Fig. 3 Coefficient α of a LQ model irradiated by mixed beams. For details see text^{3), 4)}

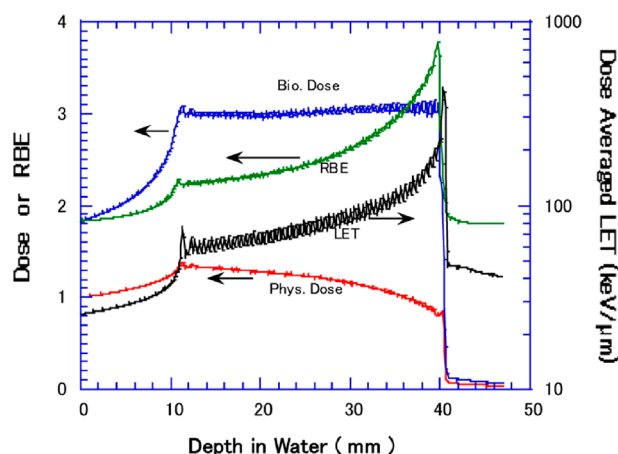


Fig. 4 SOBP designed for 135 MeV/u carbon beam^{3), 4)}

線量を示している。このSOBPに対するV79細胞の1%, 10%, 50%の生残率の測定結果と計算値をFig. 5に示す。各レベルとも計算値と測定結果はよく一致している。これ以外にも多くの結果により、上記のモデルを用いたSOBP設計が妥当であることが支持された。

3.3 臨床線量

前項ではV79細胞による実験結果を示したが、この細胞はchinese hamster由来であり、ヒトの腫瘍を代表しているとはいえなかった。扱いやすいという特徴があり初期の実験には多用されたが、臨床利用のためには好ましいとはいえない。そこで、指標となる細胞として改めて耳下腺がん由来のHSG (human salivary gland tumor)が選ばれた。この細胞が選ばれた理由は、さまざまな腫瘍細胞のうちで放射線感受性がほぼ中央に位置することや重粒子線治療は頭頸部の患者からの開始が想定されることなどからで

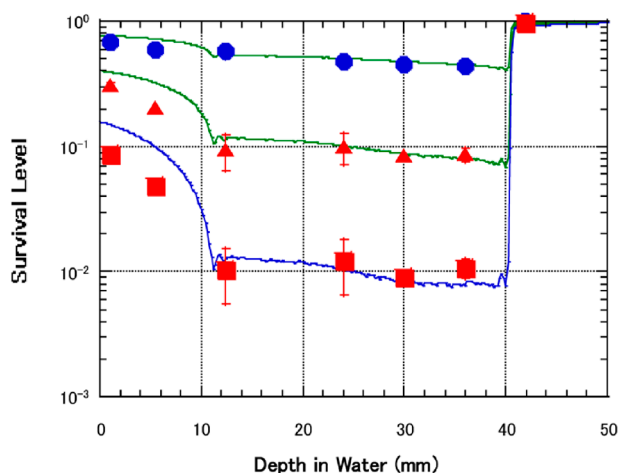


Fig. 5 Survival at different depths in water for V79 cells for the SOBP using the 135 MeV/nucleon carbon beam. For details see text^{3), 4)}

ある。HSGの放射線感受性は詳しく調べられ、今に至るまで指標としての位置を維持している。

Fig. 6はHSGの生残率パラメータを用いて設計したSOBPの線量分布を示す。図の黒色の線は物理線量分布を、青色の線は生物線量の分布を示す。図の生物線量はHSGについては正しいが、人体に対しては正しいかはわからない。図の結果を治療に適用するためには、実験細胞から人体へのスケールが必要とされる。これについては、放医研での速中性子線治療の経験を用いた。放医研では1975年から重粒子線治療の開始直前まで速中性子治療を行っており、速中性子線のRBEとして3.0を使用していた。そこで、速中性子線のLETと同じ80 keV/μmに対応する深さのRBEを3.0にスケールすることとした。Fig. 6では150 mmを少し越える深さでのLETが80 keV/μmであるので、この深さでのRBEが3.0となるようにスケールしている。図の赤色の線がこうにして求めた線量分布であり、これを臨床線量とし、治療線量の表記に用いた⁵⁾。

臨床試験においては、このようにして求めた治療線量と分割数から光子治療の線量を参考にして開始線量が決められ、線量増加試験により至適線量が決められた。上記の臨床線量は発見的に得られたものであるが、肺がんの線量増加試験の局所制御率と線量の関係を解析し、光子治療の結果と比較したところ、一定の妥当性があることが示された⁶⁾。本節で述べたSOBPの設計と臨床線量の決定法をKanai Modelといい、その後の研究の立脚点となっている。

4. 治療システムの開発

重粒子線治療は標的に線量を集中し、周辺の正常組織への線量を大幅に下げることができる治療法であるが、そのためには標的や周辺重要臓器の位置と広がり を正確に診断

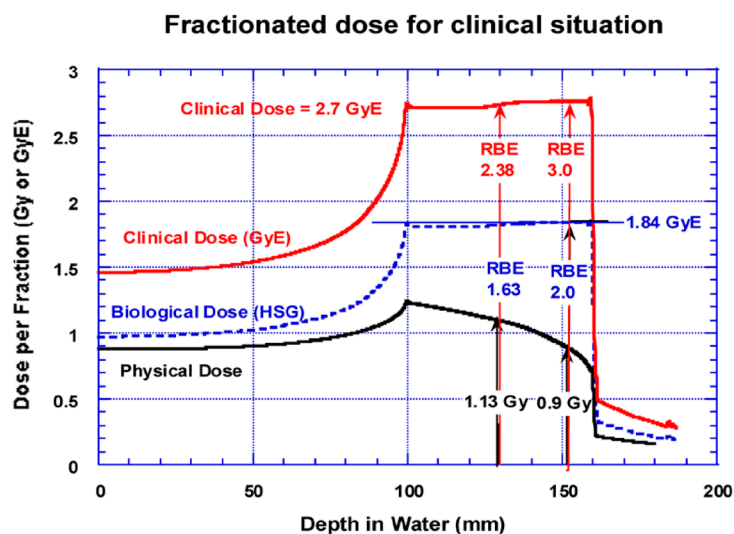


Fig. 6 Schematic method used to determine the RBE at the center of the SOBP for the clinical situation^{3), 5)}

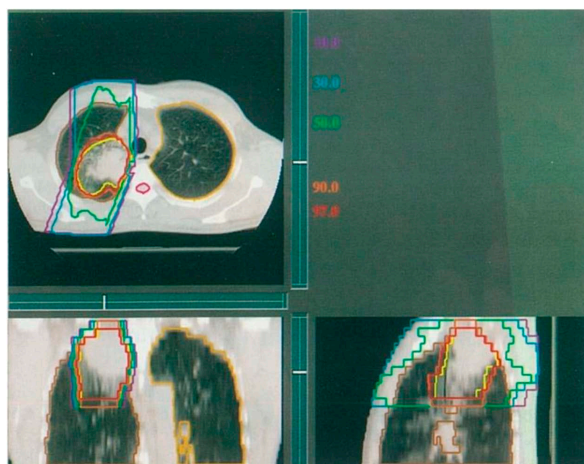


Fig. 7 3D dose distribution of carbon ion beam obtained by HIPLAN⁷⁾

し、それにもとづき適切な治療計画を行い、そしてそれにより決められた照射野で正確に患者照射を行う必要がある。これは陽子線治療でも同様であり、粒子線治療（陽子線治療と重粒子線治療を合わせたものをこの解説では、粒子線治療と呼ぶ）は、IMRTやSRTとして現在行われている高精度放射線治療の先駆けであったといえる。また、当然、画像を利用した患者位置決めも必要であり、IGRTの先駆けでもあった。

このため、MGHやLBLは粒子線治療のため、開発されたばかりの全身用CTを導入し、その画像を用いた3次元治療計画システムをそれぞれ自力で開発し、それにより粒子線治療を実施した。重粒子線治療を行うためには、放医研においても同様なシステムを開発する必要がある、それはMGHやLBLの設計思想を受け継ぎつつ、周辺技術の進歩に合わせたものとする必要があった。

開発を開始した1990年ころは、光子治療計画装置が、それまでの2次元計画装置からCTを用いた3次元計画装置に進化する途中であり、重粒子線治療計画装置のベースにするには時期尚早であった。そこで、放医研では画像表示や解析機能に優れた医用画像解析装置Dr.Viewをベースとして、ビーム設計や線量分布計算など治療に関する部分はすべて自作した治療計画装置を開発し、HIPLAN (Heavy Ion Plan)と名づけた^{7), 8)}。

使用した計算機は、UNIXをOSとする画像ワークステーションであり、最初はクボタ製のTitan750V、後にシリコングラフィックス製のIndigo2が用いられた。ソフトウェアの主な機能は、CT画像の表示と輪郭入力、標的や重要臓器の3次元表示と仮想シミュレーション、3次元線量分布計算、線量分布の表示と解析、DRRの計算、マルチリーフコリメータの開度決定や患者コリメータ・補償フィルターの設計、ビームパラメータの決定などである。ここで、線量分布計算には最も基本的なray tracing法（ブロードビーム計算法）が用いられた。なお、線量分布計算

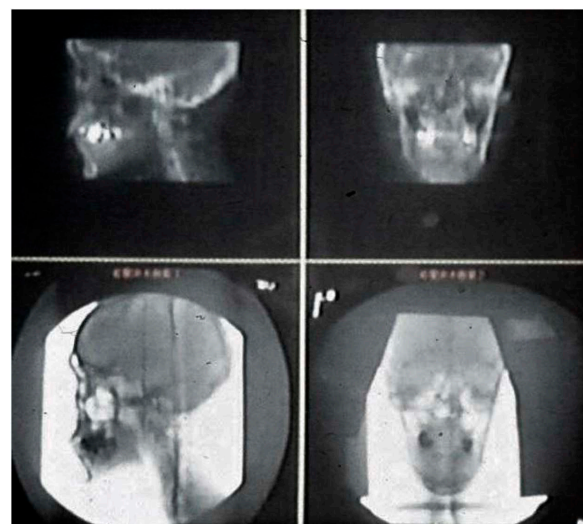


Fig. 8 AP and lateral views of DRRs (upper panels) and X-ray TV images (lower panels) displayed on positioning console of HIMAC treatment room

法については第2部で他の方法とともに解説する。

DRRとビームパラメータは、HIMAC照射系の制御コンピュータに送られ、患者の位置決めや治療照射に用いられた。また、患者コリメータと補償フィルターの設計データは、工作機器に送られ、それをもとに患者コリメータや補償フィルターが切削加工された。これらのデータの受け渡しは、治療開始時には一部はオフラインであったが、しばらく後にはCTデータの受け渡しも含めてイーサネットによるオンライン転送となった。このためもあり、治療計画CT、治療計画装置、患者コリメータ・補償フィルター製作装置、患者位置決め装置（デジタルX線テレビと患者治療台）を一つのシステムとみて、治療システムと呼んでいた。ビーム方向が固定されている重粒子線治療で位置決めを容易にするため、Table 3に示すように治療台は6軸の自由度（並進3、回転3）を持っていた。しかし、回転の2軸（rollingとpitching）については位置の微調整に必要な $\pm 5^\circ$ しか可動範囲がないので、斜め照射を可能にするため別に $\pm 40^\circ$ の回転(rolling)が可能な半円状のカプセルを天板に固定し、その上に患者を固定することが行われた。

Fig. 7にHIPLANで計算した3次元線量分布を示す。また、DRRは治療室で撮影されるX線TV画像と比較して患者の位置決め用に使われるが、Fig. 8に治療室の位置決めコンソールに表示されたDRRとX線TV画像の比較画像を示す。図は頭部ファントムに対して得られたものであり、ごく初期のものである。

患者コリメータと補償フィルターの製作については⁹⁾、それぞれの材料として真鍮ブロックおよび低密度ポリエチレンが選定され、前者は放電加工機、後者はマシニングセンターで加工が行われることになった。治療計画装置の出力データ（例えば、補償フィルターの場合は切削深の分布）をCAD/CAM端末において切削加工用のデータ（補償フィ

ルターの場合、切削パス、切削深さ、ドリルの回転速度など)に変換され、それにより加工が行われた。そして、完成品については3次元測定器で検査し、精度が基準を満たすもののみを治療に用いた。最初はすべてを外注したが、治療計画から照射までの時間を短縮するため、しばらく後には必要な設備が導入され、所内でも製作が行われるようになった。この患者コリメータ・補償フィルター製作法は、日本でのブロードビーム照射の際の標準的な方法となり、多くの施設で利用されるようになった。

5. 治療開始

以上のような準備の下、1994年3月以降、ファントム照射や生物実験が行われ、1994年6月に最初の患者3例の治療が開始された。このときまでに準備ができた治療室はB室のみであり、ビームエネルギーは290 MeV/uのみであった。また、SOBP幅は20 mm 間隔（一部は10 mm 間隔）で20 mm から120 mm まで準備する予定であったが、6月時点で平坦照射野条件がわかっているのはわずかであったので、それに適合する頭頸部の患者が選ばれた。

3例の照射終了とともに1カ月半ほど装置保守のための休みに入り、その期間に多くのバグを修正し、またA室、C室の使用開始の準備が行われた。また、より高いエネルギーである350 MeV/u（飛程200 mm）と400 MeV/u（飛程250 mm）の使用開始の準備も並行して行われた。

1994年9月に治療が再開され、11月にはA室、そして1995年4月にはC室が使用可能となった。1994年度後期

の治療患者数は18名であったが、その後、順調に患者数を伸ばし、2019年3月までの治療患者（新患）数は累計11,834名である。

参考文献

- 1) 河内清光：1.1 HIMAC 基礎科学研究開始のいきさつ—HIMAC 建設の経緯—。RADIOISOTOPES 68: 147–151, 2019
- 2) Kawachi K, Kanai T, Endo M, et al.: Radiation oncological facilities of HIMAC. J. JASTRO 1: 19–29, 1989
- 3) 金井達明：4.2.1 日本における炭素線治療の開始に向けて—拡大ブラッグピークの設計—。RADIOISOTOPES 68: 361–366, 2019
- 4) Kanai T, Furusawa Y, Fukutsu K, et al.: Irradiation of mixed beam and design of spread-out Bragg peak for heavy-ion. Radiat. Res. 147: 78–85, 1997
- 5) Kanai T, Endo M, Minohara S, et al.: Biophysical characteristics of HIMAC clinical irradiation system for heavy-ion radiation therapy. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 44: 201–210, 1999
- 6) Kanai T, Matsufuji N, Miyamoto T, et al.: Examination of GyE system for HIMAC carbon therapy. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 64: 650–656, 2006
- 7) Endo M, Koyama H, Minohara S, et al.: HIPLAN-A heavy ion treatment planning system at HIMAC. J. JASTRO 8: 231–238, 1996
- 8) 古山浩子, 遠藤真広：Digitally Reconstructed Radiographの開発。放射線医学物理 14：198–200, 1994
- 9) 宮原信幸, 遠藤真広, 中村 譲：重粒子線治療における補償フィルター／患者コリメータ自動作成。放射線医学物理 15: 9–13, 1995

著者紹介



遠藤 真広（えんどう・まさひろ）
 （現職名）医用原子力技術研究振興財団
 常務理事
 （専門分野）医学物理学，医用画像工学
 現在は、線量計校正など放射線治療の
 インフラに関する事業や粒子線治療の
 普及に関する事業に従事している。ま
 た、健康維持のためにウォーキングと
 ラジオ体操を欠かさず行っている。

施設紹介

駒澤大学大学院医療健康科学研究科診療放射線学専攻 医学物理士養成コースの紹介

馬込大貴*, 藤田幸男, 保科正夫, 佐藤昌憲

駒澤大学大学院医療健康科学研究科

Introduction of Medical Physics Course in Komazawa University

Taiki MAGOME*, Yukio FUJITA, Masao HOSHINA, Masanori SATO

Graduate Division of Health Sciences, Komazawa University

1. 施設概要

駒澤大学大学院医療健康科学研究科診療放射線学専攻は、診療放射線学に関する高度な研究能力を有し、かつ医学的情報に基づく適正な医療画像処理能力や画像検査遂行能力、放射線機器の線束管理・放射線管理・治療線量管理能力を備えた専門家を養成するため、2007年に開設された。修士課程には、診療画像学コース、がん地域遠隔画像診断支援技術者養成コース、分子イメージング解析技術者養成コース、医用計測学コース、医学物理士養成コースが存在する。医学物理士養成コースは2014年4月に開設され、高精度放射線治療の物理的技術的基礎を確保し、放射線治療における線量分布の最適化と評価が行えるとともに、高い安全性を確保できる能力を有する技術者の養成を目指している。毎年10名前後の学生が大学院に進学し、5名程度が医学物理士養成コースを選択している。医学物理士コースの教員は8名だが、診療放射線学専攻の全専任教員17名の授業を受講できる。ポスドクなどの研究員は在籍していない。すべての授業が18時以降に開講されているため、医療施設や企業に勤務しながらでも通いやすく、実際に多くの社会人学生が在籍している。渋谷から7分の駒沢大学駅が最寄り駅であり通学に非常に便利な駒沢キャンパスですべての授業が開講されている。

私立大学は学費が高いことがネックとなるが、駒澤大学大学院にはさまざまな補助制度が存在する。学会発表への援助として、在学期間中に国際会議1回、国内学会1回の旅費が援助される。また、成績優秀者には学費が免除となる制度や、大学院入学時にはPCの購入資金援助などがあり、さまざまな制度を活用すれば、それほど大きな金銭的負担がなく学位を取得できる。

2. 教育活動

2018年3月、バリアンメディカルシステムズ社と駒澤大学が提携し、駒沢キャンパスに新築された種月館（図1）に放射線治療人材教育センターが開設された。メーカーが

常に最新の実機を導入する世界初の産学連携プロジェクトと言える（図2）。2020年の時点では、True Beam 1台とEclipse 10台、GE社製CT（Revolution EVO 64列）1台が設置されている（図3, 4）。学部生や大学院生が演習などでその原理や操作方法を実践的に学ぶことが可能である。学生がリニアックの実機に触れることができる教育機

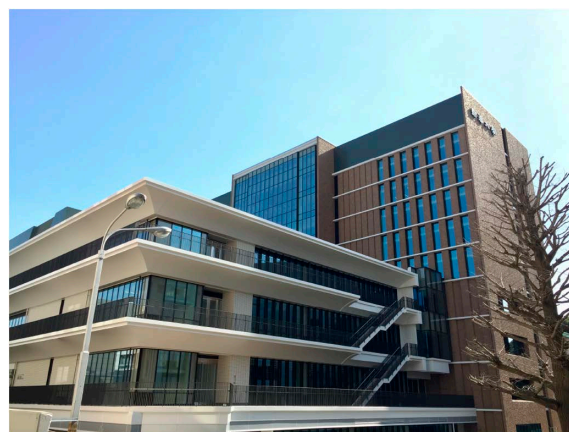


図1 放射線治療人材教育センターがある駒沢キャンパス種月館



図2 放射線治療人材教育センターの入り口付近

* 駒澤大学大学院医療健康科学研究科 [〒154-8525 東京都世田谷区駒沢1-23-1]
Graduate Division of Health Sciences, Komazawa University, 1-23-1 Komazawa, Setagaya-ku, Tokyo 154-8525, Japan
E-mail: magome@komazawa-u.ac.jp



図3 放射線治療人材教育センターのTrue Beam



図4 15名程度での実習が可能なリニアック操作室

関は国内でも数えるほどだと思われる。

同センターでは、ほかにもバーチャル放射線治療システム「VERT」を配置している。放射線治療を「見える化」したもので、本物の患者のCT画像と治療装置をリアルな3D映像で大画面に映し出すことが可能である。学生は3Dのグラスをかけ、リニアックのペンダントなどを操作することで、どのように放射線が患者の患部に照射されるのか、またどのような方向や強度が最適なのかを視覚的に体験し、治療をシミュレーションすることができる。実際には目に見えない放射線に色をつけることで、学生にもわかりやすく確認することが可能である。このバーチャルシステムを使うことで、臨床で行うすべての行為を経験することができる。このシステムの目的は、学生に思い切り失敗をしてもらうことである。就職して臨床の現場に立つと失敗は許されない。失敗から学ぶことは多く、例えばリニアックヘッドとカウチをわざと衝突させることも可能である。現場で活躍できる人というのは、失敗事例をより多く持っている人であるとの思いから、「学生のうちに失敗を総ざらいせよ」と伝えている。

センターは学生のみならず全国の医療従事者に門戸を開いており、バリアン社の最先端の医療機器を使ったトレーニングを受けられる場でもある。さまざまな研究会や講習会も積極的に開催している。このセンターを日本の放射線治療の“サロン”にすることを目標に掲げている。近世ヨー

ロッパで資産家が自身の邸宅で開催するサロンが科学や芸術の発展の場となったように、同センターに医学物理の専門家やメーカーのエンジニア、学生が集って情報交換し、互いに刺激し合うことで技術の発展に役立てたいという構想である。これは、あらゆる人と情報が集まる東京に位置し、しかも交通至便な立地にある駒澤大学だからできることだと考えられる。さらに私立大学ならではの研究や設備の自由度も高い。この恵まれた環境を活かして放射線治療のエキスパートとなり、病で苦しむ患者さんに貢献できる人材を多く輩出したいと考えている。

3. 研究活動

学内のリニアックを使用した研究はもちろん、国内・国外を問わずさまざまな医療機関と共同で研究を行っている^{1)~4)}。特に、AIの放射線治療における応用研究を盛んに進めており、さまざまな分野の知識を幅広く活用し医用画像情報と組み合わせたシステム開発を行うことで、がん治療成績の向上を目指している⁵⁾。基礎研究からその成果を臨床応用し、研究成果を実際の臨床現場に還元することを強く意識して研究を進めている。さらに、近年、“Radiomics”と呼ばれる医用画像から定量的なバイオマーカーを算出する新しい学問領域が注目されており、医用画像を定性的に評価するだけでなく、画像処理技術を用いて定量的な数値データを解析することで、読影、さらには予後予測に利用できる可能性が報告されている。これらの技術を組み合わせて使用することで、個別化医療の実現を試みる研究を勢力的に進めている。特に放射線治療に限るのではなく、広く分野横断型の知識を応用し、研究を行うように心がけている。

4. 研究者の日常

駒澤大学内では臨床業務でリニアックを占有されないため、多くの時間を教育・研究活動に使用できる。研究室ごとに特色があるが、日常の一例を示す。ほぼすべての学生と毎日個別ミーティングを行っており、密にコミュニケーションをとりながら研究を進めている。全体では週に2回大学院生ミーティング（1回は英語での研究進捗ミーティング、1回は英語論文の抄読会）を行い、週1回の学部生研究進捗ミーティングを行っている。駒澤大学は2年生の冬から研究室に配属されるため、2,3年生から研究の準備を開始し、プログラミングをマスターしてもらっている。各学生が修士課程修了までに最低1編の英語論文執筆を目指し、日々研究を進めている。土日は学内のリニアックを利用した講習会や学会・研究会などを行う場合が多い。

5. 医学物理を志す者へ一言

AAPMではimagingとtherapyのjoint sessionが大多数を占めているように、今後はさまざまな分野の知識を統合

した研究開発が望まれている。駒澤大学は都心にある大学で、大学院では授業も18時以降と通いやすいことが特徴であり、多くの分野の知識を学ぶことが可能である。常に最新の設備を使用して研究開発を行うことが可能な場であり、日本の放射線治療の“サロン”を目指して、駒澤大学で多くの仲間と議論できることを願う。

参考文献

- 1) Fujita Y, Kent MS, Wisner ER, et al.: Combined assessment of pulmonary ventilation and perfusion with single-energy computed tomography and image processing. *Acad. Radiol.*: in press, 2020
- 2) Sumida I, Magome T, Das IJ, et al.: A convolution neural network for higher resolution dose prediction in prostate volumetric modulated arc therapy. *Phys. Medica* 72: 88–95, 2020
- 3) Magome T, Froelich J, Takahashi Y, et al.: Evaluation of functional marrow irradiation based on skeletal marrow composition obtained using dual-energy computed tomography. *Radiat. Oncol. Biol.* 96: 679–687, 2016
- 4) Kadoya N, Kito S, Kurooka M, et al.: Factual survey of the clinical use of deformable image registration software for radiotherapy in Japan. *J. Radiat. Res.* 60: 546–553, 2019
- 5) Mizutani T, Magome T, Igaki H, et al.: Optimization of treatment strategy by using a machine learning model to predict survival time of patients with malignant glioma after radiotherapy. *J. Radiat. Res.* 60: 818–824, 2019

編 集 後 記

新型コロナウイルスの影響により日々の対応などでご多用のなか、本号の発刊にあたりましてお時間を割いてご執筆いただきました先生方に、深く感謝申し上げます。現状、多くの学会やセミナー、大学の講義などがオンライン実施に移行されておりますが、本誌は約2年前に電子版主体の発行となり、このような状況下でも会員の皆様方に学術情報の発信を継続できる環境が整備されていることを心強く感じております。

本号の「施設紹介」は、リニューアル後の第1回目といたしまして駒澤大学様にご執筆いただきました。河野先生の巻頭言にもございますように、「医学物理」誌ならではの内容とするべく、教育・研究活動や代表論文、研究者の日常なども含め、ご施設の特色を詳しくご紹介いただきました。今後も各ご施設の魅力をお伝えしていくことができればと思っております。特集では、2019年医学物理サマーセミナーの開催報告および参加報告と、講義「機械学習」の補講記事をご寄稿いただきました。今後セミナーに参加される方にも、これから参加を検討される方にも、参考にしていただければと思っております。また、本号より、解説記事「重粒子線治療装置 HIMAC」の連載がスタートいたしました。約半世紀にわたる HIMAC の研究や開発について4回に分けてご執筆いただく予定で、大変貴重な連載となると思っております。

本号が会員の皆様にとりまして今後の臨床、研究および教育の一助となれば幸いです。

(編集委員 佐藤清香)

Japanese Journal of Medical Physics

Editorial Board

T. Hasegawa (Chief)
M. Akimoto
F. Araki
N. Kanematsu
R. Kohno
S. Sato
S. Sugimoto
Y. Takahashi
A. Nohtomi
M. Hashimoto
T. Fujisaki
T. Magome
N. Matsufuji
S. Minohara
T. Yamamoto
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

秋元 麻未 (倉敷中央病院)
荒木不次男 (熊本大学)
兼松 伸幸 (放射線医学総合研究所)
河野 良介 (放射線医学総合研究所)
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 (放射線医学総合研究所)
荻原 伸一 (神奈川県立がんセンター)
山本 徹 (北海道大学)
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	株 式 会 社 日 立 製 作 所
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
株 式 会 社 通 商 産 業 研 究 社	

目 次

巻 頭 言

医学物理 施設紹介企画

「極めろ、医学物理道！！—日本が誇る施設最前線—」

河野良介 45

〈サマーセミナー特集〉

解 説

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 開催報告

宇都宮悟, 和田真一 46

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 参加報告

大澤阿紋 51

JSMP 医学物理サマーセミナー 2019 体験記

上村柊太 53

機械学習のための情報数学

古徳純一 55

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

重粒子線治療装置 HIMAC の建設とそのもたらしたもの—医学物理学の観点から—
第 1 部. 治療開始まで (1975～1994)

遠藤真広 61

施設紹介

駒澤大学大学院医療健康科学研究科診療放射線学専攻

医学物理士養成コースの紹介

馬込大貴, 藤田幸男, 保科正夫, 佐藤昌憲 68

編集後記 71

【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。