

<特集「医学物理士という仕事」>

高精度放射線治療における医学物理士の役割

正 井 範 尚*

京都府立医科大学附属北部医療センター放射線科

The Role of Medical Physicists in High-precision Radiotherapy

Norihisa Masai

Department of Radiology,

North Medical Center Kyoto Prefectural University of Medicine

抄 録

筆者は、医学物理士として定位手術的照射（SRS）、定位放射線治療（SRT）、そして強度変調放射線治療（IMRT）の高精度放射線治療の施行を支援し、症例数は3500例を経験した。これらは、正常組織の線量低減のための技術であるIMRTと、高い照射精度のSRS/SRTを組み合わせた強度変調定位放射線治療（IMSRT）の技術であり、その線量分割は、根治目的の寡分割照射であり、通常照射よりも高線量の処方とした。これらの治療を達成するために、我々の探究は、治療計画上の線量計算理論と線量分布コントロールの探究から始まり、患者体内の線量送達を担保するための治療計画の実測検証は、線量測定器とファントムを用いた静的な検証からコンピュータシミュレーションを用いた動的な線量検証に展開した。その結果、自施設で施行する放射線治療に関する物理的な不確かさの大部分を解消することができた。放射線治療を安全・確実に施行するためには、放射線腫瘍医学のみならず、医学物理をはじめとする放射線物理学・生物学、システム制御工学、そして統計学などの医学以外の自然科学分野との融合が必須であるといえる。本稿では、これらの項目について解説し、「高精度放射線治療における医学物理士の役割とは何か」について考えたい。

キーワード：医学物理士、定位放射線治療、強度変調定位放射線治療、高精度放射線治療、医学物理。

Abstract

As medical physicists, we have supported the implementation of high-precision radiation therapy such as Stereotactic Radiosurgery (SRS), Stereotactic Radiotherapy (SRT), and Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT), with a total of 3500 cases. This includes the technology of Intensity-Modulated Stereotactic Radiotherapy (IMSRT), which combines the high irradiation accuracy of SRS/SRT with the dose constraint technology of IMRT for reducing the dose to normal tissues. The prescribed dose was increased for definitive hypo-fractionated irradiation, which is a higher dose than conventional irradiation. To achieve these treatments, our investigation began with the exploration of dose calculation theories and dose distribution control in treatment planning. Subsequently, we evolved our approach from static measurement verification of treatment plans using detectors and phantoms, to dynamic dose verification using computer simulations, to ensure the delivery of the dose within the patient's body. In order to ensure safe and reliable radiation therapy, it

令和5年12月11日受付 令和5年12月13日受理

*連絡先 正井範尚 〒629-2261 与謝郡与謝野町字男山481

nmasai@koto.kpu-m.ac.jp

doi:10.32206/jkpum.133.02.99

is essential to integrate not only radiation oncology but also other natural science fields such as radiation physics, biology, systems control engineering, and statistics, as well as medical physics. In this paper, we will explain these contents and consider "What is the role of medical physicists in high-precision radiation therapy?".

Key Words: Medical physicist, Stereotactic radiotherapy, Intensity-modulated radiation therapy, High-precision radiation therapy, Medical physics.

はじめに

筆者は、京都府立医科大学附属北部医療センターに所属する以前にノバリスシステム (BrainLAB 社) を用いた定位手術的照射 (SRS: Stereotactic radiosurgery), 定位放射線治療 (SRT: Stereotactic Radiation Therapy), そして強度変調放射線治療 (IMRT: Intensity Modulated Radiation Therapy) の施行を医学物理士として支援した。経験した症例は10年間で約3,500例であり, その内訳は, 肺の体幹部定位放射線治療 (SBRT: Stereotactic Body Radiation therapy) (26.9%), 前立腺 IMRT (22.7%), 肝 SBRT (10.6%), 脊椎 IMRT (8.8%), 脳・中枢神経 SRS/SRT (8.2%), リンパ節転移 (頸部, 胸部, 腹部, 骨盤部) に対する SRT/IMRT (11.0%), その他 (11.4%) である。根治目的でかつ施行頻度の高い肺 SBRT, 前立腺 IMRT, そして肝 SBRT の3年の局所制御率はそれぞれ, 89% (n=133), 95% (n=401; 生化学的非再発率), そして 91% (n=152) であった。これらの治療施行には, 処方線量の判断や治療計画テクニック, 送達される線量の検証, そして線量送達の不確かさの見積もりなど, 安全・確実に施行するために放射線腫瘍医学のみならず, 放射線物理学・生物学, システム制御工学, そして現象を取扱う統計学などの医学以外の自然科学分野との融合に努力した。一方で世界に目を向けても医学物理士の医療施設における存在の意義や教育体系についての議論が行われてきた¹⁵⁾。本稿では, 医学物理士が担う分野を開拓し, 「高精度放射線治療における医学物理士の役割とは何か」について考えたい。

高精度放射線治療に必要な自然科学分野と技術

1. 強度変調定位放射線治療と根治線量の送達

当時の適応症例は, 使用した放射線治療装置が定位照射専用装置であるため, 有害事象の発生が危惧される近接臓器 (OAR: Organ At Risk) の線量低減のための技術である IMRT を施行する場合でも照射位置の精度は SRS/SRT に準じ, 強度変調定位放射線治療 (IMRT: Intensity-Modulated Stereotactic Radiotherapy) の技術として追求した。近年, この技術は SABR (Stereotactic Ablative Radiotherapy) として, その治療効果も認められつつある⁶⁻⁸⁾。線量分割は, 分割回数の少ない寡分割照射を主体とした治療方法となり, 線量処方, 組織型の違いによる腫瘍の感受性に応じて LQ モデル (Linear-Quadratic Model) を用いた生物学効果線量⁹⁾の 2 Gy 換算等価線量 (EQD: Equivalent effective dose in 2 Gy) で放射線抵抗性腫瘍には 100 Gy を超える処方で局所の根治を目指した。この際, IMRT 技術によって制御できる OAR の線量域を予測して生物学効果線量と適切な線量分割を提案する必要があった。また, 寡分割照射において, OAR の生物学効果線量は腫瘍のそれよりも格段に高くなる性質があり, 線量分布のコントロールも我々の担う重要な仕事となった。

2. 治療計画テクニック

1) 照射方法, ビームアレンジメント

現在, 主流となっている強度変調回転放射線治療 (VMAT: Volumetric Modulated Arc Therapy) は回転照射がベースとなるため, 全

方向からのビームの強度変調によって線量分布を形成するのに対して、固定多門照射がベースとなる IMRT はビーム配置（ビームアレンジメント）に強度変調を加えることにより特定部分の線量低減に有利な場合もある。一方、SBRT の初期時代の照射方法は照射野形状を PTV に絞り込んだ多方向からの照射である 3次元原体照射（3DCRT: 3-Dimensional Conformal Radiation Therapy）であった。この方法は、腫瘍が存在し得る範囲の治療計画標的体積（PTV: Planning Target Volume）内の線量強度のバランス保つために PTV を中心に全周囲からの入射線束が必要となる（図 1 左上）。これは正常組織への不必要な照射を招く。我々は、浅い深度で PTV に送達するビーム配置を基本とし、IMRT によって PTV の線量均質性を確保して不要な正常組織への線量低減を図った（図 1 左下）。また IMRT は、脊椎照射のように気管・食道などの OAR からの入射方向を避けてビーム配置できると同時に、固定された方向で柱状の脊椎に沿った方向に Multi leaf Collimator (MLC) で遮蔽することで、最も急峻な線量分布を作成することもできる（図 1 右上）。これらのように照射方法と幾何学的なビームアレンジメントで臨床的に有利な方向に導くことも重要な課題である。

2) IMRT 線量分布の形成と線量制約テクニック

治療計画は、線量を処方すべき PTV の領域内部に処方線量の 100% を照射し、PTV の周囲や外部の線量分布は可能な限り低減させる。治療計画は、CT 画像上の腫瘍輪郭と治療中に動きが生じる範囲を含めた PTV をはじめとする標的輪郭と OAR の輪郭を作成する¹⁰⁾¹¹⁾。それら輪郭への線量を指示して線量分布の最適化プロセスを走らせ、腫瘍への線量の増強と近接する OAR の線量の低減の拮抗に程よいトレードオフを見つけてエンドポイントする¹²⁾。これを線量制約と呼ぶ。IMRT の線量分布の最適化プロセスには、次の 3 つの工程がある。第一段階の IPO (Inverse Planning Optimization) は、CT 画像上に指示した体内の線量分布から照射ビームの強度を予測する工程であり、コンピュータの自動計算処理で用いられる目的関数を用いた繰り返し演算による最適化を操作する。第二段階の LS (Leaf Segmentation) は、IPO で決定した仮想的なビーム強度を実際のビーム出力として実行させるための MLC 動作に変換する工程である。このプロセスでも動作変換に用いる最適化アルゴリズムへの理解が必要となる。第三段階の FDC (Forward Dose Calculation) は、LS で作成された MLC 動作から CT 画像上に線量計算を行って最終の線量分布図を得る工程である。装置性能を最大に引き上げるにはこれらのプロセスを把握し、放射

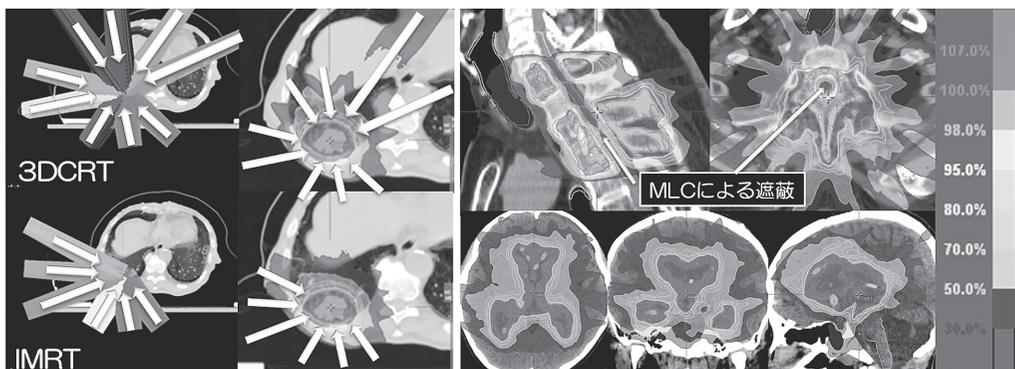


図 1 3DCRT (3次元原体照射) と固定多門 IMRT (強度変調放射線治療) を用いた SRT (左), 気管、食道を避け、脊椎に高度な線量制約を施した転移性脊椎に対する IMRT (右上段), 上衣腫に対する脳室 IMRT (右下段)

線治療装置の動作特性とともに最適化に用いられる最適化アルゴリズムや後述の線量計算の理論についての理解が必要となる¹²⁾¹³⁾。これらを適切にコントロールすることにより、図1右下段のような脳室を形取った照射も可能となる。

3) 線量計算アルゴリズムの理解

治療計画はCT画像上に線量強度を計算し、患者体内の線量分布を作成するプロセスでもある。これを正しく見積もるには線量計算アルゴリズムを知ることが必須となる。均質な軟部組織中の線量計算は比較的計算精度が高いが、空気中から皮膚への突入の際や肺や骨などの物質密度が不均質な部分では、放射線の相互作用によって放出される2次電子の吸収・散乱状態を考慮したアルゴリズムを使用する¹⁴⁾¹⁶⁾。治療計画の内容に応じた適切な線量計算アルゴリズムの選択と使用方法を提案することが重要である。これは、放射線物理学における放射線と物質の相互作用の知識が基礎となり、コンピュータ内で演算される線量計算理論の理解も患者体内に送達される処方と直結する領域である。

これらのように治療計画における線量分布の作成には、機器制御工学が基礎の装置動作特性、放射線物理学が基礎の線量計算、コンピュータ情報処理工学が基礎の最適化アルゴリズムや用いられる評価関数、計算パラメータを理解する必要がある。これらは、放射線腫瘍学の医学的な知識と守備範囲を異にする分野であり、この分野を専門とするのが医学物理士の役割と言える。

3. 治療計画ごとの送達線量の検証 (Patient Specific QA)

これまで述べた治療計画テクニックは、コンピュータワークステーションである放射線治療計画装置上で計算された線量分布である。患者に対して照射を実施する前に何らかの手段で治療計画が正しく患者体内に照射できるかを検証することも医学物理士の重要な仕事のひとつである¹⁷⁻¹⁹⁾。

1) 実測に基づく線量検証

実測に基づく線量検証は、放射線の測定器がセットできる人体等価ファントムに治療計画を移し、ファントム内で再線量計算させた計算線量値と放射線測定器によって測定された実測線量の相違を比較して元の治療計画の線量計算の確かさを確認する方法である。筆者が経験した実測線量検証を述べる。対象は、IMRT治療計画、287計画(2524ポート)であり、検証項目は、電離箱線量計による定点線量(全門、各門)、格子状に平面に配列された2次元半導体検出器による各門ビーム強度変調(フルエンス)の3%/3mm γ 解析、これは3次元の線量分布から任意の断面について、測定されたそれぞれの点の半径3mm以内に計算線量値が $\pm 3\%$ 以内の誤差ものが存在すればパスとし、全体のパスの割合で計算線量の一致度を分析する指標である²⁰⁻²²⁾。そして、放射線感光フィルムを用いた3%/3mm γ 解析による全門の相対線量分布検証であり、一般に行われている方法である¹⁸⁾。IMRTの電離箱線量計による定点絶対線量の平均値 \pm 標準偏差は、各門： $-0.55 \pm 2.70\%$ 、全門： $-0.56 \pm 1.12\%$ であり、2次元半導体検出器フルエンス検証のpass rateの平均値は99.2%と良好であった。また、フィルムによる相対線量分布検証の γ パス率の95%以上、90%以上95%未満、90%未満はそれぞれ、48.2%、40.8%、11.0%であり、これら実測検証によって治療計画が承認できなかったものは存在しなかった。ファントムと測定器による実測検証は良好な結果であったが、これらは固形のファントムに移して測定する静的な検証であり、実際に患者の体内に送達される線量のごく一側面に過ぎない。

2) 実測検証からVirtual検証へ

治療対象である患者人体は体位の位置ズレ(SE: Setup Error)や体内臓器移動(internal organ motion)等の空間的な不確かさを有し、まさに動的な照射対象と言える。我々は、これらの検証の実現には実測検証のみならずコンピュータを用いた解析が必要であると考え、治療計画検証の一環として、①SEによるランダ

ムな空間位置誤差, ②呼吸性移動に対する IPE (Inter Play Effect) (断片的に照射される IMRT ビームが呼吸性移動と照射タイミングのランダムさによって送達線量が変化する効果) の影響性, ③同呼吸性移動を加味した線量分布の作成を臨床現場に導入し, 偶発的に生じる送達線量のズレを定量的に評価する治療計画検証の体系を構築した. 図2にSEとIPEのシミュレーションの概要を示す. セットアップエラー解析は治療計画で作成した線量分布の DICOM 規格データで出力した輪郭データと線量分布データを用いる. これらの位置情報は CT 画像の座標系に紐づいている. SE は正規分布の確率分布関数に従った仮想的な空間ズレを作成し, これを基に線量分布と輪郭に仮想的な位置ズレを作成して線量の変化を評価した. IPE では, 同様に呼吸性移動データに基づき, 治療中の腫瘍の存在確率と照射が開始されるタイミングに仮想的なズレを作成して治療計画からの線量変化を分析した. ランダムな成分を有するために送達される線量分布の解析結果は, 確率的な挙動を示した. この確率的な変化を加味した輪郭内の線量と体積のヒストグラム (DVH: Dose Volume Histogram) を算出して腫瘍の線量低下, 並びに OAR の線量増加の度合いとその確率を予測評価して臨床導入を行った. これらの分析は, 既存の線量分布データに統計的な理論を導入したコンピュータシミュレーションである. 実際の患者体内に送達される線量の変化の要因を

見極め, その影響性を放射線腫瘍に指し示すことも医学物理士の責務であると考え.

特殊領域に介入できた 高精度放射線治療

眼科領域に独特な解剖と画像診断法を学びつつ, 特殊な技術取り組み, 施行した強度変調定位放射線治療の 2 症例を紹介する.

1. 乳癌脈絡膜転移性腫瘍に対する OCT を用いたオフライン ART

症例は, 51 歳女性, 乳癌発症後に腋窩, 縦隔, 胸壁リンパ節, および脳転移を来とし, 視覚異常を訴えて右脈絡膜転移が指摘された症例である. 脈絡膜転移に脳 SRT のような根治照射を施せば, 腫瘍は制御できたとしても, 網膜, 視神経の耐容線量を超え, 視覚障害が懸念される. そこで, 初期計画は 60 Gy/20 fr (100%=3 Gy), 4 週間とし, 治療中の一週毎に眼科受診を依頼した. この時, 網膜~脈絡膜の数十マイクロメートルオーダーの鮮明な断層画像が取得できる光干渉断層撮影 (OCT: Optical Coherence Tomography) を取得し, 治療期間中の腫瘍の縮小を観察しながら, 適宜, オフラインの適応照射線治療 (ART: Adaptive Re-planning Treatment) を行うことを計画した (図3). ここで, オフラインと称するのはマイクロメートルオーダーの OCT 画像を直接的に X 線 CT 画像に直接的に画像融合するのではなく, OCT

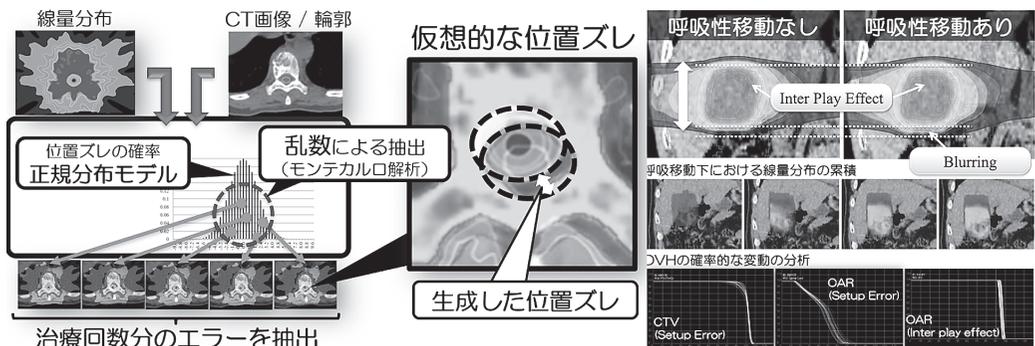


図2 Virtual 検証の例, Setup Error (左), Inter Play Effect (右)

画像から腫瘍径とその縮小率を計測し、それらの情報を基に治療計画を適応することを指す。ARTの内容は次の通りである。①第1週(5回終了)に僅かながらも腫瘍サイズの縮小を確認したため、PTVを1mm縮小、②第2週(10回終了)にOCT画像上で相対的腫瘍サイズを推定し、腫瘍輪郭であるGTV(Gross Tumor Volume)を縮小、③第3週(15回終了)に右視神経、および内側網膜の最大線量を処方線量の50%に制約、④第4週(17回終了)にOCT画像から腫瘍サイズが長径1.4mm、短径0.8mmまでの縮小が認められたことから、51 Gy/17 frで治療終了することを決定した。また、治療期間中のOCT画像からは腫瘍反応のみならず腫瘍による網膜の剥離をはじめ周囲構造の正常化してゆく様子も観察できた(図3)。

OCTを用いたオフラインART施行の結果、腫瘍にはEQD₂10で55 Gy相当が処方され、視野の中心を担う網膜中心窩部、視神経乳頭部の最大線量は、それぞれEQD₂2で53 Gy、43 Gy相当に止めることができた。これにより、転移性脈絡膜腫瘍はCR(Complete Response)が得られ、治療後の視力障害は見られなかった。一般的に、処方線量が55 Gyであれば根治線量として過小であると考えられるが、OCTの観察によって腫瘍縮小が把握でき、適切な処方線量で打ち切ることができた²³⁾。残念ながら患者は3年後に全身状態の悪化により永眠されたが、臥床の直前まで趣味のテニスを嗜まれたこ

とが本症例の意義であったと考えている。

2. 脈絡膜悪性黒色腫に対する眼球監視下におけるIMSRT

症例は66歳女性、視野歪みの自覚を主訴に眼科学的画像検査により診断された右脈絡膜悪性黒色腫の症例である。脈絡膜の腫瘍は硝子体側に突出し、眼球内部に進展する。一般に悪性黒色腫は放射線感受性が低いため、処方線量は、60 Gy/5 fr(100% = 12 Gy)を選択し、EQD₂10で110 Gyに相当する処方とした。このような処方では、50%線量でもPTV周囲の神経細胞に60 Gy(EQD₂2)に相当する線量に曝され神経細胞の障害は免れない。さらに、脈絡膜腫瘍は眼球運動に伴って腫瘍位置が変化し、その腫瘍移動の大きさだけ照射体積を大きくする必要があった。そこで、我々は治療中の眼球の運動を抑制するため、視軸固定を行う目的で民生材料を用いたシステム構築を試みた。視軸固定眼球監視システムの概要と原理を図4右に示す。システムは、プリズムミラーを患者固定用マスクに装着し、瞳のプリズム反射像を患者の尾側へ偏向した。次に光学40倍ズーム式のビデオカメラで瞳の偏向像を撮影し、これを長距離送信に適合したアナログの525本NHK標準テレビ信号に変換を行ってケーブル長で30m離れた放射線治療装置の操作室に映像を送信した。視軸固定は、プリズムミラー越しにカメラに設置したガイドランプを注視するよう患者にコー

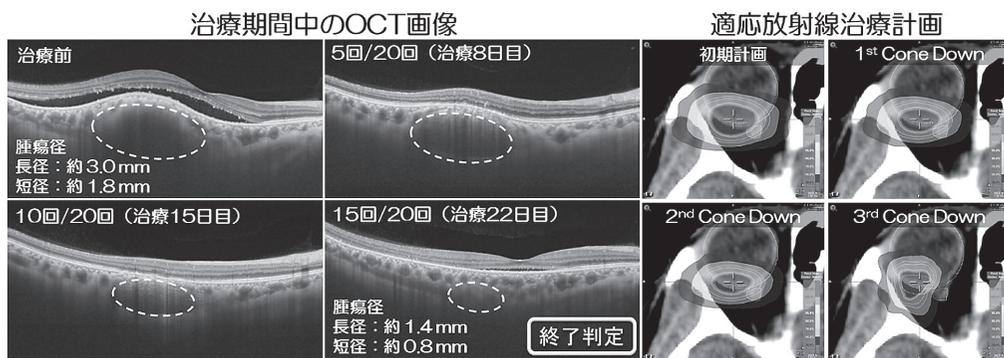


図3 OCTを用いたオフラインART

チングを行うと同時に、カメラからはガイドランプを注視している患者の虹彩の映像を治療機のオペレータが監視・記録できる仕様とした。

図4右に視軸固定の結果を示す。上段は、Cine MRを用いて閉眼状態と視軸固定下での眼球レンズの重心をプロットしたものである。閉眼状態の眼球は予想以上に眼球の動きが大きく、視軸固定を行った場合の動きは概ね±1 mmの範囲に収まる。これらのレンズの動きから、回転座標変換を行い黄斑部付近に存在する腫瘍重心の動きを算出したものが下段であり、視軸固定下における腫瘍の動きも各軸で±1 mm以内であり、いずれの患者にも同様の傾向があった。本システムによって照射すべき領域を最小限に抑えることができた²⁴⁾。

図5に施行した治療計画と治療前後のCT画像、およびOCT画像を示す。治療後の悪性黒色腫は、数年をかけて徐々に縮小し、現在までの7年間、遠隔転移も見られずCRを得ている。一方、本システムにより照射体積は最小限にとどめたが、患側の視力においては5年後に消失した。本症例の治療の第一選択肢は眼球摘出であったため、眼球を温存しながら悪性黒色腫を制御できたことに意義があると考えている。我々は、中心窩や視神経乳頭部から遠い腫瘍の局在によっては視覚機能の温存も諦めてはいない。

これら症例のように適応が不可能とされてきた症例についても放射線腫瘍医をはじめ、各科の医師と協力・連携することで、これまで存在

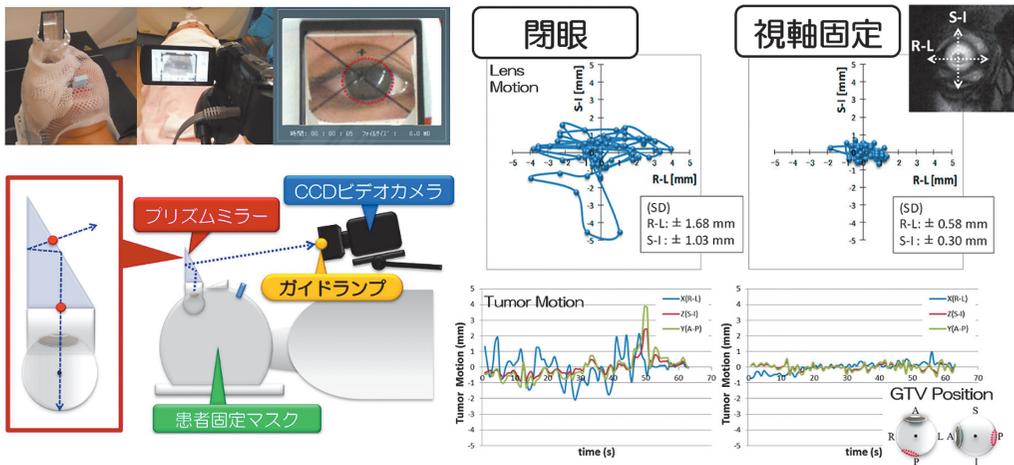


図4 視軸固定眼球監視システムの概要と視軸固定の原理（左）、眼球運動と腫瘍の動き（右）

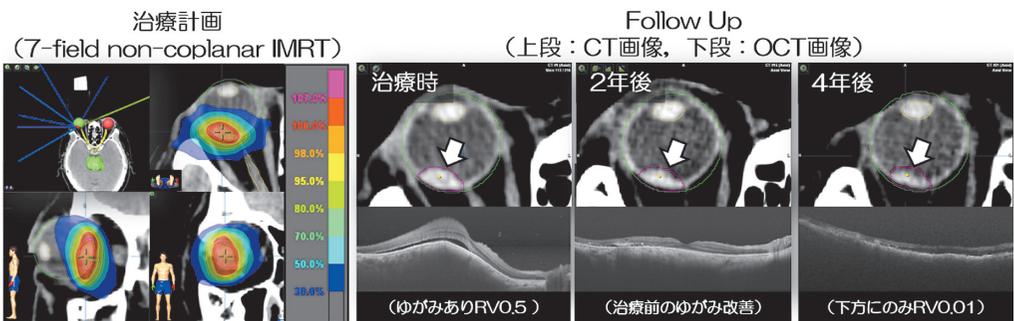


図5 脈絡膜悪性黒色腫へのIMRT、線量分布図（左）、フォローアップ画像（右）

しなかった放射線治療に挑戦するのも医学物理士の支援すべき役割であると考え.

結 語

我々は、SRS/SRTとIMRTの技術を組み合わせた根治的寡分割照射である強度変調定位放射線治療を経験した. これには治療計画上の線量計算理論と線量分布コントロールの探究に始まり、患者体内への線量送達に確信を得るために治療計画の静的な実測検証からコンピュータシミュレーションを用いた動的な線量検証に展開した. 医学物理をはじめとする放射線物理学・生物学、システム制御工学、そして統計学

など自然科学分野から放射線治療に関連する事象を明確にできれば、ようやく腫瘍医学の動向が見えてくる. 例えば、実際に患者体内に送達される放射線量を正しく見積もることができて、はじめて正しい腫瘍制御（正常組織の障害）確率が取得でき、癌組織の種類に依存する真の放射線感受性の違いが見えてくる. このように我々は、自然科学分野と医学分野を繋ぎ、放射線腫瘍医が医学に専念するための懸け橋となる医学物理士であり続けたいと考える.

開示すべき潜在的利益相反状態はない.

文 献

- 1) Teresa Eudaldo, Henk Huizenga, Inger-Lena Lamm, Alan McKenzie, Franco Milano, Wolfgang Schlegel, David Thwaites, Germaine Heeren. Guidelines for education and training of medical physicists in radiotherapy. Recommendations from an ESTRO/EFOMP working group. *Radiother Oncol*, 70: 125-135, 2004.
- 2) Colin G Orton, Thomas R Bortfeld, Andrzej Niemierko, Jan Unkelbach. The role of medical physicists and the AAPM in the development of treatment planning and optimization. *Med Phys*, 35: 4911-4923, 2008.
- 3) Stanley H Benedict, Frank J Bova, Brenda Clark, Steven J Goetsch, William H Hinson, Dennis D Leavitt, David J Schlesinger, Kamil M Yenice. Anniversary Paper: the role of medical physicists in developing stereotactic radiosurgery. *Med Phys*, 35: 4262-4277, 2008.
- 4) Loredana G Marcu, Natalie L Abbott, Ane Appelt, Stéphane Chauvie, Anne Gasnier, Christian Rønn Hansen, Efi Koutsouveli, Albert Lisbona, Christos Melidis, Jim O'Doherty. The role of medical physicists in clinical trials across Europe. *Phys Med*, 100: 31-38, 2022.
- 5) Yi Rong, Xuanfeng Ding, Megan E Daly. Hypofractionation and SABR: 25 years of evolution in medical physics and a glimpse of the future. *Med Phys*, 50: 95-103, 2023.
- 6) David A Palma, Robert Olson, Stephen Harrow, Stewart Gaede, Alexander V Louie, Cornelis Haasbeek, Liam Mulroy, Michael Lock, George B Rodrigues, Brian P Yaremko, Devin Schellenberg, Belal Ahmad, Gwendolyn Griffioen, Sashendra Senthil, Anand Swaminath, Neil Kopek, Mitchell Liu, Karen Moore, Suzanne Currie, Glenn S Bauman, Andrew Warner, Suresh Senan. Stereotactic ablative radiotherapy versus standard of care palliative treatment in patients with oligometastatic cancers (SABR-COMET): a randomised, phase 2, open-label trial. *Lancet*, 18: 2051-2058, 2019.
- 7) David A Palma, Robert Olson, Stephen Harrow, Stewart Gaede, Alexander V Louie, Cornelis Haasbeek, Liam Mulroy, Michael Lock, George B Rodrigues, Brian P Yaremko, Devin Schellenberg, Belal Ahmad, Sashendra Senthil, Anand Swaminath, Neil Kopek, Mitchell Liu, Karen Moore, Suzanne Currie, Roel Schlijper, Glenn S Bauman, Joanna Laba, X Melody Qu, Andrew Warner, Suresh Senan. Stereotactic Ablative Radiotherapy for the Comprehensive Treatment of Oligometastatic Cancers: Long-Term Results of the SABR-COMET Phase II Randomized Trial. *J Clin Oncol*, 38: 2830-2838, 2020.
- 8) Stephen Harrow, David A Palma, Robert Olson, Stewart Gaede, Alexander V Louie, Cornelis Haasbeek, Liam Mulroy, Michael Lock, George B Rodrigues, Brian P Yaremko, Devin Schellenberg, Belal Ahmad, Sashendra Senthil, Anand Swaminath, Neil Kopek, Mitchell Liu, Roel Schlijper, Glenn S Bauman, Joanna Laba, X Melody Qu, Andrew

- Warner, Suresh Senan. Stereotactic Radiation for the Comprehensive Treatment of Oligometastases (SABR-COMET): Extended Long-Term Outcomes. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 114: 611-616, 2022.
- 9) P Scalliet, J M Cosset, A Wambersie. Application of the LQ model to the interpretation of absorbed dose distribution in the daily practice of radiotherapy. *Radiother Oncol*, 22: 180-189, 1991.
- 10) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording and Reporting photon Beam Therapy, ICRU Report 50. ICRU Publications, 1993.
- 11) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy (Supplement to ICRU Report 50), ICRU Report 62. ICRU Publications, 1999.
- 12) International Commission on Radiation Units and Measurements: Prescribing, Recording and Reporting Photon-Beam Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT), ICRU Report 83. ICRU Publications, 2010.
- 13) Yair Censor, Jan Unkelbach. From analytic inversion to contemporary IMRT optimization: radiation therapy planning revisited from a mathematical perspective. *Phys Med*, 28: 109-118, 2012.
- 14) Nikos Papanikolaou, Jerry J. Battista, Arthur L. Boyer, Constantin Kappas, Eric Klein, T. Rock Mackie, Michael Sharpe, Jake Van Dyk. Report of Task Group No. 65, Tissue inhomogeneity corrections for megavoltage photon beams. AAPM, 2004.
- 15) Indrin J Chetty, Bruce Curran, Joanna E Cygler, John J DeMarco, Gary Ezzell, Bruce A Faddegon, Iwan Kawrakow, Paul J Keall, Helen Liu, C M Charlie Ma, D W O Rogers, Jan Seuntjens, Daryoush Sheikh-Bagheri, Jeffrey V Siebers. Report of the AAPM Task Group No. 105: Issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning. *Med Phys*, 34: 4818-4853, 2007.
- 16) Oleg N Vassiliev, Todd A Wareing, John McGhee, Gregory Failla, Mohammad R Salehpour, Firas Mourtada. Validation of a new grid-based Boltzmann equation solver for dose calculation in radiotherapy with photon beams. *Phys Med Biol*, 55: 581-598, 2010.
- 17) Gary A Ezzell, Jay W Burmeister, Nesrin Dogan, Thomas J LoSasso, James G Mechalakos, Dimitris Mihailidis, Andrea Molineu, Jatinder R Palta, Chester R Ramsey, Bill J Salter, Jie Shi, Ping Xia, Ning J Yue, Ying Xiao. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Med Phys*, 36: 5359-7533, 2009.
- 18) Moyed Miften, Arthur Olch, Dimitris Mihailidis, Jean Moran, Todd Pawlicki, Andrea Molineu, Harold Li, Krishni Wijesooriya, Jie Shi, Ping Xia, Nikos Papanikolaou, Daniel A Low. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys*, 45: e53-e83, 2018
- 19) Timothy C Zhu, Sotiris Stathakis, Jennifer R Clark, Wenzheng Feng, Dietmar Georg, Shannon M Holmes, Stephen F Kry, Chang-Ming Charlie Ma, Moyed Miften, Dimitris Mihailidis, Jean M Moran, Niko Papanikolaou, Bjorn Poppe, Ying Xiao. Report of AAPM Task Group 219 on independent calculation-based dose/MU verification for IMRT. *Med Phys*, 48: e808-e829, 2021.
- 20) D A Low, W B Harms, S Mutic, J A Purdy. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions. *Med Phys*, 25: 656-661, 1998.
- 21) Daniel A Low, James F Dempsey. Evaluation of the gamma dose distribution comparison method. *Med Phys*, 30: 2455-2464, 2003.
- 22) Daniel A Low, Delphine Morele, Philip Chow, Tai H Dou, Tao Ju. Does the γ dose distribution comparison technique default to the distance to agreement test in clinical dose distributions ?. *Med Phys*, 40: 071722, 2013.
- 23) Toshihiko Inoue, Norihisa Masai, Ryoong-Jin Oh, Hiroya Shiomi, Noriyasu Hashida. Adaptive replanning intensity-modulated radiotherapy for choroidal metastasis of breast cancer using optical coherence tomography. *J Radiat Res*, 55: 502-508, 2014.
- 24) Toshihiko Inoue, Norihisa Masai, Hiroya Shiomi, Ryoong-Jin Oh, Kenji Uemoto, Noriyasu Hashida. Feasibility study of a non-invasive eye fixation and monitoring device using a right-angle prism mirror for intensity-modulated radiotherapy for choroidal melanoma. *J Radiat Res*, 58: 386-396, 2017.

著者プロフィール



正井 範尚 Norihisa Masai

所属・職：京都府立医科大学附属北部医療センター放射線科・助教

略 歴：1994年3月 清恵会第二医療専門学院 卒業

1994年4月 大阪市立大学医学部附属病院 中央放射線部

2007年4月 都島放射線科クリニック 放射線治療計画室

2020年10月～現職

専門分野：放射線治療学, 放射線治療物理学

- 主な業績：1. Doi H, Tamari K, Masai N, Akino Y, Tatsumi D, Shiomi H, Oh R-J. Intensity-modulated radiation therapy administered to a previously irradiated spine is effective and well-tolerated. *Clin Transl Oncol*, **23**: 229-239, 2021.
2. Tamari K, Oh R-J, Masai N, Shiomi H, Otani K, Suzuki O, Ogawa K. Long-term Outcomes of Radiotherapy Regimen of 72 Gy in 30 Fractions for Prostate Cancer. *Anticancer Res*, **38**: 4207-4212, 2018.
3. Inoue T, Mimura O, Masai N, Ohashi A, Ikenaga K, Okuno Y, Nishiguchi I, Oh R-J. Early intervention using high-precision radiotherapy preserved visual function for five consecutive patients with optic nerve sheath meningioma. *Int J Clin Oncol*, **23**: 826-834, 2018.
4. Doi H, Uemoto K, Masai N, Tatsumi D, Shiomi H, Oh R-J. Definitive re-irradiation using intensity-modulated radiation therapy in cancers of the head and neck, focusing on rare tumors. *Acta Otolaryngol*, **38**: 750-758, 2018.
5. Doi H, Masai N, Uemoto K, Suzuki O, Shiomi H, Tatsumi D, Oh R-J. Validation of the liver mean dose in terms of the biological effective dose for the prevention of radiation-induced liver damage. *Rep Pract Oncol Radiother*, **22**: 303-309, 2017.
6. Inoue T, Masai N, Shiomi H, Oh R-J, Uemoto K, Hashida N. Feasibility study of a non-invasive eye fixation and monitoring device using a right-angle prism mirror for intensity-modulated radiotherapy for choroidal melanoma. *J Radiat Res*, **58**: 386-396, 2017.
7. Doi H, Shiomi H, Masai N, Tatsumi D, Igura T, Imai Y, Oh R-J. Threshold doses and prediction of visually apparent liver dysfunction after stereotactic body radiation therapy in cirrhotic and normal livers using magnetic resonance imaging. *J Radiat Res*, **57**: 294-300, 2016.
8. Miura H, Masai N, Oh R-J, Shiomi H, Yamada Y, Sasaki J, Inoue T. Clinical introduction of Monte Carlo treatment planning for lung stereotactic body radiotherapy. *J Appl Clin Med Phys*, **15**: 4202, 2014.
9. Inoue T, Masai N, Oh R-J, Shiomi H, Hashida N. Adaptive replanning intensity-modulated radiotherapy for choroidal metastasis of breast cancer using optical coherence tomography. *J Radiat Res*, **55**: 502-508, 2014.
10. Miura H, Masai N, Oh R-J, Shiomi H, Sasaki J, Inoue T. Approach to dose definition to the gross tumor volume for lung cancer with respiratory tumor motion. *J Radiat Res*, **54**: 140-145, 2013.
11. Miura H, Masai N, Oh R-J, Shiomi H, Sasaki J, Inoue T. Approach to dose definition to the gross tumor volume for lung cancer with respiratory tumor motion. *J Radiat Res*, **54**: 140-145, 2013.
12. Kudoh H, Masai H, Ichida T, Kubota T, Nakamura K, Yamada R. Development of variable dose X-ray fluoroscopic system -aimed at reduction of X-ray exposure during interventional radiologic procedure-. *Radiat Med*, **16**: 229-232, 1998.