

放射線がん治療における医工連携の取り組み

Medical-engineering collaboration in radiation cancer therapy

富田 和雄

TOMIDA Kazuo

三大がん治療法のひとつとされる放射線治療では、ビームを生成する加速器をはじめ、ロボティクスや画像支援など広範な工学的技術が活用されている。医療ニーズに対応した技術の変遷と安全性・信頼性担保の取り組みを概説し、医工連携による治療効果の増大と効率向上に向けた技術開発に言及する。

Radiation therapy, one of the three major cancer treatments, utilizes a wide range of technologies, including accelerators as beam generator, robotics, and image guidance. This article provides an overview of the evolution of technologies that meet medical needs and efforts to ensure safety and reliability as well as development for enhancement of efficacy and efficiency through medical-engineering collaboration.

キーワード：がん治療, 放射線治療, 医工連携, 安全性, 信頼性

1 放射線によるがん治療の概要

1.1 がんの統計

わが国では、人口の高齢化に伴い、男女ともにがんの罹患（りかん）数・死亡数が増加し続けており、2023年のがん死亡数は約38万人で、1980年の約2.4倍となっている¹⁾。

放射線治療が有効な肺がんや前立腺がんが増えているのに対して、2007年の調査では、放射線治療を受ける患者は25%であり、米国66%、ドイツ60%などに比べて低い数値となっている²⁾。

1.2 三大がん治療法と放射線治療

(1) 三大がん治療法の特徴

外科療法、化学療法、放射線療法は、三大がん治療法と位置づけられており、以下のような特徴がある。

・外科療法

転移がない場合にがん細胞を確実に切り取れる可能性が高い。一方、患部の機能を損なう場合や、長期入院が必要な場合もある。

・化学療法

全身を巡るがんに関しては抗がん剤治療が有効である。肺がんなどの固形がんでは補助的に使用する。一方、副作用を伴うこともある。

・放射線療法

主に固形がんや脳腫瘍を対象とする。臓器や機

能を温存でき、1回の治療時間が短く、通院で治療が可能である。一方、放射線が効きにくいがんの存在、呼吸等による腫瘍の位置変動への対応に課題がある。

(2) 放射線治療の種類

放射線療法（放射線治療）は内部照射と外部照射に大別され、以下のような種類がある³⁾。

① 内部照射

・小線源治療

体の内腔（ないくう）や組織内に放射線源を挿入して照射する治療方法である。

・非密封放射性同位元素治療

非密封の放射性同位元素を経口薬や静脈注射によって体内に取り込む治療法で、核医学療法とも呼ばれる。

② 外部照射

体の外から放射線を照射する治療方法であり、線形加速器で生成される電子線やエックス線、放射性同位元素から発生するガンマ線、粒子加速器で生成される陽子線や炭素線などが利用される。

がん細胞は正常組織に比べて放射線の影響を受けやすいため、繰り返し分割照射をすることにより、がん細胞を死滅させ、照射と照射の間で正常組織を回復させることができる。

熱中性子を吸収（捕獲）しやすいホウ素の同位体を含む薬剤をがんを集積させ、中性子照射時に発生するアルファ線で局所的にがん細胞を死滅さ

せる中性子捕獲療法も外部照射のひとつである。

(3) 放射線治療の特徴

放射線治療は原則として、できるだけがんのある部分だけに線量を付与し、正常組織への線量を減らすことが重要である。正常組織への線量が過大になると二次発がんのリスクが高くなるためである。

放射線治療は、がんの部位や特徴、患者の既往症などに合わせて医師が個別に処方するテーラーメイド医療であり、以下のような利点がある。

- ・局所的ながんをピンポイントで治療できる。
- ・患部の形態・機能を温存できる。
- ・通院で治療を受けられ、高齢者への負担が小さい。

放射線治療は、完治を目的とする根治療法のほか、がんの進行や痛みを緩和する目的で使用されることもある。

1.3 放射線治療における医工連携

放射線治療は、医師・医学物理士・診療放射線技師・医療機器メーカーなどの協働により、高精度で身体への負担が少ない治療法として発展してきた。近年では、画像誘導技術や強度変調放射線治療などの先進的な技術の導入や治療時間短縮、個別最適化等のニーズにより、制御、画像処理、AI、ロボティクスなどの医工学的知見が不可欠となり、医工連携による技術開発が進展している。

2 科学技術の発展と放射線治療の変遷

2.1 放射線治療のはじまり

1895年11月 Roentgenがエックス線を発見すると、1896年2月には Emil Grubbeが乳がん患者にエックス線治療を行っている。1910-1930年には、Claude Regaudが分割照射の効果を発見し、今日の放射線治療の礎を築いた。

その後、放射線治療は工学的技術とともに発展し、臨床上の利便性と安全性の向上を実現してきた。

次節では、エックス線治療および粒子線治療の開発の経緯について、それぞれ概説する。

2.2 エックス線治療の変遷³⁾⁴⁾

1934年に Henri Coutard が喉頭がんで声帯を温存できる治療法を発表すると、1950年代に

はエックス線による治療が普及していった。1960年代には、コバルト60を線源に用いたガンマ線外照射装置が普及していった。

(1) 到達深度

初期のエックス線治療装置はエネルギーが低く、体表に近い部位の治療に用いられてきたが、1970年代には高エネルギーのエックス線装置が開発され、体内深部の腫瘍にも適用されるようになった。

(2) 治療計画の精度

1982年にはCT画像によるシミュレーションが始まり、計算機の処理能力の向上も相まって、精度よく腫瘍の位置をカバーする治療計画が可能になり、現在の放射線治療の原型が作られた。

(3) 照射形状の最適化と照射精度の向上

1985年には、回転照射と同期して可動式のコリメータを腫瘍の形に合わせて動作させる原体放射線治療が開発された。さらにコンピューター技術の進化に伴い、強度変調放射線治療 (IMRT: Intensity Modulated Radio Therapy) や定位放射線治療 (SRT: Stereotactic Radio Therapy) が臨床使用されるようになった。

また、画像情報をもとに位置誤差を補正しながら、正確に治療を行う画像誘導放射線治療 (IGRT: Image Guided Radio Therapy) が導入され、現在の放射線治療のスタンダードになっている。

2.3 粒子線治療の変遷

(1) 粒子線治療の特徴と普及状況

入射エネルギーに応じた深さで線量を集中的に付与するブラッグピークの発見により、その物理的特性により線量集中性に優れた陽子線や炭素線による粒子線治療が発展してきた。

粒子線治療では、治療部位の形態やその機能を温存できる可能性が高まるほか、以下の特徴がある。

- ① 線量集中性が高く、正常組織への損傷が少ない。
- ② 放射線の影響を受けやすい臓器や器官の近くにあるがん細胞にも照射できる。
- ③ 炭素線の場合、エックス線や陽子線が効きにくい症例にも有効な場合がある。

粒子線治療は1954年に米国ローレンスバー

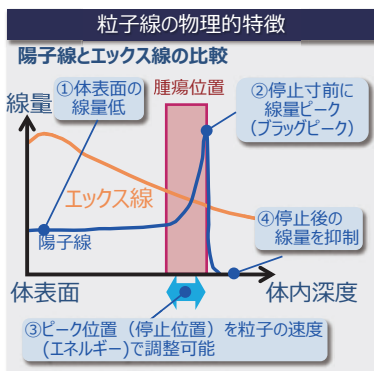


図1 粒子線の物理的特徴

クレー研究所で開始され、2000年初頭から日米欧を中心に普及が進み、2025年10月現在、世界で139施設（陽子線128施設、炭素線17施設、内両用6施設）が稼働し、累積治療患者数は40万人を超えている。

国内では、1979年に放射線医学総合研究所（現在のQST）にて重粒子線治療が始まり、国内外への展開の礎を築いている。また、1983年～2000年に高エネルギー研究所の研究用加速器にて、筑波大学による第1期の陽子線治療が実施され、約700人が治療を受けた。

2024年4月現在、陽子線20施設、重粒子線7施設が稼働し、累計治療患者数は9.6万人を超えている。2016年に小児がんが保険収載されたのを皮切りに、現在では頭頸（とうけい）部、前立腺、肺、肝臓などの多くの疾患が条件により保険適用の対象になっている。

(2) 粒子加速器

粒子線治療の放射線源として、サイクロトロン、シンクロトロンなどの粒子加速器が用いられている。30 cm程度の深部を治療するためには、230 MeV程度の陽子線、430 MeV程度の炭素線を出力できる加速器が必要になる。近年では、加速器リングの小型化や超電導技術の導入などにより、建屋のコンパクト化、消費電力の低減が図られている。

(3) 照射野形成方法

加速器から供給される粒子線は、治療室に輸送され、治療部位の形状に合わせて照射野が形成される。導入初期は散乱体やワブラー電磁石により拡大したビームをコリメータやボラスで立体的に切り取るワブラー法や二重散乱体法が採用されてきた。

近年では、細いままのビームを電磁石で二次元

的に走査し、エネルギーを切り替えながら立体的に照射するスキャニング法が主流になっている。

スキャニング法では、中性子の発生源となる散乱体等を使用せずに照射できることから、二次発がんや成長の抑制など、小児がん患者に対する副次的事象の低減に寄与している。

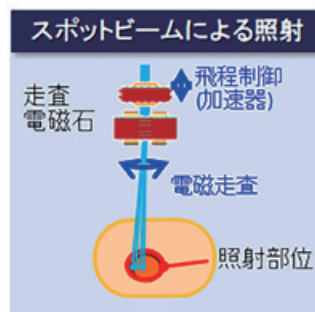


図2 スキャニング法の一例

(4) 呼吸移動性臓器への対応

呼吸とともに動く肺などの治療をする際には、正常組織への照射を抑制する工夫が必要になる。体表の動きを検知して呼吸位相に合わせてビームを出力する呼吸同期システムがその代表例である。

より精度の高い治療を目指して、医工連携による最先端研究開発により、X線透視画像を用いて体内に挿入したマーカーの位置を検知する動体追跡法が確立されている。画像処理の高度化により、マーカーを不要とする方法も開発されている。

3 安全性、信頼性の確保

3.1 放射線治療システムの要件

(1) 安全性

放射線治療特有のリスクとして、以下の事象が挙げられる。線量モニターの多重化や正常時のみ照射可能となるインターロックなどの対策が図られる。

- ① 計画線量に対する過線量または過少線量
- ② 治療部位外や医療従事者への意図しない照射
- ③ 漏えい放射線や二次放射線の影響

(2) 信頼性（稼働率）

放射線治療システムが止まるとその停止期間に応じて以下の影響が想定される。

- ① 4日以上での停止でがんが再増殖
- ② 数時間の停止でスケジュール変更
- ③ 数分の停止で位置決めやりなおし

このため、システムの信頼性向上や停止事象が発

生した際の復旧時間短縮が重要な課題となっている。

3.2 国際標準と規制対応

医用電気機器に対する以下の安全規格や国・地域の規制が放射線治療システムにも適用される。

- 品質マネジメントシステム：ISO13485
- 医療機器リスクマネジメント：ISO14971
- 一般安全原則：IEC60601-1 シリーズ

これらの規格により、以下の安全性を担保している。

① 基本性能 (ESSENTIAL PERFORMANCE)

損なわれると患者に影響を与える性能：

- 正確な位置に正確な線量を照射する。
- 正常組織への照射を避ける。
- 異常時には確実に停止させる。

② 基礎安全 (BASIC SAFETY)

安全を担保するために考慮すべきリスク：

- 感電，挟まれ，衝突，電磁両立性等

さらに、インシデントの経験を踏まえて、以下の規格類が整備され、安全性向上の基盤になっている。

(1) ソフトウェア関連

1985年～1987年に、カナダで開発された Therac25 の過照射事故が連続的に発生した。ソフトウェアのバグが原因であることがわかり、ソフトウェアライフサイクルに関する規格が整備された。

(2) ユーザビリティ (ヒューマンファクター) 関連

2005年に発生した計算機フリーズ後のリカバリー失敗と人為的な過誤による過照射事故がニューヨークタイムスで取り上げられた。人為的要因によるリスクを低減するため、ユーザビリティエンジニアリングの規格が整備された。

3.3 放射線治療における品質管理

放射線治療では、医療従事者による治療品質の作りこみが大きな役割を担っている。

米国医学物理学会、日本放射線腫瘍学会では、放射線治療システムや治療計画システムに対するQAガイドラインを整備し、治療計画、シミュレーション、患者QA、治療照射、照射実績の記録と照合の治療プロセスをとおして、品質向上に

努めている。

4 将来の展望と課題

4.1 最新の技術動向

治療効果の増大と副作用の抑制、医療従事者の負担軽減、治療プロセスの効率向上に向けた調査・研究や技術開発が進められている。

その代表例がアダプティブ治療であり、治療期間中の腫瘍の縮小や軟組織の位置変化に追従すべく、治療セッションごとに治療計画の最適化を行う。

アダプティブ治療を導入するためには、臨床上のニーズを工学的なシステムとして具現化する必要があるため、医療機関とメーカーの協働が不可欠となっている。

4.2 医工連携の取り組みに関する将来の展望

近年では、治療部位ごとに整備された標準治療を基本に、外科療法、化学療法、放射線療法を組み合わせた集学的治療が普及し、患者の希望やがんサーボードなどの医療側の判断による個別最適化のニーズが高まっている。また、放射線治療の高度化が進む一方で、専門人材の確保が喫緊の課題となっている²⁾。

これらのニーズに応えるために、医工学人材の育成や産学間の交流がこれまで以上に望まれている。

<引用文献>

- 1) がんの統計2025, がん研究振興財団
- 2) 「第3回がん対策推進協議会」(厚生労働省, 中川恵一氏提出資料, 2007年5月7日)
- 3) 白土博樹: がんの放射線治療の歴史と最先端技術: 健やかに人間らしく生きるために, 特別講演会「がんの放射線治療の歴史と最先端技術」, 2011年10月22日
- 4) 小林雅夫: 放射線治療の歴史, 頭頸部癌との関わり方の変遷について, 耳展64:1;50~59, 2021

富田 和雄 (とみだ かずお)

技術士 (原子力・放射線/
総合技術監理部門)

(株)日立ハイテク
ヘルスケア統括本部
治療システム事業部

e-mail: kazuo.tomida.wg@hitachi-hightech.com

