

# 放射線治療用リニアックの現状と将来

田中 良明<sup>1,A)</sup>、齋藤 勉<sup>A)</sup>、藤井 元彰<sup>A)</sup>、  
川上 睦美<sup>A)</sup>、中村 道子<sup>A)</sup>、河守 次郎<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 日本大学医学部放射線医学教室

〒173-8610 東京都板橋区大谷口上町330-1

<sup>B)</sup> 聖路加国際病院放射線科

〒104-8560 東京都中央区明石町9-1

## 概要

最近の医療用リニアックは、性能的には従来に比べて安定してきているものの、デジタル技術の導入により、リニアック本体ならびに周辺機器類を制御するシステム機構の信頼性が求められるようになってきた。病巣部に的確に照射する方法として、原体照射、三次元治療計画、定位的放射線治療、強度変調放射線治療（IMRT）、サイバーナイフなどの照射技術、治療機器が開発され臨床応用されるようになってきたが、これらを日常ルチーンに適用するには、治療計画装置を含めた治療機器全体のシステムとしての品質保証と、高い精度管理が求められている。

対象となる癌病巣は、さまざまな進展様式を呈しており、それぞれの患者さんに適した方法で放射線治療を行うには、ハード的にもソフト的にも使い勝手のやさしい、小回りが利く、柔軟性のある装置が望ましい。治療を受ける患者さんが装置に合わせるというのではなく、患者さん側に装置を適合させるという理念を有する治療機器が求められている。

## 1. はじめに

最近の医療環境の変化は目まぐるしく、その中でもCT、MRIをはじめとする画像診断機器の技術的進歩には目覚ましいものがある。画像のデジタル化が進み、三次元再構成像などが日常ルチーンに得られるようになった。これらの画像診断技術の発達とあいまって、放射線治療の分野においても治療機器ならびにその周辺機器類の技術的改良が進み、照射計画から治療の実際まで、従来よりも緻密で精細な内容を有するものとなってきている。こういった高精度の放射線治療技術の適用により、従来の方法に比べて、腫瘍病巣の進展範囲に近似した形状の線量分布が得られるようになり、局所制御の向上と障害発生への軽減化への期待が一段と進んできた。より理想に近い放射線治療が可能となってきた現状を踏まえ、最近の医療用リニアックの現状と将来への展望について触れてみたい。

## 2. 治療用リニアックの現状

外部照射用の放射線治療機器の変遷は、深部治療用の250kVp前後のX線照射装置からはじまり、<sup>60</sup>Coのテレコバルト治療装置から、最近の4~15MV前後の超高圧放射線治療装置に至るまで、ハード的な面では著しく進歩した。この間に、病巣部に対してはより高線量を照射し、周囲の正常組織にはできる限り線量を減らす方法として、さまざまな工夫が取り入れられてきた。その代表的な例が、回転照射機構を有する治療用ガントリーの開発、治療計画用コンピュータシステムの導入、マルチリーフコリメータの装填、原体照射および定位的照射技術の開発導入などである。

### 2.1 治療用リニアックに具備すべき条件

放射線治療器としてのリニアックに求められる条件の第一は、何と云っても信頼性の高い高出力のビームが得られることである。具体的には、物理的にみて安定したエネルギーのX線と電子線が得られ、かつ両者の切り替えが容易であること、加速管内のビーム輸送系やターゲットの構造、スキャタリングフォイルの種類などが、治療の用途に合致して適当に整備されており、さらに照射野内のビーム強度の平坦度が優れていることなども、重要な条件である。

医療機器である以上、装置全体に対して高い安定性、再現性が求められるのは当然である。この点に関しては、以前はユーザー側にとって、必ずしも満足のいく状況ではなかった。加速管のトラブルや、制御機構の不具合などで、治療患者さんに迷惑をかけたことが少なくなかったのである。さらに、最近では治療装置本体にいろいろな周辺機器類が装備されるようになり、しかもこれらが一体となってシステム化されているので、小さなトラブルであっても治療装置全体の不具合につながるものである。

### 2.2 リニアックの制御機構

最近の医療機器の制御は、大部分がデジタル方式で行われており、リニアック装置も例外でない。

<sup>1</sup> E-mail: ysaktnk@med.nihon-u.ac.jp

問題は、例えば制御装置の表示部はデジタル表示されているが、装置本体の可動部はアナログ方式であるところにある。両者をつなぐには、A-D変換装置が不可欠であるが、これらの変換器と検出器の精度が良くないと、表示部で示されている角度数値などが、実際の装置の位置角度とがずれている場合があり得る。こういった表示盤の数値と治療機本体との照合などについても、放射線治療の現場担当者は絶えずチェックしておく必要がある。

## 2.3 原体照射法: Conformal RT

1960年に高橋によって始められた原体照射法（当初の英訳はconformation radiotherapy）は、それ以前から研究が続けられていた回転横断撮影法から三次元的に展開した原体撮影法へと発展していった概念が放射線治療の分野に生かされ、運動照射への応用から原体照射法につながっていった<sup>[1]</sup>。この最初に行った「病巣に一致した高線量域を得ようとする試み」は、当初はテレコバルト装置による運動照射で行われていたが、その後、4MV～10MV X線のリニアック装置に受け継がれ、これらのリニアック装置による固定多門照射や、不整形照射野、三次元的原体照射法など、さまざまな照射法に発展した。そこで森田により、これらを含む「複雑な病巣の広がり、できるだけ一致した高線量域を得る方法」の全てを、広義の原体照射法と呼ぶとする案が提案された<sup>[2]</sup>。

原体照射法の発展の歴史は、ガントリーの回転機構に可変絞りのコリメータが設置されたのに始まり、その後、単分割絞りから多分割絞り(multileaf collimator: MLC)に発展し、また、打ち抜き照射法の応用にも発展した。しかしながらその制御機構は、カム方式および荷重方式によるものであり、アナログ方式の制御機構である。その後、1970年代になって、CT時代の幕開けと共にMLCもコンピュータ制御となり、絞り幅も回転中心で3cmから1cm、さらに0.5cmと次第に薄いものとなり、それだけ照射野の形状がより精細に調整できるようになったといえる<sup>[3]</sup>。

## 2.4 non-coplanar Conformal RTと三次元原体照射(3D-CRT)

これまではリニアック線源の回転移動面と病巣とが同一平面上であったのが(coplanar RT)、患者治療台をアイソセンターを中心に回転させて、三次元的に照射する機構が開発された。この過程には、1968年にLeksellによって始められた、ガンナイフの登場が大きく影響している。1983年にはリニアックにおける定位照射がSMRT(stereotactic multiple arc radiotherapy)法として導入され、臨床にも応用されるようになった。このnon-coplanarな原体照射法の導入により、線量の集中性がますます高まり、原体照射本来の目指す治療技術となってきたが、患者整位や治療ビームでの

照射部位の確認、照合などに関しては、より一段高い精度が求められるようになった<sup>[4]</sup>。

## 2.5 定位放射線照射

narrow beamで線量を集中的に照射する方法で、技術的には以下の条件を満たすものである。すなわち、(1)患者の固定が治療台の固定された座標系において、照射中心を固定精度内に納めるシステムであること、(2)定位型の固定枠ないしそれに順ずる精度を有する補助具を用いること、(3)固定装置の照射中心の精度が1～2mm以内、(4)治療中に上記の精度が保たれること、である。これらの技術は、対象が頭蓋内の小病変から、体幹部の小病巣に広げられてきており、体幹部に対するリニアックによる定位照射の臨床応用が、最近のこの領域における最大のトピックスの一つである。

## 2.6 呼吸同期および動態追跡照射

定位照射において、治療中の病巣部の移動に伴いビーム出力のon/offを繰り返して照射する方法で、一例が呼吸同期システムである。具体的には、モニターで患者の呼吸位相を観察しながら、治療病巣が目的とする位置にきたときにのみビームを曝射する方式である。これによって計画標的体積を小さくすることができ、肺癌などにおいて、組織耐容線量の上昇と局所制御率の向上が得られる方法として開発され、臨床に応用されている。

## 2.7 照射野確認法

当初、運動照射中の照射野の変化を確認する方法として、蛍光板・イメージインテンシファイア(II)・TVカメラからなる照射野確認装置が開発されたが、6MVという高エネルギーX線を用いること等の理由で普及せず、代わりにシリコン検出器を用いた照射野確認装置が、尾内らによって考案された<sup>[5]</sup>。さらにこの方法は、タングステン酸カドミウムシンチレータ素子を検出器として用いた照合システムとして発展し、治療体位での照射野の照合がCT像との重ね合わせで、精度良く確認できるようになった。本法を開発した中川らによれば、検出器の配列を平面状にすれば、超高圧X線CTを得ることも可能であるという<sup>[6]</sup>。

最近のリニアック装置には、ポータルイメージングシステムが装備されているのも少なくない。いずれにしても、不整形照射野からなる治療ビームの入射角度や門数が増えるに従い、実照射野の確認が容易にかつ確実に、しかもリアルタイム的に得られる方法が確立してこそ、高精度の三次元治療計画における品質保証(QA)、品質管理(QC)が成り立つものと思われる<sup>[7]</sup>。

## 3. 最新の放射線治療技術

ここで、最近の放射線治療におけるいくつかの新技术を紹介したい。

### 3.1 cyber-knife (サイバーナイフ)

サイバーナイフとは、米国で開発された三次元照射装置で、小型で軽量の6MVリニアックを、6軸の自由度の高いロボットアームの先端に取り付けて、X線のnarrow beamをnon-coplanarに照射することができる。治療計画時に作成した画像とリアルタイムに照合し、位置のずれを補正しながら照射することができるので、定位的照射に不可欠な患者固定に侵襲的な方法を用いなくても済むのが特徴である。ただし、ビームの安定性、照射部位の照合などについて、さらに検討を要するところがある。

### 3.2 intensity modulated radiation therapy (IMRT) 強度変調放射線治療

従来の放射線治療は、照射野内の線量分布は均一であったのが、これをある計画の基で不均一にすることにより、ターゲットとなる病巣内の線量分布を最適にする方法が考案された。これが強度変調放射線治療 (IMRT) で、この技術を可能にしたのは、高精度のMLCの導入と、コンピュータ最適化プログラムの改良である。

具体的には、照射野内のビーム強度を細かい区画毎に制御して、病巣すなわち臨床的標的体積 (clinical target volume: CTV) に与える線量分布の最適化を図る方法であり、コンピュータ制御による多分割絞り (MLC) と、逆問題解決法としてのinversed planning法による三次元治療計画装置のシステムが必須である。照射の実際には、ガントリーが固定して、MLCがdynamic modeで移動して照射するsliding window法、照射野を重ね合わせするfield in field法 (step & shoot法)、ガントリーが回転しながら照射するtomotherapy法などがある。IMRTの特徴は、治療域の形状がより病巣のそれに近似させることができるようになったことに加えて、病巣内での線量に重み付けが可能となったことである。これによって腫瘍制御に要する十分な線量の投与が可能となり、放射線感受性の差による空間的線量分布を変えられるようになったこと、決定臓器の線量軽減が得られるようになったこと、などが利点としてあげられる。

## 4 . リニアックの課題と将来

現行のリニアックは、装置としての安全性、再現性については改善されたものの、QC、QAについては未だ問題などところがある。さらに、手術中に高エネルギー電子線を照射する装置の開発など、企業側には大変な負担であろうが、臨床側からは要望の高い機種の一つである。この他に、陽子線治療や重粒子線治療など、特殊な放射線治療機器があるが、今回のテーマから外れるので、別の機会にしたい。

いずれにしても、臨床の現場で感じることは、癌病巣に照射するのに、周辺機器類を含めて、治療機器の方に患部を合わせるというのではなく、患部の方に治療機器の方を合わせるといった思想のもとで、治療用のリニアックを開発していただきたいと思う。

### 参考文献

- [1] Takahashi S. Conformation radiotherapy: Rotation techniques as applied to radiography and radiotherapy of cancer. Acta Radiologica, Suppl. 242, 1965.
- [2] 森田皓三：原体照射法 (conformal RT) とその発展。癌の臨床 40:33-46,1994.
- [3] 田中良明：原体照射の治療計画。(分担) 臨床放射線科のコツと落とし穴 治療 (小塚隆弘編), 中山書店 pp 174-175,1999.
- [4] 田中良明：放射線治療の新たな展開 (緊急提言 医療改革と放射線診療) 新医療 28(10):73-75,2001.
- [3] 尾内能夫ほか：2次元配列のシリコン透過線量検出器を用いた外部放射線治療用照射部位確認システムの開発。放治システム研究 Suppl 5:108-111,1988.
- [6] 中川恵一ほか：超高压X線CTを用いた位置決め照合法。日放腫会誌 4:249-258,1992.
- [7] 田中良明：論集 変革期の医療と機器・システム 放射線治療機器。月刊新医療別冊 データブック「医療機器・システム白書2002」: 45-48,2002.