

2. VMATによるIMRTの実際

名和 要武 / 中川 恵一 東京大学医学部附属病院放射線科

今日の高精度放射線治療の原点は、1957年に梅垣が提案した「可変絞り照射法」であろう¹⁾。腫瘍形状に一致した照射野を形成するために可変絞りが導入され、これが今日のマルチリーフコリメータ (multi-leaf collimator: MLC) の原型となった。61年には高橋が同手法を高エネルギー X線治療に応用し、原体照射と名付けた²⁾。その後、88年にBrahmeが強度変調放射線治療 (intensity-modulated radiation therapy: IMRT) を提案した³⁾。この論文では、MLCを用いて同一照射野内の分割領域ごとにビーム強度を変調させる技法とともに、線量分布成形の数理的アイデアとして逆問題解法 (インバースプランニング) が提唱された。逆問題解法とは、望ましい三次元線量分布が実現するまで、計画者が各方向からのビーム強度を試行錯誤で変化させる従来の手法とは逆に、まず理想的な線量分布を指定した上で、ビームの最適空間強度分布を計算機に自動算出させるものであった。最初に開発されたのはガントリ固定型IMRTであり、MLCを固定して照射する step and shoot法⁴⁾と、MLCをダイナミックに移動させながら照射する sliding window法⁵⁾がある。

ガントリ固定型IMRTは、今日でも広く臨床適用されている。しかし、ガントリ固定によるIMRTは急峻な線量勾配と引き換えに、多門照射による治療の長時間化という問題を含んでいる。折しも80年代は、

Simpsonによるリニアックの治療ビームを用いた megavoltage CT の発案⁶⁾を契機に、画像誘導放射線治療 (image-guided radiation therapy: IGRT) の黎明期にあった。寝台補正の時間を確保しつつ安全かつ患者負担が少ない放射線治療を実現するため、治療ビームの照射時間は可能なかぎり短縮される必要があった。

一方、ガントリ回転型IMRTの先駆けとして、93年にMackieによりトモセラピーが発表された⁷⁾。トモセラピーはCT装置とリニアックの動作環境を融合し、寝台を頭尾方向に移動させながら治療用ファンビームを回転照射するものである。これにより、頭尾方向に大きく伸展した標的体積に対し、均一な線量の付与が可能となった。今日においても白血病患者に対する全身照射 (total body irradiation: TBI) や全骨髄照射 (total marrow irradiation: TMI) など広範囲の照射に対して特に有効に利用されている。一方で、治療用ファンビームをバイナリーコリメータで成形しつつ slice by slice で照射するために、モニター値 (monitor unit: MU) の増大に伴う散乱線の増加および治療の長時間化という問題については、さらなる開発が期待されている。

トモセラピーを通常のリニアックで模擬すべく、95年Yuは強度変調回転照射 (intensity-modulated arc therapy: IMAT) を提案した⁸⁾。IMATはガントリ回転速度と線量率を一定に保ち、MLCのダ

イナミック制御と多重アークによって強度変調を実現した。しかし、分割照射の場合に1回の処方線量が回転数に上限を与えるため、十分な強度変調を実現できないという問題があった。また、アーク数が増加することにより、結果的には治療時間の短縮には至らなかった。さらに、当時IMATに対する商用の治療計画装置が存在しなかったこともあり、IMATは普及しなかった。

以上のような状況の下、2008年にOttoによって提案されたのが、volumetric modulated arc therapy* (以下、VMAT) である⁹⁾。VMATは、ガントリ回転位置・速度、MLC位置・速度、および線量率を変数として、臨床的に望ましい三次元線量分布を逆問題解法によって成形する連続回転照射法である。これにより、少数のアーク数でも複雑な三次元線量分布が実現できるようになった。特筆すべきはその治療時間の短さである。同年、バリアン社^{9), 10)}とエレクタ社¹¹⁾によってVMATの臨床運用可能な治療計画装置および照射装置が発表されて以降、VMATは安全かつ患者負担の少ない治療法として、高精度放射線治療の中軸を成してきた。本稿では以降、VMATを用いたIMRTの実際について、その適応やメリット、留意点について述べる。

* IMATの「強度変調回転照射」と対比できる、VMATの適切な日本語訳はないと思われる。2008年の春に開催された欧州放射線腫瘍学会 (ESTRO) において、エレクタ社のブースには「volumetric intensity-modulated arc therapy (VIMAT)」というパネルが出展された。「体積的な強度変調回転照射」という適切な日本語訳を持つものである。しかし2008年のOttoの論文からはintensityの部分が消されており、英語として完備ではないものの、学術用語として普及することとなった。