Ⅱ Beyond Precision：高精度放射線治療のさらなる展開

5. マーカーレス動体追尾VMATの開発と将来展望

中村 光宏*1／岸 徳子*2／梅川 徹*3／櫻井 雄太*3／清水優琴音*1
岩井 貴寛*2／米山 正洋*2／足立 孝則*2／川田 晃平*4／椋本 宜学*5
加藤 寛之*3／小島 徹*3／高橋 邦夫*3／吉村 通央*2／溝脇 尚志*2

＊1 京都大学大学院医学研究科医学物理学 ＊2 京都大学大学院医学研究科放射線腫瘍学・画像応用治療学
＊3（株）日立ハイテクヘルスケア事業統括本部 ＊4 京都大学医学部附属病院放射線部
＊5 大阪公立大学大学院医学研究科放射線腫瘍学

呼吸性移動を伴う腫瘍に対する高精度放射線治療では，腫瘍位置変動の管理が重要である。これまで，息止め照射，呼吸同期照射，動体追尾照射など，さまざまな呼吸性移動対策が開発されてきた[1]。なかでも動体追尾照射は，自由呼吸下で刻々と変化する腫瘍位置に治療ビームを追従させる方法である。

現在，強度変調回転放射線治療（VMAT）は，呼吸性移動を伴う腫瘍にも広く用いられている。一方，呼吸性移動が大きい症例や呼吸パターンが不規則な症例では，治療計画時と照射時で腫瘍の移動が異なることがある[2]。また，動的な強度変調と腫瘍運動とのinterplay effectにより，実際の投与線量が計画線量から乖離する可能性がある[3]。このため，呼吸性移動を適切に管理し，計画した線量を正確に投与することが重要となる。

そこでわれわれは，VMATと動体追尾を組み合わせ，腫瘍近傍に留置した金属マーカーを指標として自由呼吸下で移動する腫瘍を追尾する動体追尾VMATを実現した[4]。この追尾方式は，いわゆるハイブリッド追尾に位置づけられる。kV-X線画像から得られるマーカー位置を内部位置情報として，外部呼吸信号との関係から患者固有の相関モデルを構築し，照射中には外部呼吸信号をこの相関モデルに入力することで三次元腫瘍位置をリアルタイムに推定し，治療ビームを追従させる。

一方，体内マーカーを用いた動体追尾照射には，留置に伴う侵襲性やマーカーの変位，脱落などの課題がある[5]。こうした課題を踏まえ，動体追尾VMATのさらなる発展として，体内マーカーに依存しないマーカーレス動体追尾VMATの開発を進めている。本稿では，マーカーレス動体追尾照射の現状を概説するとともに，マーカーレス動体追尾VMATの研究概要と今後の展望について述べる。

体内マーカーを用いた動体追尾照射とその課題

動体追尾照射における腫瘍位置の把握には，腫瘍近傍に留置した金属マーカーなどをサロゲートとして追跡する方法が広く用いられてきた。kV-X線画像上で視認性の高い体内マーカーを利用することで，腫瘍そのものが不明瞭な場合にも腫瘍位置を推定できる。一方，体内マーカーには，留置手技そのものに由来する問題と，腫瘍のサロゲートとして用いることに由来する不確実性がある。以下に，主な3つの課題を示す。

第1に，マーカー留置には侵襲的処置を要する。Scherらは肺，肝，膵，副腎などへのマーカー留置について報告し，肺では気胸，肝では被膜下血腫などの有害事象を認めている[5]。また，マーカーの脱落には術者間差があり，経験の蓄積によって減少することから，留置手技には学習曲線が存在する。

第2に，留置したマーカー自体が変位・脱落すれば，マーカー位置から推定される腫瘍位置の信頼性が損なわれる[6]。

第3に，マーカー自体に変位，脱落がなくても，腫瘍との相対的位置関係が一定とは限らない[7]。呼吸に伴う両者の移動方向や移動量は必ずしも一致せず，周囲臓器の変形も加わるため，腫瘍 -

〈0913-8919/26/￥300/論文/JCOPY〉