

1. 粒子線治療の現状と今後の展望

出水 祐介 兵庫県立粒子線医療センター附属神戸陽子線センター放射線治療科

粒子線治療は、光子線による放射線治療と比較し線量分布の優位性を認識されながらも、施設数の少なさ、治療費の高さから症例集積が進まず、エビデンスが生まれにくい環境であった。そのため、長年、先進医療に据え置かれ、普及が進まなかった。しかし、2010年代に入り、施設数の増加に加え、以前より導入していた施設から多くの論文が発表されるようになり、日本放射線腫瘍学会主導の多施設共同研究の報告を経て、ついに2016年4月に、小児腫瘍に対する陽子線治療と骨軟部腫瘍に対する重粒子線治療が保険収載された。これを皮切りに、2018年4月には、コモンキャンサーである前立腺がんを含む複数の疾患が保険収載され、多くの患者が粒子線治療を受けられる時代になった。

粒子線治療とは

粒子線治療とは、放射線治療の一種であるが、通常の放射線治療で使用されるビームはX線であるのに対し、粒子線治療は陽子線や炭素イオン線といった、まったく性質の異なるビームを使用する。なお、炭素イオン線は単に炭素線とも呼ばれ、臨床現場で用いられる重粒子線と同義である。

X線やγ線は光子線と呼ばれる光の波で電荷や質量を持たないが、荷電粒子線である陽子線や重粒子線は電荷や質量を持つ(図1)。光子線は体表近くで線量が最大になり、深部に行くに従って減衰していくのに対し、粒子線は体表近くでは比較的低線量であるが、深部で停止する直前に最大のエネルギーを放出する(ブラッグピークと呼ばれる)という物理特性を持つ。このブラッグピークを腫瘍の位置・サイズに合わせて拡大すると(拡大ブラッグピーク=spread-out Bragg peak: SOBP)、周囲の正常組織への線量を低く保ったまま、腫瘍へ高線量を照射することができる(図2)。

重粒子線は、電離密度が高い、高線エネルギー付与(linear energy transfer: LET)放射線に分類され、直接作用によるDNA損傷の比率が高いため、DNA二重鎖切断(修復されにくく、細胞死の原因となる)をより引き起こしやすい。このことにより、①生物学的効果比(relative biological effectiveness:

RBE)が大きく、等物理線量を照射した場合、X線の1.2~3.5倍の効果(SOBPの位置による)¹⁾、②酸素増感比(oxygen enhancement ratio: OER)が小さく、X線が効きにくい低酸素細胞にも有効、③細胞周期依存性が小さく、X線が効きにくいS後期細胞にも有効、といった生物特性を示すため、X線抵抗性腫瘍にも効果を期待できる。なお、陽子線の生物学的効果はX線とほぼ同等(RBE=1.1)とされてきたが、近年の再検証にて、SOBP遠位ではRBEが1.7程度まで上がることが示唆されている²⁾。

粒子線治療装置は、X線リニアックと比べて非常に巨大かつ複雑である。図3に、兵庫県立粒子線医療センターの粒子線治療装置(本邦初の陽子線と重粒子線の両方が使用可能な装置)を示す。イオン源で発生させた陽子または炭素イオンを線形加速器、次いでシンクロトロンで光速の70%まで加速した後、各照射室まで輸送する。シンクロトロンの直径が30m、垂直照射ポートおよび45°照射ポートへのビーム輸送ラインの高さが20m、回転ガントリ(陽子線専用)の直径が11mである。固定ポート室を3室、回転ガントリ室を2室備えるが、ビームは1室ずつにしか輸送できないため、各室で患者セットアップを効率良く行い、ビームを次々と切り替えて照射していく。近年、粒子線治療装置(特に陽子線)のコンパクト化が進んでいるが、敷地面積の取れない都市部の施設