

## 放射線科学

# 粒子線治療の原理と適応

川村 麻里子

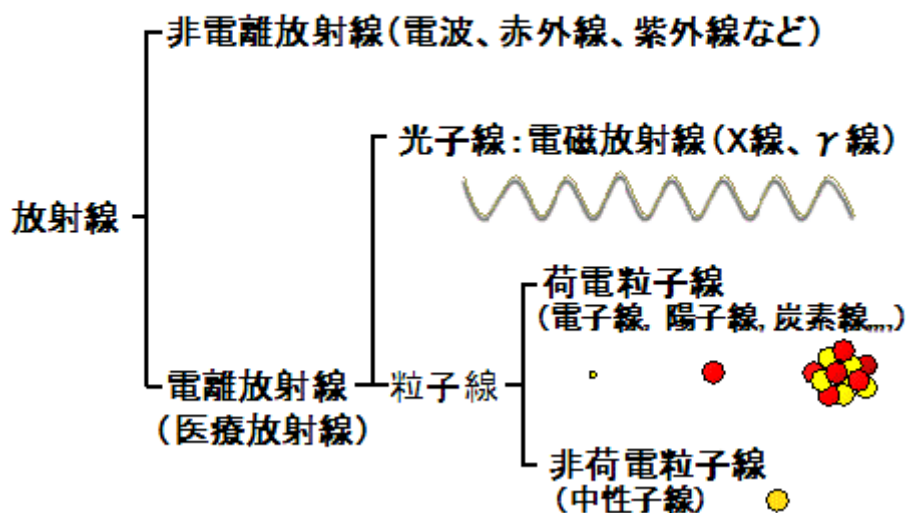
### はじめに

「粒子線」「陽子線」「重粒子線」「炭素線」…近年よく耳にするようになった言葉だが、それらを混同する他科の医師や患者も少なくない。「放射線科」というだけで、治療医でなくとも何かと質問される機会も増えてきているので、本稿では粒子線の原理や粒子線治療の適応など、私見を交えて述べる。

### 粒子線の種類

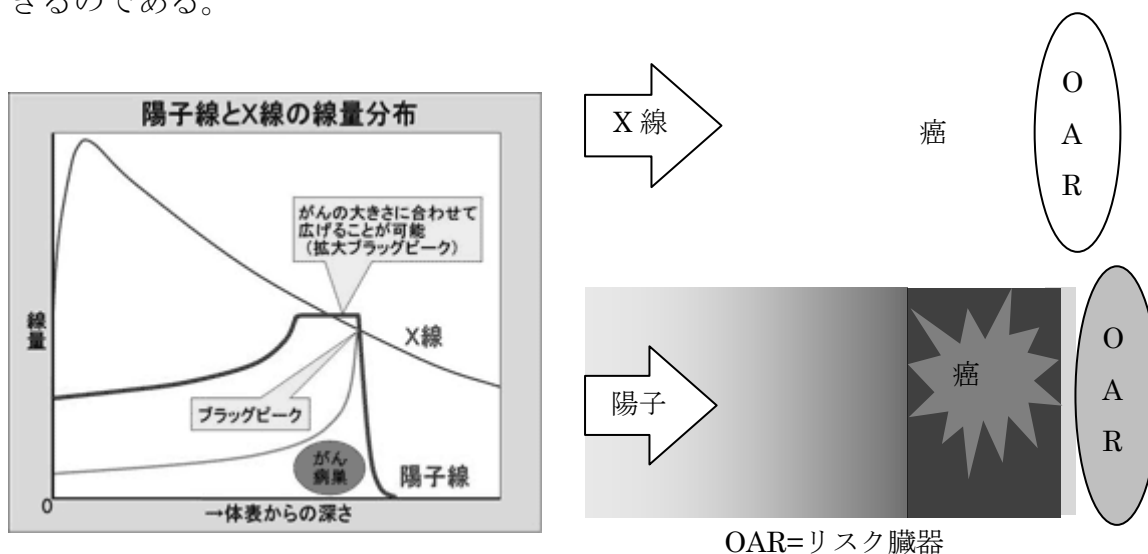
粒子線というと従来の放射線より強そう、副作用も大きそうなどと特別視されることが多いが、本質的には放射線治療である。X線やガンマ線は光子線と呼ばれる光の波で質量も電荷もない。一方、粒子線にも種々あるが、粒子線治療というと陽子線や炭素イオン線を指すことが一般的であり、電荷を持つ。陽子の質量を1とすると炭素イオン線の質量はその12倍なので炭素イオン線を指して「重粒子線」などと呼ぶこともある。

## 放射線の種類



## 粒子線の特徴

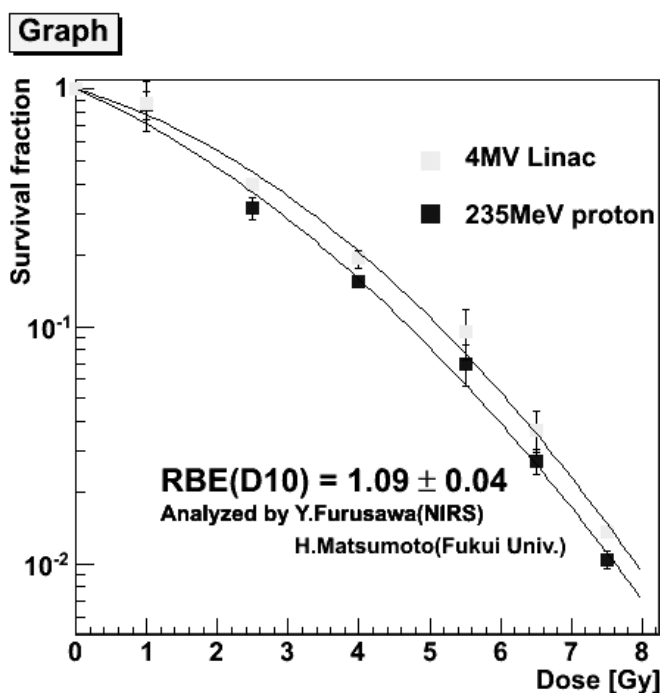
粒子線の最大のメリットは「止まる」点である。粒子線を光の約 50–65%の速度 (150~235MeV) まで加速し、水の中に打ち込むと水の阻止能 (≒抵抗) により一定の深さで停止するが、停止する直前で線量付与が最大となるブラッグピークを有する。つまり、入射エネルギー (速度) を調整することで体内にある腫瘍の位置で粒子線を止めることが可能なため、腫瘍より深部の被曝を 0 にできるのである。



次に、「生物学的効果比 (Relative biological effectiveness)」について述べる。生物学的効果比とは、粒子線治療の線量の記述で〇〇Gy (RBE) などと表記される。RBE とは同じ物理学的線量を投与した場合における細胞を殺す効果を培養細胞で比較したものである。臨床的には炭素線では X 線の約 3 倍、陽子線では 1.1 倍とされる。X 線は物理線量=生物線量なので 1Gy=1Gy (RBE)、陽子線は 1 Gy=1.1Gy (RBE)、炭素線は 1Gy=2~3Gy (RBE) となる。つまり、「X 線に置き換えると〇〇Gy 相当」というのが Gy (RBE) である。例えば、陽子線で 2Gy (RBE) 照射したとすると、その際の陽子線の物理線量は約 1.8Gy なのだが、線量表記は 1.8Gy と記載するのではなく、2Gy (RBE) と記載することが一般的である。X 線というところの 2 Gy 相当、ということになる。

粒子線と光子線とでは細胞に対する作用機序が少し異なるために、同じ物理線量でこの様な差が出る。両者とも、細胞の DNA を傷つけ殺細胞効果を示すのだが、電磁波である X 線などの光子線は水と反応し、そこから発生するフリーラジカルが DNA を障害する間接作用が主であるのに対し、粒子線では粒子が DNA を直接障害する直接作用が主体とされる。特に炭素線は直接作用による DNA 損

傷比率が高い。そのことから容易に想像できるが、細胞環境によって、効果比が異なってくる可能性がある。現在は一律に RBE1.1 を陽子については採用していることが多いが、低酸素環境など、フリーラジカルが発生しにくい環境の病変については陽子線の効果比は 1.1 以上であるとの報告も散見され、X 線抵抗性腫瘍については更なる効果が期待される一方で、正常細胞についてはおおよそ 1.1 換算でよいのではないかと考えられている。



生物学的効果比：X線と陽子線の比較

### 粒子線治療の適応

粒子線治療の特に良い適応疾患としては、

- ① X線抵抗性腫瘍：悪性黒色腫（粘膜）、腺様嚢胞癌、骨軟部肉腫など
- ② 周囲臓器の被曝が問題となる場合：頭蓋底腫瘍（脳、脳幹、視神経など）、鼻副鼻腔癌（脳幹、視神経、眼球、上顎骨など）、肝予備能の低い肝癌、小児悪性腫瘍（成長障害、二次発癌）などが挙げられる。

また転移病巣への治療は、予後の改善には寄与しないかもしれないが、脊髄への線量制約のため、従来の X 線治療では十分な腫瘍制御線量を投与できない脊髄転移や椎体転移などへの緩和照射や、分子標的薬の放射線併用に伴う有害事象増悪を回避したい場合（例えば消化管への被曝を 0 にする）などで有用かもしれない。その他にも、一部の施設では臨床試験も行われ、X 線治療あるいは化学療法との併用により進行病期の肺癌、食道癌、頭頸部癌、膀胱癌などの難治

癌への適応拡大も行われつつある。

### 粒子線治療に対する私見

粒子線治療について否定的な意見は少なからずある。しかし、否定的な意見は「同等の効果なのに高価すぎる」という点に集約されると感じる。冒頭でも述べたが、腫瘍背側の放射線被曝を0にできることは粒子線治療における最大のメリットである。医療の発展に伴い、担癌患者が「癌と共存」し長期生存するケースも少なくない。しかし、癌は時に生命にすぐには関わらなくとも、生活の質を著しく下げることがあり、その為に局所治療が望ましいこともある。分子標的薬の使用や複数回の照射、あるいは人工物を使用した固定術後などでは、従来のX線を用いた追加照射が非常に難しい場合も少なくない。このようなケースでは、恐らく、生命予後という点において、粒子線の優位性を証明することが困難であるが、患者の緩和には粒子線治療が有用であることも多い。粒子線治療は保険適応になっておらず、確かに高価である。しかし、加速器や治療装置そのものの縮小に成功し、高精度なX線治療装置と変わらないくらいの建設コストも現実味を帯びてきた。技術に対するコストというものは不変的なものではなく、日々大きく変動するため、いつか、粒子線治療を緩和でも使用できるくらいにコストが下げられる日がくることを願いたい。

### 謝辞

本年度より名古屋大学に移動になり、福井での陽子線研究の継続が難しくなったところ、貴財団の研究助成に御採択いただき継続できることになり、この場をお借りし、林誠太理事長、佐久間貞行理事を始め関係者の皆様に心より感謝申し上げます。また、本稿をまとめるにあたり、ご助言いただきました名古屋大学放射線科、福井県立病院陽子線がん治療センターの諸先輩方にも御礼申し上げます。

(名古屋大学医学部 放射線医学教室)