



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スポットスキニング陽子線治療における新型ミニリッジフィルタで形成した台形ブラッグカーブの重畳による拡大ブラッグピーク(SOBP)作成方法 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	横川, 航平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13997号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78343
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kouhei_Yokokawa_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 横川 航平

審査担当者 主 査 特任教授 梅垣 菊男

副 査 教 授 富岡 智

副 査 准教授 松浦 妙子

学位論文題名

スポットスキャン陽子線治療における新型ミニリッジフィルタで形成した台形ブラッグカーブ
の重畳による拡大ブラッグピーク (SOBP) 作成方法

(A New Spread-Out-Bragg-Peak (SOBP) Formation Method by Superposing Trapezoidal Bragg
Curves Formed by a New Designed Mini-ridge Filter for Spot Scanning in Proton Beam Therapy)

本学位論文は、陽子線治療において効率的で高精度な線量分布を形成する方法を新たに提案し、
検証したものである。

陽子線治療は、がん治療法の一つである放射線治療の中で近年最も期待されている治療法である。陽子線は、患者の体内を通過する際に、入射エネルギーに対応した特定の深さにおいて放射線量がピークになる物理的特徴 (ブラッグピーク) を持ち、標的の腫瘍に線量を集中しつつ、より深部には影響を及ぼさない理想的な物理的特性を持っている。これをがん治療に応用することで、腫瘍に対して可能な限りの線量を与える一方で、極力正常組織を守る、低侵襲な治療法になる。スポットスキャン法は、加速器から出射した細い陽子ビームをそのまま用い、照射方向に垂直な平面方向には、二つの走査電磁石によりビームを走査し、照射方向に対しては入射エネルギーをエネルギーレイヤーと呼ばれる奥行き方向の複数の層に分割して重畳して照射することで、腫瘍形状に合わせた線量分布を実現する。ここで腫瘍の奥行き方向の幅に合わせて形成する均一な深部線量分布を拡大ブラッグピーク (SOBP) と呼ぶ。

スポットスキャン法で線量分布を適切に形成する際の重要な課題は、SOBP 作成時に、奥行き方向に高い線量均一性を実現し、終端部の急峻な線量低減特性 (Distal Falloff) を保ちながら、必要な入射エネルギーレイヤー数を減らすことである。これらの特性の実現は、しばしば困難なトレードオフ問題になる。特に浅部照射時の低エネルギー領域においては、ブラッグピークが急峻になるため、高い線量均一性を得るためには多数の入射エネルギーレイヤーが必要になる。照射時のエネルギーレイヤーの変更には、加速器の運転に数秒かかるため、治療時間が長くなってしまう。エネルギーレイヤー数を低減するために、従来は一般的なリッジフィルター (Ridge Filter: RF) 等を用いて陽子を深さ方向に散乱させて急峻なブラッグピークを広げる方法がとられてきたが、ブラッグピークがガウス分布形状に広がってしまうために、終端部の Distal Falloff が鈍ってしまい後方の正常組織へ線量分布が広がってしまう、という問題点があり、このトレードオフ問題を解決するのは難しかった。

本研究では、低エネルギー領域を対象に、上記のトレードオフ問題を解決する新しい SOBP 形成コンセプトを提案し、その方法を検証した。この方法では、陽子線を新たに設計した特殊な形状を有するミニリッジフィルター (Mini Ridge Filter: MRF) に通すことで、台形ブラッグ曲線

(Trapezoidal Bragg curve: TBC) という修正された深部線量曲線を生成する。この TBC は、中心部が平坦でその両側に線形の斜面を持つ、いわば SOBP の理想形に近い基本形状を持ち、台形の斜面部を互いに一致するように重畳することで新たに拡張した台形を作成できる。これにより、TBC が SOBP の構成ユニットとなり、TBC を接続することで原理的に SOBP の深部線量分布均一性を保ち、終端部の急峻な Distal Falloff の幅を維持し、必要なエネルギーレイヤー数を低減する事が可能になる。この新しい SOBP 作成方法により、複雑な SOBP の物理的特性が、基本的に TBC の台形形状精度と線形パート幅の値のみで制御可能になった。SOBP の線量分布は、実際の陽子線治療施設のビームラインを模擬した照射体系を対象に、GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーションにより検証した。

本研究により、SOBP を形成する新たなコンセプトが実現すると共に、実際にトレードオフ問題を克服して、高い線量均一性の実現、終端部の急峻な線量低減特性の保持、必要な入射エネルギーレイヤー数の低減を同時に満足する SOBP を形成することが可能になった。この方法は、低エネルギー領域を対象に唯一の MRF を用意することで実現が可能で、全ての陽子線スポットスキャンニング治療装置に適用できる。今後の陽子線治療の高度化に広く適用されることが期待される。

これらの研究成果は博士の学位を与えるのに十分な高い価値を持つものであり、医学物理分野、特に陽子線治療の研究分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。