



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 横川 航平

学 位 論 文 題 名

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

(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)

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。スポットスキニング法は、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 (Spread-Out-Bragg-Peak: SOBP) と呼ぶ。

スポットスキニング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 (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 (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 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。

第一章では、本研究の背景である低エネルギー領域の陽子線の線量分布特性を説明し、SOBP の作成原理と SOBP の 3 つの物理的特性である線量均一性、distal falloff、エネルギーレイヤー数間にあるトレードオフ問題について述べた。次に、その課題に対する従来の対応方法と残る課題につ

いて説明した。最後に、本研究の目的と提案する新しい SOBP 作成コンセプトについて述べた。

第二章では、新しい概念である台形ブラッグ曲線 TBC の重畳による SOBP の具体的作成方法と物理的特性の特徴について述べた。SOBP の構成ユニットとする TBC の形状は、主要な深部線量分布形状を 3 つの線形パート (上り傾斜・平坦・下り傾斜) から成る台形状の深部線量曲線として、各パートの幅を一定とした。この台形状の TBC を、対応するエネルギーレイヤーで重畳することにより SOBP を形成する。この時、一つの TBC の台形片斜面の下り傾斜部と重なるもう一つの TBC の台形片斜面の上り傾斜部の線量の和がキャンセルアウトして平坦になるように、各 TBC の照射ビームウェイトを決定する。このように TBC を使った新たな重畳方法を用いることで原理的に SOBP の深部線量分布均一性 (接続された TBC の台形平坦部の平坦度) を保ち、終端部の急峻な Distal Falloff (終端の TBC の台形下り傾斜) の幅を維持し、必要なエネルギーレイヤー数 (TBC の台形線形パートの幅で制御) 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 の台形状精度と線形パート幅の値のみで制御可能になった。

第三章では、提案した TBC の台形状を高精度に作成するための特殊な MRF の設計方法について述べた。初めに MRF による深部線量曲線の変形原理を述べ、設定すべき MRF の構造パラメータ及びそれらの設計上の考慮すべき制約条件を決定した。次に、台形状を目的関数とした MRF の構造パラメータの最適化手順を、陽子線散乱の理論式を用いて構築した。その手順に沿って、目標とする低エネルギー領域を対象として、TBC を実現する MRF の形状を設計した。設計した MRF は低エネルギー領域で高い形状精度を持つ TBC を形成可能である。さらに、設計した MRF について、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に組み込み、GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーションを実施して、理論計算による最適化と同等の TBC 形状が得られることを検証した。

第四章では、第三章で作成した TBC を用いて、エネルギー領域 (標的深さ) をパラメータとして、解析的に SOBP を作成し、それぞれの物理的特性を定量的に評価した。また、急峻なブラッグピークを持つ低エネルギー領域の深部線量曲線、従来の RF でガウス分布形状に広げた深部線量曲線で同様な SOBP を作成し、定量的な比較評価を行った。その結果、TBC で形成された SOBP は、十分な線量均一性、急峻な distal falloff、大幅に低減したエネルギーレイヤー数を実現した。従来の急峻な深部線量曲線を使用した場合と比較すると、エネルギーレイヤー数を $1/3$ から $1/2$ に減らすことが可能になり、治療時間を大幅に低減できる見通しを得た。また、従来の RF を用いて広げた深部線量曲線を使用した場合と比較した場合は、distal falloff を大幅に改善した。以上の比較検証より、TBC の重畳による SOBP 作成方法が、従来解決が困難であったトレードオフ問題を克服したことを実証した。

第五章では、TBC によるスポットスキニング照射によって均一な三次元線量分布が作成可能か検証した。TBC に陽子線の側方向へ持つ二次元ガウシアン強度分布を組み込むことで三次元線量分布を定義し、水ファントム内のスポットスキニング計算を解析的に行った。その結果、作成する三次元照射野の形状に合わせて各ビーム (三次元 TBC) の照射量を適切に設定することでターゲットの形状に沿った均一な線量分布が作成可能であることを確認した。

最後に第六章では、全体の結論を述べ、提案したコンセプト、方法の今後の展望を述べた。

本研究により、陽子線スポットスキニング治療で深部線量分布を形成する際に課題であった、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たす新たな SOBP 形成方法が実現した。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。