

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 スポットスキヤニング陽子線治療における
物理コリメータの有用性の検討と臨床応用

氏名 安井 啓祐

論文内容の要旨

【背景・目的】

陽子線治療の照射法は、大きく分けると散乱体法とスキヤニング法に大別される。散乱体法は散乱体を用いて陽子線を拡大し、ボラスやコリメータを用いて患者の腫瘍形状に成形して照射を行う手法であり、これまで多くの施設で用いられてきた照射法である。一方スキヤニング法では、細いペンシル上の陽子線を偏向マグネットにより任意の位置に偏向し、エネルギーの変化によりブラッグピークの深さを変えることで腫瘍を点で塗りつぶすように照射することができ、複雑な形状の腫瘍にもより線量を集中させることが可能となる。近年の加速器システム、照射制御装置、治療計画装置の技術的な発展に伴い、患者固有のデバイスが不要、中性子が少ないなど様々なメリットを持つスキヤニング法が主流となりつつある。既存の手法と比べてメリットの多いスキヤニング法ではあるが、その課題として、商用加速器では加速器の安定した稼働、ビーム効率、有効に治療ができるスポット径などの観点から、最低エネルギーが 70 MeV 程度、深さにすると 4 g/cm² 程度までの浅い領域にしか照射できない、という点が挙げられる。4 g/cm² 以下の浅い領域を照射するには吸収体を挿入するなどの工夫が必要とされるが、エネルギーの低い陽子線は空中の散乱によって拡大しやすく、吸収体などの物質が加わるとスポット径はさらに拡大し半影領域（ペナンブラ）の広がりや線量分布の悪化を引き起こす。これら浅い領域の照射と線量分布の悪化という課題を解決する最もシンプルで実現可能な手法として、吸収体とコリメータを組み合わせる手法が考えられる。吸収体とコリメータを用いることで、浅い領域の照射を行いながらペナンブラを低減し線量分布を改善することが可能となる。本研究では、80 - 20%線量幅の変化から基礎的な条件で物理コリメータを用いることによるペナンブラの低減効果を評価し、強度変調陽子線治療を用いた臨床例において周辺のリスク臓器の線量と 50%線量が与えられる領域の低減率から物理コリメータの有用性について検討を行うことを目的とした。

【方法】

本研究では、実測と治療計画装置による計算によりコリメータの有用性の検討を行った。コリメータ装着用のデバイスと装置ノズルの構造を Figure 1 に示す。実測には三次元水phantom、電離箱、二次元検出器を用い、コリメータの有無による線量分布の比較から、コリメータの有用性についての評価を行った。治療計画装置については、基本的なビーム性能の確認のため、実測と Monte Carlo 法による計算、治療計画装置による計算の一致を照射野幅、ペナンプラの広さから評価した。また治療計画装置の計算精度の健全性を担保するため、half field や U-shape など、幾つかのパターンを用いてコリメータ装着時に実測と計算が一致していることを確認した。

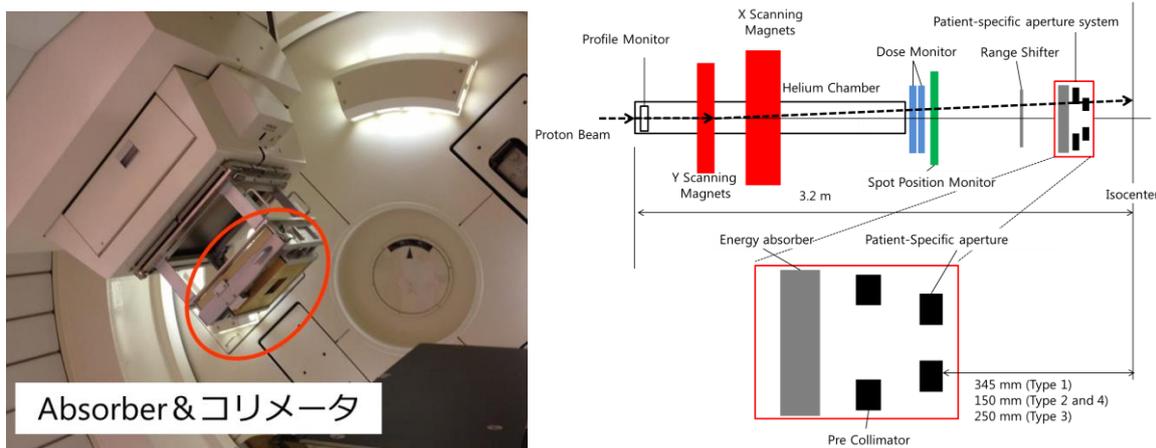


Figure 1. 左：ノズル外観、右：ノズル内構造とコリメータ装着部の拡大図

臨床的な検討としては、無作為に選択された頭頸部 10 症例において、強度変調陽子線治療を用いた際のコリメータ有無による線量分布の比較を行った。ターゲット領域に同等の線量を投与するプランを作成し、周囲のリスク臓器の最大線量又は平均線量と、50%線量域で表される線量の広がりと比較し、コリメータを入れることで低減される線量の割合からコリメータの有用性を検討した。それぞれの低減率については、[コリメータなしの最大線量、平均線量(%)または 50%線量域(ml)] - [コリメータありの最大線量、平均線量(%)または 50%線量域(ml)]により計算した。実臨床では腫瘍の体積や深さ、装置間の干渉等によりコリメータの使用が制限されるため、本研究では臨床的に可能な限りコリメータを使用したプランと使用しないプランで比較を行った。

【結果】

コリメータを使用した線量分布の比較では、患者体表近傍でコリメート可能なデバイスで最も大きな効果が得られ、139.3 MeV のビームにおいて、線量分布の 20 - 80%を指標としたラテラルペナンプラは 18.8 mm から 5.6 mm となり、およそ 70.2 %の改善が見られた。低エネルギーのビームでは散乱による影響が大きいため効果が少なくなるが、57.7 %ペナンプラが小さくなった。また、患者体表から離れたデバイスにおいても 30%以上ペナンプラが改善し、腫瘍周辺の線量分布の低減が可能であることが示唆された (Figure 2)。基礎的なビーム特性としては、吸収体を挿入した場合のビームサイズは最大で 26.7 mm となり、吸収体を挿入しない場合は最大で 13.8 mm であった。スポット径は計算と実測で 1.5 mm 以内の差であり、よく一致した。また深さ方向の分布、飛程についても計算と実測は 0.8 mm 以内で一致した。空中の照射野幅は低エネルギーでは 2.5 mm 以内、高エネルギーでは 1.0 mm 以内の一致となった。Half field や U-shape といった不整形照射野においても計画装置と実

測はよく一致しており、臨床プランの検証を行うには十分な計算精度が担保できた。一方で、コリメータからの散乱線については計画装置による計算では加味されておらず、線量分布の肩の領域では差が見られ 2.5%程度の線量上昇が確認された。

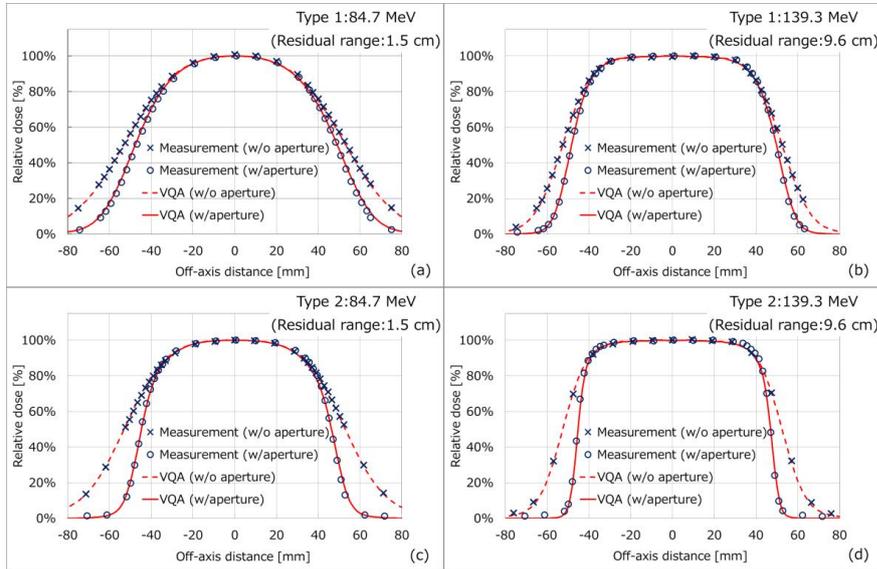


Figure 2. コリメータ有 (w/), コリメータなし(w/o)それぞれの実測値、計画値の比較 (a)、(b)は最も体表面から距離が遠くなる Type1、(c)、(d)は最も距離が近くなる type2 システムを用いた場合の 84.7 MeV と 139.3 MeV それぞれの分布

Figure 3 に強度変調陽子線治療時の有用性について結果をまとめる。周辺のリスク臓器の比較において、最大線量で評価を行った臓器については平均で 4.0%、最大 25.7%の線量低減効果が見られた。また平均線量で評価した臓器では平均 17.3%、最大 46.3%の線量低減効果が見られた。周辺の線量の広がりをも 50%線量域で比較をすると平均で 15.6%、最大で 38.9%減少した。一方で患者との干渉や照射可能な深さの制限からコリメータの使用が制限されるプランも見られ、50%線量域の差が 1.0%程度で効果が少ないプランも見られた。これらのプランの機器使用条件を見ると、患者体表面に近いデバイスを全門で使用したプランにおいて最も大きな効果を発揮し、4 門中 2 門のみでコリメータ装着が可能となるプランにおいては前述のとおり 50%線量域でも大きな差は見られなかった。

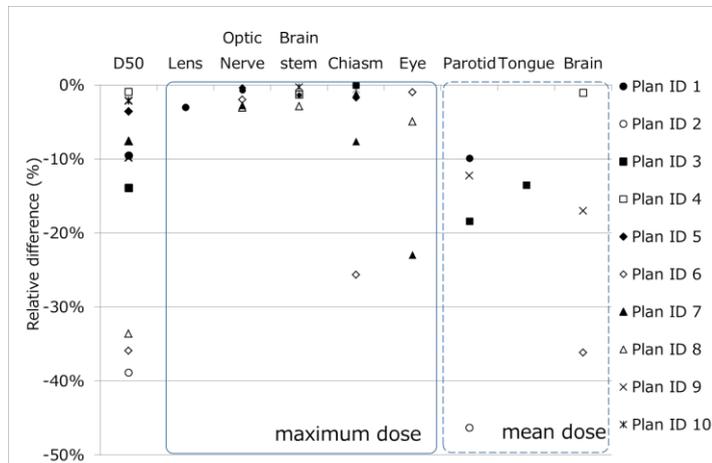


Figure 3. 強度変調陽子線治療にコリメータを適用した場合の線量低減率

【考察・結論】

本研究では、陽子線スポットスキヤニング照射で物理コリメータを用いることについて、基礎的なプランと臨床プランを用いて検討を行い、その有用性を示した。その結果から、強度変調陽子線治療を用いた場合においても浅い領域の照射に対して、腫瘍制御の向上、二次的な障害発生の低減を目的として物理コリメータを利用することは有用な手段であることが明らかとなった。また、治療計画装置はコリメータ使用時にも実測とよい一致を示した。一方で、物理コリメータを使用することでスキヤニング法の利点の1つであるボラスやコリメータなど患者固有のデバイスが不要となる、という点が失われ、必ずしも最適な手法ではないことも考えられた。また腫瘍の深さや場所によって使用が制限されることからその他の手法と組み合わせその効果を検討しながら利用していく必要があり、より効果を高める最適化計算など今後もさらなる検討が今後も必要である。