

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K19214

研究課題名（和文）スキャニング照射法の高精度化に向けたハニカム型リッジフィルタの開発

研究課題名（英文）Development of a new ridge filter with honeycomb geometry for scanning system in particle radiotherapy

研究代表者

丹正 亮平（Tansho, Ryohei）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所加速器工学部・研究員

研究者番号：80735126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000 円

研究成果の概要（和文）：粒子線がん治療においては、腫瘍への線量集中性を向上させるために、ビームサイズを微細化させる傾向にある。この微細化されたビームにおいても、設計通りにエネルギーを変調できる2次元ハニカム型リッジフィルタを開発した。従来の1次元階段型リッジフィルタでは、ビームサイズが小さくなると目標とする線量分布を形成できなくなるが、2次元リッジフィルタではより小さいビームサイズでも目標線量分布を再現できることを線量分布計算から確認できた。目標線量分布の再現性は、2次元リッジフィルタを製作し、実際に照射試験を行った結果からも確認できた。

研究成果の概要（英文）：For particle radiotherapy, the current trend is to decrease lateral beam size to improve dose conformity in a tumor. We have developed a new ridge filter with 2-dimensional honeycomb geometry to simultaneously achieve both a decrease in lateral beam size and the desired energy modulation. We calculated dose distribution and found that the beam with smaller lateral size passing through a conventional ridge filter with 1-dimensional stepped structure cannot reproduce the designed dose distribution. However, we confirmed that using the new 2D ridge filter, the dose distribution was accurately reproduced. We actually manufactured the new ridge filter and also experimentally confirmed the reproducibility of dose distribution by the measurement.

研究分野：医学物理学

キーワード：リッジフィルタ スキャニング照射法 ビーム微細化 ハニカム型構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 炭素イオン線を使ったがん治療は、炭素イオン線の持つ特徴的な深部線量分布を利用し、その線量ピーク（ブラッグピーク）を重ね合わせることで腫瘍に対して均一な線量分布を作る。線量分布は、加速器から取り出された炭素イオン線を3次的に走査するスキャンニング法によって形成される。

(2) 炭素イオン線のブラッグピーク幅は非常に細く、そのままではこれを重ね合わせる時に個々のブラッグカーブの深部方向の僅かな配置誤差が線量分布の均一性を大きく悪化させる。そのため、実際の治療ではリッジフィルタと呼ばれるエネルギー変調装置を使って、ブラッグピークの幅を拡大させている。

(3) リッジフィルタは一般的に1次元階段構造のリッジバーを1ユニットとし、これを一定間隔で並べた周期構造をもつ（図1）。ビームが通過する位置によってリッジバーの厚さが異なるため、ビームのエネルギー損失が異なり、エネルギーが変調される。リッジフィルタを使ったエネルギー変調では、ビームが複数のユニットをカバーする空間的な拡がりが必要だが、スキャンニング法では、腫瘍への線量集中性を高めるためにビームの更なる微細化が世界的なトレンドであり、その大きさはリッジバーの1~2ユニットをせいぜい通過する程度になる。よって現状では、微細化されたビームにおいて要求どおりのブラッグピーク幅を形成できない。

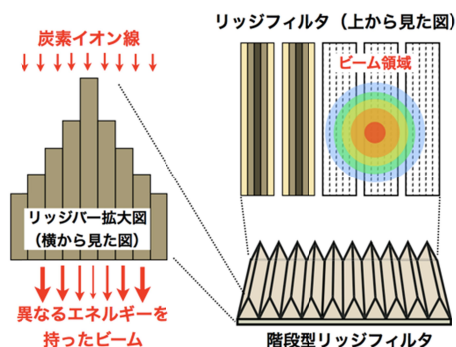


図1 階段型リッジフィルタの構造

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、微細化されたビームにおいても、ブラッグピーク幅を要求どおりに拡大させる新たなリッジフィルタを設計することである。微細化されたビームでも多くのリッジバーユニットを通過するように、従来の階段型リッジフィルタの構造を根本的に見直す。具体的には、1次元的な周期構造を2次元的な構造に拡張し、図2に示すような六角形のリッジバーを整列させたハニカム型リッジフィルタの開発を目指す。

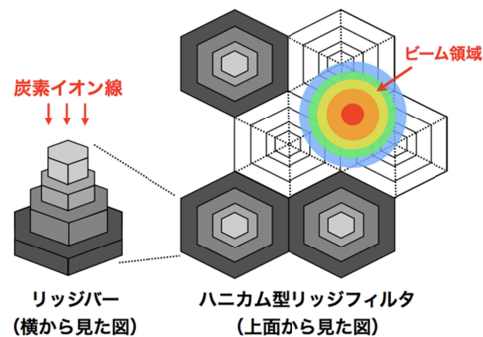


図2 ハニカム型リッジフィルタの構造

3. 研究の方法

(1) 最初にハニカム型リッジフィルタを設計する。ブラッグピークの拡大率を決定し、指定の拡大率を形成するエネルギー変調が得られるように、ハニカム状の各段の面積、高さを決定する。比較のために、同様の手法で従来の1次元階段構造のリッジフィルタも設計する。

(2) 次に設計したリッジフィルタが、要求通りのブラッグピーク幅を形成できるか簡易モンテカルロ計算[1]で検証する。このとき、深部方向の線量分布だけでなく、側方方向の線量分布の均一性も確認する。また、シミュレーション上でビームの側方サイズを小さくし、従来のリッジフィルタを使ったときと、ハニカム型リッジフィルタを使ったときで線量分布への影響にどのような違いが現れるか検証する。

(3) 設計したハニカム型リッジフィルタを3Dプリンタを使って試作する。その後、放射線医学総合研究所のスキャンニング照射装置を使って、要求通りのブラッグピーク幅を形成できるか照射試験を実施する。照射装置下流に水槽を設置し、平行平板電離箱を使ってリッジフィルタ通過後の炭素イオン線の水中深部線量分布を測定する。

4. 研究成果

(1) 図3に目標とするブラッグピークとモンテカルロ計算で求めた深部線量分布の比較結果を示す。79 MeV/uの1本の炭素イオン線がリッジフィルタを通過したときの水中深部線量分布を計算した。(a)が従来の階段型リッジフィルタ（1D-RGF）を使った場合、(b)がハニカム型リッジフィルタ（2D-RGF）を使った場合の比較結果である。ビームサイズ（RMS値）をリッジバーの周期間隔の0.3倍とした。図3では、ビームの入射位置とリッジバーの相対的な位置を変えて線量分布を計算している。図3(a)に示すように、1D-RGFを使用したときは、入射位置によって線量分布の形状が変化していることがわか

る。一方で 2D-RGF を使用したときは、入射位置による線量分布の違いは見られなかった(図 3(b))。ビームサイズが小さいために、1D-RGF の場合は、ビームがカバーするリッジバーの数が少なく、エネルギー変調が入射位置に依存して変化した結果と言える。

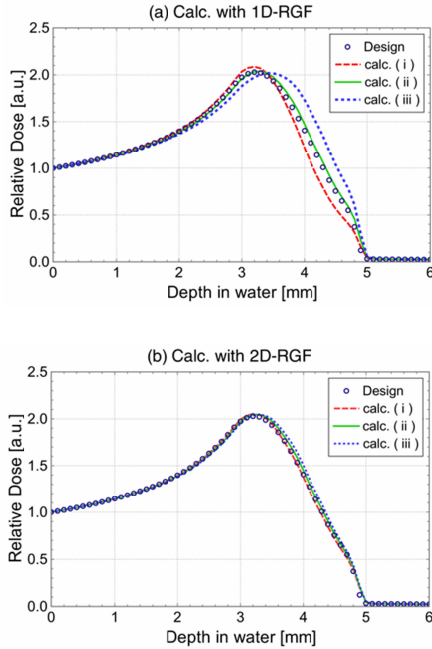


図 3 目標線量分布と線量分布の計算値の比較。(a)は 1D-RGF を使ったときの計算値、(b)は 2D-RGF を使ったときの計算値との比較である。図中の calc. (i)~(iii)はそれぞれ、ビームの入射位置をリッジバーの中心から、リッジバーの配置間隔の 0, 1/4, 1/2 倍離れたときの計算結果である[2]。

(2) 目標線量分布に対する再現性を定量的に評価するために、以下の式に示す χ^2 を定義し、ビームサイズを小さくすることによる線量分布再現性の影響を検証した。z は水深、Calc.(z)、Dsgn.(z)はそれぞれ、深さ z における線量の計算値と目標値である。

$$\chi^2 = \sum_z \frac{\{Calc.(z) - Dsgn.(z)\}^2}{Dsgn.(z)}$$

検証結果を図 4 に示す。リッジバーの配置間隔に対してビームサイズを相対的に小さくしたとき、 χ^2 の値が大きくなり(線量分布の再現性が悪く)なった。この依存性を 1D-RGF と 2D-RGF で比較すると、1D-RGF はビームサイズ/リッジバーの配置間隔の比が 0.5 を下回ると χ^2 の値が急激に大きくなるのに対して、2D-RGF は更に小さいビームサイズにおいても線量分布の再現性が高かった。この結果から、目標線量分布を再現できる最小のビームサイズは、2D-RGF を使ったときの方が小さいと言える。

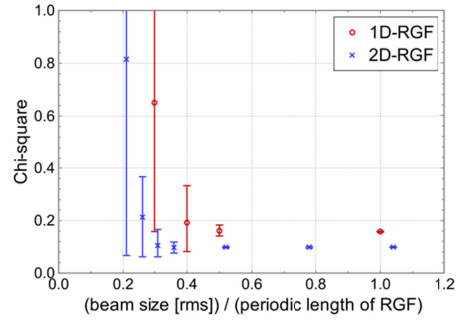


図 4 ビームサイズ/リッジバーの配置間隔の比と線量分布の再現性 (χ^2) の関係。 χ^2 が大きいほど目標線量分布に対する再現性が悪いことを示す。誤差棒はビームの入射位置を変えたときの χ^2 の最大値と最小値を表す[2]。

(3) 図 5 にリッジフィルタ通過後 300 mm 下流の位置での側方線量分布の計算結果を示す。ビームエネルギーは 290 MeV/u、ビームサイズとビーム入射角度の広がりを 2 mm rms、1 mrad rms とそれぞれ仮定した。リッジバーの配置間隔は、1D-RGF、2D-RGF とともに 2 mm とした。図 5 に示すように、それぞれのリッジフィルタ構造に依存した系統的なパターンが線量分布の不均一性として現れた。この不均一性は一般的にリッジフィルタからの距離が離れることで緩和される。側方線量分布の不均一性 (inhomogeneity) を以下の式で定義し、リッジフィルタからの距離と inhomogeneity の関係を調べた。以下の式において、 $f(x,y)$ は側方位置 (x, y) における相対的なフルエンス値、 f_{ave} は側方分布内のフルエンスの平均値、n は inhomogeneity を評価する評価点の数である。

inhomogeneity =

$$\frac{1}{f_{ave}} \sqrt{\sum_x \sum_y \frac{\{f(x,y) - f_{ave}\}^2}{n}}$$

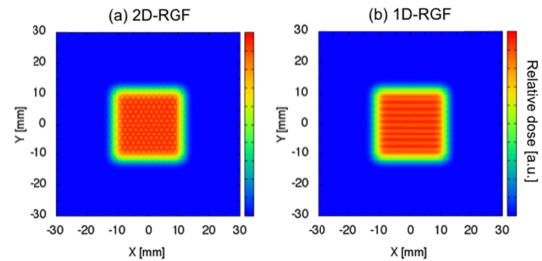


図 5 リッジフィルタから 300 mm 離れた下流面での側方線量分布の計算結果。(a) は 2D-RGF を使った場合、(b) は 1D-RGF を使った場合の結果である[2]。

図 6 にリッジフィルタからの距離と inhomogeneity の関係を示す。Inhomogeneity はリッジフィルタから一定距離離れた位置で最も大きくなるが、その後小さくなった。ビームエネルギーが低いほどより短い距離で inhomogeneity が小さくなったが、これはビームエネルギーが低いほどリッジフィルタでの散乱が大きく、粒子が側方に大きく広がるためと言える。また、2D-RGF の方が 1D-RGF と比較してより短い距離で inhomogeneity が収束した。つまり、2D-RGF を使うことで照射ポートから患者までの距離をより短くすることが可能で、それにより腫瘍への線量集中性を向上させることができる。

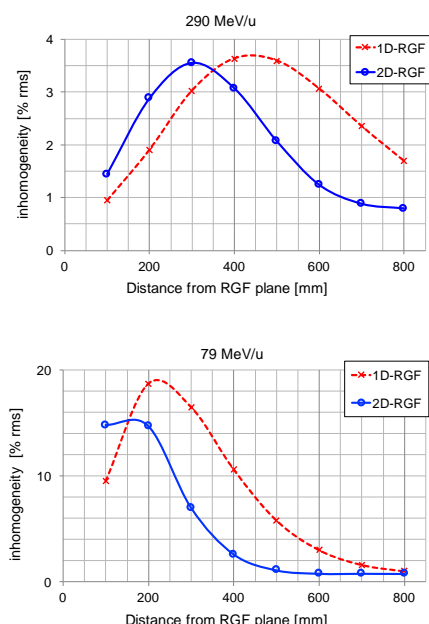


図 6 リッジフィルタからの距離と inhomogeneity の計算値との関係。ビームエネルギー290 MeV/u (上図)と 79 MeV/u (下図)で検証した。モンテカルロ計算の統計誤差は 0.8% rms である。

(4) ハニカム型リッジフィルタを実際に製作し、目標とする線量分布を形成するか実験で検証した。図 7 に製作したリッジフィルタを示す。

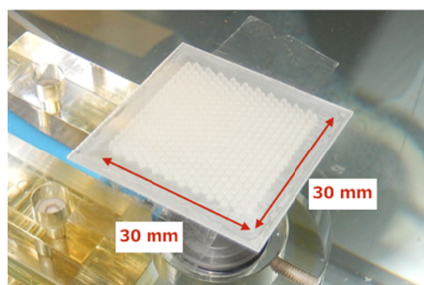


図 7 ハニカム型リッジフィルタの試作品

(5) 図 8 に深部線量分布の目標値と測定値の比較を示す。ビームエネルギー79 MeV/u のとき、ブラッグピークの拡大幅が目標とする拡大幅よりもやや大きかったが、分布の不均一性はなく、実用上の問題はなかった。

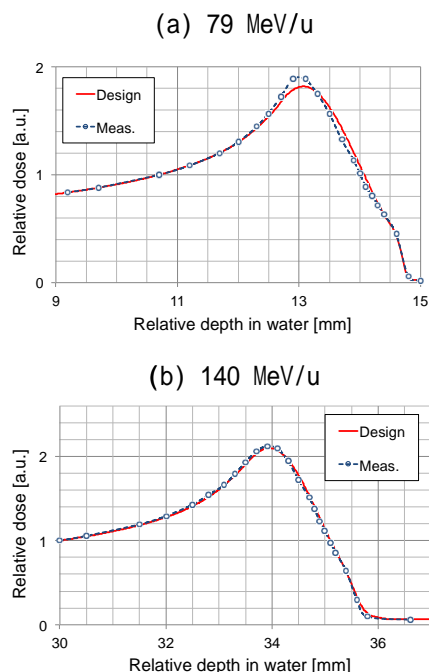


図 8 深部線量分布の目標値と測定値の比較。ビームエネルギーが(a)79 MeV/u の場合と(b)140 MeV/u の場合の測定結果。

<引用文献>

- [1] K.Hotta, R.Kohno, Y.Takada et al, "Improved dose-calculation accuracy in proton treatment planning using a simplified Monte Carlo method verified with three-dimensional measurements in an anthropomorphic phantom", Phys. Med. Biol. 55, 2010, pp.3545-3556.
- [2] R.Tansho, T.Furukawa, Y.Hara et al, "Development of NIRS pencil beam scanning system for carbon ion radiotherapy", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 406, Part A, 2017, pp.352-355.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Ryohei Tansho, Takuji Furukawa, Yousuke Hara, Kota Mizushima, Naoya Saotome, Yuichi Saraya, Toshiyuki Shirai and Koji Noda, "Development of a new ridge filter

with honeycomb geometry for a pencil beam scanning system in particle radiotherapy”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 406, Part A, 2017, pp.352-355, 査読有
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2016.10.009>

〔学会発表〕(計1件)

Ryohei Tansho, Takuji Furukawa, Yousuke Hara, Kota Mizushima, Naoya Saotome, Yuichi Saraya, Toshiyuki Shirai and Koji Noda, “Development of a new ridge filter with honeycomb geometry for a pencil beam scanning system in particle radiotherapy”, 12th ECAART PA-55, in Jyväskylä Finland, 2016.7

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：エネルギー変調装置及びこれを用いた粒子線治療装置

発明者：丹正 亮平、古川 卓司、原 洋介

権利者：量子科学技術研究開発機構

種類：特許

番号：特願 2016-250604 号

出願年月日：2016 年 12 月 26 日

国内外の別： 国内

取得状況(計0件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

丹正 亮平 (TANSO, Ryohei)

量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所加速器工学部・研究員

研究者番号：80735126

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし