

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25461905

研究課題名(和文)炭素線ビームの輸送コードに関する高度化研究

研究課題名(英文)Study for a high precise transport code for Carbon-ion therapy

研究代表者

遊佐 顕 (Yusa, Ken)

群馬大学・重粒子線医学推進機構・助教

研究者番号：40300743

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モンテカルロ法を用いた炭素線治療用ビームのシミュレーションシステムを構築した。Geant4ベースのPTSIMを利用し、炭素線治療の特徴である生物線量を計算する機能を追加した。またシミュレーションの結果の妥当性を評価するため実測との比較を行った。また初期ビームエネルギーの揺らぎも実測との評価を行った。その結果、飛程や深部線量分布に関しては僅かな差があるもののよく一致している。幾つか課題点が残るものの、本システムは治療ビームのシミュレーションシステムとして要望なものであり、今後も研究を進めていく予定である。

研究成果の概要(英文)：In this study, a Monte Carlo simulation system for carbon-ion therapy was developed. The PTSIM was employed for this purpose and modified to calculate biological dose distributions. For validation of the PTSIM, the simulation should be verified by comparing the simulation results with the experimental data. Tuning certain parameters such as fluctuation factors of initial beam energies should be considered as well. The calculated residual ranges or depth dose distributions are compatible with the measurements within small differences. Although some issues persist, the system is a prospective tool for carbon-ion therapy and is expected to offer important and useful information.

研究分野：医学物理

キーワード：炭素線治療 生物学的効果 モンテカルロシミュレーション 線量分布 Geant4

様式 C - 19、F - 19、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

炭素線治療は優れた線量分布と生物学的効果という特徴を持ち、効果の高いがん治療法として期待されている。しかしその機序は物理的な部分、生物学的な部分を含めて未解明で単純なモデルを仮定し適用している部分もあり、研究的な立場からも実用的な立場からもその解明が期待されている。

実用的な例を挙げると炭素線治療ポートのビームコミッショニング試験で行う機器パラメータ決定や治療計画の線量モニター計算など線量計算アルゴリズムでは炭素線の輸送を単純なペンシルビーム法で計算を行っているが、実測データと比較すると実用上無視できない違いがある。

2. 研究の目的

炭素線ビームの物理的特性の空間的な構造は従来のペンシルビーム計算法では比較的単純な近似をおこなってきた。しかし、実際の炭素線ビームは物質と核破砕反応等の相互作用を起こすため、ペンシルビームの空間的構造はより複雑であることが予想される。また線質についてもそのスペクトル構造や、空間的な構造も現状では平均化した一定の値として仮定して用いられている。

解決の手法として物理過程を確率論的に追える Geant4 などのモンテカルロコードの利用が有効である。但し、モンテカルロ法によるシミュレーションを行う場合、精度を確保する為には非常に多くの計算ステップ数を要する。この為の計算処理速度の高速化が課題となる。そこでモンテカルロ法と演算時間が短い数値計算を組み合わせたハイブリッド計算システムを開発する。

3. 研究の方法

モンテカルロシミュレーションによる線量分布計算の開発について、本研究をすすめる中で、Geant4 を基盤とした粒子線治療対応のシミュレーションツール PTSIM () を利用することが本研究を進める上で合理的であると判断した。これは CT 画像や治療装置のビームライン機器が予めモジュールとして用意されてあること、治療計画装置の出力データ (DICOM-ION) を取り扱うことができることが主な理由である。

ただし、生物線量分布を計算する機能がないので、その機能を付加する必要がある。これについては、本学の治療計画で採用されている RBE 計算モデル () に基づいた計算機能を付加することとした。

また Geant4 のシミュレーションの妥当性を評価する実測との検証も行った。

4. 研究成果

(1) 実測との比較

実測と同じセットアップを模擬しシミュレーション計算を幾つか行い妥当性を評価した。

図 1 は深部線量分布の比較の一例である。計算は2種類の Geant4 のイオン非弾性反応モデルについて行った。またブラッグピークの幅を実測にあわせるため、シミュレーションの初期エネルギーの揺らぎを 0.17-0.18% (揺らぎがガウス分布に従うと仮定した場合の標準偏差に相当) とした。

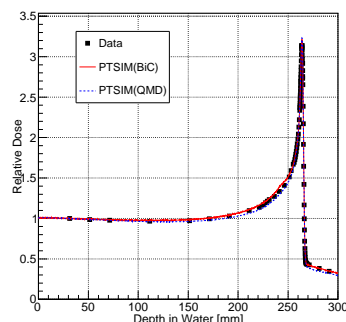


図 1 モノエネルギーの深部線量分布 (ブラッグ曲線) の比較例

2 つのモデルをもとにしたシミュレーション結果について、どちらも僅かな差がみとめられるが実験をよく再現している。

残余飛程について、治療に用いるビームライン機器の設定をシミュレーションした場合の残余飛程をシミュレーションし実測との比較を行った。

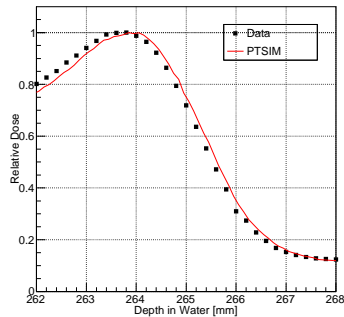


図 2 残余飛程の比較例

その結果、最大 0.4mm の違いで一致した。また、散乱体やレンジシフトの水等価厚に関しても ±0.5mm 以内で実測を再現している。

一方、多重散乱については Geant4 での計算で電離電子のカットオフレンジに依存している事象が見られることが判った。更に原因を追求し、改善を求める予定である。

表 1 多重散乱の電離電子のカットオフレンジ依存性の例 (散乱体 3mm での散乱半径)

カットオフレンジ	散乱半径 (mm)
100m	60.8
100mm	60.5
1mm	59.7
0.1mm	58.3
0.01mm	52.9

(2) RBE 計算機能追加

生物学的効果を考慮した線量分布を計算する機能を PTSIM に追加した。まず前述のように、本学の治療計画に採用されている RBE モデルを採用した。これは治療計画の計算結果と直接比較できるからである。結果は次の「SOBP 分布の比較」で示す。

(3) 生物線量の比較

治療計画装置で水タンクの中に階段状のターゲットを作成し、それに対し線量分布を計算した結果について、PTSIM でシミュレーションした。その 2 次元線量分布(生物線量分布)を図 3 に示す。

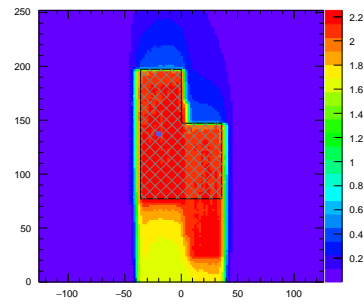


図 3 2次元生物線量分布の例 (SOBP)

図 3 の Y=-20mm の深部線量分布を示したものが図 4 である。

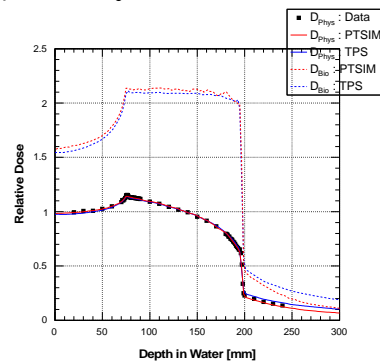


図 4 SOBP 深部線量分布の比較

図 4 は物理線量については実測と PTSIM、治療計画の 3 種類、生物線量は PTSIM と治療計画の 2 種類の比較を行っている。PTSIM のシミュレーション結果は実測や治療計画をよく再現している。

同様に、図 5 は Z=112.3mm の深さでの側方分布の比較である。段差の境界領域について治療計画では計算しきれていないが、PTSIM は実測をよりよく再現出来ている。

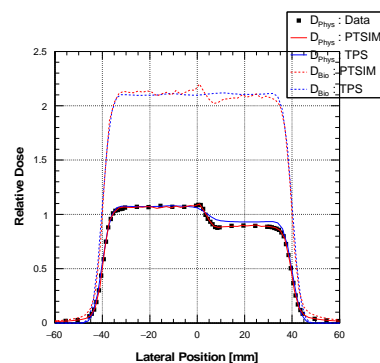


図 5 SOBP 側方分布の比較

モンテカルロ法でペンシルビームの構造をシ

ミュレーションすることに関して、前日の通り、Geant4 の多重散乱の計算で更に確認検証すべきことがあり、これについては今後継続して進めることとした。

尚、本課題を更に発展させた、課題 平成 28 年度 基盤研究(C)「モンテカルロ法を用いた炭素線治療シミュレーションシステムの開発」(課題番号 16K10385) が採択された。本課題で得られた知見をもとに研究を進める予定である。

< 引用文献 >

- Takashi Akagi et.al., “Geant4-based particle therapy simulation framework for verification of dose distributions in proton therapy facilities”, Progress in Nuclear Science and Technology, 4, 896-900 (2014).
PTSIM Web site,
<http://wiki.kek.jp/display/g4med/Home>
Tatsuaki Kanai et.al., “Irradiation of Mixed Beam and Design of Spread-Out Bragg Peak Irradiation for Heavy-Ion Radiotherapy, Radiation research”, 147, 78-85 (1997).
Mokoto Sakama et.al., “Design of ridge filters for spread-out Bragg peaks with Monte Carlo simulation in carbon ion therapy, Physics in Medicine and Biology”, 57, 6615-6633 (2012).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- Yoshiki Kubota, Hidemasa Kawamura, Makoto Sakai, Ryou Tsumuraya, Mutsumi Tashiro, Ken Yusa, Nobuteru Kubo, Hiro Sato, Masahiro Kawahara, Hiroyuki Katoh, Tatsuaki Kanai, Tatsuya Ohno, Takashi Nakano, Changes in Rectal Dose Due to Alterations in Beam Angles for Setup Uncertainty and Range Uncertainty in Carbon-Ion Radiotherapy for Prostate Cancer, Plos One, 査読有, 4, 2016, e0153894
DOI:10.1371/journal.pone.0153894
Akihiko Matsumura, Ken Yusa, Tatsuaki Kanai, Manabu Mizota, Tatsuya Ohno, Takashi Nakano, Evaluation of an empirical monitor output estimation in carbon ion radiotherapy, Medical Physics, 査読有, 9, 2015, 5188-5194
DOI:10.1118/1.4928145
遊佐 顕、久保田佳樹、治療の品質保証、

RADIOISOTOPES、査読有、64、2015、400-405
DOI: 10.3769/radioisotopes.64.400

[学会発表] (計 4 件)

- Ken Yusa, Evaluation of a QA tool using a Monte Carlo simulation for carbon-ion therapy at Gunma University, PTCOG55, 2016年5月25-28日, Prague
遊佐 顕, RTP-PTSIM 群馬版の進捗, 富山 PTSIM 講習会・Geant4 医学応用研究会, 2015年12月19日, 富山
遊佐 顕, 群馬大学重粒子線医学研究センターにおけるモンテカルロ計算の活用, 名古屋陽子線治療センターPTSIM 応用研究会, 2014年3月19日, 名古屋
Ken Yusa, Commissioning status of Layer Stacking Irradiation Method at Gunma University, PTCOG52, 2013年6月2-8日, Essen

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遊佐 顕 (YUSA Ken)
群馬大学・重粒子線医学推進機構・助教
研究者番号：40300743