

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19899

研究課題名（和文）高精度モンテカルロ線量評価に基づく治療計画立案を実現する超高速人体モデル計算技術

研究課題名（英文）The high-speed dose calculation technology for human geometry which allows performing the high precision Monte-Carlo treatment planning

研究代表者

熊田 博明（Kumada, Hiroaki）

筑波大学・医学医療系・准教授

研究者番号：30354913

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：治療計画システム：ツクバプランで作成した人体頭部の計算モデルを四面体法に変換して計算性能の特性評価を実施した。この結果から、四面体法を採用することで従来のボクセル法に対して50%程度計算時間を短縮できる可能性を見出した。また、この四面体法を使ってモンテカルロ計算を実施できるように、ベースとなるモンテカルロ計算コード：PHITSの改良、高度化も実施した。明らかとなった課題としては、四面体法で人体のような複雑な計算モデルを定義する場合、現状のツクバプランの技術では複雑な曲面部分で空間定義の材質未定義領域、もしくは、材質重複領域が生じてしまう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

難治がん、再発がんの治療法の確立は人類の大きな課題である。がん治療法の中で放射線治療分野において必須である治療計画/線量評価作業において、モンテカルロ法を用いることで線量評価精度が高くなり、より適切な治療が期待できるが、計算時間が長時間かかるため、実用的ではなかった。本研究により、モンテカルロ法による線量評価の高速化、短時間化の見通しを得ることができた。これにより、放射線治療によるがん治療の高精度化を図ることができ、ひいては治療成績の向上に寄与できることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：A calculation model for a patient's head created by Tsukuba-Plan that is a treatment planning system was converted into a model constructed by the tetrahedron method and then calculation performance for the model has been evaluated. The results demonstrated that the calculation time can be shortened by about 50% compared to the conventional voxel method by adopting the tetrahedral method. In addition, PHITS as a Monte Carlo-based calculation code has been improved so that Monte Carlo calculations can be performed using the tetrahedral method. As an issue that became clear in this research, when defining a complicated calculation model like a human head by the tetrahedron method, the material undefined area of the space definition or the material overlapping area in the complicated curved surface part with the current Tsukuba-plan technology will occur. We wish to improve the system so that a tetrahedron model can be created automatically.

研究分野：放射線治療の医学物理分野

キーワード：治療計画 モンテカルロ法 BNCT 線量計算 並列計算 四面体法 ボクセル法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

放射線治療分野において、照射条件(ビームの入射位置、角度、距離等)を決定する“治療計画”は治療効果、成績を決定する重要な因子である。従来のX線治療、粒子線治療では、数式を解く“決定論的手法”が用いられている。一方、2020年に保険治療となった“BNCT”(ホウ素中性子捕捉療法)では、治療に粒子挙動が複雑、かつ、多様な中性子線を用いることから、線量計算にモンテカルロ法(確率論的手法)が用いられている。モンテカルロ法(以下、MC法)は、高精度な線量計算ができることから、BNCTだけでなくX線治療、粒子線治療でも導入することが検討されているが、現在、これらの治療分野で用いられている方法は条件を制限した簡易的MC法であり、BNCT分野で使われているすべての粒子挙動を追跡するフル・モンテカルロ法(以下、FMC法)は、高精度な結果を得るためには計算に長時間(数時間以上)を要することから、BNCT分野以外では実用化できていなかった。FMC法を採用しているBNCT分野でも、長時間計算の必要性から、多くの照射条件でのシミュレーションができず、最適な照射条件を導けていない可能性もある。FMC法で長時間原因となる主な要因は、

非幾何学的形状である人体形状を計算モデル化する手法として“ボクセル法”を用いている。

通常のプロセッサでの並列化によって高速化は可能であるが高コストと運用性の問題から病院への導入が困難。

である。ここでボクセル法とは、計算体系を微細な直方体に分割し、個々の直方体(ボクセル)に適切な材質を定義することで、人体のような複雑な計算モデルを定義するモデリング方法である(図1(a))。治療計画の場合、最小のボクセル単位は、ベースとなるCTのピクセルと一致する。計算体験を分割する直方体の大きさを小さくするほど、より精密なモデルを定義できる。ここで、ボクセルを小さくするとボクセル数が増大するが、MC計算ではボクセル数が増えるほど、計算時間が長時間化する、という特性を有している。FMC法の放射線の挙動計算アルゴリズムでは、放射線がボクセルの境界面を横切る度に処理が発生するため、大量のボクセルを使って人体形状を定義する人体モデルに対しては、膨大な処理が派生して計算に時間がかかってしまう。特にボクセルを小さくしてしまうと、同じ材質が連続する領域も細かく分割されてしまい、同じ材質を通過する粒子に対しても境界を通過する毎に処理が生じてしまう。

これらの背景を踏まえて本研究は、複雑形状の人体モデルに対するFMC法での線量計算を高速化し、放射線治療分野の治療計画作業に実用化するための基盤技術の検討を行う。

2. 研究の目的

放射線治療において、より高精度な線量計算が可能となるフル・モンテカルロ計算による線量評価技術を治療計画作業に実用化するための基盤技術の開発研究を行う。具体的な研究課題として、従来のボクセル法による計算モデリング手法に代わる新しいモデリング手法の検討、及び、超並列計算機による高速計算技術の医療分野の線量計算への応用、に関する研究開発を行い、これら新手法をFMCベース治療計画システムに実装して検証を行う。

3. 研究の方法

従来のボクセル法に代わるモデリング手法として、ポリゴン法の一つである“連続四面体法”(tetrahedron method)をモンテカルロ線量計算の人体モデリングに採用することを試みる。この連続四面体法によるモデリング手法は、ある物体を多数の“テトラ”(自在に変形する四面体)を繋ぎ合わせて複雑な3次元形状を定義する手法である。連続四面体法で人体形状を定義することで、図1-(b)に示すように同じ材質が連続する範囲を少ないブロック(四面体)で定義できるため、この領域を通過する放射線の輸送計算処理を効率化できる。本研究では、筑波大学でBNCT用に開発しているモンテカルロベースの治療計画システムである“Tsukuba-Plan”(コード名)を用いて、頭部形状ファントムを作成し、このモデルに対して、連続四面体法による計算モデルを構築し、線量計算を実行する。この計算結果を、従来のボクセル法による計算モデルによる計算結果と比較し、計算性能(計算時間等)を比較評価する。モンテカルロ計算コードには、従来のボクセル法に加えて、連続四面体法によるジオメトリ設定機能も備えている“PHITS”を用いる。

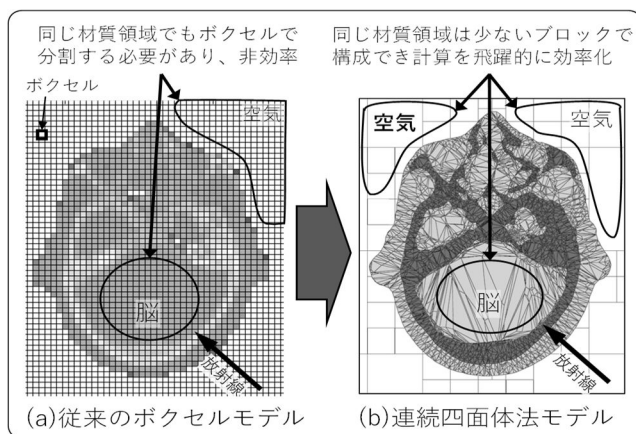


図1 複雑な人体形状をモデリングする2つの手法

2 つ目の課題である並列計算処理については、現在モンテカルロ輸送計算に用いられている Intel - 86 系の並列計算機に代えて、GPGPU 系の大量のコプロセッサによる CPU: メニーコア・プロセッサ (以下、ManyCP) による人体モデルの超並列化を試みる。本研究には、筑波大学が所管する ManyCP 系の超並列計算機である Oakforest-PACS (以下、OFP) に PHITS を導入し、上記の人体モデルでの計算を実行する。OFP の CPU には、Intel Xeon Phi が採用されており、8208 ノードのプロセッサ (1 ノード当たり 68Core) を搭載した超並列クラスタ型計算機である。

4 . 研究成果

連続四面体法によるモデリングに関しては、頭部形状ファントムの CT データを取り込み、先ず、従来のボクセル法による 3 次元モデルを構築した (図 2 - (a))。これをベースに連続四面体法に変換して、頭部形状ファントムモデルを作成した (図 2 - (b))。

それぞれの計算モデルに対して、筑波大学の BNCT 施設である “iBNCT” の照射位置に両モデルをセットし、頭部に中性子ビームを照射するシミュレーションを設定して頭部内の線量分布計算を実施した。図 3 は、それぞれの計算モデルを iBNCT 施設のビーム照射孔位置に設定した計算インプット図を示している。このインプットを用いて、中性子ビーム照射シミュレーションを実行し、頭部内の線量分布を算出し、この計算に要した時間を比較した。

この結果から、従来のボクセルモデルでの計算に要する時間を “1” とすると、連続四面体法モデルの計算時間は、“0.56” に短縮できた。また、同じ粒子数を輸送計算しているため、ボクセルモデルと連続四面体モデルの計算値は、各部位で統計精度の範囲内で一致していた。これらの結果から人体モデルに対して連続四面体法によるモデリング技術を導入することで、計算時間を約 60% 削減することができた。

2 つ目の課題である超並列計算機によるモンテカルロ輸送計算の評価では、OFP で 128 ノード、32,678 コアを確保して、コア数に対する計算時間の評価を行った。この結果から、コア数の増加に比例して、計算時間を短縮できることを確認した。

ここで、従来の Intel-86 系 CPU に対して 1 個当たりの計算速度は遅いものの、約 10 コア並列で Intel-86 系の 1 CPU とほぼ同等の処理速度となった。従って治療計画の線量評価に 32,678 コアで実行した場合、従来の CPU の約 3000 並列に相当する計算速度を有することになる。ただし、今回の評価に用いた OFPI は、共用の大型計算機であるため、128 ノードを一度に使うような大規模計算になると、計算を開始するまでの待機時間が長くなってしまいう傾向がある。したがって実際の治療計画を実施する場合は、病院にも設置できる中～小規模の ManyCP 系ワークステーションが比較的安価に導入できるようになることを期待する。

連続四面体法による人体モデルと ManyCP での並列計算を治療計画に適用することで、計算時間の短縮できることが明らかとなった。今後の課題としては、四面体法で人体のような複雑な計算モデルを定義する場合、現状の治療計画システムでは、複雑な曲面部分で空間定義の材質未定義領域、もしくは、材質重複領域が生じてしまうため、手作業での修復が必要である。今後、複雑形状領域に対しても自動的に適切な定義ができる技術を開発することで、四面体法による治療計画が実現できると期待される。

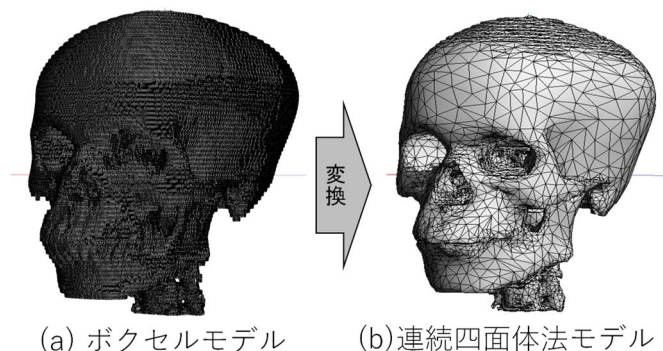


図 2 3次元頭部形状ファントムモデル

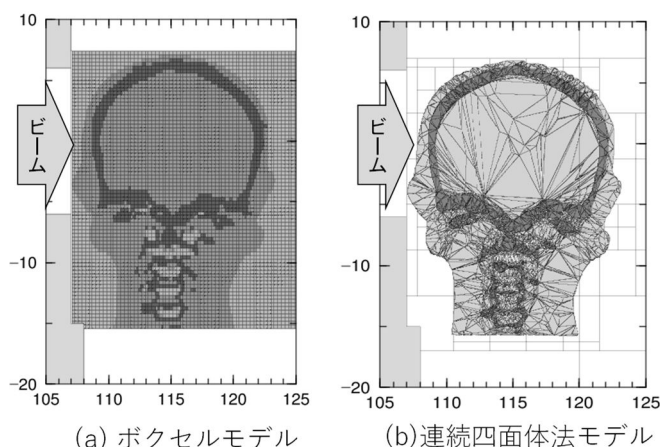


図 3 両モデルを iBNCT 施設のビーム照射孔位置にセットした計算モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato T, Masunaga S. I, Kumada H, Hamada N.	4. 巻 183(1-2)
2. 論文標題 DEPTH DISTRIBUTIONS OF RBE-WEIGHTED DOSE and PHOTON-ISOEFFECTIVE DOSE FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiat Prot Dosimetry.	6. 最初と最後の頁 247-250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/rpd/ncy235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumada H, Tanaka S, Naito F, Kurihara T, Sugimura T, Sakurai H, Matsumura A, Sakae T	4. 巻 231
2. 論文標題 Neutron beam performance of iBNCT as linac-based neutron source for boron neutron capture therapy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conference	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202023101003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kumada H, Takada K, Naito F, Kurihara T, Sugimura T, Matsumoto Y, Sakurai H, Matsumura A, Sakae T	4. 巻 2160
2. 論文標題 Beam performance of the iBNCT as a compact linac-based BNCT neutron source developed by University of tsukuba	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 050013-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5127705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Koketsu J, Kumada H, Takada k, Takei H, Mori Y, Kamizawa S, Hu Yuchao, Sakurai H, Sakae T.	4. 巻 20(9)
2. 論文標題 3D-pintable lung phantom for distal falloff verification of proton Bragg peak	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Appl Clin Med Phys.	6. 最初と最後の頁 86-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/acm2.12706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 櫻井良憲, 熊田博明, 鬼柳善明	4. 巻 61(6)
2. 論文標題 中性子を用いた次世代がん放射線治療: ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) -原子炉から小型加速器へ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本原子力学会誌	6. 最初と最後の頁 469-473
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3327/jaesjb.61.6_469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kumada and T. Takada	4. 巻 Special Issue
2. 論文標題 Treatment planning system and patient positioning for boron neutron capture therapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Therapeutic Radiology and Oncology	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Onishi H. Kumada, K. Takada F. Naito, T. Kurihara, T. Sakae	4. 巻 140
2. 論文標題 Investigation of the neutron spectrum measurement method for dose evaluation in boron neutron capture therapy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 5~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2018.06.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Sato, S. Masunaga, H. Kumada, N. Hamada	4. 巻 180
2. 論文標題 DEPTH DISTRIBUTIONS OF RBE-WEIGHTED DOSE and PHOTON-ISOEFFECTIVE DOSE FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Radiation Protection Dosimetry	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/rpd/ncy235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 熊田博明	4. 巻 757
2. 論文標題 医療用加速器中性子源の開発と産業・工業分野への応用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Isotope News	6. 最初と最後の頁 22-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 H Kumada, K. Takada, T. Sato, H. Sakurai T. Sakae
2. 発表標題 MULTIMODAL MONTE CARLO TREATMENT SYSTEM CAPABLE OF MICRODOSIMETRY WITH PHITS
3. 学会等名 Mini-Micro-Nano Dosimetry (MMND) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kumada H., Takada K., Tanaka S., Matsumura A., Sakurai H., Sakae T.,
2. 発表標題 erification of performance for dose estimation for BNCT by the Monte Carlo based multi-modal treatment planning system
3. 学会等名 PTCOG58 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumada H., Takada K., Sato T.
2. 発表標題 Development of a core technologies for multi-modal treatment planning system with the high-speed and high-precision Monte Carlo dose calculation engine
3. 学会等名 11th CCS International Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊田博明
2. 発表標題 Development of the Monte Carlo based treatment planning system by combination with the tetrahedral based human modeling method
3. 学会等名 第117回日本医学物理学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kumada H
2. 発表標題 Treatment planning and dose estimation for BNCT
3. 学会等名 1st Ru BNCT Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊田博明
2. 発表標題 BNCT用治療計画プログラムの現状と今後の課題
3. 学会等名 日本中性子捕捉療法学会第15回学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊田博明
2. 発表標題 BNCTの技術
3. 学会等名 第65回放射線治療研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Kumada, K. Takada, T. Aihara, T. Ohnishi, A. Matsumura, H. Sakurai, T. Sakae
2. 発表標題 Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba
3. 学会等名 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Kumada
2. 発表標題 Current status of development for accelerator-based neutron source and peripheral devices for BNCT
3. 学会等名 International Symposium of Accelerator based NCT technologies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Furuta
2. 発表標題 Three-dimensional analysis using polygons in Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)", 20th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of ANS
3. 学会等名 RPSD2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Tsuboi K., Mori Y., Yasuoka K., Sato T., Takada K., Kumada H., Terunuma T., Kamizawa S., Matsumoto Y., Sakae T.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 235
3. 書名 Proton Beam Radiotherapy	

1. 著者名 中村浩之、中川義信、切畑光統、田中憲一、増永慎一郎、鈴木実、熊田博明、中井啓、川端信司、福田寛	4. 発行年 2018年
2. 出版社 大阪公立大学共同出版社	5. 総ページ数 167
3. 書名 BNCT基礎から臨床応用まで	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)用治療計画システム、BNCTシステム及びBNCT	発明者 熊田博明	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/046256	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高田 健太 (Takada Kenta) (10640782)	群馬県立県民健康科学大学・診療放射線学部・准教授 (22304)	
研究分担者	佐藤 達彦 (Sato Tatsuhiko) (30354707)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主席 (82110)	
研究分担者	古田 琢哉 (Furuta Takuya) (40604575)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹 (82110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------