

機関番号：12102
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20591487
 研究課題名（和文）：中性子捕捉療法の治療計画に精密モンテカルロ評価を実現する境界関数モデル法の研究
 研究課題名（英文）：Investigation of boundary functional modeling method which can perform accurate Monte-Carlo dosimetry in treatment planning in neutron capture therapy.
 研究代表者
 熊田 博明（KUMADA HIROAKI）
 筑波大学・大学院人間総合科学研究科・准教授
 研究者番号：30354913

研究成果の概要（和文）：

放射線治療の治療計画において、高精度な線量評価が可能な次世代の評価技術であるモンテカルロ線量評価について、人体の計算モデルに対する新しいモデリング手法：マルチステップ・ラティス・ボクセル法を開発した。この手法を用いることで計算精度を高精度化しつつ、計算速度を約2倍に高速化することが可能となった。本研究結果を踏まえ、本手法の特許を出願した。

研究成果の概要（英文）：

For computational dosimetry with Monte-Carlo method which can perform accurate dose estimation in treatment planning work of radiotherapy, a new voxel modeling method; “Multistep lattice-voxel method” was devised. Application of the method to Monte-Carlo dosimetry enables to perform high-accuracy estimation as well as fast calculation as about 2 times compared with conventional method. As a investigation result, an patent for the method was applied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：医学物理、線量評価、放射線工学

科研費の分科・細目：内科臨床医学・放射線医学

キーワード：放射線医療物理学、中性子捕捉療法、治療計画、線量評価、アルゴリズム、モンテカルロ、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

中性子捕捉療法（Neutron Capture Therapy, NCT）は腫瘍細胞に選択的に集まるホウ素（¹⁰B）を投与し、病巣部に中性子を照射してホウ素と中性子との核反応で生じるα線によって腫瘍細胞のみを破壊するがん細胞選択的粒子線治療である。これまで日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-4 や京都大

学原子炉実験所の KUR を使って悪性脳腫瘍や頭頸部がんに対して臨床研究が実施されており、有効な治療効果が示されている。

NCT を実施するためには、中性子照射によって患者に付与される線量を照射シミュレーションによって的確に評価し、最適な照射条件を導く治療計画システムが不可欠である。X線とは挙動が大きく異なる中性子では

従来の線量計算アルゴリズムでは適切な線量評価ができない。従ってNCTの治療計画には、中性子と生体組織との反応を的確に評価できるモンテカルロ法による線量評価技術が用いられている。モンテカルロ線量評価は高精度評価が可能なることから、近年ではX線治療や粒子線治療への適用も検討されている。しかしモンテカルロ線量評価は、長時間計算が必要という課題を抱えており、実用レベルでは普及していない。

現状の放射線治療の線量計算方法は、医療画像を基に3次元モデルを作成し、これを“ボクセルモデル”に変換し、この計算モデルを用いて計算を行っている。現状のNCTの線量評価では輸送計算を効率化するため、ボクセルの大きさを $8\text{mm}^3 \sim 1\text{cm}^3$ で作成している。この大きさのボクセルを用いた線量計算では、粒子が異なる組成領域（空気と皮膚など）を通過する際に計算誤差を生じるという問題がある。ここでモデルを構成するボクセルの数と計算時間には相関性があり、ボクセルをピクセルレベルに微細化することで線量評価精度を向上できる一方で、ボクセル数が増加し計算時間が長くなってしまい、実際の治療には適用が困難である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、モンテカルロ線量評価による治療計画をNCTだけでなくX線治療、粒子線治療にも実用化することを最終目標に、複雑な人体モデルに対するモンテカルロ線量評価の精度を高精度化しつつ、計算効率を向上する手法の研究を行う。

3. 研究の方法

NCTの治療計画に用いられているモンテカルロコード：MCNP、PHITSには、複雑な形状を簡便に定義できる“Lattice”機能が搭載されており、上記のモデリング方法もLattice機能を用いている。このLattice機能を活用して、CTのピクセルレベルの精密な計算モデルを形成し、且つ、効率的な輸送計算を実行できる新しいモデリング・アルゴリズム：“マルチステップ・ラティス・ボクセル法”（以下、MLV法と呼ぶ）を考案した。図1にMLV法の概略を示す。MLV法によるモデリングの手順は、まず1スライス： 512×512 ピクセルのデータを 32×32 個の領域に分割する（1領域は 16×16 ピクセル）。ここで分割した領域内の材質がすべて同じ材質の場合は、1つの大きなVoxel（Single Large Voxel）に置き換える。もし複数の材質が存在する場合は、Latticeを使ってピクセルレベルのままのボクセル（Mixed Large Voxel）を作成する。この手順をLattice機能を繰り返し用いて、

最終的に1つの人体モデルを形成する。

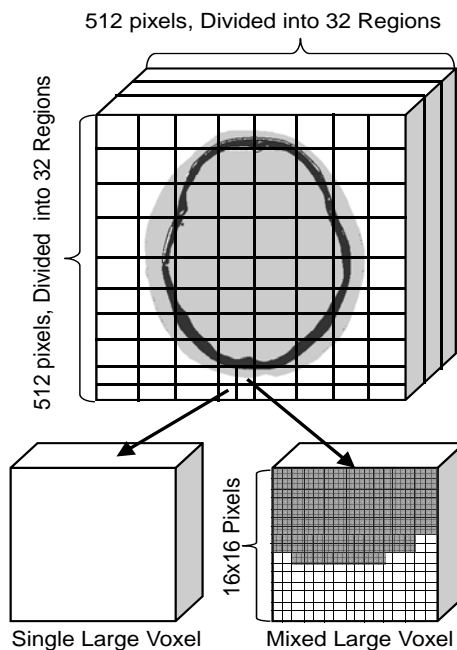


図1 MLV法によるモデリングの概略

開発したMLV法の計算性能の検証を行った。まず単純な円筒水ファントム体系に対して、①全てピクセルレベルのボクセルで作成したモデル（フルピクセルボクセルモデル）及び②MLV法を用いて大きさの異なるボクセルが混在するモデル（不均一ボクセルモデル）を作成し、それぞれの線量計算を行った。

次に、より現実的な評価として図2に示すような人体頭部のCTデータを基に作成した頭部3次元モデルに対し、フルピクセルボクセルモデルと、MLV法を用いた不均一ボクセルモデルをそれぞれ作成し、任意方向からの中性子照射のシミュレーションを実施して、それぞれのモデルに対する計算精度と計算時間を比較評価した。図3に病巣領域周辺を拡大した(a)フルピクセルモデルと、(b)不均一ボクセルモデルを示す。

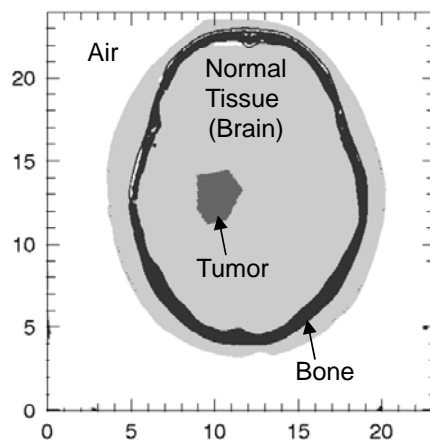
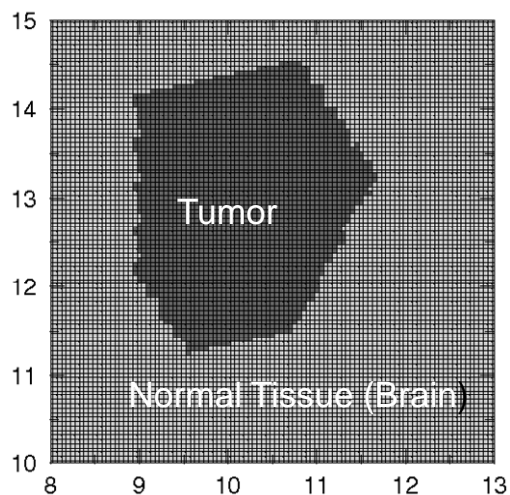
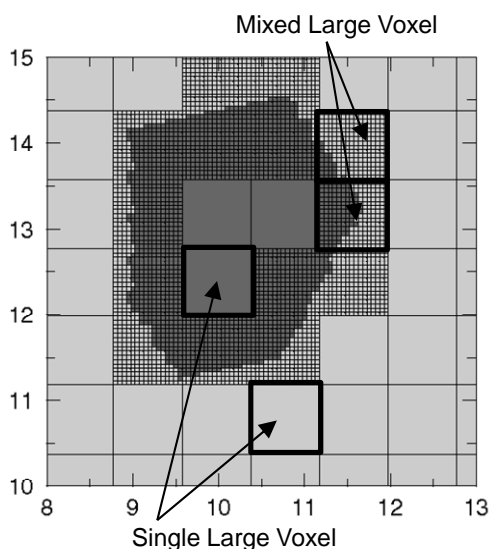


図2 CTから作成した頭部モデル



(a) フルピクセルボクセルモデル



(b) MLV法で作成した不均一ボクセルモデル

図3 頭部モデルのフルピクセルボクセルモデル (a) と不均一ボクセルモデル (b)

4. 研究成果

円筒水ファントム体系での評価では、1スライス当たりのボクセル数は、フルピクセルボクセルモデルが262,144個 (512 x 512個) であるのに対し、不均一ボクセルモデルではMLV法を用いることで約23,200個と約91%減少することができた。計算時間もフルピクセルボクセルモデルの約47%に短縮することができた。

より複雑な人体頭部モデルでの評価では、任意のスライス断面の不均一ボクセルモデルのボクセル数は約65,000個であり、約75%減少することができた。フルピクセルモデルと不均一ボクセルモデルの線量評価結果を比較した結果、双方の評価結果は統計誤差の

範囲内で一致した。これは、不均一ボクセルモデルの材質構成はフルピクセルボクセルモデルと全く同一であるため、同等の線量評価結果を得ることができる。一方、不均一ボクセルモデルの計算時間は、フルピクセルモデルに対して約33%短縮することができた。計算効率については、評価領域 (粒子が通過する領域) のジオメトリの複雑さによってボクセル数が異なるため、評価モデル、ビーム照射角度等の条件によって計算時間の短縮率は増減する。

この研究成果を踏まえ、開発したアルゴリズムの特許出願を行った: 「特願2010-232524」 (マルチステップ・ラティス・ボクセル法)。また本研究成果を中性子捕捉療法の国際学会 (14th International Congress on Neutron Capture Therapy) やモンテカルロ国際学会 (SNA+MC2010) 及び国内の関連学会で発表を行った。さらに「Applied Radiation and Isotopes」等に査読付き論文にも投稿し、受理された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

1. H. Kumada, K. Saito, T. Nakamura, T. Sakae, H. Sakurai, K. Ono, A. Matsumura, Multistep Lattice Voxel method utilizing lattice function for Monte-Carlo treatment planning with pixel based voxel model, Appl. Radiat. Isot., In-Press, 2011 査読有
2. H. Kumada, K. Saito, T. Sakae, A. Matsumura, T. Nakamura, K. Ono, Development of the efficient modeling method with complicated human geometry for Monte-Carlo treatment planning system, Progress in Nuclear Science and Technology, In-Press, 2011 査読有
3. H. Kumada, T. Sakae, K. Saito, T. Isobe, T. Hashimoto, H. Sakurai, Application of the multi-modal Monte-Carlo treatment planning system combined with PHITS to proton radiotherapy, Progress in Nuclear Science and Technology, In-Press, 2011 査読有
4. H. Kumada, K. Saito, T. Nakamura, T. Sakae, H. Sakurai, K. Ono, A. Matsumura, Multistep Lattice Voxel method utilizing lattice function for Monte-Carlo treatment planning with pixel based voxel model, New Challenges in Neutron Capture Therapy 2010 -Proceedings of ICNCT-14-, 238-241,

2010 査読無

5. H. Kumada, T. Nakamura, M. Komeda, A. Matsumura, Development of a new multi-modal Monte-Carlo radiotherapy planning system, Appl. Radiat. Isot., Vol. 67, 118-121, 2009 査読有
6. H. Kumada, T. Nakamura, M. Komeda, A. Matsumura, Development of a Multi-Modal Monte-Carlo Radiation treatment planning system combined with PHITS, Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Industry and Medicine, 1153, 377-387, 2009 査読有
7. T. Yamamoto, K. Nakai, T. Kageji, H. Kumada, K. Endo, M. Matsuda, et al Boron neutron capture therapy for newly diagnosed glioblastoma, Radiotherapy and Oncology, Vol. 91, 80-84, 2009 査読有
8. M. Komeda, H. Kumada, M. Ishikawa, T. Nakamura, A. Matsumura, K. Yamamoto, Performance measurement of the scintillator with optical fiber detector for boron neutron capture therapy, Appl. Radiat. Isot., Vol. 67, 254-257, 2009 査読有
9. H. Koivunoro, H. Kumada, T. Seppala, P. Kotiluoto, I. Auterinen, L. Kankaanranta, S. Savolaine, Comparative study of dose calculation with SERA and JCDS treatment planning systems, Appl. Radiat. Isot., Vol. 67, 126-129, 2009 査読有
10. 熊田博明、山本和喜、松村明、小野公二、中性子捕捉療法の線量評価、放射線、Vol. 3, No. 2, 117-126, 2008 査読有

[学会発表] (計11件)

1. 熊田博明、松村明、中村剛実、小野公二、櫻井良憲、粒子線治療のモンテカルロ線量評価を高速化する新しいボクセルモデリング手法、日本原子力学会2011春の年会、2011年3月30日、福井
2. 熊田博明、モンテカルロ線量評価の高精度化と高速化を可能にするマルチステップ・ラティス・ボクセル法、第7回日本中性子捕捉療法学会学術大会、2010年8月5日、東京
3. H. Kumada, K. Saito, T. Nakamura, T. Sakae, H. Sakurai, K. Ono, A. Matsumura, Multistep Lattice Voxel method utilizing lattice function for Monte-Carlo treatment

planning with pixel based voxel model, 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2009年10月29日、ブエノスアイレス

4. H. Kumada, K. Saito, T. Sakae, A. Matsumura, T. Nakamura, K. Ono, Development of the efficient modeling method with complicated human geometry for Monte-Carlo treatment planning system, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications + Monte Carlo 2010, 2009年10月19日、東京
5. 熊田博明、松村明、中村剛実、小野公二、櫻井良憲、BNCTの中性子照射技術、治療計画技術、日本放射線腫瘍学会第22回学術大会、2009年9月18日、京都
6. H. Kumada, T. Nakamura, A. Matsumura, K. Ono, Development of a new Monte-Carlo radiation treatment planning system for boron neutron capture therapy, 17th International Conference on Nuclear and Engineering, 2009年7月14日、ブリュッセル
7. 熊田博明、中村剛実、松村明、新しい汎用放射線治療用モンテカルロ治療計画システムの線量評価性能の検証、第97回日本医学物理学会学術大会、2009年4月17日、横浜
8. 熊田博明、中村剛実、松村明、小野公二、線量計算にPHITSを適用した汎用モンテカルロ粒子線治療計画システムの開発、春季第56回応用物理学会関係連合講演会、2009年3月30日、つくば
9. H. Kumada, T. Nakamura, M. Komeda, A. Matsumura, Development of a Multi-Modal Monte-Carlo Radiation treatment planning system combined with PHITS, 2nd International Symposium on Laser-Driven Relativistic Plasmas Applied to Science, Industry and Medicine, 2009年1月19日、京都
10. H. Kumada, T. Nakamura, M. Komeda, A. Matsumura, Development of a new multi-modal Monte-Carlo radiotherapy planning system, 13th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2008年11月6日、フィレンツェ (イタリア)
11. 熊田博明、中性子捕捉療法の治療計画、第5回日本中性子捕捉療法学会学術大会、2008年7月26日、岡山

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：マルチステップ・ラティス・ボクセル
法

発明者：熊田博明

権利者：筑波大学

種類：特許

番号：特願2010-232524

出願年月日：平成23年10月15日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊田 博明 (KUMADA HIROAKI)

筑波大学・大学院人間総合科学研究科・
准教授

研究者番号：30354913

(2) 研究分担者

山本 哲哉 (YAMAMOTO TETSUYA)

筑波大学・大学院人間総合科学研究科・
講師

研究者番号：30375505