

高精度モンテカルロ線量計算技術を実装した汎用的放射線治療計画

システムの実用化に向けた研究

Research for practical application of multi-modal treatment planning system for radiotherapy with high accuracy Monte Carlo dose calculation technology

熊田博明

筑波大学 医学医療系

1. 研究目的

3 大がん治療法の1つである放射線治療において、現在治療に使われている主な放射線はX線、ガンマ線、陽子線、炭素線、中性子線 (BNCT) の5種類である。筑波大学はこれらのうち炭素線を除く4つの放射線治療を扱う世界的にも稀有な放射線治療研究拠点である。

放射線治療を実施するためには、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事前評価するシステム：治療計画システムが不可欠であり、現在、数多くの商用システムが病院に導入されている。しかし、多くの商用システムは対象とする1種類の放射線しか線量評価を実施できない。当研究グループは、これまでにBNCT用の治療計画システム (開発ネーム：Tsukuba-Plan)を開発してきた。さらに当グループは、Tsukuba-PlanをBNCT以外のすべての放射線治療への適応拡大も目指した研究を実施している。また、Tsukuba-Planのもう1つの大きな特徴は、線量計算エンジンに高精度計算が可能なモンテカルロ輸送計算コード：PHITSを実装していることである。この2つのアドバンテージを踏まえ本研究目標は、Tsukuba-Planを多くの大学病院やがん治療拠点病院等に導入・普及させ、高精度シミュレーションに基づいた治療計画立案による治療成績の向上、異なる放射線治療を組み合わせた集学的療法の確立、個々の患者の一連のがん治療による線量管理等を最終目標に、Tsukuba-Planの実用化に向けた研究開発を実施する。

この研究背景を踏まえ、Tsukuba-Planの実用化に不可欠となる以下の研究を実施する。

- ① さまざまな放射線治療照射体系における線量計算結果の多角的検証
- ② モンテカルロ線量計算のメニーコア計算対応による超高速化

2. 研究成果の内容

①さまざまな放射線治療照射体系における線量計算結果の多角的検証

現在、放射線治療で利用されている種々の治療用ビームのうち、X線治療用ビーム、粒子線治療ビーム (陽子線および炭素イオン線)、BNCTビームの計算体系を構築し、COMAおよびOakforest-PACSにコンパイルした汎用モンテカルロコードPHITSで計算を実施し

た。BNCT ビームに関しては、筑波大学が現在遂行中の加速器ベースの BNCT 実用化プロジェクトで開発中のビーム輸送系を正確に再現し、エネルギースペクトルの推定を行うとともに、生物照射実験に要する基礎データの取得、人体ファントムを用いた物理的照射実験のシミュレーション結果を提供した。

さらに、物理的な特徴の異なる種々の放射線種に対し、**lineal energy** と呼ばれる線質指標を用いて統一かつ定量的に評価したり、複数の放射線を用いて治療を実施する、いわゆる **combination radiotherapy** の線量評価を **Tsukuba-Plan** との組み合わせによって成功させたりするなどの成果を得た。

②モンテカルロ線量計算のメニーコア計算対応による超高速化

モンテカルロ計算を人体の線量評価に応用する際には、医療画像である CT データから画素情報を読み取り、計算に適したサイズのボクセルと呼ばれる計算要素を作り出す必要がある。より精緻な放射線の輸送計算を実施する際には、ボクセルサイズを細かくする必要がある一方、細かすぎるボクセルデータは、計算用インプットデータの膨大化を招き、モンテカルロ計算が非効率になる。今回、80 枚程度の CT 画像から構築した精密サイズのボクセルデータについても **Oakforest-PACS** 上での計算に成功し、また、使用ノード数を増加させることによる計算時間の短縮を図ることも成功した。

3. 学際共同利用として実施した意義

放射線治療のモンテカルロ計算体系を構築する際は、数多くの計算パラメータを調整しながらシミュレーションを実施し、それらを線量測定結果と比較するという過程が必要であり、数多くの放射線治療用ビームのビーム輸送系を同時平行的に構築していくことは、少なくとも研究室に整備された並列計算環境では不可能に近い。これを実現できたことから、学際共同利用の恩恵は我々にとって極めて大きい。また、従来 BNCT のみの線量評価プラットフォームであった **Tsukuba-Plan** を、マルチモダリティ対応に拡張できたことも、学際共同利用の直接的な利益である。

4. 今後の展望

本年度の学際共同利用において、種々の放射線治療ビームに関してモンテカルロ計算を実施できる環境は構築された。ただし、同じ X 線治療装置であっても、メーカーが異なれば装置内部のビーム輸送系は少なからず異なり、それは粒子線治療においても同様である。今後、**Tsukuba-Plan** を用いて放射線治療分野の線量計算を包括的に扱うためには、引き続き、ビーム輸送系の洗練化と拡充を進める必要がある。また、**PHITS** コードの改良を施し、より効率的な線量計算速度を実現させるとともに、**Tsukuba-Plan** との組み合わせによって従来は線量評価を実施すること困難であった例に積極的にチャレンジするといった取り組みも必要であると考えている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- 1) H. Kumada and K. Takada, Treatment planning system and patient positioning for boron neutron capture therapy, Therapeutic Radiology and Oncology, Special Issue, 1-11, 2018
- 2) H. Kumada, K. Takada, F. Naito, et al., Beam performance of the iBNCT as a compact linac-based BNCT neutron source developed by University of Tsukuba, AIP Conference Proceedings, Accepted, 2019
- 3) T. Onishi, H. Kumada, K. Takada, F. Naito, T. Kurihara, T. Sakae, Investigation of the neutron spectrum measurement method for dose evaluation in boron neutron capture therapy, Applied Radiation and Isotopes, 140, 5-11, 2018
- 4) 熊田博明, 医療用加速器中性子源の開発と産業・工業分野への応用, Isotope News, No.757, 1-4, 2018

(2) 学会発表

- 1) H. Kumada, K. Takada, F. Naito, et al., Beam performance of the iBNCT as a compact linac-based BNCT neutron source developed by University of Tsukuba, CAARI 2018 (25th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, テキサス (米国) , 2018.8.13~17
- 2) 熊田博明, BNCT の物理工学分野の過去、現在、未来 –BNCT を医療として確立するための工学的課題–, 日本中性子捕捉療法学会第 15 回学術大会, 北海道大学 (札幌) , 2018.9.1~2
- 3) 熊田博明, BNCT 用治療計画プログラムの現状と今後の課題, 日本中性子捕捉療法学会第 15 回学術大会, 北海道大学 (札幌) , 2018.9.1~2
- 4) 熊田博明, 高田健太, 大西貴博, 他, Characteristic measurement for neutron beam of iBNCT device as a linac-based neutron source for BNCT in University of Tsukuba, 日本医学物理学会第 116 回学術大会, 盛岡, 2018.9.15~16
- 5) H. Kumada, Physics/ Neutron Source, 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北 (台湾) , 2018.10-28~11.2
- 6) H. Kumada, Neutron source for neutron capture therapy, 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北 (台湾) , 2018.10-28~11.2
- 7) H. Kumada, K. Takada, T. Aihara, T. Ohnishi, et al., Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba, 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北 (台湾) , 2018.10-28~11.2
- 8) H. Kumada, K. Takada, T. Terunuma, T. Aihara, et al., Development of a novel patient setting & real-time monitoring system using motion capture technology for boron neutron capture

- therapy, 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北（台湾）, 2018.10-28~11.2
- 9) Kenta Takada, Hiroaki Kumada, Akira Matsumura, et al., Computational evaluation of dose distribution including radiation exposure to ambient organs for BNCT treatment combined with X-ray therapy or proton beam therapy, 18th International Congress on Neutron Capture Therapy (ICNCT-18), 台北（台湾）, 2018.10-28~11.2
- 10) H. Kumada, Current status of development for accelerator-based neutron source and peripheral devices for BNCT, International Symposium of Accelerator based NCT technologies, ソウル（韓国）, 2018.12.10
- 11) 高田健太, PHITS を活用したマルチ放射線治療用線量評価システム, 応用物理学会放射線分科会医療放射線技術研究会, 首都大学東京（東京）, 2019.1.12
- 12) 熊田博明, 筑波大学の医療（BNCT）用小型加速器中性子源の開発状況, 第12回 Quantum Medicine 研究会, 茨城大学（水戸）, 2019.2.17
- 13) 熊田博明, 筑波大学の BNCT 用加速器中性子源の開発状況, 平成30年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会, 京都大学複合原子力研究所（大阪府）, 2019.3.13~14
- 14) 熊田博明, 筑波大学のリニアックベース BNCT 装置: iBNCT の中性子ビームの特性測定, 日本原子力学会 2019 年春の年会, 茨城大学（水戸）, 2019.3.20-22
- 15) H.Kumada, Y.Kanbe, K. Takada, S.Tanaka, T.Sato, T.Furuta, et al., Development of the Monte Carlo based treatment planning system by combination with the tetrahedral based human modeling method, 日本医学物理学会第117回学術大会, パシフィコ横浜（横浜）, 2019.4.11~14

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
COMA	○	27,504	
Oakforest-PACS	○	88,405	
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			