



Title	ホウ素中性子捕捉療法における深部がん照射計画の開発・最適化
Author(s)	守實, 友梨
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2026, 16, p. 142-144
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/106257
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ホウ素中性子捕捉療法における深部がん照射計画の開発・最適化

守實 友梨

大阪大学 大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻

1. はじめに

ホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy: BNCT) は、がん細胞に集まりやすいホウ素化合物 (^{10}B) を投与し、体外から中性子を照射することでがん細胞だけを選択的に破壊する放射線がん治療法である。 ^{10}B に熱中性子が捕捉されると核反応により高線形エネルギー付与 (Linear Energy Transfer: LET) のアルファ線 (^4He) と ^7Li 反跳核が生成され、これらの飛程が細胞 1 個分程度 (約 $10\ \mu\text{m}$) であるためがん細胞のみを選択的に殺傷できる。BNCT は脳腫瘍や頭頸部がんへの適用が進んでおり、2020 年には切除不能な局所進行または局所再発の頭頸部がんに対して保険適用が認められた[1]。また、皮膚がんや悪性黒色腫などへの応用研究も進められている。

一方、膵臓がんや肺がんなど深部に位置し、内視鏡では発見しづらく手術も困難ながんに対しては BNCT の適用が十分に検討されていない。膵臓がんの 5 年相対生存率は約 10% と非常に低く[1]、深部がんへの新たな治療法開発は急務である。BNCT を深部がん治療に適用するうえでは、主に二つの技術的課題が存在する。第一に、BNCT で主に用いられる熱中性子は体内に入ると陽子との弾性衝突によりすぐに減衰するため、現在の治療深度は 5~6 cm に限られている。深部腫瘍への対応策として 10 keV 周辺にピークを持つ熱外中性子の使用や、開頭手術を組み合わせたアプローチが試みられているが、いずれも課題を抱えている。第二に、国際原子力機関 (IAEA) による BNCT の治療基準[2]は部位ごとの明確な定義がなく腫瘍位置による線量閾値が設定されていないため、照射プロトコルが不十分であり、照

射位置の決定が個人依存になりやすいという問題がある。本研究では、これらの課題を解決するため、高速な線量計算システムの開発と照射位置最適化アルゴリズムの構築を目的とする。

2. 先行研究と本研究のアプローチ

深部がん照射に関連する先行研究として、遺伝的アルゴリズムを用いた照射位置最適化[3]や深層学習を用いた治療計画[4]が提案されている。遺伝的アルゴリズムを用いた手法は照射位置が 5 か所に固定され計算コストが大きく、腫瘍線量最大化のみを目的としているため正常細胞への影響が考慮されていないという問題がある。一方、深層学習ベースの手法はモンテカルロ法に比べて高速であるものの、特定のデータセットに依存しており物理法則を無視しがちで誤差が生じやすく、特殊ケースへの対応が困難である。また、単一方向からの照射のみを対象としているため多門照射への拡張が難しい。

これらの課題を克服するため、本研究では物理ベースのモンテカルロ計算を前提としつつ、事前計算データベースの活用により計算速度を大幅に向上させるアプローチを採用する。具体的には、腫瘍位置・照射角度・ビームエネルギーを変数とした照射データセットを D3 センターのスーパーコンピュータで大規模並列計算により構築し、これを基盤として照射プロトコルの最適化・多門照射への展開・深部がん専用スペクトルの探索へと研究を発展させる。

3. 研究方法

3.1 球モデルを用いた高速線量計算手法

本研究では、BNCT の線量計算を高速化する

ために、あらかじめモンテカルロコード PHITS で計算された簡易な頭部球モデル（半径 10 cm の脳細胞、頭蓋骨、皮膚の 3 層構造）を用い、その回転・重ね合わせで任意方向からの照射に対する線量分布を再現する手法を提案した。モンテカルロコードによる逐次計算は物理的精度が高い一方、1 回の計算に数時間を要するため臨床応用の妨げとなっている。本手法では事前計算データベースを参照することで、この計算コストを大幅に削減する。

データベースの構築には大阪大学 D3 センターのスーパーコンピュータ SQUID（汎用 CPU ノード群）を使用した。様々なエネルギーおよび照射角度のポイントソースデータを PHITS により計算し、エネルギー範囲 0.01 eV～10 MeV、照射角度の余弦方向 $\cos \theta$ は 0～1 の範囲で 40 群に分割したデータセットを作成した。 $\cos \theta$ の例について図 1 に示す。中心点における余弦方向とエネルギーを変数とすることで、任意の角度における線量分布を回転操作により再現できるようにした。このデータベースの作成により、異なる照射条件に対して毎回モンテカルロ計算を行う必要がなくなり、照射計画の大幅な効率化が期待される。

3.2 線量計算アルゴリズム

構築したデータベースを用い、指定したビームの半径・エネルギーに対応するデータセットを選択し、中心から任意の方向へ回転移動させることで各ビームの線量分布を作成した。さらに複数方向のビームを重ね合わせることで多門照射を含む任意の照射配置に対する線量分布を算出した。BNCT 線量計算では、ホウ素線量

(DB)、水素線量 (DH)、窒素線量 (DN)、ガンマ線量 (D_γ) の各成分に対し、それぞれ相対的生物学的効果比 (RBE) および複合生物学的効果係数 (CBE) を乗じて足し合わせることで生物学的等価線量 (Gy-Eq) を算出した。ホウ素線量の計算には MCNP タリー F4（反応率

/cc/source) を用い、水素・ガンマ線量には F6 タリー (MeV/g/source) を用いた。各成分の計算結果にはカレントフラックス比 (Current Flux Ratio: CF) を乗じることで、ビームの方向性を適切に反映させた。

3.3 ビーム特性の調査

深部がん照射に適したビーム条件を探索するため、ビーム半径、エネルギー、カレントフラックス比 (CF 比) の 3 パラメータについて系統的な調査を行った。CF 比はビームの指向性を表す指標であり、平行ビームで CF=1.0、等方性では CF=0.5 となる。深部照射においては指向性の高い (CF 比の大きい) ビームが有効であるが、実際の加速器施設では CF 比の上限があるため、施設の制約内で最適なビーム条件を決定する必要がある。ビーム半径と線量分布の関係では、半径が小さいほど表面線量が高くなる一方、深部の腫瘍への集中照射が難しくなるトレードオフが存在することを確認した。エネルギーについては、IAEA の治療基準で推奨される 10 keV 付近の熱外中性子が深部治療に有利であることを計算により確認した。

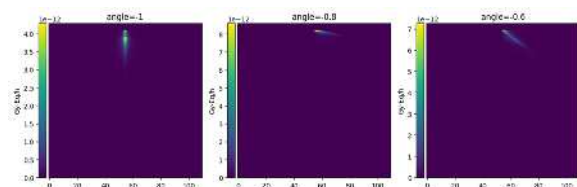


図 1：照射角度の余弦方向の例。angle は方向余弦 $\cos \theta$ の値である。-1 は直線ビームを示す。

4. 計算結果と考察

4.1 モデル計算精度の検証

提案した球モデルを用いた線量計算手法を PHITS によるモンテカルロ計算と比較し、精度を検証した。比較結果について図 2 に示す。相関係数は 0.966 と高い値を示し、計算速度については粒子数 $1e6$ において PHITS（計算時間 5 時間）と比較して約 100 倍の向上（1 分）が確

認められた。部位ごとの対称平均絶対パーセント誤差 (sMAPE) は、脳細胞で 9.5%、皮膚で 13% と実用的な精度を達成した。一方、頭蓋骨では 52% の誤差が生じており、これはポイントソースによる中心部分のビームの誤差が大きいためと考察される。この問題に対しては、ピークを緩和させるフィルターの導入やデータセットの細分化が有効と考えられるが、計算時間とのトレードオフに留意する必要がある。

ビーム半径とエネルギーを変えた場合の線量体積ヒストグラム (DVH) 解析では、CF=0.8、ビーム半径 6 cm、エネルギー 10 keV の条件において、腫瘍位置が表面から 4 cm の場合と 5 cm の場合を比較した。表面から 4 cm の腫瘍に対しては腫瘍最小線量が 20 Gy-Eq 付近に達したが、5 cm では腫瘍線量の低下が顕著であった。これは熱外中性子であっても体内での減衰の影響を受けることを示しており、多門照射による集中照射がさらに重要になることを示唆する。今後は MRI/CT データを用いた実際の頭部形状モデルへの外挿、および最適化アルゴリズムとの統合により、個別患者に対応した照射計画システムの実現を目指す。

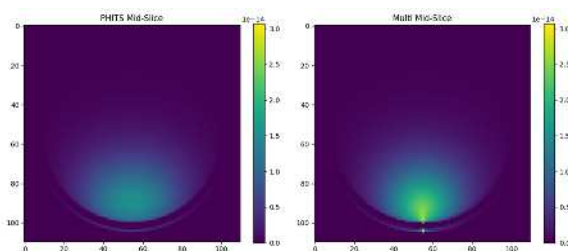


図 2：実際のモンテカルロ計算(左、PHITS)と本提案手法における計算結果(右)の比較

5. おわりに

本研究では、BNCT による深部がん治療を実現するための高速線量計算システムの開発を行った。大阪大学 D3 センターのスーパーコンピュータ SQUID を用い、エネルギー 0.01 eV ~ 10 MeV、照射角度 $\cos \theta = 0 \sim 1$ (40 群) の範囲でポイントソースデータを PHITS で計算したデ

ータベースを構築した。このデータベースをもとに球モデルの回転・重ね合わせにより線量分布を再現する手法を提案した結果、PHITS と比較して計算時間を約 100 倍短縮しながら脳細胞で 9.5% (相関係数 0.966) の精度を達成した。今後は、頭蓋骨部分の誤差低減のためのフィルター導入とデータセット細分化を進めるとともに、本手法を最適化アルゴリズムや実際の MRI/CT データへ適用することで、深部がんに対する BNCT 照射プロトコルの確立を目指す。さらに薬物動態 (腫瘍/正常組織ホウ素濃度比: T/N 比) などの臨床パラメータを加えた包括的な深部がん照射プロトコルの策定へと発展させる予定である。

参考文献

- (1) Center for Cancer Control and Information Services, National Cancer Center, Monitoring of Cancer Incidence in Japan - Survival 2009-2011 Report (2020).
- (2) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in Boron Neutron Capture Therapy, IAEA, Vienna (2023).
- (3) Y. Wang et al., Development of an automatic optimization program for the weight of multi-field irradiation in BNCT based on a genetic algorithm, Journal of Nuclear Science and Technology (2024).
- (4) X. Wang et al., Enhanced difference ghost shuffle U-Net: A hybrid Monte Carlo deep learning denoiser for BNCT dose calculation, Medical Physics, 52(12), e70100 (2025).