

高精度モンテカルロコード PHITS を用いたさまざまな放射線治療に対する包括的線量評価の実現に向けた研究

Research of realization for comprehensive dose estimation system for various radiotherapy with PHITS, a high accuracy Monte Carlo code

熊田博明

筑波大学 医学医療系

1. 研究目的

現代のがん治療法の主翼の一旦を担う放射線治療では、さまざまな種類の放射線（X 線、ガンマ線、陽子線、炭素線、中性子線（BNCT））が用いられている。当研究グループは、現代の放射線治療領域において最も高精度な線量計算エンジンとされるモンテカルロ計算を活用した線量評価を確立するための研究を、貴センターの学際共同利用を利用しつつ進めている。2017 年度には BNCT 分野における線量計算を多数実施し、2018 年度には BNCT のみならず、X 線治療、粒子線治療にも高速モンテカルロ計算の適応範囲を拡大すべく線量評価体系の構築を推進してきた。2019 年度には超微細計算モデルに対してのモンテカルロ線量計算法の確立を目指して研究を進めてきた。

従来の X 線およびガンマ線を用いた放射線治療では、物理的な線量である吸収線量のみが重要な指標であったが、昨今新たに利用されつつある粒子線治療（陽子線、炭素線、BNCT）では、同じ吸収線量でも生物学的な効果が異なるため、生物学的線量の評価も重要である。また、最新の実験的知見においては、大線量を瞬時に照射する方法で、細胞に与える生物学的効果が異なることが示唆されるなど、今後、放射線治療分野に新たな展開が開かれることが期待されている。これを踏まえ本研究では、当グループで構築してきた種々の放射線治療ビームの線量計算体系を用いて、これまでは主に物理的線量の評価を主体として行ってきた線量評価に加え、細胞レベルでの生物学的な効果を考慮した線量評価の実施を試みる。

2. 研究成果の内容

（各種放射線治療ビームに対する microdosimetry）

構築済みの臨床放射線治療ビーム照射体系を用いて、陽子線、炭素線、BNCT ビームを照射した際の microdosimetry をモンテカルロ計算により実施した。生体を模したファントム中における lineal energy 分布（ y 分布）および specific energy 分布（ z 分布）を、モンテカルロ計算コード PHITS を用いて計算した。得られた z 分布と細胞生存率を類推する Microdosimetric kinetic model を組み合わせて生物学的効果比を求め、さらにその生物学的効果比を考慮した線量分布を取得した。一般に、放射線治療ビームの種類が異なると、同じ生物効果を生じさせるために必要となる線量が異なることが知られており、その

指標を RBE と呼び、臨床的に重要な評価項目である。物理的線量に RBE を荷重した線量分布（生物学的線量）は、種類の異なる放射線治療ビームを臨床的知見から比較することが可能である。本年度実施した計算によって、陽子線、炭素線、BNCT ビームに対する RBE を microdosimetric quantity をベースとして評価することに成功した。

（microdosimetry を用いた照射野外線量評価）

放射線治療では腫瘍部のみに線量を集中させるため、照射範囲を限局した照射が実施される。しかし、治療ビーム自体の散乱や、治療ビームが二次的に発生させる粒子によって照射野外の線量を zero にすることは難しい。本年度、この照射野外線量に着目し、陽子線治療ビームおよび BNCT ビームを照射した際の照射野外線量について、上述した microdosimetry を応用して評価した。放射線治療ビームの照射に伴う照射野外線量は、これまで被ばく線量として評価されてきたケースが多かった。本評価では、microdosimetry の y 分布および z 分布として評価することで、線量付与に寄与する粒子成分を区分して評価することに成功した。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

当研究グループは、放射線治療、特に BNCT の高精度線量評価技術の高度化に関する研究開発が起点であった。BNCT に続いて、X 線治療ビームおよび陽子線治療ビームに対する正確なモンテカルロ用計算体系構築へと適用拡大を図っている。モンテカルロ法を用いた高精度線量計算を行うためには、強力な計算処理パワーが必要であり、当研究室に整備している PC-WS クラスの並列計算環境では非効率的で、1つの計算結果を得るために数日を要してしまうという大きな課題を抱えていた。学際共同利用による OFP の活用では、より大規模な並列計算を実施することが可能であり、さらに、物理的、時間的制限なくアクセスして計算を実行することが可能となった。これにより当該研究活動を飛躍的に進めることができるようになり、従来の計算環境の数十倍以上の計算結果を得ることができた。また、これまでの研究活動で OFP 上に構築した放射線の線量評価環境は、今後実際の臨床研究に向けた研究開発にも寄与できるものである。

4. 今後の展望

2020 年度に検討した放射線の生物学的効果、影響に基づく線量計算手法は、今後実際の放射線治療の線量評価・治療計画に応用できる可能性がある。次年度以降、モンテカルロベースの放射線治療用治療計画システムへの導入について検討したい。特に、BNCT 分野は、2020 年度から治療が保険適用となったが、現状で行われている線量評価の精度は十分とはいえない。本研究結果を同治療分野に早期に導入することを検討したい。また、粒子線治療、X 線治療分野にも同技術を展開するための検討を並行して進めたい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. H. Kumada, K. Takada, T. Terunuma, T. Aihara, A. Matsumura, H. Sakurai, T. Sakae, Monitoring patient movement with boron neutron capture therapy and motion capture technology, *Appli.Radiat.Isot*, 163, 109208, 2020
2. H. Kumada, K. Takada, S. Tanaka, Y. Matsumoto, F. Naito, T. Kurihara, T. Sugimura, M. Sato, A. Matsumura, H. Sakurai, T. Sakae, Evaluation of the characteristics of the neutron beam of a linac-based neutron source for boron neutron capture therapy *Appli.Radiat.Isot*, 165, 109246, 2020
3. H. Kumada, K. Takada, T. Aihara, A. Matsumura, H. Sakurai, T. Sakae, Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba, *Appli.Radiat.Isot*, 166, 109222, 2020
4. Takada K, Kumada H, Matsumura A, Sakurai H, Sakae T. Computational evaluation of dose distribution for BNCT treatment combined with X-ray therapy or proton beam therapy. *Applied Radiation and Isotopes* 165, 109295, 2020
5. Takada K, Sato T, Kumada H, Sakurai H, Sakae T. Evaluation of RBE-weighted doses for various radiotherapy beams based on a microdosimetric function implemented in PHITS. *Journal of Physics: Conference Series* 1662: 012004, 2020

(2) 学会発表

1. H. Kumada, Y. Sakurai, H. Tanaka, Y. Kiyonagi, Beam Design Considerations for BNCT device, Technical Meeting on Advances in Boron Neutron Capture Therapy, IAEA, Web Congress, July 2020
2. H. Kumada, Y. Li, S. Tanaka, F. Naito, T. Kurihara, T. Sugimura, M. Sato, H. Sakurai, T. Sakae, Beam performance of the linac-based neutron source for BNCT in University of Tsukuba, UCANS_Web-2020, December 2020
3. 熊田博明, BNCT 治療装置の国際標準化について, 令和 2 年度京都大学複合原子力科学研究所専門研究会, オンライン開催, 2020 年 9 月
4. 熊田博明, 次世代がん放射線治療: BNCT の研究開発最前線ー世界をリードする医療用加速器中性子源技術, 中部原子力懇談会 (オンライン開催), 2021 年 2 月

(3) その他

なし

| 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 |
| Cygnus | | | |
| Oakforest-PACS | ○ | 174,600 | なし |
| ※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。 | | | |