

## 高速量子線シミュレーションを用いた高精度線量評価基盤の確立

### Establishment of High-Precision Dose Evaluation Basis Using High-Speed Quantum Beams Simulation

熊田博明

筑波大学医学医療系

#### 1. 研究目的

放射線治療を実施する際には、個々の患者の CT 画像から作成した計算モデルに対して放射線の照射シミュレーションを実施し、最適な治療計画を導く。実際の治療ではこの治療計画に従って治療を実施する。現在の放射線治療は、X 線だけでなく炭素線、陽子線、中性子線など様々な放射線を用いて治療を行うが、各放射線は殺細胞効果/特性が異なる。現状の線量計算アルゴリズムの中で、モンテカルロ法（以下、MC 法）は、種々の放射線の挙動計算、線量計算ができ、かつ、他の計算アルゴリズムに対して最も計算精度が高いと考えられている。一方で、MC 法は 1 個 1 個の粒子挙動をシミュレートすることから、大きな計算コストがかかり、実際の治療には実用的ではない。この課題に対して、Miyabi による超並列計算環境下でモンテカルロ計算を実施できる環境を構築し、放射線治療に残っている様々な課題の解決を試みた。本研究にはモンテカルロコード・PHITS を用いて実施した。PHITS はあらゆる放射線の線量計算に対応しており、また、マイクロドシメトリ機能も搭載している。

本研究が完遂した際には、あらゆる放射線照射に対する正確・高精度な線量評価システムが確立されることとなり、当該分野で有用な同一プラットフォームによる包括的線量評価システムを確立することができる。

#### 2. 研究成果の内容

BNCT 分野の研究では、Miyabi による MC 計算の高速化を図る。BNCT の治療計画では、古くから MC 法による線量計算が行われてきた。しかし従来の PC ベースの並列計算機を用いた計算では、人体（患者）モデルに対する MC 計算は、数十時間から数日を要していた。この状況に対して Miyabi で PHITS を実行できる環境を構築し、超並列による線量計算を実現した。旧来の PC ベースの MC 計算に対して数十倍以上の速さで線量評価を実施できるようになった。現在当グループは、初発悪性脳腫瘍に対する第 I 相治療を実施しているが、この治療の治療計画時の線量計算を Miyabi で実行することで、従来よりも多くの条件での照射シミュレーションを実施でき、個々の患者に対してより適切な照射条件を導くことが可能となった。

最近の陽子線治療のビーム照射法は、がん病巣に対して細い陽子ビームを動かしながら照射する“スキヤニング照射”が一般的となっている。筑波大学もこのスキヤニ

ング照射が可能な治療装置を整備し、2025 年から同装置を用いた治療が開始された。しかし、このスキヤニング照射に対する MC 法による線量計算は、照射条件設定が複雑であり、計算コストが膨大にかかることから、MC 法による解析が困難であった。この課題に対して、筑波大学の陽子線治療のスキヤニング照射を PHITS で再現し、MC 計算を Miyabi で実行してスキヤニング照射時の線量分布を導くことに成功した。これにより、陽子線スキヤニング照射時の線量分布を MC 法によってより高精度に評価することが可能となり、また、陽子線照射時に発生する 2 次中性子の影響解析も併せて実施することが可能となった。

各放射線の生物学的影響を MC 法によって解析するため、PHITS のマイクロシメトリ機能を用いて線量計算を実施した。この機能は、放射線の挙動計算を細胞レベルで計算することでより正確な線量計算を実施する技術であるが、膨大な計算コストが必要となり、PC ベースの計算環境では実施できなかった。この課題に対して本研究活動によって、PHITS のマイクロシメトリ計算を Miyabi で実施することが可能となり、従来法では実用的ではなかった生物学的線量評価の実施が可能となった。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

放射線治療時に各放射線が生体に与える影響を正確に評価する方法として、MC 法が開発されてきたが、計算コストが膨大にかかることが課題となっていた。特にマイクロシメトリ評価や放射線照射によって 2 次的に発生する中性子の影響解析、スキヤニング照射などをモンテカルロ法で再現してシミュレーションすることは実用的に困難であった。この状況に対して、本プログラムによって Miyabi で MC 解析を実施できるようになり、これにより計算コストに基づく課題を解消できる見通しが得られた。これにより、マイクロシメトリなどの基礎・基盤分野から、治療時の治療計画立案といった応用分野までの放射線解析を MC 法で実施することが可能となった。本成果は、将来、放射線治療の治療効果・精度の向上にも寄与するものである。

### 4. 今後の展望

2025 年度は Miyabi を用いた計算解析が主であったが、この計算によって得られた研究成果を適宜、関連する学会で発表するとともに論文も行う。

2026 年度も継続して Miyabi を利用できる機会を得たことから、2025 年度に引き続き、Miyabi によるモンテカルロ解析を継続して実施する。マイクロシメトリ分野では、新しい生物学的計算モデルによる計算を行える環境を整備する。BNCT 分野では治療計画に MC 法と深層学習法を組み合わせるさらなる高速線量計算を実現する。陽子線治療においても、スキヤニング照射による解析を種々の臓器に対しても行えるように適用拡大を目指すとともに、2 次中性子の影響についても解析を行う。

5. 成果発表

- (1) 学術論文： 2 (うち Accepted：1)
- (2) 学会発表： 7 (国内：7, 国際：0)
- (3) その他： 0

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus				
Miyabi-G				
Miyabi-C	○	5088	0	0
※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				