

## 高速かつ高精度モンテカルロ線量計算エンジンを搭載したマルチモ

### ダリティ対応型線量評価システムの基盤開発

#### Development of a core technologies for multi-modal treatment planning system with the high-speed and high-precision Monte Carlo dose calculation engine

熊田博明

筑波大学医学医療系

#### 1. 研究目的

現代の放射線治療には、さまざまな種類の放射線（X線、粒子線、中性子）が利用されている。当研究グループは、ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）用の治療計画システムを開発し、その線量計算エンジンにはモンテカルロ法を採用している。モンテカルロ法による線量計算は、現在の放射線治療において最も高精度な線量評価法として知られており、BNCT用の治療計画システムへの搭載は事実上必須となっている。一方で、モンテカルロ法による線量計算手法は、膨大な数の粒子シミュレーションを繰り返す、つぶさにその挙動を解析することで確率的に線量を決定していくため、**time-consuming** の呪縛から逃れられておらず、BNCT以外の放射線治療ビームについては研究用ツールとしての活躍が主であり、臨床的に広く普及しているとは言い難い。当研究グループでは、モンテカルロ法による高精度線量評価基盤をBNCTにおける治療計画システムに用いることはもちろん、その他に必要とされる各種線量評価や、他の放射線治療ビームにも適応させるための取り組みを持続的に行っている。これらの研究背景を踏まえ、2019年度には主に以下の取り組みを実施した。

①BNCTにおける照射野外線量のモンテカルロシミュレーションによる評価

②臨床用各種放射線治療ビームに対する線量評価実施体系の拡充

③構築した線量評価体系を用いた線質評価

#### 2. 研究成果の内容

##### ①BNCTにおける照射野外線量のモンテカルロシミュレーションによる評価

放射線治療においては目的箇所（腫瘍）に線量を集約し、それ以外の部分（正常組織）に付与される線量を最小限に留めるのが大原則である。一般的な放射線治療においては、照射範囲（照射野と呼ぶ）を可能な限り小さく絞り、かつ多方向からビームを照射することで交点の線量分布を向上させている。一方、BNCTはその特性上比較的大きな照射野、かつ一方向のみからの照射が用いられており、近年照射野外線量評価が重要になりつつあった。2019年度、当研究グループが構築済みのBNCT用線量評価体系を用いて、筑波大学が推進中のBNCTプロジェクト（iBNCT）における照

射野外線量を定量的に評価した。本定量評価では中性子による線量付与はもちろん、付随して発生する光子による線量付与も勘案した。

### ②臨床用各種放射線治療ビームに対する線量評価実施体系の拡充

2018年度に構築したX線治療ビームおよび陽子線治療ビームに対する線量評価体系の高度化を推し進め、臨床的な治療ビームを正確に再現できる線量評価体系を構築した。X線治療用ビームに関しては、従来モンテカルロ計算の効率性を重視し、光子の **phase space file** を用いた計算体系を使用していたが、実際の治療機の内部構造を反映するため、電子を金属製ターゲットに入射させX線を発生させる線量体系を2019年度に構築した。また、陽子線治療ビームに関しては、X線治療ビームに比べて、極めて複雑な照射野形成系を有しているが、患者個々に異なる照射器具（ボーラス、コリメータ形状、リッジフィルタ形状、等）を全て正確に考慮した線量評価体系を構築し終えた。また、構築したこれらの線量評価体系については、実際に測定したファントム内の2次元線量分布と比較する事によって、その妥当性についても検証した。

### ③構築した線量評価体系を用いた線質評価

2019年度に構築したこれらの線量評価体系、およびすでに構築済みのBNCT用線量評価体系を用いて、以下に示すような種々の線量評価を実施した。

（LET評価）陽子線治療の臨床的ビームに対する線質評価として線量平均LETと呼ばれる線質指標を計算し、解析的手法により得られた結果と比較した。

（ $y^*$ 評価）BNCTおよび陽子線治療ビームに対して、 $yD$ および $y^*$ と呼ばれるマイクロドジメトリで用いられる線質指標を包括的に計算した。また、当研究グループが開発したBNCT用治療計画システムと組み合わせることで、人体内における $y^*$ の空間分布を計算し、医療用画像であるCT画像上にマッピングすることに成功した。

（BNCTにおける高精度線量評価）当研究グループが開発したBNCT用治療計画システムを用いて構築した高精細ボクセルモデル（CT画像のピクセル値から構築する人体の線量評価モデル）に関し、ボクセルサイズと計算時間との関係性を評価するとともに、今後求められる新たな計算モデルについて検討した。

## 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、BNCTにおけるモンテカルロ法を用いた線量計算が出発点であった。そこから、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波及させ、かつ **validation** する作業は極めて手間のかかる作業であり、研究室に整備されたレベルの並列計算環境では不可能に近い。学際共同利用によるOFPの活用では、計算資源の利用に空間的な制約がなく（2019年度の利用においては、ほぼ学外からのアクセスによる利用）、また、時間的制約も少ない（必要なモンテカルロ計算を夜予約し、翌日評価することが可能、など）。さらに、これらの構築済み計算体系を用いて、さまざまなビームに対する線量・線質評価が行う基盤が醸成されたことは、学際共同利用の直接的な価値である。

4. 今後の展望

2019年度に構築した各種放射線治療ビームに対する線量計算体系は、今後さまざまな線量評価・線質評価に役立てることができる貴重な財産である。次年度以降、研究的価値の高い評価を数多く実施し、放射線治療全般におけるモンテカルロ計算の価値を向上させていきたい。特に、粒子線やBNCT領域においては、線量評価において新しいコンセプトが導入されつつある領域であるため、それらに対する評価にも活用していきたいと考えている。また、当研究グループが構築してきた線量計算体系を幅広い研究者に知ってもらうためのアウトリーチ活動も推進していきたい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Koketsu J, **Kumada H, Takada K**, et al.: 3D - printable lung phantom for distal falloff verification of proton Bragg peak, J. Applied Medical Physics, 20, 86-94, 2019, DOI: 10.1002/acm2.12706

(2) 学会発表

1. **Takada K, Sato T, Kumada H**, Sakae T. Microdosimetric applications using PHITS for proton therapy and BNCT based on full mock-up simulation geometries. Mini-Micro-Nano-Dosimetry and Innovative Technologies in Radiation Oncology Workshops 2020 (Wollongong, Australia), 2020.02
2. **Kumada H, Takada K, Sato T**, et al.: Multimodal Monte Carlo Treatment System Capable of Microdosimetry with PHITS. Mini-Micro-Nano-Dosimetry and Innovative Technologies in Radiation Oncology Workshops 2020 (Wollongong, Australia), 2020.02
3. **Kumada H**: Treatment planning and dose estimation for BNCT. 1st Ru BNCT Conference (Novosibirsk, Russia), 2019.10
4. **Kumada H, Takada K**, Tanaka S, et al.: Verification of performance for dose estimation for BNCT by the Monte Carlo based multi-modal treatment planning system. The 58th Annual Conference of the Particle Therapy Co-Operative Group (Manchester, England), 2019.06

(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
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	187,500	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。			