

「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」

平成 15 年度採択研究代表者

佐々木 節

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構計算科学センター・教授

高度放射線治療のためのシミュレーション基盤の開発

1. 研究実施の概要

がんは、非常に身近な疾患の一つであり、1981年以来日本人の死因の一位であり続けている。多くの治療法が研究され、実際に医療の現場で用いられるようになってきたが、治療中、治療後の QOL(生活の質)の面から、粒子線治療が大きな注目を集めている。このような社会的要求に応じ、粒子線治療に焦点を絞り、がんの放射線治療の高度化に寄与すべく、シミュレーションを行うために必要なソフトウェアの研究と開発を本研究は行っている。

粒子線治療には、現在、陽子線または炭素線が利用されている。炭素線は、炭素の物理的性質から、より高い治療と少ない副作用が期待される。一方で、炭素に関わる物理プロセスは複雑で、未だ完全に理解されていない。現状でも、陽子、炭素両方のシミュレーション結果に対し、治療に十分な精度は得られているが、特に炭素と物質の相互作用を理解し、精度を向上させることに力を入れてきた。シミュレーションの結果の正当性の検証を行うことも本研究の大きな柱となっている。

治療施設をシミュレーションするために必要なソフトウェア部品の多くの設計と実装が終わり、研究成果は、IEEEなどの国際会議や論文として発表されるだけでなく、国内外の施設にソフトウェアを提供し、評価をして頂いている。画像診断装置の画像と線量分布を合わせて三次元で可視化するソフトウェアの開発も進み、専門家に評価をいただいているところである。GRID にも対応し、地理的に分散している機関の間で情報と計算資源の共有が可能となった。

粒子線治療のシミュレーションを行うために必要なソフトウェアは、一通り完成したが、各治療施設からの意見を取り入れ、今後も開発を続けていく必要がある。粒子線治療のみならず、他の放射線治療も統合的にシミュレーションを行い、異なる治療法を個別の患者に対して比較するために必要な研究と開発が望まれている。本年度 CREST 研究は終了するが、これまでの成果をさらに発展させ、がん治療の高度化という社会的要求に応えられるよう、努力を続けたい。

2. 研究実施内容

がんの放射線治療、特に粒子線治療をシミュレーションするために必要なソフトウェア一式を開発することを目標の研究を続けている。粒子線治療には、陽子線、または炭素線が用いられている。双方とも、線量分布が局所化し、がんをピンポイントで治療することが可能であり、なおかつ副作用を軽減できることが知られている。炭素線は、陽子線に比べて、さらに生物学的効果が高く、線量分布の局所性も高いので、陽子線よりもさらにすぐれた性質があると考えられている。しかし、炭素と物質の相互作用は複雑で、技術的に利用するには未だ解明すべきことが多くある。陽子線、炭素線両方の場合に対して、実験結果との詳細な比較を行いつつ、結果の正当性の検証を慎重に行ってきた。

開発しているソフトウェアを大きく分けると、各施設の実装に用いるソフトウェアツールキット、粒子と物質の相互作用を扱い、線量を計算するための線量計算エンジン、可視化ソフトウェア、グリッドコンピューティング対応部分に分けられる。各施設に対応するために必要なソフトウェアツールキットは、これまでに、放射線医学研究所(炭素)、国立がんセンター東病院(陽子)、兵庫県立粒子線医療センター(陽子、炭素)、米国カリフォルニア州立大学サンフランシスコ校(陽子)、イタリア CATANA(陽子、炭素)、ドイツ GSI(炭素)の各施設の実相に用いられている。図 1 にまとめの表を示す。

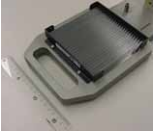
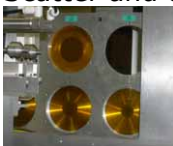
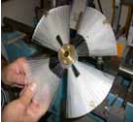
Facility	Accelerator	Beam Energy (MeV)	Lateral Spreading System	Range Modulator
HIBMC Gantry Japan	Synchrotron	Proton 150,190,230	Wobbler magnets and scatter 	Ridge filter 
NCC Gantry Japan	Cyclotron	Proton 150,190,235	Scatter and double scatter 	Ridge filter 
UCSF United States	Cyclotron	Proton 67.5	N/A 	Propeller blades 
HIMAC Japan	Synchrotron	Carbon 400 MeV/u	Wobbler magnets and scatter	Ridge filter
HIBMC Japan	Synchrotron	Carbon 320 MeV/u	Wobbler magnets and scatter	Ridge filter
GSI Germany	Synchrotron	Carbon ~400 MeV/u	Beam scanning	Fine Ridge filter 
CATANA Italy	Synchrotron	Proton:45 to 100 Carbon: ~50MeV/u	N/A	Propeller blades

図1:国内外粒子線治療施設対応の状況

それぞれの施設は、異なった方式を取っているが、すでに用意されているソフトウェア部品を利用して実装をすることが可能となっている。オブジェクト指向法を採用して設計実装が行われているため、容易に新しい施設の実装が行えるようになった。これらの各施設と協力し、シミュレーション結果の正当性の検証に取り組んでいる。

兵庫県医療センターでは、実際の患者に対する線量分布を治療計画装置と我々のシミュレーションソフトウェアの間で比較を行った。治療計画装置は、計算の高速化のため、粒子と物質の相互作用を正確に扱っていないので、両者の結果には差異がみられた。

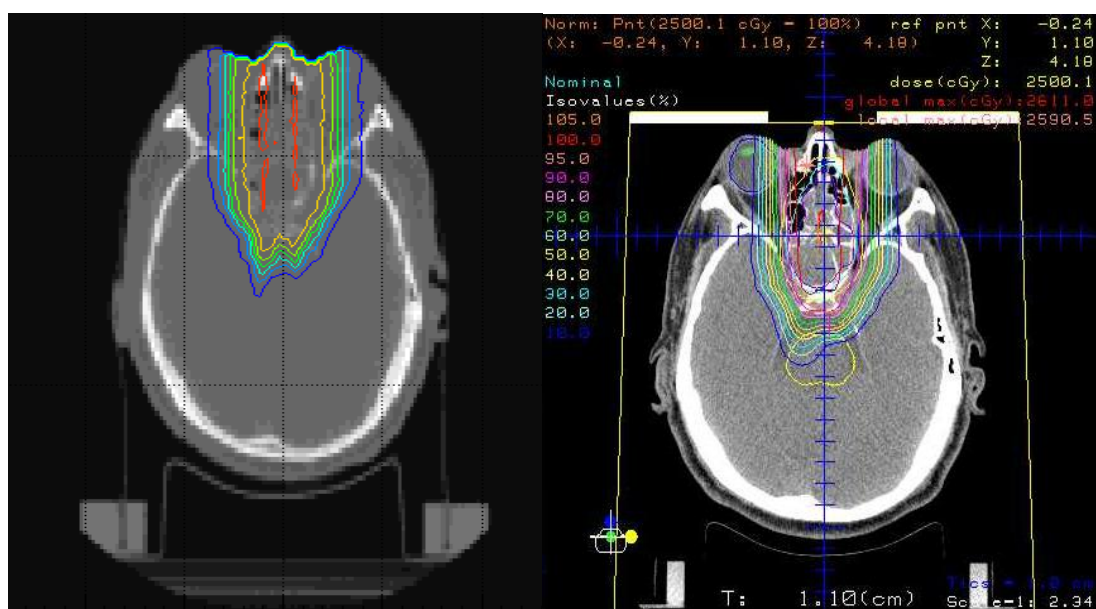


図2:シミュレーション(左)と治療計画装置(右)による CT 画像上の線量分布

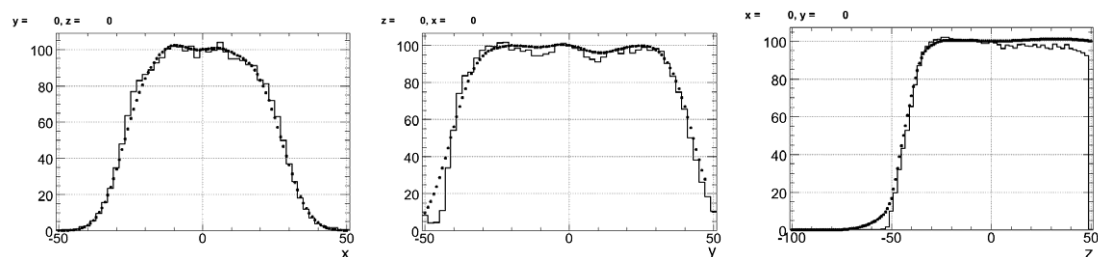


図3:治療計画装置(実線)とシミュレーション結果(破線)の比較

図2の左側の画像は、本研究で開発されたソフトウェア gMocren によって可視化されたものである。この結果は、日本医学物理学会において発表された。

計算の高速化のため、グリッド技術を利用し、並列計算をするための基盤整備も進んでおり、ヨーロッパで開発された gLite と呼ばれるミドルウェア、および日本国内で開発されている NAREGI の双方の環境で実行できるようになった。

今後は、物理プロセスの計算精度の向上に努めると共に、ビースキャニング法に対する結果の正当性の検証を行う必要がある。また、台湾において 3 つの粒子線施設の建設が決まるなど、新たな施設が次々と建設される予定があるので、それらに対応していきたいと考えている。また、グリッド化に頼るだけでなく、コード全体の見直しを図るほか、アルゴリズムの検討を行い、計算時間の短縮を図ることが必要とされている。グリッド対応に関しては、線量計算グリッドオペレーションセ

ンターを設置し、環境の導入、計算資源の遠隔監視、ソフトウェアの開発支援を行うことが期待される。

開発が停止されたソフトウェアは利用されなくなるので、CREST 研究後も開発を続け、放射線医療の高度化に役立つよう、努力を続ける予定である。

3. 研究実施体制

(1) 総括グループ

- ① 研究者名: 佐々木 節 (高エネルギー加速器研究機構)
- ② 研究項目: 研究の総括およびインターフェースの設計と実装

(2) 重粒子コード検証グループ

- ① 研究者名: 金井 達明 (放射線医学総合研究所)
- ② 研究項目: 重粒子線及び陽子線コードの実験的検証、重粒子線の生物効果

(3) 粒子線治療モデリンググループ

- ① 研究者名: 田中 覚 (立命館大学)
- ② 研究項目: Geant4 と画像診断装置および治療計画装置とのインターフェースの基礎となるモデル化

(4) GRID研究グループ

- ① 研究者名: 佐々木 節 (高エネルギー加速器研究機構)
- ② 研究項目: シミュレーションの並列化およびデータの共有

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- ・ 歳藤 利行「Measurements of the total and partial charge-changing cross sections For 200–400MeV/nucleon ^{12}C in water and polycarbonate.」, Physical Review C, 2007 年 5 月 9 日 出版 75, 054606 (2007)