

「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

(高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター 助教授)

「高度放射線医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

がんの放射線治療のシミュレーションを機器や手法によらず包括的に行うために必要なソフトウェアの開発を目指している。特に、治療効果と副作用の少なさで注目されている粒子線治療（炭素、陽子）に焦点を絞り、シミュレーション結果の妥当性の検証にも重点を置いた。炭素と物質の相互作用は複雑なので、今後、改善の余地はあるが、治療に必要な精度を達成することが出来た。GRID 技術を採用し、並列処理を行うことで、実行時間の短縮も図っている。独自の可視化ツールの開発にも成功し、シミュレーション結果を画像診断装置の出力と合成し、表示することが可能となった。今後は、ソフトウェアの設計と実装をさらに見直し、実用度を上げる努力が必要である。それと平行し、新しい炭素の物理モデルの探求と、既存モデルのパラメータの調整を行い、精度の向上を目指す。また、生物学的効果を取り込む努力を行う。

2. 研究実施内容

研究目的

がんの放射線治療には、様々な手法があるが、特定の患者に対する最善の治療を見つける手法は確立してない。治療法によって、要する時間も大きく異なり、患者の経済的負担にも大きな差があるので、より多くの患者をより効果的に治療し、患者の満足度を向上させるためには、事前に各手法による治療効果の予測を知ることが強く望まれている。エックス線を用いた治療に関しては、以前から、多くの治療装置に対してシミュレーションが用いられ、治療計画に生かされている。近年、治療効果の大きさと、副作用の少なさから注目されている、粒子線治療に関しては、未だ未整備の状態である。粒子線治療も含めた、がんの放射線治療のシミュレーションを機器や手法によらず包括的に行うために必要なソフトウェアを、画像診断装置とのインターフェース、可視化を含めて行う。シミュレーションの結果の妥当性を基礎的な実験データとの比較を行うことで、検証し、適用可能範囲、制度を明らかにする。また、GRID 技術を適用することで、計算時間の短縮と利便性の向上を図る。

方法

ソフトウェアの設計には、ソフトウェア工学的方法の一つであるオブジェクト指向分析・設計を行う。ユーザからユースケースを収集し、ソフトウェアに必要な機能と要求要件を明らかにする。この結果に基づき必要な開発要素を決定し、他のグループと連携して開発を行う。放射線コードとしては、Geant4を採用する。メンバーの多くがGeant4の開発者でもあるので、必要に応じてGeant4の改善も行う。様々なソフトウェア部品を平行に開発を行い、システムとして稼働させるために必要なインターフェースを定義し、提供する。ソフトウェアの実装を一度行ったら完成というわけではなく、ユーザの意見を取り入れ、設計の見直しと再実装を繰り返す、スパイラル開発プロセスを行う。チームに参加している施設だけではなく、国内にある陽子線、炭素線の治療施設を全て訪問し、要求要件とユースケースの聞き取りを行った。また、国外の施設からも協力の申し出があり、それら施設を訪問し、同様の作業を行った。次表にそれらの施設を示す。

施設名	所在地	
放射線医学研究所*	千葉県千葉市	炭素線
兵庫県粒子線医療センター*	兵庫県たつの市	陽子線、炭素線
国立がんセンター東病院*	千葉県柏市	陽子線
静岡県立がんセンター	静岡県	陽子線
若狭湾エネルギー研究センター	福井県	陽子線
筑波大陽子線医学利用研究センター	茨城県つくば市	陽子線
CATANA	カタール、イタリア	陽子線
UCSF	サンフランシスコ、米国	陽子線 (UC Davis)
DKFZ (ドイツがんセンター)	ハイデルベルク、ドイツ	炭素線(GSI)

表1 聞き取りを行った治療施設 (注 *メンバーとして参加している機関)

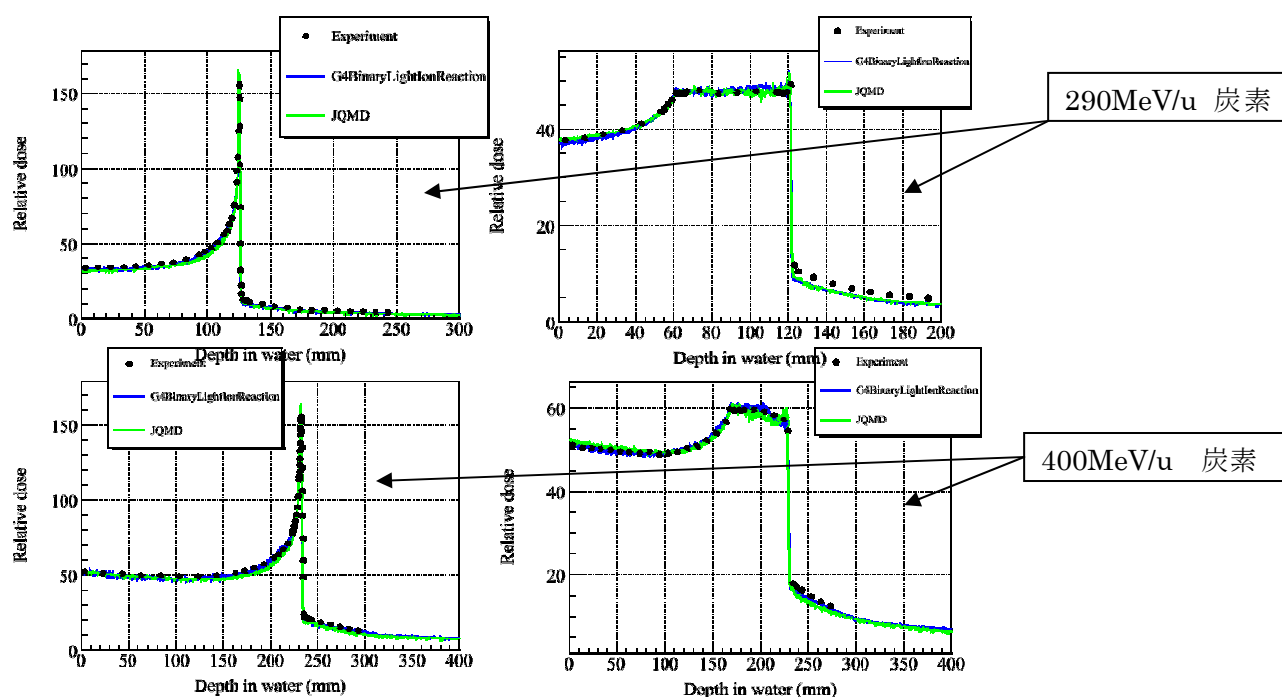
その結果、各施設において、現在使われている治療計画装置の検証、治療効果の検証、および新しい治療施設の開発のためのシミュレーションが急務であることが分かった。結果の精度向上に重点を置いて、必要なソフトウェア部品の開発を進めることとなった。治療施設定義部分、画像診断装置へのインターフェース、可視化ソフトウェアなどを全体としてひとつのソフトウェアとして稼働させることを目標とする。

成果

炭素、陽子の物質中を測定すると、ブラッグピークと呼ばれるピークを形成する。このピーク位置前後に集中的に線量が分布する。これは、X線など治療に使われるほかの粒子との大きな違いであり、入射エネルギーを調整することで、正常細胞への照射を避け、がん細胞に線量を集中させることが可能となる。がん細胞には奥行きがあるので、入射エネルギーに幅を持たせることで、拡大ブラッグピーク(SOBP: Spread Out Bragg Peak)を生成することが可能である。基本的な量であるブラッグピークの位置と拡大ブラ

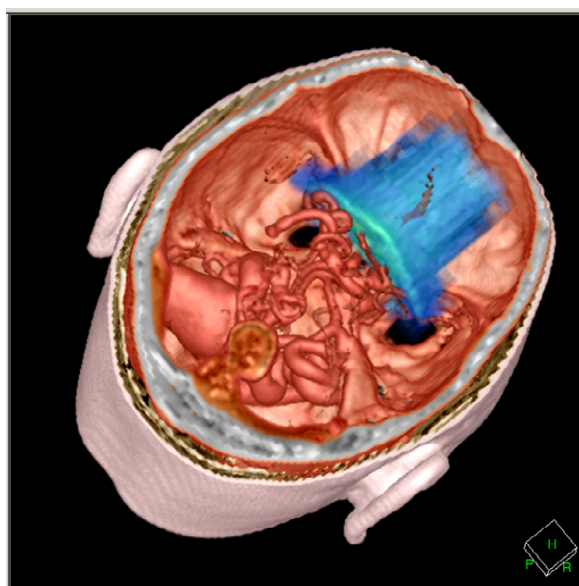
ブラッグピークの再現が粒子線治療（炭素、陽子）のシミュレーションを行うためには最低限必要とされる。炭素に関しては、放射線医学研究所の実験データと、陽子に関しては、兵庫県立粒子線医療センターのデータとシミュレーションの結果を比較したところ、治療に必要な精度では、両者が合致した。より精度を上げるためには、炭素および陽子の核反応を正確に再現することが重要である。特に炭素の核反応は、複雑であり、関連する粒子数、相互作用が多いため、純粋な理論計算は困難であり、モデルに頼らざるを得ない。様々な実験データと比較し、より良くデータを再現するモデルの選択と、パラメータのチューニングを行っている。炭素の核反応に関する研究をさらに進めるには、核反応を起こした炭素を選び出す必要がある。このために必要な研究を続けている。

以下に示すのは、炭素のブラッグピーク、および拡大ブラッグピークを放射線医学研究所のデータとシミュレーションの比較を行った図である。

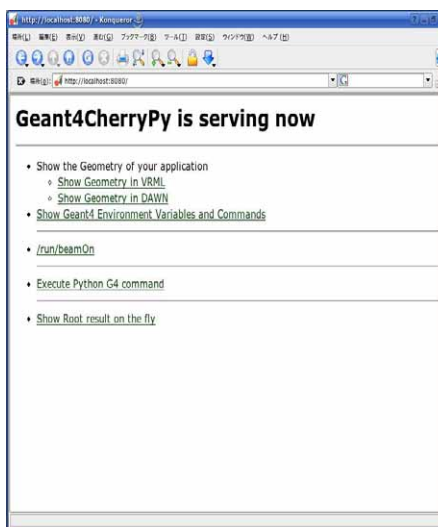
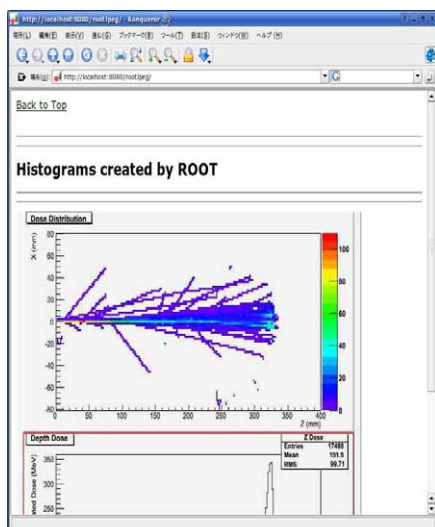


炭素に対しては、二つのモデルとの比較を行ったが、優劣を付け難い状況である。どちらのモデルを使っても炭素の核反応を充分には再現しておらず、今後、パラメータを出来る限りチューニングする必要がある。モデルに寄らない理由としては、炭素と物質との散乱断面積の値が合っていない可能性が高い。新しい散乱断面積の測定が放射線医学研究所で行われているので、公開されれば、シミュレーションに取り入れる予定である。

GRID 環境を病院などネットワークセキュリティの高度な機関においても利用を可能にする GRID web ポータルの開発が進んでいる。ファイアウォールの内側で作業しているユーザは画像診断装置からの出力である DICOM ファイルと入力パラメータ、ジョブの実行条件などを web ブラウザから入力し、実行ボタンをクリックする。ジョブは、グリッド環境で並列に処理され、出力のファイルが一箇所に集められた後、統計処理をした結果のグラフ



が表示される。必要に応じて、一つの事象の可視化を行うことも可能である。gMocren を利用する際には、ファイルをダウンロードしてから表示することになる。以下に web ポータルβ版による実行例を示す。



3. 研究実施体制

(1) 総括グループ

① グループリーダー

佐々木 節(高エネルギー加速器研究機構 助教授)

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グループリーダー

金井 達明((独)放射線医学総合研究所 室長)

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グループリーダー

田中 寛(立命館大学 教授)

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グループリーダー

佐々木 節(高エネルギー加速器研究機構 助教授)

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)

- 著者名 Masanobu Ozaki *et. al.*

タイトル Framework for a Geant4-Based Simulator of the Radiation Background and Detector Responses of the Space X-Ray Observatory Suzaku (Astro-E2)

掲載誌 IEEE Transactions on Nuclear Science Vol.53, No.3, June 2006

- 著者名 Nobuyuki Kanematsu *et. al.*

タイトル Biological dose calculation with Monte-Carlo physics simulation for heavy-ion radiotherapy

掲載誌 Physics in Medicine and Biology 51(24) N467-N475

- 著者名 Kouichi Maruyama, Takashi Hanada, Riki Kikumura, Mitsutaka Kanazawa, Toshimi Suda and Kazuhige Maeda

タイトル A Method to Tagging the Nuclear Fragmentation Event Induced by 11C for Cancer Therapy

掲載誌 IEEE Transaction on Nuclear Science, Volume 53(1): 2006