

「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 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

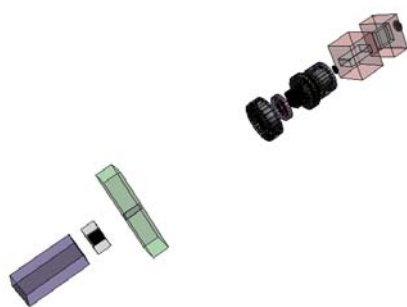
放射線治療のシミュレーションを精確に行うことができれば、治療装置の開発を容易にするだけではなく、治療方法、治療計画の妥当性を精緻に検証することが可能となる。ガンマ線、X 線治療に関しては、比較的精確にシミュレーションが行うことが可能であるが、粒子線治療、特に炭素線治療に関しては、原子核同士の相互作用を扱う困難さから、シミュレーションを精確に行うことができなかった。将来的には、あらゆる放射線治療装置のシミュレーションを可能にすることを目標に、陽子線、炭素線治療のシミュレーションに必要なソフトウェアの開発に取り組んでいる。既に、放射線医学研究所、兵庫県粒子線医療センター、国立がんセンター東病院の施設に関してシミュレーションを行い、結果の正当性の検証を行ってきた。GRID 技術を導入することで、計算時間の短縮や、異なる機関における情報共有を容易にする試みも行っている。今年度は、ベータ版のソフトウェアを医学物理の専門家に向けて公開する予定である。シミュレーション結果を確認するための医療画像可視化ツールも合わせて公開する。

2. 研究実施内容

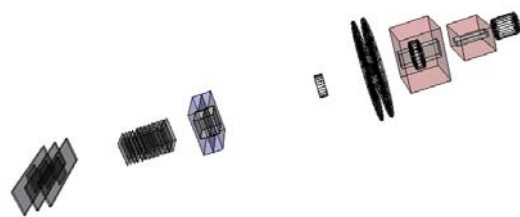
放射線治療は、X 線またはガンマ線を用いる手法が主に利用されてきた。放射線治療の問題点としては、がん細胞のみならず、正常な細胞にも害を与えてしまい、結果として副作用を招くことがある。より効果的にがん細胞のみに効果を集中させる方法の開発が様々試みられており、その一つが粒子線治療である。X 線またはガンマ線(どちらも光子)は、その物理的な性質から、体表面に近いところで大きなエネルギーの寄与を与えてしまい、副作用なしに深層部にあるがん細胞に十分な効果を与えることが難しい。一方、粒子線治療に使われる陽子や炭素は、そのエネルギーによって一定の位置周辺でのみ大きな相互作用を起こして停止する性質がある。国内には、既に 6 箇所の粒子線治療施設があり、さらに、多くの施設の建設が計画されている。シミュレーションを精度良く行うことができれば、新たな施設の設計に役立つほか、新たな照射方法の開発、治療計画や治療効果の事後検証など様々な目的に利用することが可能である。粒子線治療のシミュレーションを行うにあたって、特に炭素線の場合には、炭素と原子核の反応の扱いを精確に行うことが重要

である。我々は、単なるソフトウェアの開発に止まらず、シミュレーションという機能を提供するという観点から、結果の正当性の検証に精力的に取り組んでいる。

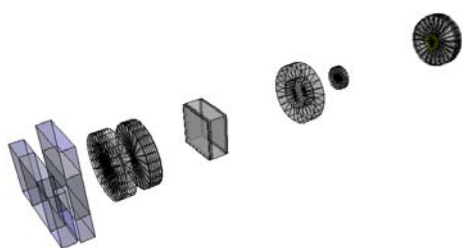
国内 6 箇所の全施設との打ち合わせなどを通じ、放射線治療のシミュレーションを行うために必要な機能、要件の洗い出しに注力を続けてきた。また、チーム内には、その半数の施設から研究分担者が参加しており、医学物理士の求める機能や精度を設計に反映させてきた。粒子線治療施設での治療をシミュレーションしようとする、加速器のビームラインの構造や、医療画像診断装置から出力としての患者の形状、物質の情報など、多くの情報を取り込む必要がある。特に、加速器の部品を含めた治療装置の構造定義を精確に行うことが重要である。国内の施設を全て調査し、これらを統一的に扱うことができ、将来建設される施設の構造の定義を容易にすることを考慮に入れたソフトウェアフレームワークの設計と実装を行った。以下に、放射線医学研究所、がんセンター東病院、兵庫県粒子線治療センターの施設の構造を定義し、可視化した例を示す。



放射線医学研究所



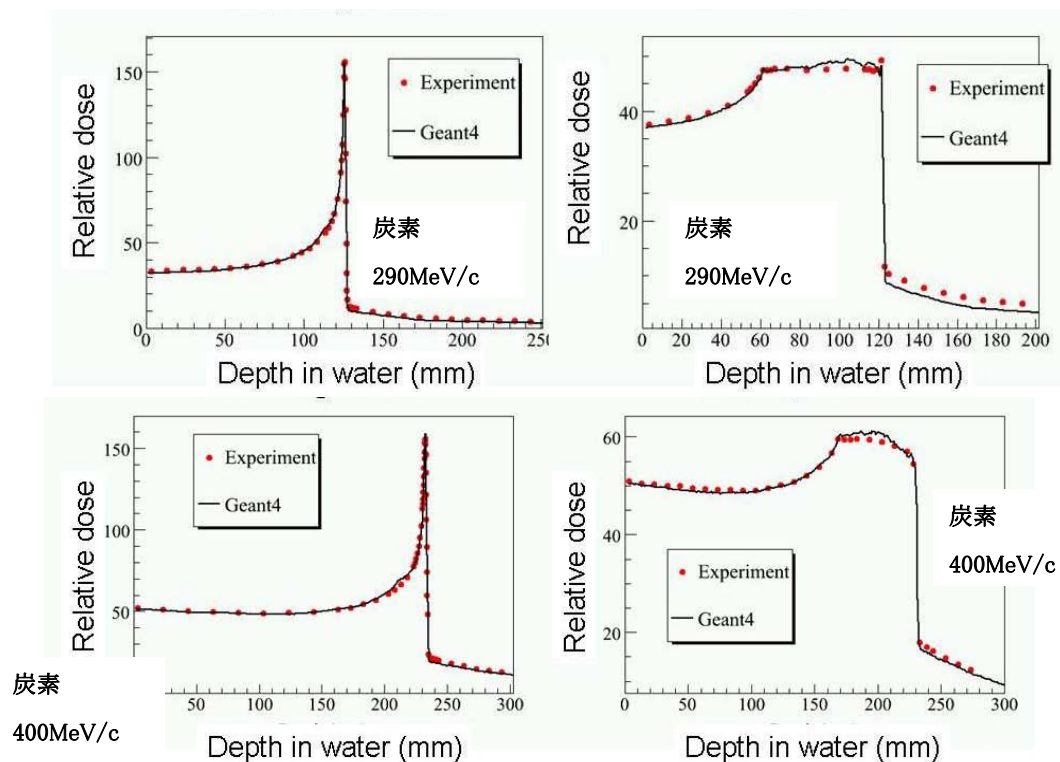
兵庫県粒子線治療センター



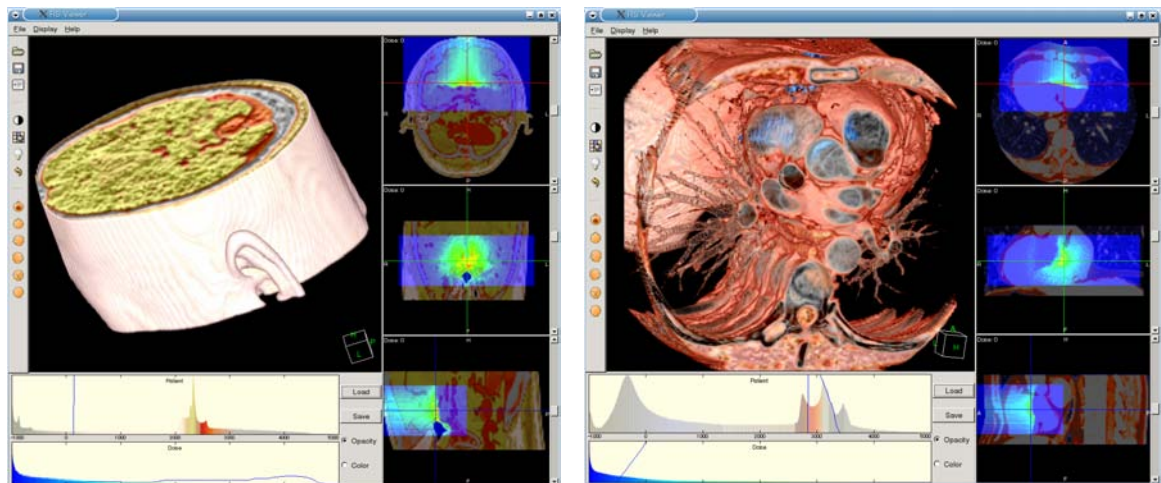
がんセンター東病院

これらの施設では、治療装置の検証のために、様々な実験が行われている。陽子線に関する検証に引き続き、今年度は、炭素線を用いた実験とシミュレーションの結果を比較し、正当性の検証に取り組んできた。以下に、放射線医学研究所で行った水タンク中での炭素線の線量分布を測定する実験とシミュレーション結果の比較を示す。左

側は、モノクロマティックな炭素を入射し、単純なブラッグピークを形成した場合で、右側は、癌の奥行きを再現するために炭素線のエネルギーに幅を持たせ、拡大ブラッグピークを形成した場合の実験とシミュレーションの比較である。実線がシミュレーション、赤の点が実験の測定点を示している。炭素のエネルギー2 種類に対して比較を行ったが、どちらもほぼ良い合致を見た。拡大ブラッグピークの場合にややずれが見られるので、原因を追究し、改善する努力を行っている。



シミュレーションの結果を可視化することで、直感的に結果を理解することが可能となる。特に医療画像診断装置から入力とシミュレーションによる線量分布を対応させて可視化することで、病巣付近での効果を確認できるだけでなく、特に興味ある領域のみ精度良くシミュレーションを行い、他の部分では実行性能を重視した手法に切り替えることも可能となる。以下に、開発した可視化ツールの利用例を示す。左側の図は、頭部、右側の図は、腹部に照射したケースを、実際の人体をX線CTで情報を取り込みシミュレーションした結果を可視化したものである。



シミュレーションを精度良く行おうとすると計算時間が長大に必要となる。そこで、GRID 技術を導入し、計算時間の短縮を行う仕組みのプロトタイプの開発を行った。web インターフェースを用いて、シミュレーションに必要な入力パラメータや画像診断装置のファイルをアップロードし、計算ジョブ

を実行すると、終了後結果を web 上で確認することが可能である。今後、利便性を高めるために、インターフェースの改善を行う予定である。また、GRID 環境を実現するために CERN で開発された LCG(gLite1)と呼ばれるミドルウェアを導入し、整備を続けている。国内での配備を考え、我が国で開発されている NAERGI の導入も視野に入れ、今後の開発を続ける予定である。

3. 研究実施体制

総括グループ

- ①研究分担グループ長：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）
- ②研究項目：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

重粒子コード検証グループ

- ①研究分担グループ長：金井 達明（放射線医学総合研究所 医学物理部、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

粒子線治療モデリンググループ

- ①研究分担グループ長：田中 寛（立命館大学 情報理工学部、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

GRID 研究グループ

- ①研究分担グループ長：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）
- 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. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- 著者名 T.ASO, A.KIMURA, S.TANAKA, H.YOSHIDA, N.KANEMATSU, T.SASAKI, T.AKAGI
タイトル Verification of the Dose Distributions with Geant4 Simulation for Proton Therapy
掲載誌 IEEE Transaction on Nuclear Science, Volume 52, Issue 4, Aug.2005, pp.896-901
- 著者名 丸山浩一
タイトル 癌放射線治療における線量集中性と線量確認方法
掲載誌 北里医学 Vol. 35, No. 1, Jun. 2005
- 著者名 Maruyama, K.; Hanada, T.; Kikumura, R.; Kanazawa, M.; Suda, T.; Maeda, K.,
タイトル "A Method of Tagging the Nuclear Fragmentation Event Induced by ^{11}C for Cancer Therapy,"

- 掲載誌 *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.53, no.1 pp. 346– 350, Feb. 2006
- 著者名 K.MARUYAMA, *et.al*,
 タイトル Total Reaction Cross Sections of Con Plastic Scintillator in the Energy Range of 100–345 MeV/u
 掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn 74(5): 1636–1639, 2005.
- 著者名 Ozaki, M.; Watanabe, S.; Terada, Y.; Itoh, T.; Kitsunozuka, M.; Ishisaki, Y.; Takahashi, T
 タイトル Radiation physics simulator for space X-ray observatory Astro-E2
 掲載誌 2004 IEEE Volume 4, 16–22 Oct. 2004 Page(s):2174 – 2177 Vol. 4
- 著者名 K.Murakami, K.Amako, M.G.Pia, T.Sasaki, H.Yoshida, N.Kanematsu
 タイトル Design of Simulation Framework for Generic Radiotherapy
 掲載誌 2004 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record
 ISBN:0-7803-8701-5 N33-172
- 著者名 K.Murakami, *et.al*.
 タイトル Systematic comparison of electromagnetic physics between Geant4 and EGS4 with respect to protocol data
 掲載誌 2004 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record
 ISBN:0-7803-8701-5 N42-2