

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「シミュレーション技術の革新と  
実用化基盤の構築」  
研究課題「高度放射線医療のための  
シミュレーション基盤の開発」

## 研究終了報告書

研究期間 平成15年10月～平成21年3月

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 教授)

## § 1 研究実施の概要

がんは、昭和 56 年より死亡要因の一位であり続けており、実に総死亡の 30 パーセント以上が癌を原因としている。がんの克服に向け、新たな治療法の確立は、社会的急務である。近年、粒子線治療は、治療効果のみならず、治療中、治療後のクオリティーオブライフの面からも大きな注目を浴びている。X 線、ガンマ線に比べると、粒子線治療に利用される陽子線や炭素線（重粒子線）は、生物学的効果の面で優れており、同じ線量を与えた場合、粒子線の方がより高い確率でがん細胞を死滅させることができる。粒子線の中でも、炭素の方が陽子に比べてさらに生物学的効果が高い。さらに、粒子線は、他の放射線の線種と比較すると、極めて小さな領域に線量分布を集中させることができることも、他の放射線に比べて、がん治療において有益な点である。がんだけを狙い撃ちできるので、副作用が少なく、照射のために入院中も、ゴルフが楽しめるほどである。

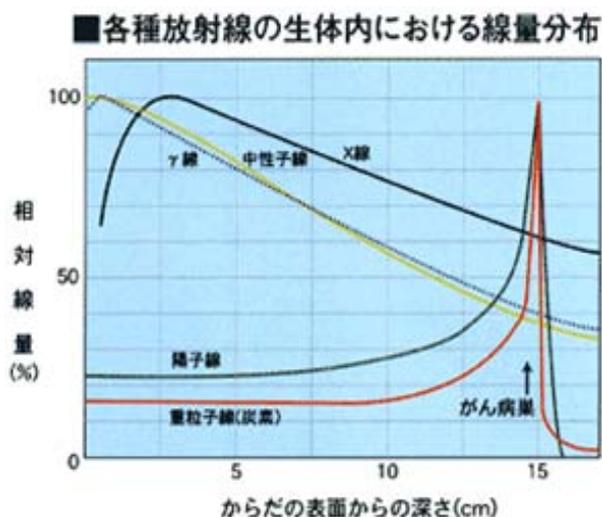


図 1 放射線医学研究所提供

様々な利点がある半面、粒子線は、電磁相互作用に加え原子核反応を起こすので、扱いが容易ではない。特に、炭素は、陽子に比べても反応が複雑である。また、人体内部での線量分布を正確に測定することは、容易ではなく、特に生きている人間内部の線量分布を知ることは不可能と言ってよい。治療効果および副作用の検証、新しい治療法、治療装置の開発のために、粒子線と物質の相互作用を精緻に再現できるシミュレーション技術を整備することが必要とされている。我が国は、特に炭素線の利用に関しては、世界で一番進んでおり、シミュレーション技術確立が強く望まれている。

本研究に参加する研究者の半数は、Geant4 と呼ばれる放射線と物質の相互作用を扱うソフトウェアツールキットの開発を 1994 年から続けてきた。基本設計は、日本グループの成果に基づいて CERN との共同で行い、日米欧から多くの機関が研究に参加している。Geant4 は、素粒子・原子核物理学、宇宙、医学、工学など多くの分野で現在利用されている。2003 年に公表した論文、“Geant4, a Simulation Toolkit” は、Thomson Reuters 社の Science Watch において 2008 年 6 月に Engineering 部門の Current Classic に選ばれており、Elsevier 社の SCOPUS によれば 2008 年 10 月の時点で 1300 回以上も引用されていることから、普及のほどがうかがえる。オープンソースで開発されており、商用利用、2 次配布も可能ならライセンスとなっている。我が国発のシミュレーションソフトウェアで、かつて、これほど広く普及し

たものはないと思われる。Geant4 を線量計算のエンジンとして使い、粒子線治療に必要なソフトウェアの開発を行った。Geant4 は、他の所謂放射線モンテカルロコードと異なり、電磁相互作用、原子核反応の双方を高い精度でシミュレーションすることが可能である。

本研究においては、画像診断装置の出力である DICOM ファイルを読み込むことで、個々の患者の情報を取り込み、モデリングし、粒子線による線量分布を GRID 技術の利用により計算し、結果を可視化するために必要なソフトウェア一式を包括的に開発することに世界で初めて成功した。他に同様の計画はなく、他の追随を許さない研究成果を得ることができた。

ソフトウェアの設計と実装に関しては、オブジェクト指向技術を全面的に採用し、C++言語で開発を行った。設計に先立ち、放射線医学研究所、国立がんセンター東病院、兵庫県粒子線医療センター、カリフォルニア大学サンフランシスコ校、Centro di AdroTerapia e Applicazioni Nucleari Avanzate (イタリア)、ドイツがんセンターの関係者を面接し、要求要件の解析を行った。現在、それらの施設の実装が終了しており、それぞれの機関にソフトウェアを配布し、共同研究を展開している。また、台湾に長基大学に建設予定の陽子線治療施設のシミュレーションを行うために、長基大学および精華大学とも共同研究を開始した。以下に治療施設をモデリングし、実装した例を示す。

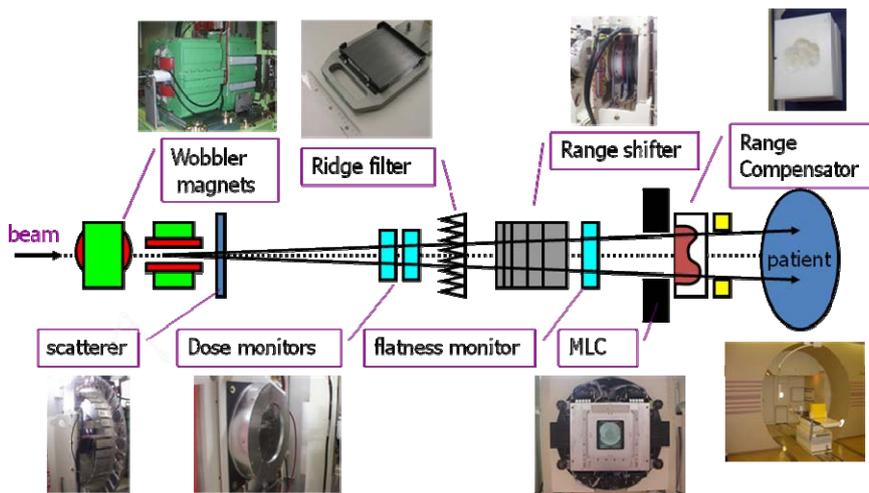


図2 照射ビームラインの例

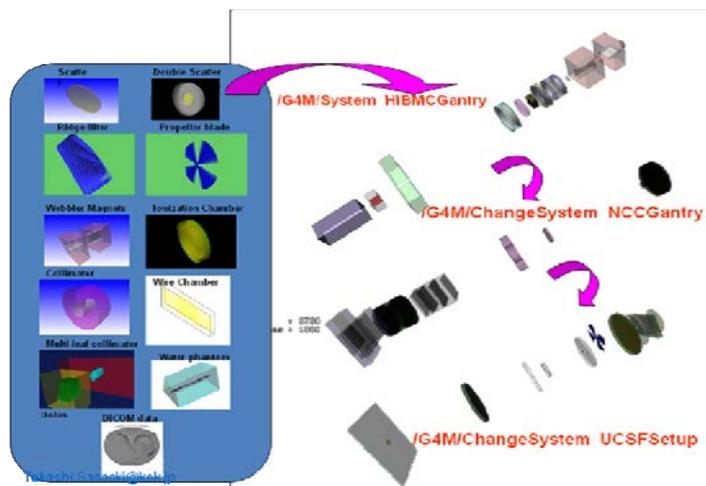


図3 照射機器のモデリングの結果

粒子線治療においては、陽子や炭素を加速器で加速し、ビームの形をがんの形に成型して照射を行う。ビームを横方向に広げたり、奥行き方向に深さを持たせたり、複雑ながんの形を再現したりするために様々な機器がビームラインに並べられている。これら全ての形状と材質を正確に入力することが必要である。我々は、それぞれの機器をソフトウェア部品として設計と実装をしたので、新たな施設への対応が容易に行えるようになった。

シミュレーションにとり、結果の妥当性の検証を行うことは必須である。陽子線、炭素線に関して、様々な実験結果とシミュレーションの比較を行った。図4に示されるのは、陽子線の水中での線量分布である。人体は、しばしば、単純に水で近似される。ビームを単純に入射し Bragg Peak を得た場合と、奥行き方向の分布を再現するよう設定を行い SOBP (Spread Out Bragg Peak) を得た場合の双方を測定とシミュレーションの比較を行い、良い合致を見ることができた。図5には、ビームラインに並べられた機器の効果をシミュレーションし、図示してある。

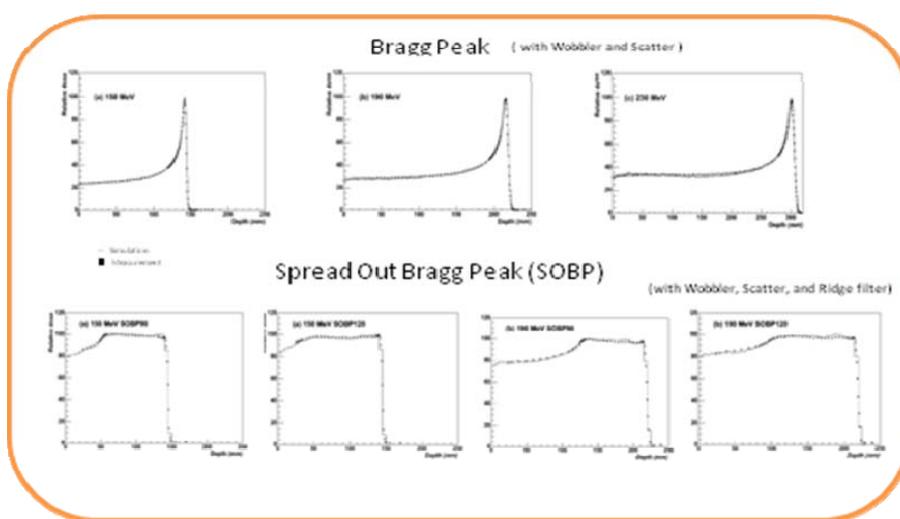


図4

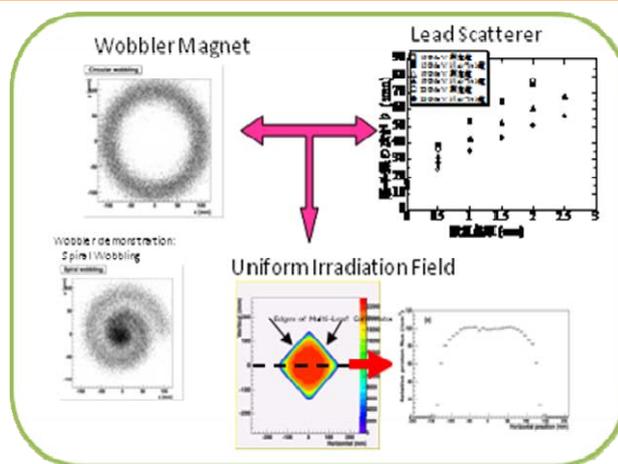


図5

## Depth-dose distribution (<sup>12</sup>C 290 MeV/n)

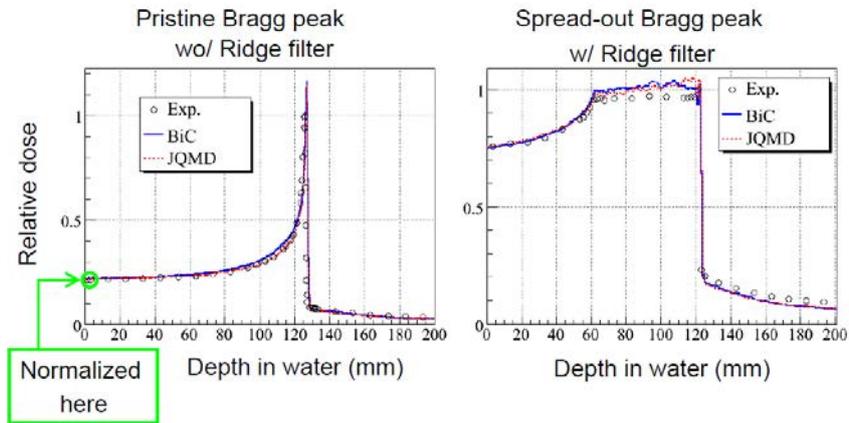


図6 炭素のブラッグピーク及び拡大ブラッグピーク

図6には、炭素に関する実験とシミュレーション結果の比較を示す。シミュレーションの精度を向上させるために、陽子、炭素の物理コードの開発を続けている。当初、原子核反応に注目していたが、陽子や炭素の電磁相互作用が十分に理解されていないことが分かった。電子に関する電磁相互作用は、良く知られているので、陽子や炭素に関しても、電子に近似されることが多いが、それでは不十分であることが世界で初めて示された。過去に原子核物理への興味から行われた実験は数多くあるが、放射線の工業利用を考えたときには、新たな物理プロセスコードを開発や、結果の検証を行うには不十分であることが分かった。今後、時間をかけて改善を続ける必要がある。

本研究では、CTなどの画像診断装置の出力を読み込み、シミュレーションできるよう、ソフトウェアの開発を行った。画像診断装置の出力であるDICOM形式のファイルを読み込み、人体の形状を3次元で可視化するソフトウェアは、市販されているものもあるが、シミュレーション結果を重ねて図示できるようにはなっていない。

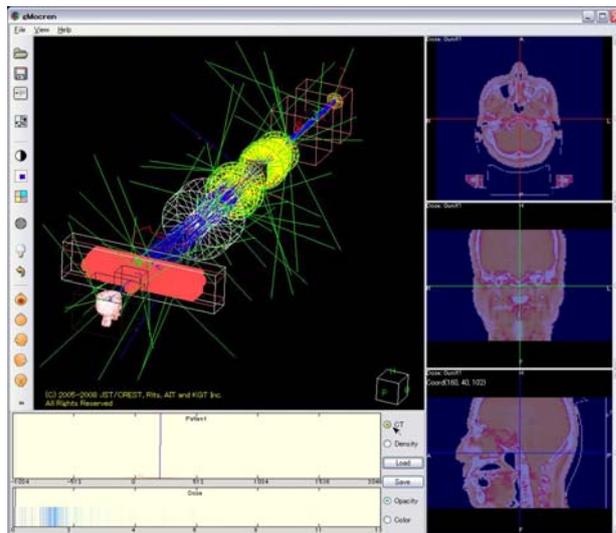


図7 頭部への照射の例

我々は、画像診断装置の主力に重ね、粒子の飛跡および線量分布の表示が 3 次元で行える可視化ソフトウェアの開発に成功した。

計算時間短縮のために、GRID 技術による並行計算を実現した。ヨーロッパで開発されている gLite ミドルウェア、NAREGI ミドルウェアの双方に対応し、web ポータルを開発することで、容易にジョブの投入が行えるようになった。

宇宙空間には、多数の陽子やイオンが漂っていることから、本研究で開発したソフトウェアの核の部分は、宇宙分野にも適用可能である。図 8 に人工衛星と放射線の相互作用をシミュレーションした例を示す。

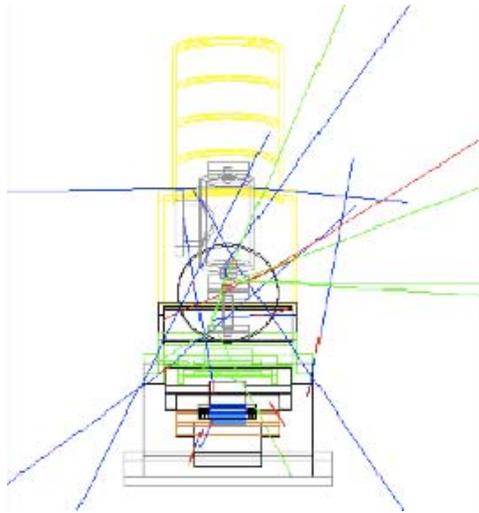


図 8

本研究において、がんの放射線治療のうち、粒子線治療に焦点を絞り、そのシミュレーションに必要なソフトウェアの開発を世界で初めて包括的に行うことに成功した。成果物を現在用いられている治療計画装置の妥当性の検証、治療の有効性の検証、新たな治療法、治療装置の開発に用いることを目標に、研究開発を続けてきた。シミュレーション結果の妥当性の検証に力を注ぎ、医療用途に十分な精度を得ることができた。画像診断装置とのインターフェース、シミュレーション結果の可視化、グリッド技術への対応も行われており、世界に類を見ないソフトウェアが完成しつつある。CREST 研究終了後も、放射線の生物学的効果のシミュレーションを実現すること、ガンマ線や X 線治療装置への対応と結果の妥当性の検証などに取り組む予定である。患者が、治療効果や有効性を事前に知った上で、治療法を検討し選択できるよう、シミュレーション技術による「根拠に基づいた医療(EBM)」の確立を目指している。

## § 2 研究構想及び実施体制

### (1) 研究構想

研究開始時に立案した研究計画の線表を以下に示す。

項目	平成 15 年度 (6 ヶ月)	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度 (6 ヶ月)
要求要件の調査	←→					
全体の設計		←→				
フレームワークの 設計と実装				←→		
並列化		←→			←→	
重粒子コード検証	←→				←→	
人体モデリング		←→			←→	
放射線治療計画装 置モデリング		←→			←→	
システムインテグ レーション			←→			←→
まとめ						←→

総括グループは、関連施設に対する要求要件の聞き取りと、分析、解析を進め、ソフトウェアの設計を行った。このプロセスに時間が掛ることが分かっていたので、プロトタイプの実装を行い、シミュレーション結果の検証を行った。このため、初期の段階においても、重粒子コード検証グループは、結果の妥当性の検証に着手することが可能となった。粒子線治療モデリンググループ、GRID 研究グループも、初期の段階では、独立に研究を推進し、他のグループの進行に妨げられることなく、研究を行った。

全ての項目が概ね計画よりも早期に研究を推進することができた。平成 18 年度の中間評価の時点で、ソフトウェアの骨格と主要な部分のベータ版の実装を終えており、主要な機能のデモンストレーションを行うことができた。その後は、さらに多くのユーザから要求要件を取り入れ、設計の見直しと、実装の改善を進めることができた。また、後述する4研究グループを組織し、それぞれのグループ独自の活動を行うだけでなく、各グループが協調して開発を行うことが出来、効率的に開発を進めることができた。初期の段階では、予算は JST からの直接執行であったため、各グループ、機関の進行度、事情の変更に柔軟に応じ、予算の再分配が可能であったことも、研究の効率化に繋がった。後半、各機関に受託研究費として配分するようになってからは、年度内における予算の調整が不可能になった。

研究開始時点では、陽子、炭素に電磁相互作用は、すでによく理解されているというのが、医学物理関係者の間の合意事項の一つであった。実際には、良く知られている電子に近似しており、質量が重い陽子、更に重い炭素、複数の荷電状態があり得る炭素に適用した場合、必ずしも正確とは言えないことが分かった。現時点で実用上問題ないレベルに達してはいるが、さらに精度を向上させるには、粒子線の電磁相互作用に関しては、さらに地道な研究が必要で、

新たなモデル作成のために、基礎的な実験データの収集から始める必要がある。今後、放射線の工業利用という観点から、新たに系統立てた実験とそれを利用した計算モデルの確立が求められる。原子核反応に関しても、当初の予想以上に理解されていないことが分かった。シミュレーションを行うには、炭素が反応を起こした結果、どのような 2 次粒子がどのような角度にどのようなエネルギーで放出されるか分かっていなければならない。今後、精度の向上のためには、実験をさらに行い、必要な情報の収集を行うことが必要である。重粒子コード検証グループと総括グループが協力し、この研究にあたった。

線量分布を実用上問題ないレベルで得ることができたので、生物学的効果を見積もり、がん細胞がどの程度死滅する確率があるかをシミュレーションする取り組みを行っている。放射線により、同じ線量によっても、死滅するがん細胞の数は異なる。DNA レベルの放射線損傷の見積もりから、生物学的効果を知る努力を開始したが、実用化にはさらに時間が必要である。

粒子線治療モデリンググループは、画像診断装置の出力である DICOM の調査、可視化ソフトウェアに関する要求要件の調査、市販の可視化ソフトウェアの調査に着手することから始め、開発項目の洗い出しと、ソフトウェアの設計、実装を行った。

GRID 研究グループは、当初、ヨーロッパで開発されている gLite ミドルウェアのみを対象としていたが、国産の NAREGI ソフトウェアにも対応することとし、ベータ版を利用した実行環境の構築を行った。gLite および NAREGI の双方にジョブの実行が可能となっている。他の機関との連携を行う努力も並行して行った。また、web portal を開発し、GRID 環境の無い機関においても、ジョブの投入を可能とした。

## (2)実施体制

グループ名	研究代表者又は主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
総括グループ	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・教授	全体設計、フレームワーク実装、応用
重粒子コード検証グループ	金井達明	放射線医学総合研究所・部長	コードの検証と改善
粒子線治療モデリンググループ	田中覚	立命館大学・教授	可視化、施設のモデリング、ユーザ・インターフェースの開発
GRID 研究グループ	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・教授	GRID 対応

### § 3 研究実施内容及び成果

#### 3. 1 総括グループ(高エネルギー加速器研究機構、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部、神戸大学大学院 自然科学研究科)

##### (1) 研究実施内容及び成果

本グループは、放射線医療シミュレーションの基盤となりうる包括的なソフトウェアの提供を目指し、全体の設計と多分野展開を主に担当する。並行し、線量計算に用いている放射線シミュレーションのソフトウェアツールキット Geant4 の改善と改良に取り組んだ。放射線医療におけるシミュレーションのために必要とされる要求を解析し、提供すべき機能の洗い出しを最初に行った。Geant4 開発の経験から、この過程は時間を長く必要とし、作業も煩雑であるが、完成後の産物が実際に多くのユーザに利用されるためには、非常に重要なプロセスであることが分かっている。本研究参加者のみならず、多くの関係者から要求を聴取し、結果を文章および図として保存する。可能限り多分野への応用を可能にするため、計算機科学、宇宙分野、物理学分野の研究者と連携し、研究を遂行してきた。

全体をインテグレーションするために必要なフレームワークの設計と実装を行うほか、各種放射線コード、相互作用データを調査し、選択的に必要なものが利用できるように、バーチャルモンテカルロシステムを開発するために必要な作業を行った。EGS4 や、JQMD と言った Geant4 から見た外部コードをインテグレーションし、シミュレーションが行えるようになった。EGS4 は、広く普及している電磁相互作用のみを扱う線量計算コードである。Geant4 には電磁相互作用を扱う独自に開発されたコードが含まれているが、EGS4 との結果の比較をしたいという医学物理関係者の要求に応えるために、Geant4 の枠組みを利用しつつ、EGS4 で物理プロセスの計算を行うためのインターフェースの開発を行った。EGS4 は、原子核反応を扱わないので、粒子線治療のシミュレーションに単体で用いることはできない。また、JQMD は、日本原子力研究機構が開発された、Quark Molecular Dynamics に基づき、原子核同士の反応を計算するコードである。Geant4 に組み込まれている Binary Cascade Model との比較を行うために、スタンフォード線形加速器センターと協力して開発が行われた。最近、Geant4 独自の Quark Molecular Dynamics を扱うコードが実装されたので、そちらの利用に移る予定である。PENelope と呼ばれる線量計算コードもスタンフォード線形加速器センターで、インテグレーションの作業が進んでいる。このように、Geant4 は、非常に柔軟に設計されたので、外部コードを容易に取り込み、装置経常や物質の組成などを共有したまま、異なる線量計算コード間の比較を行うことができた。

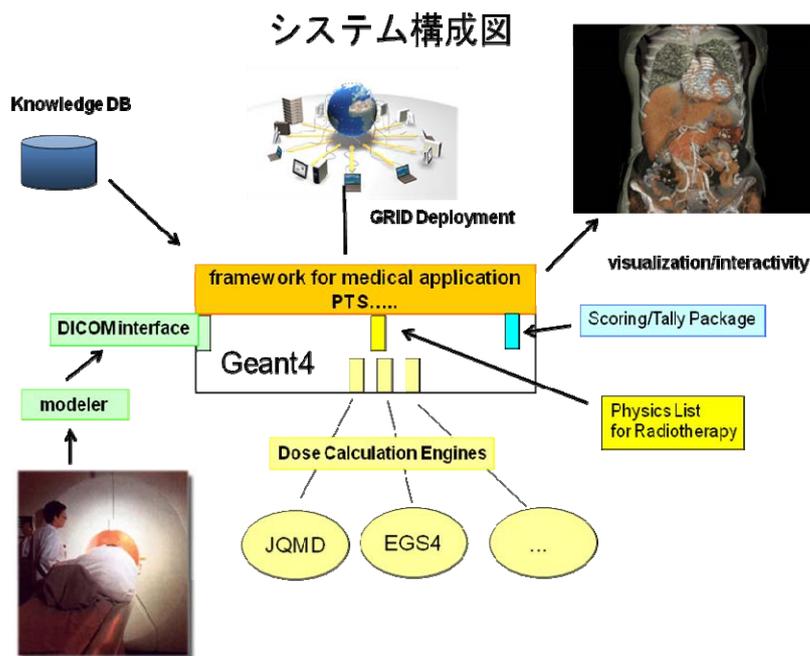


図9 開発したシステムの全体像

Geant4 本体に関して、物理プロセス以外の改善、改良も行われた。粒子が物質中を通過した際、有感部分において、どのような物理量を記録するかは、ユーザーに任されている。しかし、放射線治療のシミュレーションを考えた場合、記録したい物理量は、限られた種類のものしかない。また、どの領域で、どのようなメッシュで記録するかもユーザーが判断する必要がある。そこで、記録する物理量やメッシュの大きさ、切り方をコマンドで用意に設定し、変更することが可能になるよう、新たなソフトウェア部品を開発し、Geant4 に組み込むことに成功した。以前は、C++のプログラムを記述する必要があったが、このソフトウェア部品を利用すれば、必要な物理量を必要なメッシュの大きさに記録できるようにコマンドで設定できるようになった。

Geant4 には、PhysicsList と呼ばれる、どの粒子に対してどの物理モデルを利用するかユーザーが設定する項目がある。陽子や炭素が物質と相互作用すると、様々な2次粒子が発生するので、それらの相互作用も含めてシミュレーションするために、多くの粒子と関係する物理プロセスに関する記述が必要となる。入射粒子のエネルギーや種類によって設定を変える必要があり、一般的なユーザーにとっては、困難な作業の一つとなる。粒子線治療用に標準的な設定を開発し、ソフトウェア本体と一緒に配布することにより、利用者の負担を軽減することができた。

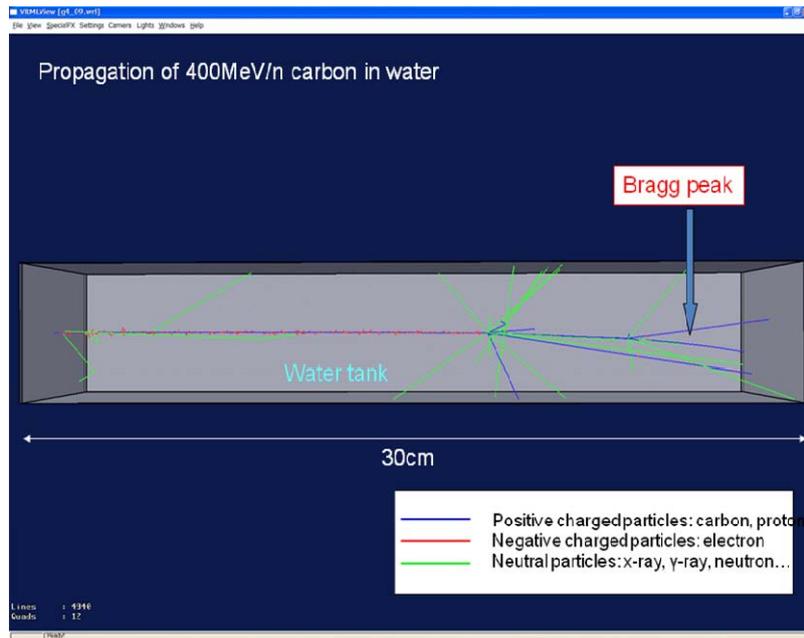


図10 水中での炭素の相互作用

検証グループとも協力し、Geant4 に組み込まれた物理プロセスのさらなる改善、改良を並行して行ってきた。十分な実験データがないので、必要に応じて新たな実験の依頼も行いながら、地道に制度の改善に取り組んできた。現状においても、医療に用いるために十分な精度はあるが、さらなる向上を目指している。

シミュレーションにとり、ソフトウェアの開発以上に難しいのが結果の正当性の検証である。既知の知識を内挿、外挿し、与えられた条件下での振る舞いを予言するのがシミュレーションの役目とすれば、既知の知識の範囲内でのみ、結果を保証できることになる。検証グループにより、様々な基礎的物理プロセスに対して、実験データとシミュレーションの比較を行い、個々の場合に対するシミュレーションの精度がどの程度であるか見積もることができた。もし、このような基礎的なレベルでの検証を行うとすれば、時間が掛るだけではなく、重複した努力を行うことになりかねない。そこで、陽子及び炭素に関する検証の結果をソフトウェアと同時に配布することで、個々の施設の負担を下げることができるようになった。個々の施設により、ビームエネルギーの値が異なったり、加速器とそのビームラインの設計が独自であったりするので、個々の施設における結果の検証の必要がなくなった訳ではないが、かなりの労力を節約できることとなった。

出来るだけ多くの海外の機関との連携を強化し、開発したソフトウェアの普及を目指した。すでに、ヨーロッパ、アメリカ、台湾にソフトウェアを配布済みである。それぞれの施設に対するソフトウェアの実装と検証を行った。可能な限り多くの施設の実装を行い、より普及を目指している。以下に、すでに実装が終了している施設の一覧を示す。この他に、筑波大学陽子線医療センターに対して、ソフトウェアの提供をすることを検討している。

施設	加速器形式	エネルギー (MeV/u)	水平拡散装置	飛程調節
兵庫県 粒子線 医療セ ンター Gantry	Synchrotron	陽子 150,190,230	ワブラー磁石と散乱体 	くし型フィルター 
国立がん センター Gantry	Cyclotron	陽子 150,190,235	散乱体と二重散乱体 	くし型フィルター 
UCSF	Cyclotron	陽子 67.5	N/A 	プロペラ 
放医研	Synchrotron	炭素 400 MeV/u	ワブラー磁石と散乱体	くし型フィルター
兵庫県	Synchrotron	炭素 320 MeV/u	ワブラー磁石と散乱体	くし型フィルター
GSI/DK FZ	Synchrotron	炭素 ~400 MeV/u	ビームスキャニング	細密くし型フィル ター 

図 1 1 実装済みの施設

ビームライン上には、照射野を生成するために様々な機器がならべられており、これらをすべてモデリングしてシミュレーションに取り組む必要がある。現在、広く使われているのは、ワブラー磁石法と呼ばれるものである。がん細胞の形に合わせてビームを照射するために、ワブラー磁石、くし型フィルター、飛程を調節するレンジシフタ、不要な領域のビームを除去するコリメータ、最終的にがんの形に成型するボラスが並べられている。日本以外の施設では、くし型フィルターに代わり、プロペラ型のフィルターを回転させる手法が広く使われている。この手法に関してもすでに実装済みである。これらを用いて、複雑ながんの形にビーム形状に合わせて照射することになる。また、最近開発されて、ドイツの GSI/DKFZ で初めて治療に用いられたビームスキャニング法に注目が集まっている。これは、ビームライン上に置かれた磁石により、ビームでがんの形にひと筆書きを行う（ラスタースキャン）手法である。ワブラー磁石法に比べて、小さながん、形状の複雑ながんの治療の際に、正常細胞を傷つける可能性を下げる事が可能になる。我が国の施設も、順次導入を検討している。ドイツがんセンターとも協力し、このビームスキャニング法を利用するために必要なソフトウェアの開発を行った。

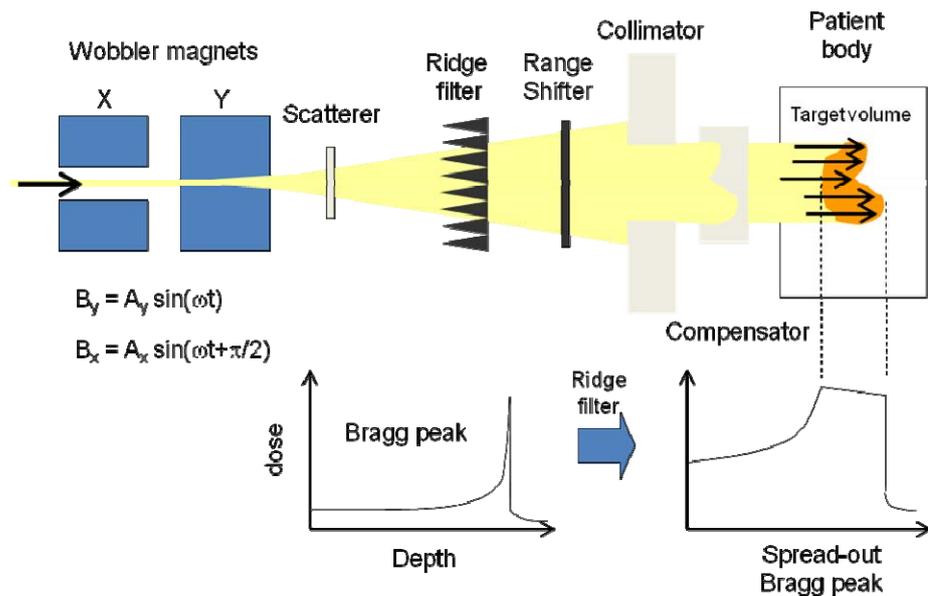


図 1 2 ワブラー法

既に述べたように、我々は、多くの施設の要求要件分析を行い、汎用に使えるソフトウェア部品を開発することに注力してきた。その結果、新たな施設への対応も容易であり、何か問題があった場合に、その施設固有の問題なのか、ソフトウェアの問題なのかを切り分けることも容易になった。また、画像診断装置とのインターフェース、可視化、グリッド対応が行われている統合的な粒子線治療シミュレーションのためのソフトウェアの開発に世界で初めて成功した。この成果は画期的なものであり、注目を集めている。これまでは、個々の施設で個々に開発したソフトウェアを利用してきたので、シミュレーションと実験の間に差異が認められたとしても、線量計算コードが原因なのか、パラメータ設定の問題なのか、施設の形状記述や物質の定義の問題なのか、それらのいくつかの複合的な理由なのかが理解しにくく、問題の解決が困難であった。例え、別の施設でシミュレーションの結果が実験とよく合うという論文が公表されても、際限が不可能に近かった。そのため、シミュレーション結果の分布を normalization と称して、都合よく実験データに合わせてしまうことも散見された。normalization は、本来、ビーム中の粒子の数とシミュレーションに用いた粒子の数を合致させるために行われるべきもので、分布を縦横に移動させるものではない。我々は、事あるごとに、この点を訴え続け、理解されるようになったのも大きな成果である。

全体を統合するために、Python 言語を用いたフレームワークの開発も行った。スクリプト言語である Python を用いることで、C++言語だけを用いた開発に比べて、試作ソフトウェアを短時間に作成することが可能となった。粒子線治療モデリンググループと協力し、ユーザ・インターフェース、web インターフェースの開発に利用した。

フランス IN2P3 とは、生物学的効果の見積もりに向けて、DNA レベルでの放射線損傷のシミュレーションを行うために必要な共同研究を行っている。現状では、端緒についたところで、これからの研究課題は大きい。将来的には、放射線の種類によってがん細胞の感受率が異なるという生物学的効果のより正確なシミュレーションが行えればと考えている。なお、簡単な近似に基づいた生物学的効果の見積もりは検証グループによって行われており、論文として公表された。

## (2)研究成果の今後期待される効果

我々が開発した粒子線治療施設をモデリングするためのクラスライブラリを用いれば、新たな施設の実装を容易に行うことが可能となった。コードだけではなく、物理プロセスに関する知見、妥当性検証の結果など、他の施設で得られた結果が含まれており、単に実装を楽にするだけではなく、精確なシミュレーションを行うことが容易になった。現在、我が国では3か所で新たな粒子線治療施設を建設中であり、さらに計画中の施設が多数ある。世界的に見れば、多くの施設が計画されている現状である。粒子線治療を正しく行い、治療成果を検証するために、シミュレーションを用いたいという要求が高まっている。現在は、水中での線量分布を測り、人体中の線量分布を予測している。精度よくシミュレーションが行えるようになったことで、用途は広がっている。既存のシステムの検証、治療成果の検証、新たな施設的设计や計画、新しい治療法の開発などに利用されようとしている。

新たな放射線医療機器を設計、開発するためには、繰り返し様々な実験を行う必要がある。その多くの部分をシミュレーションに置き換えることができれば、機器の開発コストが下がり、早いサイクルで効率よく新たな機器の開発を行うことが可能となる。

一例として、粒子線を用いたCTの開発がある。現在広く使われているX線CTは、光子の物質中での減衰率が物質の密度によるという仮定に基づいている。粒子線治療においても、X線CTを用いて体内の物質密度を決定している。しかし、粒子線は、X線と異なり、原子核反応も起こすので、X線で観察した物質密度が粒子線に対する物質密度に等しいとは限らない。そこで、粒子線によるCTを開発し、粒子線に対する物質密度を正確に知りたいという要求がある。粒子線は、X線と異なり、物質の表面や浅い深度での相互作用の確率が低い。この性質を利用し、物質を通過してきた粒子線の入射前後のエネルギー差を求めれば、陽子線CTの開発につなげることができる。X線CTと異なり、体表面での減衰も少ないので、より鮮明で高解像度の画像を得ることが期待できる。これまでは発見できなかった小さながんを発見できる可能性も高い。今後、シミュレーションによって、概念設計とその検証を試みる予定である。

本研究は、粒子線治療に焦点を絞って研究を行ったが、開発したソフトウェアの多くの部分は、X線、ガンマ線治療にも用いることができる。今後、それらの装置に関しても、モデリングに必要なソフトウェア部品の開発を行いたいと考えている。

患者にとり、最善の治療法を自ら選択することは困難である。しかし、シミュレーションにより、事前に治療効果を知ることができれば、経済性も加味しつつ、個々の患者取って最適と思われる治療法が選択できる。医師にとっても、治療法選択の根拠としてシミュレーションを用いることができれば、長年急務と言われてきた根拠に基づいた医療の確立に繋がる。少なくとも、シミュレーションを利用して、数ある放射線治療の手法の中から、最適な治療法を選ぶことができるはずである。互いに関連した高次元のパラメータを最適化し、治療法の選択を可能にしたいと考えている。

本研究の成果は、医学に留まらずに、すでに宇宙分野にも適用されている。宇宙空間に漂うイオンは、粒子線の一種であり、考えるべき物理プロセスは同じである。宇宙航空研究開発機構では、人工衛星の開発に生かしており、今後も、広く利用される予定である。ヨーロッパや米国では、人間を火星に送る計画もあり、宇宙船内での被ばく量の見積もりをシミュレーションしたいという要求もある。更なるソフトウェアの開発、改良が必要ではあるが、より広い領域で利用されると見込まれている。

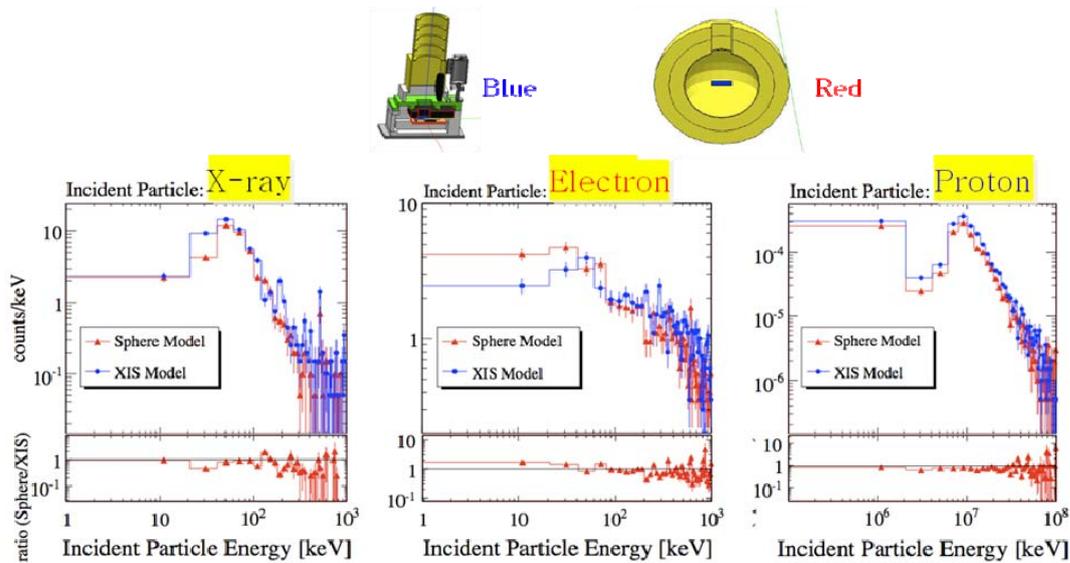


図13 XIS 衛星への利用例、衛星の CCD 単体と衛星全体を用いた場合のスペクトラム

### 3. 2 重粒子コード検証グループ(放射線医学研究所、北里大学、群馬大学、国立がんセンター東病院、兵庫県粒子線医療センター)

#### (1)研究実施内容及び成果

本グループは、シミュレーションを医療機器の精度評価あるいは品質保証へ応用するために、その計算精度を治療用陽子線、および炭素線ビームで検証を行った。また、素過程の実験データを収集し、原子核反応モデルの検証及び改良のために提供し、ソフトウェアの開発と改善に生かしてきた。

本研究で開発したソフトウェアを粒子線治療計画への応用を目指して、素過程物理量から重粒子線の生物効果を推定する手法を確立することを目標に研究を行った。

本グループの各機関における研究の概要は以下である。

#### ①放射線医学研究所、群馬大学における研究の概要

- ・ HIMAC の治療用炭素線を用いた実験とシミュレーションとの間で線量分布を比較し、物理的な線量精度を評価した。治療を模擬した厚い水標的を用いてフラグメントの角度分布を測定し、多重散乱と核反応を組み合わせることで空間分布モデルを確立することができた。しかしながら、厚いターゲットの場合はフラグメントの角度分布の中に多重散乱による広がりが含まれてしまうため、核反応による広がりそのものを議論しようとしても、その精度が制限されてしまうことが分かった。以下に治療を模擬した厚い標的での線量分布を示す。エネルギーが 320MeV/u の炭素線を入射した場合の線量のビーム軸方向に関する空間分布である。
- ・ HIMAC での核破碎反応実験で素過程を測定し、シミュレーションと比較した。
- ・ HIMAC の現行治療計画で用いている生物効果モデルをシミュレーションに組み込むための支援をした。成果を論文として発表した。

シミュレーションを医療機器の精度評価あるいは品質保証へ応用するために、その計算精度を治療用陽子線ビームで検証した。

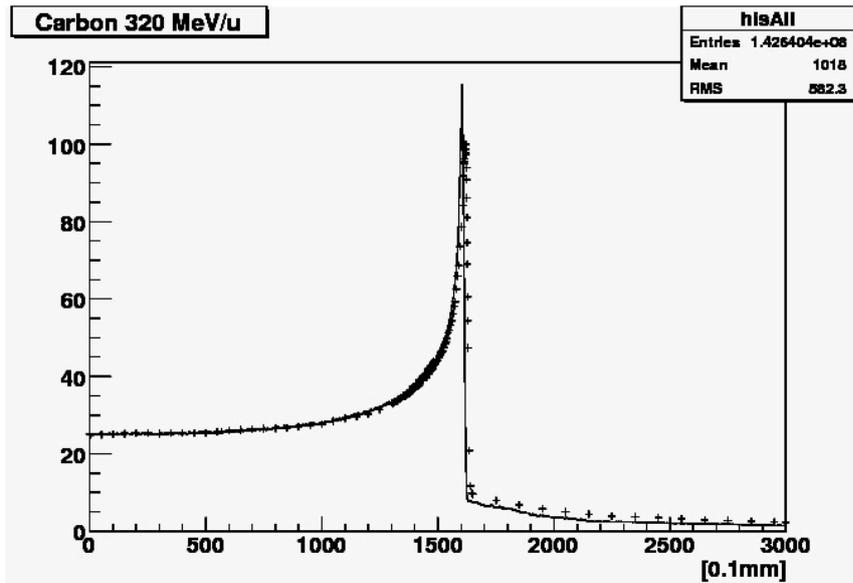


図 1 4 線量分布 (ブラッグピーク)

②国立がんセンター東病院における研究の概要

- 国立がんセンター東病院陽子線施設で治療用陽子線を利用した線量分布の実測及び治療計画による分布計算結果とシミュレーションの分布計算結果との比較を実施し、計算コードの精度検証及びシミュレーションの実臨床利用に向けた計算時間の短縮化を行った。
- 陽子線 spot scanning 対応の線量計算及びそのビーム条件の最適化計算法を含めたシミュレーションの線量分布計算結果を組み合わせた計算アルゴリズムの開発を行った。
- 陽子線による患者体内の核破砕反応断面積のシミュレーションに組み込まれた計算値と実験より算出した値との比較による精度検証を実施した。患者治療計画用 CT 画像を利用した破砕反応によるポジトロン放出核の生成率を計算出来るツールの環境整備を整えた。実臨床での陽子線照射後のポジトロン放出核の生成率の実測値と計算値の比較検証を行った。

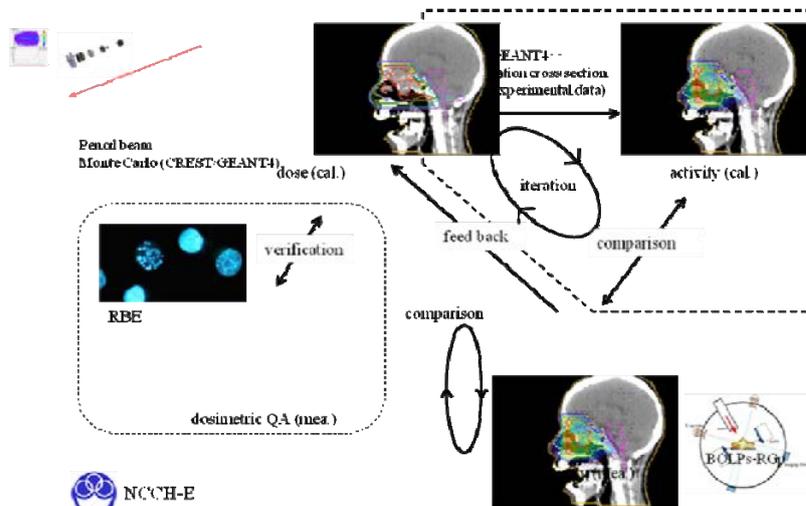


図 1 5 国立がんセンターにおいて開発中のシステム

### ③兵庫県立粒子線医療センターにおける研究の概要

兵庫県立粒子線医療センター施設で治療用陽子線を利用した線量分布の実測とシミュレーションの計算結果を比較し、計算コードの精度検証を行った。また、患者データ(CT 画像)、治療計画データをシミュレーションに取り込み、患者上での線量計算を行った。患者を水に置き換えた線量計算も行い、実測との比較検証を行った。

- ・ 治療用陽子線の深部および側方線量分布の実測とシミュレーションとの比較を行い、シミュレーションに組み込まれている物理過程の検証を行った。
- ・ 治療計画によって作成された治療用のパラメータを使って水中での線量分布を測定し、同様のパラメータを取り込んだシミュレーションの計算と比較し、検証した。また、治療計画装置によって計算された分布と比較し、治療計画に組み込まれている線量計算の検証を行った。

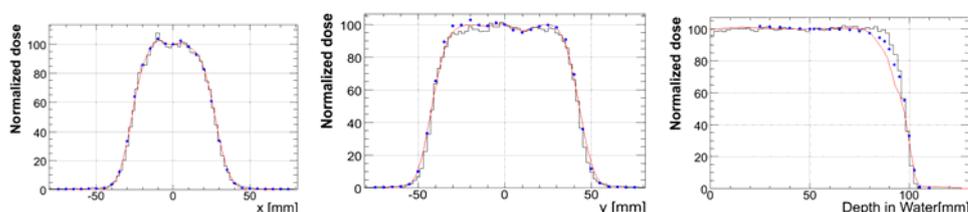


図 1 6 現行治療計画装置とシミュレーションの比較

X 軸、Y 軸、Z 軸平面上での線量分布は、細部で違いが見られた。実際の患者に対する線量分布の比較を行ったのが次の図である。

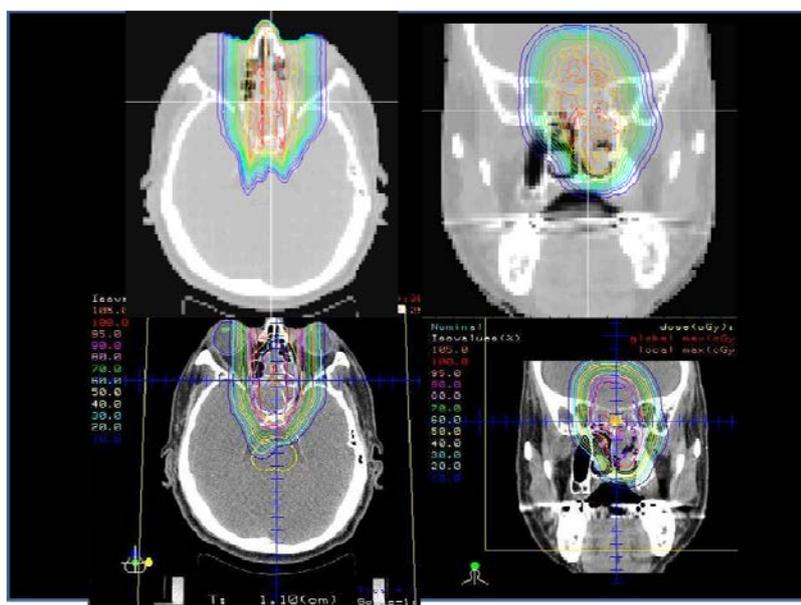


図 1 7 患者内での線量分布、上:シミュレーション、下:治療計画装置

- ・ 患者データ(CT 画像)を GEANT4 へ取り込み患者上での線量計算を行い、治療計画装置によって計算された分布と比較し検証した。治療計画上、患者は様々な密度をもつ水として扱われているが、GEANT4 で実際の体の構成物質を使って線量計算を行い、水を使ったときとの違いを検証した。

④北里大学における研究の概要

放射線医学研究所の重粒子加速器である HIMAC において、がん治療用炭素線による厚い標的及び積層型ファントムでの核破砕反応の発生率及び荷電粒子多重度の測定を行い、GEANT4 シミュレーション結果と比較した。モデルの違いによる再現性を詳細に調べ、必要な修正を指摘してきた。従来蓄積したデータと計算結果から、重粒子線コードの検証に関して結果を得た。

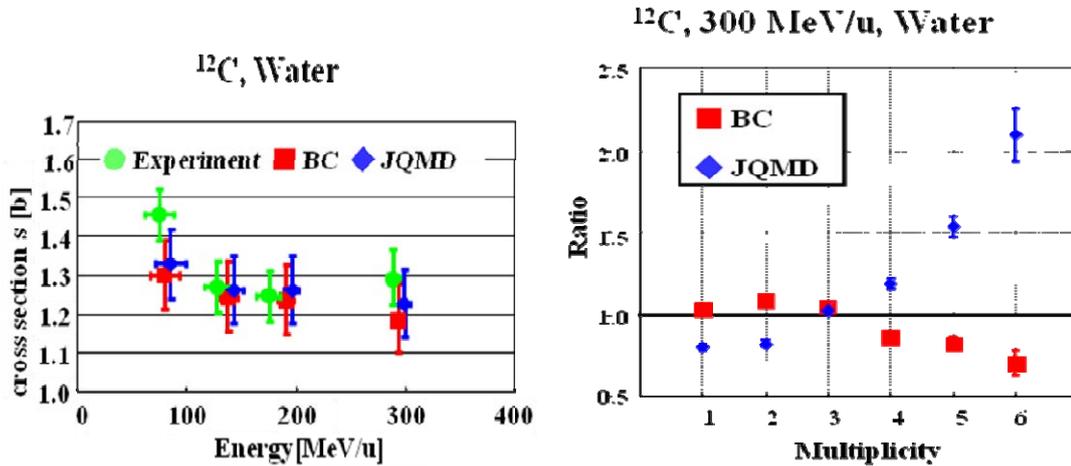


図18 異なる物理モデルと実験の比較

原子核反応に対する異なる物理モデル間に比較を行い、モデルの適用性の限界や、結果の傾向の違いが理解された。

⑤研究の総括

我が国を代表する粒子線治療施設での測定結果を用い、シミュレーション結果の妥当性の検証を行った結果、本研究で開発したソフトウェアは、現時点での医療に必要な精度を得ることができた。今後、新しい治療法、治療装置の開発に結びつけるために、さらに、精度の向上が求められる。本研究に用いている Geant4 は、開発が継続されており、性能向上と精度改善のために新たなバージョンが毎年リリースされている。新たな物理プロセスの実装も本研究のメンバーと協力して進められており、粒子線治療シミュレーションへの適用性の検証を続ける必要がある。今後も、随時、ソフトウェアがアップデートされる度に、検証を行うことが必要である。

これまでは、各研究施設において、特定の用途に対して、シミュレーションを行ってきた。異なる線量計算コードを用い、異なる実装と設定が行われてきたため、結果を公平に比較することが困難であった。本研究の成果であるソフトウェアを用いることで、施設間におけるシミュレーションに関する知識の共有も実現された。実装に掛る時間や労力が減ったことで、より多くの目的にシミュレーションの利用が進められると期待している。

医療機器、施設の開発には、多大な時間と労力が必要であり、シミュレーションの有効利用により、有効な機器や施設の短時間での開発に繋がることが望まれる。また、個々の患者に対するシミュレーションを事前に行うことで、「根拠に基づいた医療」確立の一助になると期待されている。

## (2)研究成果の今後期待される効果

様々な条件のもと、本研究において開発したソフトウェアの精度の検証を行ったので、新たな施設において利用する際に、基礎的な検証を行う必要がない。また、シミュレーションの医学利用そのものに懐疑的な人々もいるが、様々な視点から検証を行い、シミュレーションの結果が信ずるに足るレベルにあることを実証することができた。今後、様々な目的で本研究の成果が利用されることが期待される。

本研究に参加した治療施設においては、本研究の成果を様々な目的に用いることが計画されているが、まずは、現在利用している治療計画装置の検証と改善に本研究の成果物の利用が始まっている。治療計画装置に内蔵されている線量計算のアルゴリズムは、非常に高速であるが、条件によっては十分な精度が得られない。そこで、本研究の成果を現行システムに取り入れ、計算速度と精度の両方の利点を得ることが検討されている。

本研究の成果を様々な場合に応用し、多くの知見を得ることが、より多くの施設に対する本研究の成果普及に繋がると確信している。その過程で、シミュレーションに求められる精度と性能に関して、新たな要求要件が浮上するのは確実なので、将来の研究、開発の継続が強く望まれる。

## 3.3 粒子線治療モデリンググループ(立命館大学、足利工業大学、四国大学、富山商船高専)

### (1)研究実施内容及び成果

粒子線治療モデリンググループは、Geant4と治療計画装置および画像診断装置とのインターフェースのモデル化を研究し、必要なライブラリやアプリケーション・ソフトウェアを開発した。

本グループは、画像診断装置の出力であるDICOMファイルを読み込み、シミュレーションのためのモデリングした結果を可視化するためのソフトウェア (gMocren) を開発した。また、gMocrenのユーザに便宜をはかるための、わかりやすいチュートリアルを作成した。DICOM画像を表示できる商用、非商用のソフトウェアは多数あるが、シミュレーションした結果をDICOM画像と合成できる機能をもったソフトウェアは、調査の結果、存在していなかった。シミュレーション結果を可視化するために、これまではワイヤフレームを用いた手法が一般的であり、ヴォクセルグラフィクスを実現したものは、なかった。そのため、DICOM画像とシミュレーション結果を合成して表示することは、困難であった。また、非商用で、高精度3次元画像を高速に表示できるソフトウェアも存在しておらず、独自に開発を進めてきた。gMocrenは、ソフトウェアで全てを処理するため、特別なハードウェアを必要としない。また、メモリの消費量も少なく、計算に必要なCPU能力も高くない。通常利用されているノート型パソコンにおいて十分利用可能な仕様となっている。

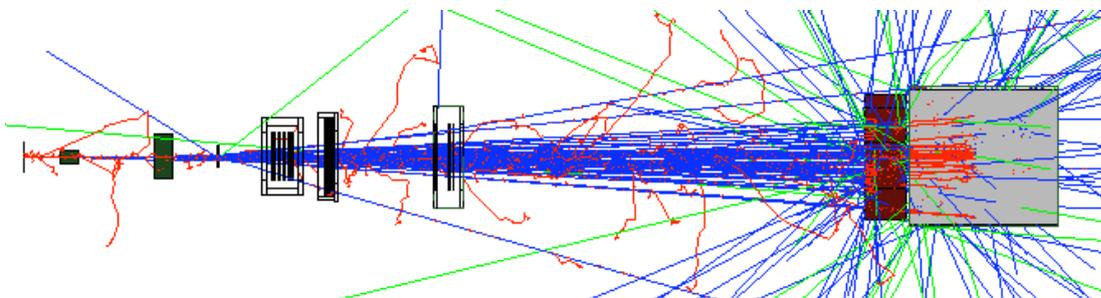


図 19-1 従来の手法による可視化

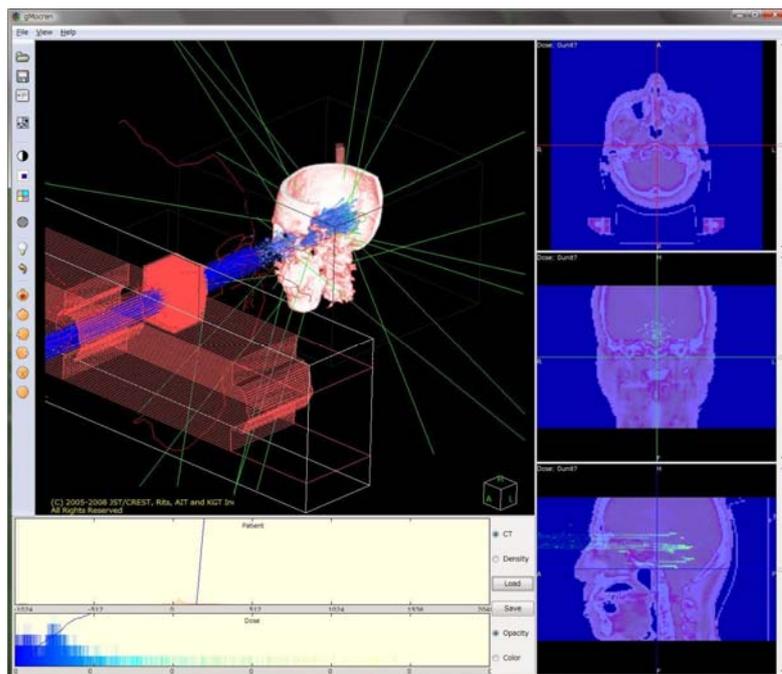


図 19-2 gMocren による兵庫県粒子線医療センターにおける頭部治療のシミュレーションの可視化例

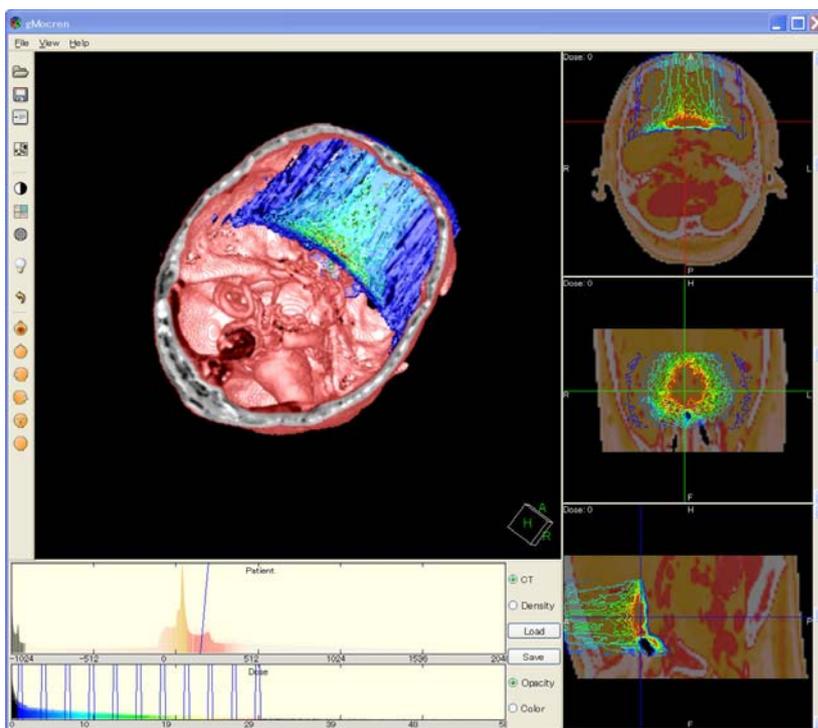


図 20 頭部の線量分布

ユーザ・インターフェースは、医用DICOMビューワで標準的に利用されているソフトウェアに倣い、xy, yz, zx平面への投影であるMPRペーンの表示と操作を実現した。切断面の設定は、マウスの操作で行う。任意の断面における線量分布を表示すること

が可能である。DICOM出力とシミュレーションによる線量分布を同時に可視化するために、ボリューム融合を実現した。これまでのDICOMビューワでは、粒子の飛跡を表示することができなかった。シミュレーションの場合、個々の粒子の飛跡を可視化して、広がりや、到達点を確認したいという要求に応えるために、機能を拡張した。図19に示されているように、画像診断装置の出力上に、シミュレーションによる飛跡が合成して描かれている。治療施設で用いられている線量計画装置の表示に似せ、白黒で2次元表示する機能も備えており、医療現場で従来用いられているソフトウェアの利用者にとり、直観的に瞬時に利用可能なよう、設計および実装が行われた。

研究を推進する中で、画像診断装置の進歩により、当初想定していた以上に大規模データを扱う必要が生じてきた。しかしながら、gMocrenは大規模データの可視化には限界があるため、大規模データを高速に可視化するソフトウェアの開発を行い、リアルタイム・レンダリングを追求することを開始した。ヴォクセルグラフィクスを実現するハードウェアを利用し、より大規模のデータを、より高精細度に、より高速に可視化することを実現しつつある。ソフトウェアで全てを処理するgMocrenと異なり、特別なボードをコンピュータに導入する必要はあるが、医学分野の要求に応えるためには、ハードウェアの支援が不可欠である。

ユーザ・インターフェースとして総括グループが開発した Python フレームワークを基盤として、シミュレーション操作ツールや解析ツールなどを統合する使いやすいGUIを開発した。さらに、それらを Geant4 Web Service として提供するために、評価を終えた Web Server プロトタイプを基に必要な機能の追加などの開発を進めた。Web Service を提供することができれば、ユーザは、手元に余分な計算資源を用意する必要がない。

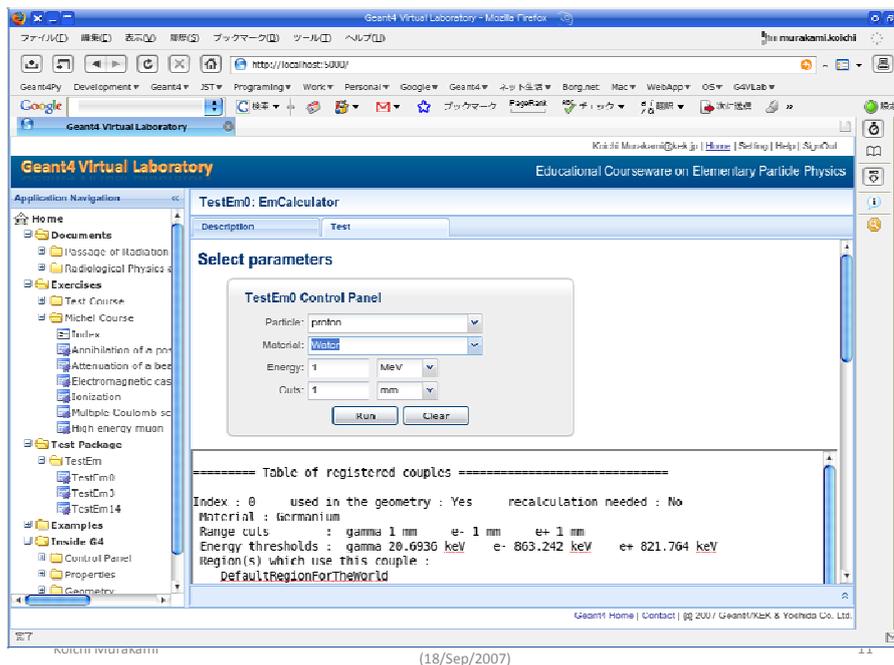


図 21 web インターフェースの例

治療装置のモデリングは、総括グループと協力して行った。すでに述べたように、装実装のためのソフトウェア部品を多数用意し、新たな施設への対応を容易にした。検証グループとも協力し、実際に実装した施設のシミュレーションを行い、結果の妥当性の検証に利用した。ソフトウェア部品化し、ソースコードの再利用性の向上と、設計の見通しのよさを向上させるために、オブジェクト指向技術を利用している。C++言語により実装されたことで、他の FORTRAN をもとにしているシミュレーションソフトウェアに比べて、効率よく質の高いプログ

ラムの作成が可能となった。

装置の設定を行い、記録するためのプロトコルとして、DICOM-RT が国際標準化されている。このプロトコルを利用し、装置の設定をシミュレーションに読み込むために必要なインターフェースの開発を行った。しかし、このプロトコルは、細部に関して、装置製造者の装置実装によるところが大きく、全ての施設に適用することが難しいことが分かった。実際、DICOM-RT を採用している施設は少なく、国内においては、兵庫県粒子線医療センターのみである。将来、DICOM-RT の仕様が細部に及び改訂され、多くの施設がこのプロトコルを利用することが望まれる。現状においては、患者ごとに変更される装置の設定を、各施設に対応するインターフェースを作成する必要がある。現時点で、DICOM-RT とのインターフェースを実現したシミュレーションソフトウェアは、本研究の成果物のみである。

## (2)研究成果の今後期待される効果

gMocren は、医学目的のみならず、一般的に所謂ヴォクセルグラフィクスに利用可能である。医療画像診断装置の出力である DICOM の表示以外にも様々な用途に利用が可能である。すでに、DNA の放射線による損傷の研究において、線量分布の表示に用いることが可能となるように拡張が行われた。図 22 には、採用および DNA の螺旋に対する線量分布を可視化したものである。双方とも、シミュレーションの結果を可視化した。細胞や、DNA の放射線に対する放射損傷を調べる、マイクロジメトリーと呼ばれる分野で、今後の発展が期待されている。

宇宙空間における粒子密度や速度の可視化など、ヴォクセルに基づいた測定結果、計算結果を可視化するために広く利用展開が期待されている。今後、利用者の要求に基づいた改造、改善が必要とされるが、研究成果の普及に努力したい。

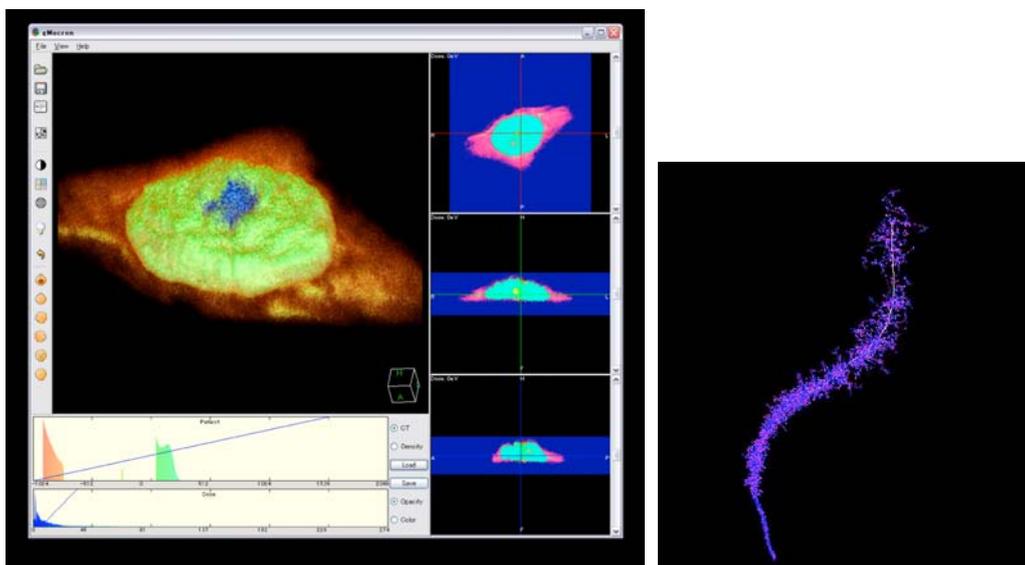


図 22 DNA に対する線量分布

## 3. 4 GRID 研究グループ(高エネルギー加速器研究機構)

### (1)研究実施内容及び成果

放射線シミュレーションは、多種の放射線の様々な相互作用を扱う。粒子の種類によって、引き起こされる相互作用の種類は決まっているが、どの相互作用が起こるかは、確率現象となっている。粒子を極わずかな量だけ進めながら、個々の相互作用の起こる確率を計算し、実際に相互作用が起きた時の様々な物理量の変化、新たな粒子の生成とその物理量を計算する。10 の6乗個以上の粒子数をシミュレーションする必要があり、大きな計算



は、多くの計算資源を共有するために、有効な方法であることが分かった。

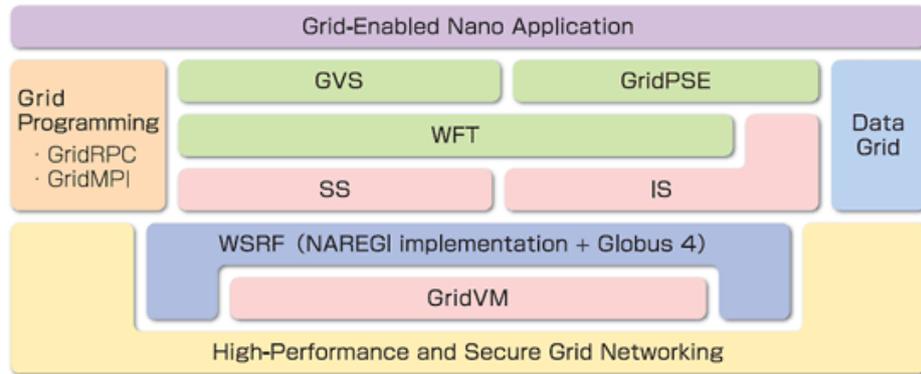


図 2 4 NAREGI アーキテクチャ (<http://www.naregi.org> より)

異なるミドルウェアは、異なる技術に基づいており、アプリケーションソフトウェア側で、それぞれのミドルウェアに対応する必要がある。たとえば、NAREGI 環境のみに対応したアプリケーションソフトウェアを利用しようと思うと、手元に gLite の環境が合っても、NAREGI の環境が無いとジョブの投入ができない。結局は、双方のミドルウェアに対応する作業が必要となった。本研究において開発したアプリケーションソフトウェアは、世界で初めて、双方のミドルウェアに対応し、双方の環境で利用が可能となった。この経験から、ミドルウェアの違いを吸収する API 層の存在が必要であるという結論に達し、本研究とは独立に研究に取り組むこととなった。

GRID 環境を有しているためには、多数の TCP/IP 通信ポートが多数のサイトに対して開かれている必要がある。しかし、セキュリティを重視する治療施設においては、インターネットへの計算機の接続および通信が強く制限されていることが多い。GRID ミドルウェアを利用するためのコマンドも、医学関係者にとっては、敷居が高いことが分かった。そこで、本研究においては、web インターフェースを介し、GRID 環境へジョブの投入が可能となるよう、必要な開発を行った。現在、gLite 版が稼働しており、NAREGI 版も作業が進んでいる。

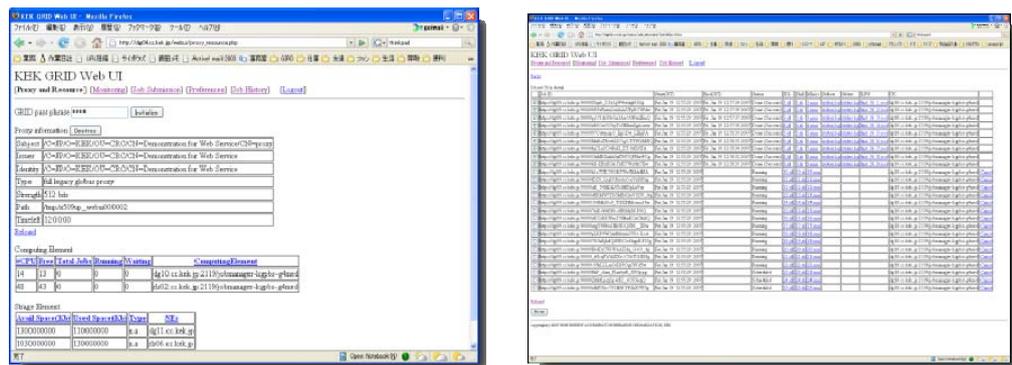


図 25 GRID Web インターフェース

ジョブ終了後、計算結果を集めて統計学的に重ね合わせ、最終的な分布を得たり、可視化のためのファイルを得たり、実行状況を確認できるように作られている。ジョブの実行状況は、モニタが画面でリアルタイムに確認することが可能である。

治療計画の検証や、治療効果の検証などといった目的に利用するのであれば、現状の計算時間でも利用可能あるが、本研究の成果を治療計画に生かそうとした場合、計算時間の短縮が最大の課題となっている。近年、マルチコア化により、共有メモリ型の計算機が急

速に普及していること、所謂スーパーコンピュータ利用の可能性を追求するために、一事象を並列に計算したいという要求が浮上してきた。

入出力ファイルや、計算結果の出力、画像診断装置の出力をインターネット上に分散したサイト間で共有する手法として、サンディエゴスーパーコンピュータセンターの開発したSRBというソフトウェアの利用を試みみた。患者の主治医の病院、治療施設、計算センターがそれぞれ遠隔地に分散しており、患者のデータを治療施設に送り、治療計画を立て、計算センターでシミュレーションを行い、その結果を患者と医師が利用するというモデルを考えた。SRBを用いると、インターネット上でのファイル共有が比較的簡単にセキュアに行うことができる。画像診断装置の出力は、DICOM アノマイザを利用し、個人情報を消去してSRBに記録することも可能である。web インターフェースとの併用で、医療における知識及びデータ共有の仕組みの研究を行った。通信を完全に暗号化し、ユーザ認証をより厳格にするなど、より高度のセキュリティー機能の実装が望まれる。

さらに実行速度を高速化し、計算時間を短縮するためには、本研究で開発した大部分のソフトウェアと線量計算に用いているGeant4の双方を合わせて1事象の計算の並列化する必要がある。しかし、開発の規模が大きく、本研究の範囲内で行うことはできなかった。我が国に、世界一のスーパーコンピュータを開発する計画もあり、公共性や社会性から、本研究の成果も利用に値するものと考えている。将来、機会を得て、並列化に取り組みたいと考える。

## (2)研究成果の今後期待される効果

放射線シミュレーションは、事象を独立に扱えるために、GRID には非常に適したアプリケーションの一つであるといえる。GRID コンピューティングの有用性を示すとともに、本研究の成果物であるソフトウェアが世界的な規模で利用されるための礎が完成した。

一方で、一般ユーザによる GRID ミドルウェアの利用には、未だ高い障壁があることが分かったのも事実である。一般ユーザにとって通信路の確保と設定、グリッドミドルウェアの導入は容易ではない。GRID Web インターフェースを用いることで、これらの困難を背後に隠すことが可能となる。Web インターフェースは、様々な分野で応用可能であると考えている。また、本研究から派生した GRID ミドルウェアの違いを吸収するための API が実用化されれば、国産の NAREGI ミドルウェアの普及にもつながると考えている。

将来的には、計算資源が手元になくとも、シミュレーションが行えるように環境の整備を行いたいと考えている。ソフトウェアとしては、GRID には対応しているが、計算資源の提供者を探す必要があり、実際にユーザが利用するのは簡単なことではない。有償、無償を問わず医療目的に少しなりとも計算資源を提供可能な機関を組織化し、仮想組織を形成する必要がある。本研究の成果を足がかりに、仮想組織形成が促進されると期待する。グリッドの仕組みを利用することで、計算資源が手元になくともシミュレーションが行えるようになる。本研究の成果の普及につながるだけでなく、GRID コンピューティングの有効利用の例となることを期待している。

## § 4 研究参加者

### ①総括グループ(研究の総括およびインターフェースの設計と実装)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	佐々木 節	高エネルギー加速器研究機構	教授	研究総括	H15.10～H21.3
	渡瀬 芳行	高エネルギー加速器研究機構	客員教授	要求分析	H15.10～H21.3
	川端 節彌	高エネルギー加速器研究機構	教授	要求分析	H15.10～H21.3
	尼子 勝哉	高エネルギー加速器研究機構	准教授	分析・設計	H15.10～H21.3
	村上 晃一	高エネルギー加速器研究機構	助教	設計・実装	H15.10～H21.3
*	歳藤 利行	高エネルギー加速器研究機構	CREST 研究員	インターフェイス実装、 検証	H18.4～H21.3
	鵜飼熊太郎	高エネルギー加速器研究機構	助教授	データベース設備	H15.10～H17.3
	小林 克己	高エネルギー加速器研究機構	准教授	放射線の生物学的 効果検証	H20.4～H21.3
	宮本 彰也	高エネルギー加速器研究機構	准教授	要求分析	H20.10～H21.3
	藏重 久弥	神戸大学大学院	准教授	システムインテグレーション	H15.10～H21.3
	尾崎 正伸	宇宙航空研究開発機構	助教	バーチャルモンテカルロ	H19.4～H21.3
	前田 良知	宇宙航空研究開発機構	助教	バーチャルモンテカルロ	H15.10～H21.3
	中澤 知洋	宇宙航空研究開発機構	助教	バーチャルモンテカルロ	H15.10～H19.3
	渡辺 伸	宇宙航空研究開発機構	助教	バーチャルモンテカルロ	H16.4～H21.3
*	小島 好紀	筑波大学大学院理工学研究科	研究補助員	研究データの収集	H16.5～H19.3
*	相田 祥昭	筑波大学大学院理工学研究科	研究補助員	研究データの収集	H17.10～H18.11
*	高橋 睦史	筑波大学大学院システム情報 工学研究科	研究補助員	研究データの収集	H16.5～H17.9
*	岡本 高幸	筑波大学大学院システム情報 工学研究科	研究補助員	研究データの収集	H18.8～H19.3
*	上村 佳史	筑波大学大学院システム情報 工学研究科	研究補助員	研究データの収集	H18.8～H19.3
*	本田 由子	高エネルギー加速器研究機構	研究補助員	研究チーム事務	H15.11～H20.3
	本田 由子	高エネルギー加速器研究機構	チーム事務員	研究チーム事務	H20.4～H21.3

### ② 重粒子コード検証グループ(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)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	金井 達明	放射線医学総合研究所	室長	重粒子コード検証	H15.10～H21.3
	兼松 伸幸	放射線医学総合研究所	研究員	重粒子核破碎実験	H15.10～H21.3
	小森 雅孝	放射線医学総合研究所	研究員	重粒子核破碎実験	H15.10～H21.3
	松藤 成広	放射線医学総合研究所	研究員	重粒子核破碎実験	H15.10～H21.3
	米内 俊祐	放射線医学総合研究所	研究員	重粒子核破碎実験	H19.4～H21.3
	遊佐 颯	群馬大学	助教	重粒子コード検証	H15.10～H21.3
	丸山 浩一	北里大学	教授	重粒子コード検証	H15.10～H21.3
	長谷川智之	北里大学	講師	重粒子コード検証	H15.10～H21.3

	村石 浩	北里大学	助教	重粒子コード検証	H15.10～H21.3
	赤城 卓	兵庫県粒子線医療センター	主査	陽子線コード検証	H16.4～H21.3
*	山下 智弘	神戸大学大学院	研究補助員	陽子線コード検証	H19.1～H19.3
*	山下 智弘	神戸大学大学院	CREST 研究員	陽子線コード検証	H19.4～H20.3
	山下 智弘	兵庫県粒子線医療センター	技術吏官	陽子線コード検証	H20.4～H21.3
	西尾 禎治	国立がんセンター東病院	室長	陽子線コード検証	H16.4～H21.3
	亀岡 覚	国立がんセンター東病院	研究員	陽子線コード検証	H17.4～H21.3
*	稲庭 卓	東京工業大学大学院	研究補助員	研究データの収集	H16.5～H18.3
*	塩入 憲二	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H17.8～H18.1
*	松林 史泰	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H17.8～H18.1
*	真柄 昂胤	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H17.2～H18.3
*	福島 康宏	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H17.12～H18.3
*	宮武 彩	首都大学東京大学院	研究補助員	研究データの収集	H17.4～H19.3
*	石上 稔	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H18.11～H19.9
*	小島 礼慎	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H18.11～H19.9
*	川端 徹	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H19.10～H20.3
*	小島 春菜	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H19.10～H20.3
*	芝生 純	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H19.10～H20.3
*	向井 謙騎	北里大学大学院医療系研究科	研究補助員	研究データの収集	H19.10～H20.3
*	堀田 健二	筑波大学大学院数理物質科学研究科	研究補助員	研究データの収集	H19.4～H21.3

③ 粒子線治療モデリンググループ（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）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	田中 覚	立命館大学	教授	可視化システムの開発	H15.10～H21.3
*	長谷川恭子	立命館大学	CREST 研究員	可視化システムの開発	H19.11～H21.3
*	斎藤 歩	立命館大学	CREST 研究員	可視化システムの開発	H18.4～H19.9
	斎藤 歩	兵庫県立大学大学院	助教	可視化システムの	H19.9～H21.3

				開発	
*	木村 彰徳	立命館大学	CREST 研究員	可視化システムおよび人体モデリングツールの開発	H15.10～ H.17.11
	木村 彰徳	足利工業大学	講師	可視化システムおよび人体モデリングツールの開発	H17.12～H21.3
	阿蘇 司	富山商船高専	准教授	照射機器群のモデル化	H15.10～H21.3
	早勢 欣和	富山商船高専	助手	照射機器群のモデル化	H15.10～H18.3
	吉田 肇	四国大学	教授	治療計画装置のモデリング化	H15.10～H21.3
	鈴木 恵理	鳴門教育大学	大学院生	治療計画装置のモデリング化	H16.9～H17.3
	川西 芳弘	鳴門教育大学	大学院生	治療計画装置のモデリング化	H16.9～H17.3
	保坂 咲絵	鳴門教育大学	大学院生	治療計画装置のモデリング化	H18.11～H19.3
	袁 彦鵬	鳴門教育大学	大学院生	治療計画装置のモデリング化	H18.11～H19.3

④ GRID研究グループ（シミュレーションの並列化およびデータの共有）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	佐々木 節	高エネルギー加速器研究機構	教授	GRID ミドルウェア	H15.10～ H21.3
	鈴木 聡	高エネルギー加速器研究機構	研究機関 講師	GRID ミドルウェアの開発	H15.10～ H21.3
	八代 茂夫	高エネルギー加速器研究機構	技官	GRID 環境の構築	H15.10～ H21.3
	飯田 好美	高エネルギー加速器研究機構	技官	GRID 環境の構築	H15.10～ H21.3
	真鍋 篤	高エネルギー加速器研究機構	教授	GRID 環境	H15.10～ H21.3
*	岩井 剛	高エネルギー加速器研究機構	CREST 研究員	並列化	H16.4～ H18.2
	岩井 剛	高エネルギー加速器研究機構	助教	並列化	H18.3～ H21.3

§ 5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
浅井 慎(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器研究機構	H16.2.13～2.21

小井 辰巳(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器 研究機構	H16.9.5~9.11
小井 辰巳(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器 研究機構	H17.1.10~1.23
小井 辰巳(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ ワークショップ参加	高エネルギー加速器 研究機構、富山商 船高専、立命館大 学、放射線医学総 合研究所	H17.1.10~1.23
Gabriele Cosmo(CERN 研究員)	研究打ち合わせ ワークショップ参加	富山商船高専 立命館大学	H17.1.10~1.19
Marc Verderi(CNRS 研究員)	研究打ち合わせ ワークショップ参加	富山商船高専 立命館大学	H17.1.10~1.19
Petteri Niemine(ESA/ESTEC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器 研究機構	H17.6.26~7.1
John Apostolakis(CERN 研究員)	研究打ち合わせ、セ ミナーおよび講演	高エネルギー加速器 研究機構、北里大 学立命館大学	H18.1.21~2.1
Bruce Faddegon(UCSF 研究員)	研究打ち合わせ、 日台シンポジウム出席	オークラフロンティアホテル つくば	H18.12.9 ~12.16
浅井 慎(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器 研究機構	H19.6.26~7.14
小井 辰巳(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	高エネルギー加速器 研究機構	H19.8.21~9.1
浅井 慎(SLAC 研究員)	研究打ち合わせ	富山商船高専	H19.8.26~9.5

## § 6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 9件)

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 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 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  $^{11}\text{C}$  for Cancer Therapy  
 掲載誌 IEEE Transaction on Nuclear Science, Volume 53(1): Feb 2006
- 著者名 齋藤歩, 神谷淳  
 タイトル Accuracy Improvement of Inner-Point Formula in Three-Dimensional BEM  
 掲載誌 IEEE Transactions on Magnetics 2007年4月出版 Vol. 43, No. 4pp.1489-1492
- 著者名 歳藤 利行、尼子勝哉、岩井剛、村上晃一、佐々木節他  
 タイトル Measurements of the total and partial charge-changing cross sections For 200-400MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  in water and polycarbonate.  
 掲載誌 Physical Review C, 2007年5月9日出版 75, 054606 (2007)
- 著者名 亀岡覚、尼子勝哉、岩井剛、村上晃一、佐々木節他  
 タイトル Dosimetric evaluation of nuclear interaction models in the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit for carbon-ion radiotherapy  
 掲載誌 Radiological Physics and Technology 1 183/187 (2008)
- 著者名 歳藤 利行、尼子勝哉、岩井剛、村上晃一、佐々木節他  
 タイトル Measurements of projectile-like  $^{8}\text{Be}$  and  $^{9}\text{B}$  production in 200-400 MeV/nucleon  $^{12}\text{C}$  on water  
 掲載誌 Physical Review C 78, 067602 (2008)

(2)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

①招待講演 (国内会議 1件、国際会議 4件)

国内

- ・ 佐々木節 (KEK)「粒子線治療シミュレーション基盤の開発-癌の放射線治療の未来を拓く-」 第27回日本シミュレーション学会大会 特別講演 2008.6.19 滋賀

国際

- ・ 佐々木 節(KEK)「Geant4 Toolkit and Simulation Framework for Particle Therapy」PTCOG (Particle Therapy Co-operative Group) 42 東京 (2005.6.9)
- ・ 佐々木 節(KEK)「An Example of Technology Transfer from High Energy Physics to Medicine, Simulation in Radiotherapy」2006 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 15 th International Room Temperature Semiconductor Detector Workshop 2006.11.1 San Diego, USA
- ・ 佐々木 節(KEK), Software suite for hadron therapy simulation, IEEE Nuclear Science and

Medical Imaging Conference 2007, ホノルル、2007年11月2日

- ・ 佐々木 節 (KEK) 「Comprehensive Software Suite for Hadron Therapy」 2008 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) 2008.10.24 ドイツ・ドレスデン

## ②口頭発表 (国内会議 16 件、国際会議 83 件)

### 国内

- ・ 木村 彰徳 (立命館大学(JST)) 「ボリュームデータの適応的四面体格子に基づく並列セグメンテーション」 電子情報通信学会 医用画像研究会 兵庫県神戸市先端医療センター 2004年11月16日
- ・ 長谷川 智之 (北里大学) 「放射線医療教育における3次元動画とe-Learning」 日本医学物理学会 広島市 2004年9月30日
- ・ 木村 彰徳(立命館大学)「適応的四面体格子に基づく複数領域同時分割アルゴリズム」 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2005, 情報処理学会 淡路市 (2005.7.18~20)
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「高度放射線医療のためのシミュレーション基盤の開発」 第4回全国高専テクノフォーラム 2006.7.21 長岡工業専門学校
- ・ 西尾 禎治(国立がんセンター東病院)「国立がんセンター東における新規陽子線治療計画装置の開発」 日本医学物理学会 2006.9.30 博多
- ・ 歳藤 利行(KEK) 「原子核写真乾板を用いた医療用炭素ビームの核破碎反応の研究」, 日本写真学会年次大会,千葉市,2007.5.24
- ・ 木村 彰徳(足利工業大学)「放射線治療シミュレータのための可視化ツール gMocren の開発」, 第26回 日本シミュレーション学会大会,東京都,2007.6.22
- ・ 斎藤 歩(兵庫県立大学)「境界要素法の高精度化 II 境界近傍の解の精度劣化を回避するためのアプローチ」, 応用数理学会 2007 年度年会,2007.9.16 北海道
- ・ 尾崎 正伸(JAXA)「Geant4 による、X 線 CCD の放射線バックグラウンド感受性に対する素子形状の影響の推定」, 日本天文学会 2007 年秋季年会,2007.9.28,岐阜
- ・ 長谷川 恭子(立命館大学)「修正 RPIM によるメッシュレス解析への反復法の適用」, 日本機械学会 第 20 回 計算力学講演会,2007.11.27,京都
- ・ 歳藤 利行 (KEK) 「炭素線治療における線量計算の精密化のための Charge-Changing Cross Section の測定」 平成 19 年度 HIMAC 共同利用研究成果発表会 2008.4.14 千葉
- ・ 山下 智弘 (兵庫県立粒子線医療センター) 「Geant4 と HIBMC で使われているペンシルビーム法による線量計算の比較」 第 95 回日本医学物理学会学術大会 2008.4.4 横浜
- ・ 長谷川 恭子「修正 RPIM の振動解析への適用」第 13 回 計算工学講演会 2008.5.21 仙台
- ・ 長谷川 恭子「修正 RPIM の 3 次元振動解析への適用」第 57 回理論応用力学講演会 2008.6.11 東京
- ・ 山下 智弘 (兵庫県立粒子線医療センター) 「兵庫県粒子線医療センターでの人体に対するシミュレーション」 第 27 回日本シミュレーション学会大会 2008.6.19 滋賀
- ・ 歳藤 利行 (KEK) 「CREST プロジェクト「高度放射線治療のためのシミュレーション基盤の開発」の成果と展望」 第 27 回日本シミュレーション学会大会 2008.6.19 滋賀

### 国際

- ・ 阿蘇 司 (富山商船高等専門学校) 「Verification of the dose distributions with Geant4 simulation for proton therapy」 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ローマ 2004年10月21日
- ・ 木村 彰徳 (立命館大学(JST)) 「Parallel Volume Segmentation with Tetrahedral Adaptive Grid」 17th International Conference on Pattern Recognition イギリス 2004年8月24日

- ・ 木村 彰徳 (立命館大学(JST)) 「DICOM Data Handling for Geant4-Based Medical Physics Application」 The 2004 Nuclear Science Symposium ローマ 2004年10月21日
- ・ 丸山 浩一 (北里大学) 「A Novel Method to Evaluate the Carbon-Beam Attenuation Due to Nuclear Fragmentation Reactions for Cancer Therapy」 The 2004 Nuclear Science Symposium ローマ 2004年10月20日
- ・ 尾崎 正伸 (宇宙航空研究開発機構) 「Radiation Physics Simulator for Space X-Ray Observatory Astro-E2」 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ローマ 2004年10月21日
- ・ 尼子 勝哉 (KEK) 「Geant4: Toolkit for the simulation of the interaction of particles with matter」 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ローマ 2004年10月17日
- ・ 村上 晃一 (KEK) 「Systematic Comparison of Electromagnetic Physics Between Geant4 and EGS4 with Respect to Protocol data」 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ローマ 2004年10月20日
- ・ 村上 晃一 (KEK) 「Deign of Simulation Framework for Generic Radiotherapy」 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference ローマ 2004年10月21日
- ・ 木村 彰徳 (立命館大学) 「Parallel Volume Segmentation of Multiple Regions with Adaptive Tetrahedral Grid」 International Workshop on Volume Graphics 米国 ニューヨーク (2005. 6. 20~24)
- ・ 木村 彰徳 (立命館大学) 「DICOM Interface for Geant4-based Medical Application」 PTCOG (Particle Therapy Co-operative Group) 42 東京 (2005. 6. 8~10)
- ・ 丸山 浩一 (北里大学) 「AN EASY-TO-HANDLE RANGE MEASUREMET TOOL FOR PROTON THERAPY」 PTCOG (Particle Therapy Co-operative Group) 42 東京 (2005.6.9)
- ・ 丸山 浩一 (北里大学) 「Short-term range variation of the therapeutic proton beam」 RSNA2005 (Annual Meeting of 2005 Radiological Society of North ) アメリカ (2005. 11. 29)
- ・ 阿蘇 司 (富山商船高専) 「Parallel tally geometry in GEANT4 for medical dose calculation」 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference Puerto Rico (2005. 10. 23~27)
- ・ 木村 彰徳 (立命館大学) 「DICOM Interface and Visualization Tool for Geant4-Based Dose Calculation」 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference Puerto Rico (2005. 10. 26)
- ・ 村上 晃一 (KEK) 「Geant4 Python Interface」 Geant4 2005 10th users conference and collaboration workshop Bordeaux France (2005. 11. 8~10)
- ・ 阿蘇 司 (富山商船高専) 「A GEANT4-based simulation of irradiation system for hadron therapy」 Geant4 2005 10th users conference and collaboration workshop Bordeaux France (2005. 11. 8~10)
- ・ 佐々木 節 (KEK) 「Status and plan for the hadron therapy simulation project in Japan」 Geant4 2005 10th users conference and collaboration workshop Bordeaux France (2005. 11. 3)
- ・ 尼子 勝哉 (KEK) 「Geant4 Application to lon Therapy in Japan」 9th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications イタリア (2005.10.20)
- ・ 吉田 肇 (鳴門教育大学) 「Geant4 for Education in HEP and Radiation Therapy - A Toolkit Approach -」 Geant4 2005, 10 th Users Conference and Collaboration Workshop Bordeaux France (2005. 11. 4)
- ・ 吉田 肇 (鳴門教育大学) 「GUI Toolkit of Geant4 Simulator to Design and Evaluate a Beam Line of Medical Linac」 IEEE NSS-MIC 2005, San Juan , Puerto Rico Puerto Rico (2005. 10. 26)

- ・ 飯田 好美(KEK)「Federated SRB system」SRB workshop San Diego USA (2005.12.8-9)
- ・ 亀岡 覚(KEK)「Simulation of heavy ion therapy system using Geant4」Computing in High Energy and Nuclear Physics Mumbai INDIA (2006.2.12-17)
- ・ 木村 彰徳(足利工業大学)「New Scorers and Examples for the Geant4 Primitive Scorers」The Geant4 Primitive Scorer Workshop USA(2006.2.13)
- ・ 飯田 好美(KEK)「Globally federated SRB zones」SRB workshop San Diego USA (2006.2.13)
- ・ 斎藤 歩(立命館大学)「Accuracy Improvement of Inner-Point Formula in Three-Dimensional BEM」The 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2006) 2006.5.1 Miami, Florida, USA
- ・ 木村 彰徳(足利工業大学)「A Visualization Tool for Geant4-based Medical Physics Applications」Computer Assisted Radiology and Surgery 20th International Congress and Exhibition 2006.6.29 OSAKA
- ・ 村上 晃一(KEK)「The results on Geant4 validation results from the recent carbon test beams at HIMAC」Geant4 Physics Verification and Validation Workshop 2006.7.17 Geneva, Switzerland
- ・ 村上 晃一(KEK)「A Geant4 Tool for Medical Applications - A Geant4-Python interface」Scientific discussions concerning hadron therapy and related issues 2006.7.21 Lyon, France
- ・ 西尾 禎治(国立がんセンター東病院)「Development of new proton treatment planning system based on GEANT4-JST/CREST in National Cancer Center, Kashiwa, Japan」Particle Therapy Co-Operative Group 45 2006.8.10 Houston, USA
- ・ 佐々木 節(KEK)「Hadron therapy simulation on Grid」KEK CC-IN2P3 Meeting on Grids 2006.9.13 Lyon, France
- ・ 佐々木 節(KEK)「Introduction of the project on developing simulation software for particle therapy supported by JST/CREST」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 尼子 勝哉(KEK)「Validation of carbon physics in Geant4」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 赤城 卓(兵庫県粒子線医療センター)「Application of Monte Carlo Simulation to Ion Therapy at HIBMC」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 松藤 成広(放射線医学総合研究所)「Application of Monte-Carlo Simulation at HIMAC」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Sampling and Scoring」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Proton Physics validation」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.5 ドイツ
- ・ 村上 晃一(KEK)「Geant4 Python Interface」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.6 ドイツ
- ・ 吉田 肇(鳴門教育大学)「Wrapping Geant4 with Python and New Graphical User Interfaces for Medical Applications」Monte Carlo Simulations for Carbon Ion Therapy 2006.10.6 ドイツ
- ・ 尼子 勝哉(KEK)「Total and partial charge-changing cross section of 200-400MeV/u Carbon at measured at NIRS and validation of Geant4」11th Geant4 Collaboration Workshop and Users Conference 2006.10.11 Lisbon, Portugal
- ・ 吉田 肇(鳴門教育大学)「Status and Plan of the Graphical User Interface of Geant4 Using the New Python Wrappers」11th Geant4 Collaboration Workshop and Users Conference 2006.10.10 Lisbon, Portugal

- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「A Geant4-based simulation for hadron therapy」 11th Geant4 Collaboration Workshop and Users Conference 2006.10.9 Lisbon, Portugal
- ・ 佐々木 節(KEK)「Status and Plan on the Japanese project for developing particle therapy simulator」 11th Geant4 Collaboration Workshop and Users Conference 2006.10.9 Lisbon, Portugal
- ・ 村上 晃一(KEK)「Application of Geant4 Python Interface」11th Geant4 Collaboration Workshop and Users Conference 2006.10.9 Lisbon, Portugal
- ・ 亀岡 覚(KEK)「Simulation of a heavy ion therapy system using Geant4」 First European Workshop on Monte Carlo Treatment Planning of the European Workgroup on MCTP 2006.10.22 Gent, Belgium
- ・ 村上 晃一(KEK)「A Geant4-Python Interface: Development and Its Applications」 IEEE NSS/MIC 2006 2006.10.30 San Diego, USA
- ・ 歳藤 利行(KEK)「Study on Nuclear Fragmentation by High Speed Emulsion Read-Out System」 2006 Nuclear Science Symposium 2006.11.1 San Diego, USA
- ・ 亀岡 覚(KEK)「Simulation of a heavy ion therapy system using Geant4」 2006 Nuclear Science Symposium 2006.11.1 San Diego, USA
- ・ 尾崎 正伸(宇宙航空研究開発機構)「Geant4 Application for Japanese Space Science Missions from 2006 to Future」 4th Geant4 Space Users' Workshop and 3<sup>rd</sup> Spenvis Users' Workshop 2006.11.7 Pasadena, USA
- ・ 佐々木 節(KEK)「Validation of ion physics in Geant4 against carbon」 4th Geant4 Space Users' Workshop and 3<sup>rd</sup> Spenvis Users' Workshop 2006.11.7 Pasadena, USA
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Geant4 validation on proton stopping power」 4th Geant4 Space Users' Workshop and 3<sup>rd</sup> Spenvis Users' Workshop 2006.11.8 Pasadena, USA
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Primitive Scorer for sampling and scoring physical quantities in Geant4」 4th Geant4 Space Users' Workshop and 3<sup>rd</sup> Spenvis Users' Workshop 2006.11.10 Pasadena, USA
- ・ 赤城 卓(兵庫県粒子線医療センター)「Application of Monte Carlo Simulation to Ion Therapy at HIBMC」 The Japan Taiwan Symposium on Simulation in Medicine 2006.12.13 Tukuba Japan
- ・ 斎藤 歩(立命館大学)「Volume Visualization Tools for Geant4 Simulation」 The Japan Taiwan Symposium on Simulation in Medicine 2006.12.13 Tukuba Japan
- ・ 歳藤 利行(KEK)「Study of fragmentation of therapeutic carbon beams with emulsion」, International nuclear physics conference(INPC2007),東京都,2007.6.5
- ・ 木村 彰徳(足利工業大学)「gMocren: A Visualization Tool for Geant4 Medical Applications」, CARS 2007 Computer Assisted Radiology and Surgery 21st International Congress and Exhibition,ドイツ,2007.6.27
- ・ 斎藤 歩(兵庫県立大学)「Accuracy Improvement of BNM」, 16 th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields,ドイツ,2007.6.27
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「A GEANT4 based simulation for proton therapy」, International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics,2007.9.3,カナダ
- ・ 山下 智弘(神戸大学大学院)「Geant 4 simulation of HIBMC facility using DICOM」, 12 th Geant4 Collaboration Workshop,2007.9.13,イギリス
- ・ 吉田 肇(鳴門教育大学)「Geant4 Web Application ? its design and use」, 12 th Geant4 Collaboration Workshop,2007.9.17,イギリス
- ・ 歳藤 利行(KEK)「Carbon ion depth dose profile in HIBMC facility」, 12 th Geant4 Collaboration Workshop,2007.9.18,イギリス
- ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Proton Physics Validation on GEANT4 Based Particle Therapy Simulator」, The European Federation of Organizations for Medical Physics,2007.9.20,イタリア
- ・ 丸山 浩一(北里大学)「Analysis of the Factors that Disturb Dose Concentration in Carbon

- Beam Therapy], 11 th Workshop of Heavy Charged Particles in Biology and Medicine, Heidelberg,2007.9.27,ドイツ
- ・ 斎藤 歩(兵庫県立大学)「gMocren: High-Quality Volume Visualization Tool for Geant4 Simulation」, 2007 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE,2007.10.30.ハワイ
  - ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Optimization of Patient Geometry Based on CT Data in GEANT4 for Medical Application」, 2007 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE,2007.11.2,ハワイ
  - ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Geant4 Based Simulation Framework for Particle Therapy System」, 2007 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE,2007.11.2,ハワイ
  - ・ 長谷川 恭子(立命館大学)「High-Quality Volume Visualizer Designed for Computer Simulation of Radiation Therapy」, The Third Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2007),2007.11.16,滋賀
  - ・ 歳藤 利行(KEK)「Simulation of depth-dose profile of therapeutic carbon beam at KEK, Japan」, New Geant4 extensions by the Japan-France Collaboration, Bordeaux France,2007.11.12,フランス
  - ・ 木村 彰徳(足利工業大学)「gMocren: A Volume Visualization Tool for Geant4-based」, New Geant4 extensions by the Japan-France Collaboration,2007.11.13,フランス
  - ・ 吉田 肇(鳴門教育大学)「Web Frameworks for Education」, New Geant4 extensions by the Japan-France Collaboration,2007.11.13,フランス
  - ・ 阿蘇 司(富山商船高専)「Activities at Toyama National College of Maritime Technology , Japan」, New Geant4 extensions by the Japan-France Collaboration,2007.11.13,フランス
  - ・ 歳藤 利行(KEK)「Study on the Medical Application of Heavy Ion Therapy」, 3rd International Workshop on Nuclear Emulsion Techniques,2008.1.24,名古屋
  - ・ 歳藤 利行 (KEK) 「Validation of Nuclear Reaction Models in Geant4 for the Purpose of Carbon Ion Radiotherapy」 2007 Nuclear Science Symposium 2007. 11.1 ハワイ
  - ・ 尼子 勝哉 (KEK) 「Documentation on the Web」 12<sup>th</sup> Geant4 Collaboration Workshop 2007. 9. 11 イギリス・ヨークシャー
  - ・ 西尾 禎治(国立がんセンター東病院)「Application of Monte Carlo code for treatment planning of charged particle radiotherapy」 Ion Beams in Biology and Medicine, 11th Workshop of Heavy Charged Particles in Biology and Medicine, ESTRO teaching course on Radiotherapy with Protons and Ions 2007. 10. 5 ドイツ・ハイデルベルグ
  - ・ 村上 晃一 (KEK) 「Python Interface, Geant4 Education and Geant4 on Web」 12 th Geant4 Collaboration Workshop 2007. 9. 17 イギリス・マンチェスター
  - ・ 木村 明德 (足利工業大学) 「Requirements in Modeling and Visualization for Geant4-Based Radiotherapy Simulation」 2007 Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, IEEE 2007. 11. 2 ハワイ
  - ・ 尾崎 正伸(宇宙航空研究開発機構)「Geant4 in JAXA」5th Geant4 Space Users' Workshop 2008. 2. 13 東京
  - ・ 歳藤 利行 (KEK) 「Recent progress in emulsion technology to study fragmentation reactions of high energetic ion beams」 Seventh International Symposium Swift Heavy ions in Matter Lyon, France 2008. 6. 3 フランス・リヨン
  - ・ 阿蘇 司 (富山商船高専) 「Hybrid Dose Calculation with a Pencil Beam Algorithm and a GEANT4 Simulation for Hadron Therapy Application」 2008 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) 2008. 10. 21 ドイツ・ドレスデン
  - ・ 尼子 勝哉 (KEK) 「Geant4 Education - Python Interface to ENDL-EEDL/EPDL/EADL」 New Geant Extensions: Meeting under KEK-CNRS FJPL Project 2008. 9. 02 フランス・アヌシー
  - ・ 歳藤 利行 (KEK) 「Range & peak /plateau ratio of carbon beam on water」 New Geant4

- extensions 2008.9.3 フランス・アヌシー
- ・吉田 肇 (四国大学) 「Unification and new developments of Geant4 (G)UI toolkits for educational applications」 New Geant4 extensions 2008.9.2 フランス・アヌシー
  - ・尾崎 正伸 (宇宙航空研究開発機構) 「Report on the Space Users' Workshop at Tokyo and Japan's Activities for the Space Application」 2008.10.7 神戸

③ポスター発表 (国内会議 2件、国際会議 2件)

国内

- ・歳藤 利行(KEK)「炭素線相互作用シミュレーションの精密検証」, シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」CREST・さきがけシンポジウム,2007.11.21,東京
- ・長谷川 恭子(立命館大学)「gMocren: 放射線シミュレータを前提としたボリューム可視化ツール」, シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」CREST・さきがけシンポジウム

国際

- ・岩井 剛(KEK)「The 2005 Nuclear Science Symposium」 An Application of Grid Technology to Medical Physics Simulation Puerto Rico (2005.10.25)
- ・尾崎 正伸 (宇宙航空研究開発機構) 「Instrumental background of the X-ray CCD camera in space: its dependence on the configuration parameters of CCD」 SPIE conference: Astronomical Telescopes and Instrumentation 2008: Telescopes and Systems 2008.6.24 マルセイユ

(3)特許出願

①国内出願 (0件)

②海外出願 (0件)

(4)受賞等

①受賞

- ・歳藤 利行 日本写真学会進歩賞

②新聞報道

③その他

(5)その他特記事項

なし

## §7 研究期間中の主な活動

ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2004.6.2	チーム総会	JST シミュレーション事務所	23 名	各グループの進捗状況の報告と研究計画の確認
2004.11.1	チーム総会	JST シミュレーション事務所	17 名	研究チームの全体の進捗状況を報告し計画を議論
2005.1.11 ～1.15	GEANT4 研究会講習会	立命館大学くさつキャンパス	55 名	基盤となるソフトウェアの講習会と研究会(公開)
2005.1.16 ～1.18	チーム打ち合わせ	富山商船高専	10 名	研究打ち合わせ
2005.5.11	チーム総会	JST シミュレーション事務所	20 名	前年度の報告と新年度の活動予定を議論
2005.7.28	チーム総会	JST シミュレーション事務所	20 名	進捗状況の確認と方針を議論
2006.1.26 ～1.27	Geant4 研究会 2005	北里大学	40 名	放射線シミュレータ Geant4 の利用と開発に関する情報交換
2006.5.17	チーム総会	JST シミュレーション事務所	26 名	前年度の報告と新年度の活動予定を議論
2006.12.12 ～12.15	The Japan Taiwan Symposium on Simulation in Medicine	つくば国際会議場	50 名	日本台湾シンポジウム
2007.5.16	チーム総会	JST シミュレーション事務所	31 名	前年度の報告と新年度の活動予定を議論
2008.5.28	チーム総会	JST シミュレーション事務所	23 名	前年度の報告と新年度の活動予定を議論

## §8 結び

本研究において、粒子線治療のシミュレーションに必要なソフトウェアを包括的に開発することができた。今後、新たな施設でシミュレーションを行う際には、本研究の成果を利用することで、実装に必要な時間を短縮することができる。また、基本的な物理量に関する結果の検証を十分に行っているため、それぞれの施設における目的に即した検証に注力が可能となる。これまで、同様のソフトウェア開発は世界に類を見ないものであり、国際的にも高く評価されている。

今後は、X 線、ガンマ線治療装置への対応を行い、放射線治療全般をシミュレーション可能なように展開していきたい。現状では、患者は、治療法の選択を医師に任せているが、「根拠に基づいた医療」の確立により、患者に選択の権利を与えるべきであるということが社会的な合意となりつつある。「根拠に基づいた医療」を確立するために、治療のシミュレーションを利用することは有効である。治療装置の選択、治療装置のパラメータの決定、治療効果の類推をシミュレーションによって行えるようにしたいと考えている。社会的ニーズの高い問題でもあり、実現を目指して尽力したい。複雑に絡みあった高次元のパラメータを最適化するためには、大量のシミュレーションジョブを処理する必要があり、1 事象の計算の並列化は避けられない。また、より一層の計算機の高性能化も望まれる。

本研究においては、6 名の CREST 研究員、1 名の高エネルギー加速器研究機構博士研究員の

計7名が、いわゆるポスドクとして、研究に参加した。現時点で、2名が在職中、3名が大学等研究機関に助教または講師として採用され、2名が医学物理士として治療施設採用された。医学物理士の不足が我が国の放射線治療の遅れの一因とも言われている。物理学で学位を取ったが、医学に強い興味のある2名に対して、医学物理士への道が開けた意味は大きいと考えている。また、3名の研究機関等に採用された者も、引き続き本研究に参加し、大きな成果を上げている。残る2名にも、それぞれが望む職が得られることを望んでいる。

研究費配分の方式が途中で変更になったことで、研究チーム内には様々な混乱があった。当初のJST一括管理方式の方が我々にはメリットがあったと考えている。研究の対象の複雑さ、困難さから、多数の方に研究に参加していただき、それぞれの専門性を発揮していただく必要があった。そのため、我々のチームに参加する研究機関の数が多くなっている。個人の都合などで、どうしても研究計画通り進まない機関もあれば、予定よりも研究が大幅に進む機関もある。チーム全体の予算を一括管理し、当初の研究計画縛られずに、予算を柔軟に利用できたことで、当初に2年の間に、全体としても研究が予想以上に進展し、早期に成果を得ることができた。後半、各機関に年度当初に配分される方式に代わってからは、研究代表者が年度途中における研究の進捗程度を調整できなくなった。また、予算の適正執行に関しても、各機関にお願いすることになった。研究費の適正執行の問題も理解できるが、研究代表者に課せられる責任に見合った予算執行方法の検討が望まれる。

最後に、折に触れご指導を頂いた研究総括、アドバイザーの先生方に感謝します。また、研究を支援して頂いたシミュレーション事務所の皆様の多大なご尽力にも感謝します。