

「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」

平成14年度採択研究代表者

齋藤 公明

(日本原子力研究所 計算科学技術推進センター 主任研究員)

「放射線治療の高度化のための超並列シミュレーションシステムの開発」

1. 研究実施の概要

本研究の目的は、高度計算科学技術を活用することにより、現行の放射線治療の高精度化と高信頼性化、ならびに先端的な治療技術の開発に貢献することにある。このために、(a)放射線治療遠隔支援のための線量計算システム (IMAGINE) の開発、及び(b)レーザー駆動陽子線による医療照射プラン構築デモソフト開発、を実施する。

(a)の研究では、詳細人体モデルと高速モンテカルロ手法により高精度線量計算を線量計算センターで集中して行い、高速ネットワークを介して現場とデータの授受を行うことで、効率的な線量評価を行えるシステムを構築し、光子・電子を用いた放射線治療を支援する。これまでに、システム全体の設計を進めるとともに、システムの重要な構成要素である人体モデリングエンジン、スペクトル計算エンジン、線量計算エンジンのプロトタイプを整備し、これらを用いた基礎特性試験を進めた。さらに、先端的治療法への応用研究として、強度変調放射線治療 (IMRT) 及びCT集光治療 (CTRTx) へシステムを適用するための研究を行った。特に、開発中のCTRTx治療装置が16年の近い時期に完成する見込みであることを考慮し、CTRTxに特化した線量計算エンジンとIMAGINEシステムのプロトタイプをまず開発し、システム内のデータ転送等の基礎特性試験を実施した。今後は、このプロトタイプを発展させる形で汎用版IMAGINEシステムを17年度に構築し、実証試験を通してシステムを完成させる予定である。

(b)では、陽子線治療で現在使われている加速器 (サイクロトロン等) にかわり、レーザー駆動陽子線発生装置を利用した低浸潤性、低コスト、コンパクト性において優れた陽子線治療実証機 の概念設計を目指す。これまでに、PIC粒子シミュレーションによる超並列マルチパラメトリックラン実行環境を構築し、レーザー駆動陽子線の基礎特性についての解析を進めた。また、遠隔治療計画を行うインフラ整備の一環としてのネットワーク接続試験を開始した。さらに、パルス制御X線透視による動体追跡照射治療装置についての理論的考察、ならびに陽子線による吸収線量のマイクロ過程と線量評価の検討を行った。今後は、陽子エネルギー分布を線量分布計算コードへ直接入力してのブラッグピークの解析、モンテカルロ法の治療計画への利用についての検討を進めるとともに、ビームの輸送系について検討する。以上のシミュレーションデータを整理・集積することにより、レーザー

駆動陽子線治療実証機の概念設計を行う。

2. 研究実施内容

本研究プロジェクトでは、現在広く実施されている光子・電子を用いた放射線治療の高精度化と高信頼性化を目指すサブグループと、将来の治療法として期待がかかる陽子線治療を対象として小型の治療装置を実現するための基礎研究を行うサブグループに別れて研究を実施している。以下にそれぞれのグループの研究実施内容についてまとめて紹介する。

(a) 放射線治療遠隔支援のための線量計算システム（IMAGINE）の開発

IMAGINEシステムの開発では、これまでに全体システムの検討と基本設計を進め、CTRTx用のIAGINEシステムプロトタイプを開発した。さらに、個別の研究課題についてワーキンググループを組織し、15年度に実施した研究の内容は以下の通りである。

光子・電子モンテカルロ計算高速化研究WGでは、モンテカルロシミュレーション計算の高度化と高速化、ファントム実験等による実測値とシミュレーションとの比較による精度検証、医学物理・線量評価の立場からの実証試験への参加と本システムの治療計画装置のQC/QAへの適用性検討などを目的としている。この中で、●治療装置照射ヘッドの構造、材質の調査、●BEAMコードによるエネルギースペクトル計算、●高速・高精度線量分布シミュレーションのためのエネルギースペクトル発生方法の検討、●線量分布測定データとの比較によるシミュレーションパラメータ決定手順の作成、●分散処理基本モデルの構築、●分散並列処理によるエネルギースペクトル計算、吸収線量計算の処理速度向上に関する検討、●計算線量検証のためのファントム実験系の精度に関する検討、●肺がん定位放射線治療への線量計算システムへの応用、などに関する研究を行った。

人体モデリングWGでは、線量計算に用いる詳細人体モデルの仕様決定・設計ならびに人体モデル自動作成アルゴリズム開発の研究を行っている。詳細人体モデル（ボクセル・ファントム）の仕様に関しては、人体モデルを構成する材質の元素組成分類方法と腫瘍部の線量精度との関係を明らかにした。今後は、腫瘍の周囲に存在する危険臓器の線量と元素組成分類との関係を調べるとともに、特に骨格部分の組成の分類法について検討を加える予定である。また、CT画像から、緻密骨、骨髄、肺、脂肪、筋肉、皮膚を自動的に分割して人体モデルを作成する人体モデリングエンジンのプロトタイプを開発し、ウサギのCT画像への適用試験を実施して良好な結果を得た。今後、画像のノイズ除去等のモデリングアルゴリズムの改良点を随時エンジンに組み込み性能向上を図る。

強度変調放射線治療（IMRT）応用研究WGでは、マルチリーフコリメータ（MLC）を利用する放射線治療に対してIMAGINEシステムを応用するために、マルチリーフコリメータの特性について主に評価を実施した。EGS4モンテカルロシミュレーションにより、バリアン社製Millennium MLC120において発生する散乱線の発生状況について調査した結果、その3次元的な発生分布を把握することができた。本結果は、X線発生装置のタ

ターゲット、照射野コリメータを通過した後のX線のエネルギースペクトルに応じた散乱線発生状況の把握、及びその次のステップの線量計算をモンテカルロ法で実施する上でのX線発生位置（線源）の決定に応用できるものと期待され、それに向けて研究を続行している。

CT集光治療装置(CTRTx)応用研究WGでは、CTRTxの線量評価手法に関する研究を行った。今年度はBEAMシミュレーションプログラムを用いて、治療用CTの管球から矩形コリメータを介したビームのシミュレーションをおこなった。エネルギー分布の計算結果と東芝研究所で測定した実測値とは良く合致した。また、深さ方向のX線強度プロファイルも前年度に測定した実測値とよく一致した。これによってEGS4とBEAMでのシミュレーションの妥当性が確認されたため、今後の検証に用いることができる。さらに実際にIMAGINEを利用した線量評価システムを開発した。制御ソフトウェア、インターフェイスソフトウェア、CTRTxに最適化したIMAGINE線量計算エンジンの各要素がほぼそろい、年度末には実際に接続試験をおこなった。動物実験に関してはウサギの全身画像を作成すると共に若干匹のウサギ肺をライナックで照射し、照射部位を対象にCT画像を連続して撮影して、CTRTxのための至適線量と対照群として治療後の肺変化の状態を得るための実験を続けている。

(b) レーザー駆動陽子線による医療照射プラン構築デモソフト開発

レーザー駆動粒子線による医療照射プラン構築デモソフト開発では、粒子発生計算エンジンであるPIC粒子シミュレーションコードについて、原研関西研超並列計算機によるパラメータラン環境構築を行った。これにより、空間2次元配位モデルではあるが720 CPUを活用した720パラメータラン同時実行が可能となり、レーザー強度－プラズマ密度空間などでの広範囲の解析が行えるようになった。実際にこれをレーザー－薄膜相互作用によるイオン加速実験解析に適用し、ターゲット前面に生成される低密度プラズマ中でのイオン加速機構を明らかにした。さらに、二重層薄膜照射に対して空間3次元モデルから予測される準単色の陽子エネルギー分布をモデル化し線量分布計算コードGeant3への入力とし、1000.0mmの立方体水ファントムを仮定したブラッグピーク解析を進めている。

兵庫県粒子線医療センター（HIBMC）と神戸大学医学部の端末を兵庫県情報ハイウェイとSINETを介して接続し、医用画像（CT画像）を転送し、遠隔治療計画を行うインフラを整備中である。セキュリティを考慮した暗号処理を利用し、伝送速度約19Mbpsでの検証を実施した。CTスライス1枚の伝送速度は約0.22秒である。今後はフィールド検証を行い、実用性等について検証する。原研関西研にあるスカラ並列型スーパーコンピュータを用いたモンテカルロ法による治療計画を計画中である。これは、ペンシルビーム法の治療計画に比べ、粒子と物質との物理的相互作用を考慮し正確であるとされている。治療計画は、患者の登録からROI（Region of Interest：関心領域）の入力、線量分布計算・評価、照射スケジュール作成などの行程を経て実施されるため、臨床における実用性評価も考慮する必要がある。今後、高速ネットワークと高性能大

型コンピュータを活用したレーザー駆動陽子線による治療計画の立案を行い、適応疾患の解析とその治療時の技術解析から粒子線治療の必要とするシステムを提案することを目的として活動を進める。

放射線治療における線量分布のその場観測を可能とする、新しいタイプの検出器開発に向けたシミュレーション解析を前年度に引き続き行った。この検出器は、高抵抗酸化物の薄膜が放射線照射によって導電性を示すことを利用するものであるが、この現象が酸化物薄膜を支持する基板材料と表面保護のカバー材での電子発生によって引き起こされている可能性大であることが実験とシミュレーションの比較によって示された。また、動体追跡陽子線治療において肺腫瘍を動体追跡する場合に、透視線量を軽減するために、腫瘍存在位置の予測関数を用いた透視パルス照射の軽減が可能かどうかをいくつかの予測法について比較検討した。さらに、4次元(時間と空間)な腫瘍の軌跡を、毎回の治療前に可視化し、これを用いてその日ごとに肺癌の治療部位を設定できるシステムを開発した。一方、リアルタイム動体追跡手法を陽子線治療に適用する際に必要な治療線量パルスの幅、タイミング、エネルギー密度等を決定することを目的として、陽子線の水中における阻止能データの精査に着手した。この結果、実験的に得られるブラッグピークには、報告データ間でバラツキが非常に大きいこと、阻止能データからブラッグ曲線を導出する際には、多重クーロン散乱によるレンジストラグリング等の効果を入れる必要があること等が明らかとなり、ペンシルビーム陽子線のビーム中心での線量を見積もる際の基礎が再検討された。治療に必要な吸収線量を与えるパルス状陽子ビームのフルエンス等の試算により、現在リニアックで用いられている2方向透視X線動体追跡装置が、現状の加速器による陽子線治療装置に対しても十分適用可能であることが示された。

3. 研究実施体制

以下、グループ(1)から(4)は(a)放射線治療遠隔支援のための線量計算システム(IMAGINE)の開発を、グループ(5)は(b)レーザー駆動陽子線による医療照射プラン構築デモソフト開発を、それぞれ担当している。

(1) 光子・電子モンテカルロ計算高速化研究グループ

- ① 研究分担グループ長：齋藤秀敏(東京都立保健科学大学 放射線学科、助教授)
- ② 研究項目：光子・電子モンテカルロ計算の高速化に関する研究

(2) 人体モデリング研究グループ

- ① 研究分担グループ長：齋藤公明(日本原子力研究所 計算科学技術推進センター 量子生命情報解析グループ、主任研究員：保健物理部放射線リスク研究室、室長兼務)
- ② 研究項目：人体モデリング手法に関する研究

(3) 強度変調放射線治療(IMRT)応用研究グループ

- ① 分担グループ長：成田雄一郎(千葉県がんセンター 放射線治療物理部、技師)

- ② 研究項目：IMRT線量評価システムの開発
- (4) C T集光治療装置 (CTRTx) 応用研究グループ
 - ① 分担グループ長：国枝悦夫(慶応義塾大学 医学部 放射線科学教室、専任講師)
 - ② 研究項目：CT集光治療装置の線量評価システムの開発
- (5) レーザー駆動粒子線応用グループ
 - ① 研究分担グループ長：田島俊樹 (日本原子力研究所 関西研究所、所長)
 - ② 研究項目：レーザー駆動粒子線による医療照射プラン構築デモソフト開発

4. 主な研究成果の発表 (論文発表および特許出願)

(1) 論文発表

- Shirato H, Harada T, Harabayashi T, Hida K, Endo H, Kitamura K, Onimaru R, Yamazaki K, Kurauchi N, Shimizu T, Shinohara N, Matsushita M, Dosaka-Akita H, Miyasaka K.: Feasibility of insertion/implantation of 2.0-mm-diameter gold internal fiducial markers for precise setup and real-time tumor tracking in radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 56(1), 240-7 May 1 (2003)
- Neicu T, Shirato H, Seppenwoolde Y, Jiang SB.: Synchronized moving aperture radiation therapy (SMART): average tumour trajectory for lung patients. *Phys Med Biol.* 48(5):587-98 (2003).
- 伊達 広行、友澤 秀征、賞雅 寛而、岡本 孝司、下妻 光夫：RISA (Radiation Induced Surface Activation) 検出器の開発，第86回日本医学物理学会学術大会報文集23巻Sup. 3, 220-221 (2003)
- Kunieda Etsuo, Kawaguchi Osamu, Saitoh Hidetoshi, Fujisaki Tatsuya, Takeda Atsuya, Kawase Takatsugu, Hossain M DeLoar, Shigematsu Naoyuki and Kubo Atsushi: Measurement of beam-axis displacement from the isocenter during three-dimensional conformal radiosurgery with a micro-multileaf collimator. *Radiotherapy and Oncology* 70(1) 45-48 (2004).
- K. Saito, E. Kunieda, Y. Narita, H. M. DeLoar, H. Kimura, M. Hirai, T. Fujisaki, A. Myojoyama and H. Saitoh: Development of the accurate sode calculation system IMAGINE for remotely aiding radiotherapy. *KEK Proceedings 2003-15*, 81-87 (2004).

(2) 特許出願

なし