

「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

((独) 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 研究主席)

「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)では、詳細人体モデルと高速モンテカルロ手法を利用して高精度線量計算を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、現在広く行われている X 線治療を支援することを目指す。18 年度には、日本原子力研究開発機構関西研究所の ITBL 計算機及び東海研究所の PC クラスターを仮想線量計算センターとして、開発した汎用 IMAGINE システム第 1 版を常時使用できる環境を構築し、システム実証・検証試験を開始した。19 年度には、試験結果のフィードバックにより改良を加え、IMAGINE システム実用版を完成させる。

(b)では、レーザー駆動陽子線を利用した小型で安価な陽子線治療装置実現のための基礎研究を行っている。18 年度には、モンテカルロ線量分布計算コードの高速化について、GEANT4 ナビゲーションライブラリのカスタマイズと MPI 並列化手法により、3,000 倍以上の計算速度の改善を達成した。また、レーザー駆動陽子線をスポットスキニング法による放射線治療に用いる際に必要とされるビーム特性を探る解析において線量分布の最適化に一定の目途をつけた。今後、パラメータサーベイをさらに進め、レーザー駆動陽子加速の特性ならびに限界、放射線治療への適用性、放射線治療システムとしての革新性を明らかにする。

2. 研究実施内容

(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

開発した汎用 IMAGINE システム第 1 版の実証・検証試験を行うために、日本原子力研究開発機構(原子力機構)関西光科学研究所の ITBL 計算機ならびに同東海原子力科学研究所の PC クラスターを仮想線量計算センターと想定し、プロジェクト参加機関である首都大学東京、慶應義塾大

学、京都大学、原子力機構から遠隔で恒常的に IMAGINE システムを使用できる環境を構築しシステム実証試験を開始した。また、システムの機能で不十分な部分の改良を行った。この中で、強度変調放射線治療 (IMRT) 等で用いられる多分割コリメータ (MLC) によるビーム整形を考慮するための MLC 計算エンジンにおいて、透過・散乱成分を考慮できるよう改良を加えた。モニターユニット (MU) 値を用いて線量計算値を規格化するための機能をシステムに加えた。さらに、ユーザーインターフェイスとして使用している市販の治療計画装置としてこれまでのシステムでは XiO を対象としてきたが、その他の計画装置にも対応できるよう、データの入出力を DICOM-RT 形式で行うように改良を加えた。これらに加え、各ワーキンググループでは、以下の活動を行った。

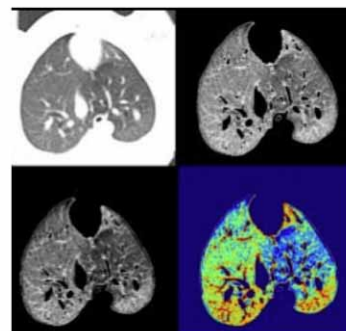
光子・電子モンテカルロ計算高速化研究 WG では、システムの実用化へ向けて、治療計画装置に搭載されたモデルベース計算アルゴリズムと、本システムが採用するモンテカルロ吸収線量計算アルゴリズムについて、肺がんモデルおよび乳房接線照射モデル上で計算精度の比較を行った。さらに、各モデルのファントムを作成し、ガラス線量計による実測を行い、平成 19 年度に本格実施予定の精度検証、実証試験に関する検討を行った。

人体モデリング研究 WG では、人体モデル自動作成アルゴリズムにおいて人体と人体以外の物体との識別の精度を上げるため、評価関数の改良、癒着した被写体の分離方法の開発等を行った。その結果、誤識別の割合をおよそ 5 分の 1 に減らすことができ、モデル自動作成の信頼性をさらに高めることができた。

CT 集光治療装置 (CTRTRx) 応用研究 WG では、CT 型キロボルト X 線集光照射装置を実際に用いた正常ウサギ肺への照射によって、生物学的反応を確認する実験をおこない、生じた放射線肺障害の画像所見・病理学的所見を精査した。また、同時にモンテカルロシミュレーションを行い生じた生物反応と対比することにより、キロボルト X 線による肺

定位照射の物理—生物反応の対応や、CT 集光治療の実行可能性を検証した。結果として、照射野に一致して低吸収域をみとめた。この所見は、30 Gy 以上の照射群で認められ、それ未満の照射群では認められなかった。この領域は組織病理学的に高度な肺線維化であることが確認された。

組織学的変化 60Gy1回照射後



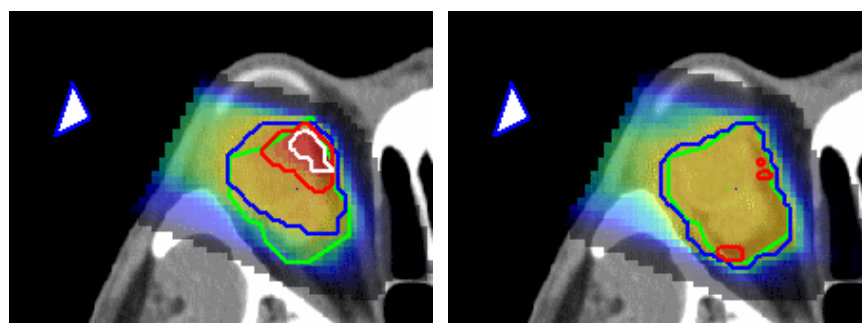
限局性気腫性変化

ウサギ肺の CT 集光照射による生体学的反応

(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

GEANT4によるモンテカルロ線量分布計算コードの高速化について、ボクセル化されたCTボリュームをより効率的に取り扱えるようコアジオメトリライブラリをカスタマイズした。さらに、TOP-C (Task Oriented Parallel C/C++) のような GEANT4 に既存の並列化では良好にスケールしないため、少数の MPI コールのみを用いるようにした。この方法では、シミュレーション実行におけるネットワークトラフィックがほとんど発生しないため、ほぼ無限にスケーラビリティが確保される。これらの結果、北大グループの23クラスターマシン上で3,000倍以上の計算速度の改善を達成し、実行時間は数日から数分に短縮することができるようになった。

モンテカルロ線量分布計算コードの応用について、レーザー駆動陽子線をスポットスキヤニング法による放射線治療に用いる際に必要とされるビーム特性を調べる解析を進めた。スポットスキヤニング法による陽子線治療においては、照射するペンシルビームのビーム径、照射方向、エネルギー幅、ドーズスポットのスキヤニング間隔（側方向、深さ方向）等が、線量分布に影響を与える。これらの影響を解析するために、モンテカルロ計算コードを中心とするシミュレーションソフトウェア群を開発してきた。X線CTデータより人体モデルを作成し、標的（病巣）位置に応じた照射粒子ビームのパラメータ（入射位置、方向、陽子のエネルギー、照射回数）を決定し、モンテカルロ計算コードを用い、得られた人体モデルとビームパラメータを入力として、標的周辺の線量分布を算出する。さらに、線量分布可視化ソフトウェアを用いて計算結果を可視化し、評価ツールを用いて標的体積との一致度等を評価する。これまでに、主として眼などの小さな腫瘍に対するパラメータサーベイを行った。図は線量分布の最適化計算を行った例で、線量分布が標的体積において平坦化されていることを示している。



眼に対する治療の線量分布の最適化例

兵庫県立粒子線医療センターでは神戸大学医学部附属病院と学術情報ネットワーク (SINET) 経由での広域ネットワーク (WAN) システムを再構築し、粒子線医療センターでは実施不可能な診断 (PETや特殊なシーケンスでとられたMRI、血管造影検査時に同時に行うCTA、CTAPなど) を画像診断専門施設 (神戸大学医学部附属病院) で行い、粒子線

医療センターにWAN経由で送り、FOCASで治療計画する時点でFusion画像として利用する方式について、有用性を検証中である。

3. 研究実施体制

(1)「光子・電子モンテカルロ計算高速化研究」グループ

①グループリーダー

齋藤 秀敏(首都大学東京 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
- ・体内吸収線量計算の高精度化と高速化に関する研究
- ・治療ビームデータ発生の高精度化と高速化に関する研究
- ・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
- ・実証試験と本システムのQC/QAに関する研究

(2)「人体モデリング研究」グループ

①グループリーダー

齋藤 公明((独)日本原子力研究開発機構 研究主席)

②研究項目

- ・人体モデリングに関する研究
- ・十分な線量計算精度を得るための人体モデルの要件の検討
- ・人体モデルの元素組成分割方法と線量精度の関係の解明
- ・人体モデル自動作成アルゴリズム及びコードの開発と人体モデリングサーバへの実装

(3)「強度変調放射線治療(IMRT)応用研究」グループ

①グループリーダー

成田 雄一郎(京都大学医学部附属病院 講師)

②研究項目

- ・IMRT 線量評価システムの開発
- ・MLC の物理特性の評価
- ・IMAGINE システムにおけるMLC 計算エンジン実装に関する研究
- ・IMAGINE システムのIMRT 線量計算への実証試験

(4)「CT集光治療装置(CTRTx) 応用研究」グループ

①グループリーダー

国枝 悦夫(慶應義塾大学医学部 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
- ・ CT 集光治療装置の線量評価手法に関する研究
- ・ IMAGINE を利用した CTRTx 線量評価システムの開発
- ・ 動物を用いた実測線量によるシステムの有効性の確認
- ・ 本システムの治療計画装置のQC/QAへの適用性検討

(5)「レーザー駆動粒子線応用」グループ

①グループリーダー

田島 俊樹((独)日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所長)

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
- ・ イオンエネルギースペクトル等ビーム特性の同定
- ・ 人体内線量分布計算のための各基本コード群の整備
- ・ ビーム品質のレーザー照射条件、ターゲット条件依存性を系統的に解析
- ・ 人体内線量分布の最適化
- ・ 深部エネルギー付与と線量分布に関する微視的物理過程の解明

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- Kunieda E , Deloar HM, Takagi S, Sato K, Kawase T, Saitoh H: Interface software for DOSXYZnrc Monte Carlo dose evaluation on a commercial RTP system. Radiation Medicine, (2007).(in printing)
- Kunieda E, Deloar HM, Kitamura M, Kawaguchi O, Shiba H, Takeda A: Rotational and translational reproducibility of newly developed Leksell frame-based relocatable fixation system. Radiation Medicine, 24(7), 503-510(2006).
- Deloar HM, Kunieda E, Kawase T, Tsunoo T, Saitoh H, Ozaki M : Investigations of different kilovoltage X-ray energy for three-dimensional converging stereotactic radiotherapy system: Monte Carlo simulations with CT data. Medical Physics, 33(12), 4635-4642(2006).
- Bulanov SV, Esirkepov TZh: Comment on “Collimated Multi-MeV Ion Beams from High-Intensity Laser Interactions with Underdense Plasma”. Phys. Rev. Lett, 98, 049503 (2007).
- Oita M, Ohmori K, Obinata K, Kinoshita R, Onimaru R, Tsuchiya K, Suzuki K, Nishioka T, Ohsaka H, Fujita K, Shimamura T, Shirato H, Miyasaka K : Uncertainty in treatment of head-and-neck tumors by use of intraoral mouthpiece and embedded fiducials. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 64(5), 1581-1588(2006).

- Sakuhara Y, Shimizu T, Kodama Y, Sawada A, Endo H, Abo D, Hasegawa T, Miyasaka K: Magnetic resonance-guided percutaneous cryoablation of uterine fibroids: early clinical experiences. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 29(4), 552-558(2006).
- Katoh N, Shirato H, Aoyama H, Onimaru R, Suzuki K, Hida K, Miyasaka K, Iwasaki Y : Hypofractionated radiotherapy boost for dose escalation as a treatment option for high-grade spinal cord astrocytic tumor. *J Neurooncol*, 78(1), 63-69(2006).
- Nishio T, Kunieda E, Shirato H, Ishikura S, Onishi H, Tateoka K, Hiraoka M, Narita Y, Ikeda M, Goka T: Dosimetric verification in participating institutions in a stereotactic body radiotherapy trial for stage I non-small cell lung cancer: Japan clinical oncology group trial (JCOG0403). *Phys Med Biol*, 51(21), 5409-5417(2006). Epub 2006 Oct 6.
- Berbeco RI, Nishioka S, Shirato H, Jiang SB: Residual motion of lung tumors in end-of-inhale respiratory gated radiotherapy based on external surrogates. *Med Phys*, 33(11), 4149-4156(2006).
- Tomozawa H, Takamasa T, Okamoto K, Tujimura N, Date H ,Nakata J: A Novel Real-Time Dosimetry Technique Based on Radiation Induced Surface Activation. *Radiation Protection Dosimetry*, **120**, 373-377(2006).
- Date H, Tomozawa H, Takamasa T, Okamoto K, Shimozuma M: Electrical conductivity of TiO₂ thin film on insulator induced by radiation exposure. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, No.1, 417-419 (2007).

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:0件(CREST 研究期間累積件数:1件)