

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 23 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540350

研究課題名(和文)多重画像の撮像が可能な陽子線ラジオグラフィの開発研究

研究課題名(英文)Study on Multiplex Imaging in Proton radiography

研究代表者

阿蘇 司 (Aso, Tsukasa)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：30290737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円、(間接経費) 660,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー物理実験の手法を用いて、医療と新たな分野への応用を目指し、陽子線治療用加速器を用いた新しいラジオグラフィ手法の開発を検討した。シミュレーションを利用して、実現性、性能、最適化についての評価と検討を行った。

陽子線治療装置の構成を活かすため、飛程変調器を用いて簡易なシステムで陽子線画像を得ることを提案し、シミュレーションを用いてその実現可能性を評価した。また、被曝線量や画像の比較による最適化について検討を行った。本研究により、比較的簡易なシステムにより陽子線画像が取得可能であることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We studied about the multiplex proton radiography using a proton accelerator in a proton therapy facility. The study has been performed by using the Monte Carlo simulation based on Geant4 simulation toolkit and the analysis techniques in the High Energy Physics research. The proposed proton imaging system was investigated in terms of possibility, performance, and optimizations.

For the purpose of realizing a simple proton radiography, we utilized the range modulator to vary proton beam energy to emphasize the energy losses of different materials. We evaluated our proposed system in the image quality and the radiation dose in the target. The result shows that our system can obtain proton images with simpler and cheaper equipments than other proton imaging systems.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：放射線画像 シミュレーション Geant4 粒子線治療 陽子線治療

1. 研究開始当初の背景

(1) 放射線画像の進展状況

これまでのラジオグラフィは、レントゲン、コンピュータ・トモグラフィ(X線CT)、非破壊検査などX線や γ 線を用いた手法が主流である。陽子線と物質との相互作用は、X線とは異なり、低被曝で鮮明な画像が得られることが理論的に示されている。しかし、陽子線加速器は、一部の公的研究機関等にしかなく、陽子線画像への応用研究は、X線に比べてほとんど進んでいない。

(2) 陽子線治療装置の普及状況

近年の放射線医療の普及により、X線治療とともに陽子線治療が可能な病院が増えている。国立研究機関のみならず、県立病院や市立病院などの公的機関や私立病院も陽子線治療施設の建設と運営に進出している。これらの治療用陽子線装置を治療のみでなく診断や治療精度向上等の広い用途に活用する研究は、新たな医療産業や工業技術を創出する発展性があり、かつ地域貢献に結びつく取り組みである。

(3) これまでの陽子線画像研究状況

医療分野における陽子線を用いた断層画像(陽子線CT)の技術研究が、1983年に世界に先駆けて筑波大学グループにより高エネルギー加速器研究機構の陽子線加速器を用いて行われた。しかし、当時の手法では鮮明な画像を得るに至っていない。現在でも、陽子線CTの開発研究は行われており、検出器の性能向上による再生画像の改善が報告されているが、解決すべき課題も多く実用化には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、陽子線CTを実現する上でも投影画像の鮮明さが重要であること、そして、より実現性が高い研究課題として、陽子線ラジオグラフィ(陽子線画像)の取得方法と有効性について研究することを目的とする。

(1) 評価用シミュレーション構築と検証

陽子線治療施設は、通常の治療を実施しており、実験を行うには制約が多いため、本研究では陽子線治療装置をシミュレーションで構築して活用して効率的に研究を進める。研究結果を評価するにあたり、シミュレーションの信頼性の確認が不可欠であるため、シミュレーション結果の検証を並行して行う。また、計算精度を確保しつつ計算時間を短縮するための方法を検討する。

(2) 簡易な検出システムの検討

陽子線画像の取得は、陽子線の対象物内のエネルギー損失量を測定することによって行われる。そのため、通常は陽子線が停止する飛程よりも長い検出器が必要となり装置が大型化してしまう。本研究では、システ

ムの簡易化を目指して、薄型の検出器で画像を得る手法について検討を行う。

(3) 多重化した画像収集方法の検討

陽子線と物質の相互作用の特徴を活かして、多様な画像を得る方法について検討を行う。特に、次の二つの課題についての検討を行う。

①薄型の検出器を用いることで画像化が困難となる課題を解決する。

②エネルギー損失以外での画像化が可能であるかを検討する。

3. 研究の方法

(1) 評価用シミュレーション構築と検証方法

陽子線治療施設の陽子線治療装置を再現したシミュレーションを構築するため、これまで開発を行ってきた粒子線治療シミュレータ(PTSIM)を用いた。PTSIMは、Geant4シミュレーション・ツールキットを利用して、電磁相互作用とハドロン相互作用を含む物理相互作用を精密に計算することができる。本研究では、陽子線治療装置によって与えられる患者データ内の線量分布を検証することにより、その信頼性の確認を行った。これらは、国立がん研究センター東病院、福井県立病院陽子線治療センター、兵庫県立粒子線医療センターの協力により実施した。また、線量分布の比較を行うために、病院情報システムとのインターフェイス開発を行った。

計算時間を短縮するために、大規模計算機グリッド環境における分散並列処理を行うシステムを、高エネルギー加速器研究機構の研究支援者の協力の元で開発し、並列数と計算時間の短縮との関係性を評価した。

その他にも、シミュレーションを繰り返し実施する場合の計算時間の短縮を目指して、粒子の種別や運動量を記録したファイルを作成し、2回目以降は記録された粒子情報を元に、対象物の領域のみのシミュレーションを実施する方法を評価した。

(2) 簡易な検出システムの検討方法

陽子線画像で用いられる従来の計測システムの簡易化を目指して、薄型の検出器での陽子線画像の取得を、シミュレーションを用いて検討した。

シミュレーションでは、撮像対象物として、水で満たされたファントム内に、人体組織の組成に従った物質を直径4cmの円柱型として配置した。検出器として水等価1cmの2次元検出器を配置して、陽子線の入射位置と検出器内でのエネルギー付与量が理想的に計測できるものと仮定した。陽子線のエネルギーは250MeVとし、撮像対象物の上流44cmから一様に撮像対象物に向けて平行な運動量を与えて照射した。照射数は、陽子線の個数が、 1mm^2 当たり111個程度を設定した。

陽子線が薄型検出器を通り抜けることによって与える信号量は、ブラッグ・カーブ特

性によって与えられ、高いエネルギーでは物質の違いによる差異は非常に小さくなり、対象物の構造や物質の違いを識別することが困難となる。そこで、本研究では飛程変調器を用いて、単一エネルギーの陽子線にエネルギー変調を与えて構造の違いが識別できるかを検討した。

更に、飛程変調器を撮像対象物の上流に配置した場合と下流に配置した場合とで、画像と対象物の被曝線量を比較した。

(3) 多重化した画像収集方法の検討方法

薄型検出器では、陽子線の入射位置と検出器内でのエネルギー付与量が得られると仮定して、次の2つの画像化を試みた。

①薄型検出器では、エネルギー付与量が小さく、対象物の構造を識別することが難しくなるため、飛程編変調器の厚さを変化させ、各厚さでの画像を取得する多重化法を採用した。このとき、画像のコントラストは、陽子線が薄型検出器に与えるエネルギー付与量の違いにより表される。

②エネルギー損失量以外の画像化として、物質による多重散乱の違いを利用した画像化を試みた。このとき、画像のコントラストは、撮像対象物に入射前の陽子線の位置が既知であると仮定して、入射前の位置と通過後の位置の差から、画像平面上での距離を計算して累積した。

4. 研究成果

(1) 評価用シミュレーション構築の成果

シミュレーションの信頼性確保のために、陽子線治療施設での線量分布の比較検証を行った。シミュレーション結果は測定値に2%程度の差異内で一致していることが確認された。

計算機グリッドによる分散並列処理の評価のために、高エネルギー加速器研究機構の共通計算機環境で最大 1000 タスクまで並列化を実施した。そして、並列数に対応してシミュレーション時間が短縮できることを確認した。また、粒子情報を保存したデータを用いてシミュレーションを繰り返す場合には、更に約 60~30%の計算時間まで短縮できることが確認できた。

(2) 薄型検出器での多重化画像の成果

①エネルギー損失量の画像化

図1は、水等価1cm厚の検出器での撮像をシミュレーションにより得た画像である。左図および右図は、水等価厚230mm相当の飛程検出器をそれぞれ撮像対象物の上流または下流に配置した場合である。画像の鮮明度は明らかに下流に配置した場合の方が良好であることがわかる。撮像対象物の被曝線量値は、飛程変調器を上流に配置した撮影方法では、飛程変調器を置かない場合に比較して最大で2.3倍の箇所があることがわかった。

図2は、撮像対象物の下流に飛程変調器を

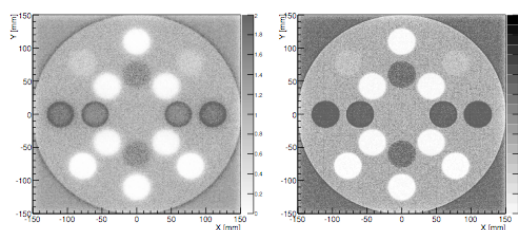


図1 飛程変調器の配置による画像の違い

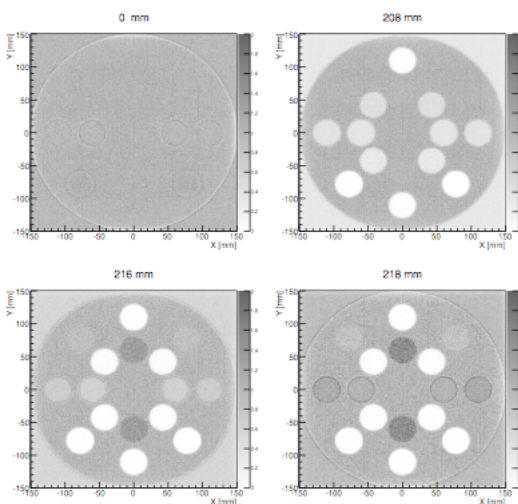


図2 飛程変調器の厚さによる画像の違い

配置して、その厚さを変えて撮像したときのシミュレーション結果である。この画像より、飛程変調器の厚さを変えることによって、撮像対象物の構造が可視化できることがわかった。

更に薄い検出器として水等価厚1mmでのシミュレーションも行ったが、エネルギー付与の揺らぎによって画像の劣化が著しくなることがわかっている。画像の劣化は、陽子線照射数を増やすことによって改善できるが、被曝線量との関係性を考慮する必要がある。

②多重散乱による位置差異の画像化

多重散乱による位置の差異の画像化では、画像の鮮明化のために1mm²当たり1111個の陽子線を照射したシミュレーションを行った。図3はその結果である。骨および肺などの水に対する密度差が大きい構造体については可視化することができた。

多重散乱を用いる画像取得方法は、飛程変調器も原理的に不要であり、高精度の2次元位置検出器を用いて簡易に画像を得ることができるとわかった。

本研究により、比較的簡易な検出器の組み合わせにより、陽子線画像が得られることを、シミュレーションを用いて実証した。

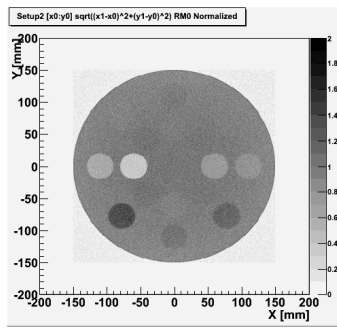


図3 多重散乱の可視化画像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① G. Iwai, W. Takase, T. Aso, Y. Watase, T. Sasaki, T. Akagi, T. Yamashita, Y. Maeda and T. Nishio, Common platform of Monte Carlo dose calculation on universal grid interface with Geant4 based particle therapy simulation framework, IOP Publishing, 査読有, Journal of Physics Conference Series 489 2014, 012001 DOI:10.1088/1742-6596/489/1/012001
- ② T. Akagi, T. Aso, G. Iwai, A. Kimura, S. Kameoka, S. B. Lee, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, S. Park, T. Sasaki, T. Toshito, W. Takase, T. Yamashita and Y. Watase, Geant4-based particle therapy simulation framework for verification of dose distributions in proton therapy facilities, Progress in Nuclear Science and Technology, 査読有, 2014 Accepted for publication,
- ③ T. Aso, Y. Maeda, G. Iwai, W. Takase, T. Sasaki, Y. Watase, T. Yamashita, T. Akagi and Y. Nakano, Extension of the Particle Therapy Simulation Framework to Hospital Information Systems and Multi-grid Environments, IEEE International Conference on Computing and Engineering, 査読有, IEEE Computer Society (2012) pp. 229-234. DOI 10.1109/ICCSE.2012.39
- ④ T. Yamashita, T. Akagi, T. Aso, A. Kimura and T. Sasaki, Effect of inhomogeneity in patient's body on the accuracy of pencil beam algorithm in comparison to Monte Carlo, Phys. 査読有, Med. Biol. 57 (2012) pp. 7673-7688. doi:10.1088/0031-9155/57/22/7673
- ⑤ T. Akagi, T. Aso, B. Faddegon, A. Kimura, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, H. Paganetti, J. Perl, T. Sasaki, D. Sawkey, J. Shumann, J. Shin, T. Toshito, T. Yamashita and H. Yoshida, The PTSim and TOPAS Projects,

Bringing Geant4 to the Particle Therapy Clinic, 査読有, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.912-917 (2011)

<http://www.aesj.or.jp/publication/pnst02/data/912-917.pdf>

[学会発表] (計13件)

- ① T. Aso, W. Takase, G. Iwai, T. Sasaki, Y. Watase, Y. Maeda, T. Yamashita, T. Akagi, H. Shuuichi, T. Nishio, S. Y. Cai, T. C. Chao, E. Yen, T. H. Wu, Y. T. Lin, Performance evaluation of Geant4 Based Particle Therapy System Simulation Framework, International Symposium on Grids & Clouds 2014, Mar. 24-28, (2014) Academia Sinica, Taipei, Taiwan.
- ② T. Aso, T. Akagi, G. Iwai, A. Kimura, Y. Maeda, N. Mastufuji, T. Nishio, C. Omachi, T. Sasaki, W. Takase, T. Toshito, T. Yamashita, Y. Watase, Recent Updates and Plan in Geant4 Based Particle Therapy System Simulation Framework, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference Record HT3-8, Oct. 27-Nov. 2 (2013), COEX, South Korea
- ③ S. Oyama, T. Aso, M. Shimaoka, K. Amako, H. Yoshida, T. Sasaki, Command-Based Interface of Importance Biasing Technique Using Geant4 for Shielding Applications, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference Record NP02-130, Oct. 27-Nov. 2 (2013), COEX, South Korea
- ④ G. Iwai, W. Takase, T. Aso, Y. Watase, T. Sasaki, T. Akagi, T. Yamashita, Y. Maeda, T. Nishio, Common platform of Monte Carlo dose calculation on universal grid interface with Geant4 based particle therapy simulation framework, International conference on the use of computers in radiation therapy (ICCR2013). May. 6-9 (2013). Melbourne Convention and Exhibition Centre, Australia
- ⑤ T. Aso, G. Iwai, T. Wataru, T. Sasaki, Y. Watase, Y. Maeda, T. Yamashita, T. Akagi, T. Nishio, Geant4 based particle therapy system simulation framework with universal grid interface. International Symposium on Grid and Clouds 2013 (ISGC2013), Feb. 19-22, (2013), Academia Sinica, Taipei
- ⑥ T. Aso, Y. Maeda, G. Iwai, W. Takase, T. Sasaki, Y. Watase, T. Yamashita, T. Akagi and Y. Nakano, Extension of the Particle Therapy Simulation Framework to Hospital Information Systems and Multi-grid Environments, IEEE International Conference on Computing and Engineering, IEEE Computer Society, Dec. 5-7, (2012),

Paphos Cyprus

⑦ T. Aso, K. Kawashima, T. Nishio, S. B. Lee and T. Sasaki, A Study on Multiplex Proton Imaging Using GEANT4, IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Conference Record N28-3, Oct. 29-Nov. 3 (2012), Anaheim USA

⑧ T. Akagi, T. Yamashita, T. Aso, A. Kimura, S. Kameoka, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, T. Sasaki, T. Toshito. Status of Quality Assurance using Particle Therapy Simulation Framework in Particle Therapy Facility in Japan, Particle Therapy Workshop in IEEE NSS/MIC Conference, HT-4-4, Oct. 28 (2012), Anaheim USA

⑨ T. Akagi, T. Aso, G. Iwai, A. Kimura, S. Kameoka, S. B. Lee, Y. Maeda, N. Matsufuji, T. Nishio, C. Omachi, S. Park, T. Sasaki, T. Toshito, W. Takase, T. Yamashita and Y. Watase, A GEANT4 BASED PARTICLE THERAPY SIMULATION FRAMEWORK FOR VERIFICATION OF DOSE DISTRIBUTIONS IN PROTON THERAPY FACILITY, 12th International Conference on Radiation Shielding, Computational Medical Physics Working Group, Sep. 2, 2012. Nara Prefectural New Public Hall, Nara

⑩ T. Aso, R. Noto, W. Takase, Y. Watase, G. Iwai and T. Sasaki, Application of Particle Therapy Simulation on GRID Environments, International Symposium on Grids & Clouds 2012, Taipei, 2012. Feb. 26-Mar. 2, p. 222-223. DOI10.1109/Grid.2011.38

⑪ T. Aso, A. Kimura, T. Sasaki, Extensions of DICOM Data interface in Particle Therapy Simulation Framework, 6th Japan-Korea Joint Meeting on Medical Physics/11th Asia-Oceania Congress of Medical Physics, Sept. 29-Oct. 1, 2011, P-1, Kyusyu Univ.

⑫ T. Aso, R. Noto, G. Iwai, T. Sasaki, Particle Therapy Simulation Framework on GRID Environments, 12th IEEE/ACM International Conference on Grid Computing, Sept 22-23, 2011, (France) Lyon Conference Center.

⑬ T. Aso, A. Kumura, T. Yamashita, T. Akagi, S. Kameoka, T. Nishio, K. Murakami, C. Omachi, T. Sasaki, K. Amako, H. Yoshida, H. Kurashige, A GEANT4 Based Particle Therapy Simulation Framework, Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG 50), 2011, May 8-14, Philadelphia, USA

[図書] (計 0 件)
該当なし

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)
該当なし

○取得状況 (計 0 件)
該当なし

[その他]
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿蘇 司 (ASO, Tsukasa)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：30290773

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

佐々木 節 (SASAKI Takashi)
高エネルギー加速器研究機構
計算科学センター・教授
研究者番号：50259983

西尾 禎治 (NISHIO Teiji)
国立がん研究センター
東病院臨床開発センター・室長
研究者番号：40415526

高田 英治 (TAKADA Eiji)
富山高等専門学校・専攻科・教授
研究者番号：00270885