

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K15617

研究課題名（和文）MRI-Linac用NonLinearCCC線量計算アルゴリズムの開発

研究課題名（英文）Development Collapsed Cone Convolution Dose Calculation Engine for MRI-Linac

研究代表者

伊藤 謙吾（Ito, Kengo）

東北大学・大学病院・助手

研究者番号：40705076

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、本邦でも新たに臨床導入された放射線治療装置MRI-Linac（MRL）用の高速線量計算アルゴリズムの開発を行った。放射線治療では、患者体内で放射線が落としたエネルギーの分布である線量分布を用いて治療効果が評価される。MRLでは、磁場中の患者を治療するため、線量分布に磁場の影響を組み込む必要がある。現在使用されている方法では高精度に線量分布を導出できる一方で長い計算時間が必要とされる。本研究では従来法に新たな補正を組み込むことでMRLに対応したアルゴリズム開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したアルゴリズムは、高速に線量分布を導出することができる点で特徴的である。現在世界中で使用されているアルゴリズムは、GPUを用いた超並列計算を用いることで临床上許容される時間内で線量分布を取得している。本研究で開発したアルゴリズムもGPUを使用することでさらなる高速化も可能となっており、精度評価が完遂すれば臨床応用も可能であると考えられる。短時間に線量分布を取得できることで患者待機時間は短縮され、装置のスループットも向上する。同じ時間内で従来よりも多くの患者がMRI-Linacで治療されることになる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a fast dose calculation algorithm for MRI-Linac (MRL) which was newly introduced clinical use in Japan. In radiotherapy, the response to treatments are evaluated using dose distributions, which are the distributions of energy depositions by the radiation in the patient body. Since the MRL treats the patient in the magnetic field, the dose distributions need to be incorporated the effect of the magnetic field. Currently used algorithms can derive dose distributions with high accuracy, however, it require long computation times. In this study, we developed an algorithm for MRL by incorporating a new correction into the conventional method, Collapsed Cone Convolution methods.

研究分野：放射線治療

キーワード：MRI-Linac 高速線量計算 CCC法 磁場 モンテカルロ法 コンボリューション法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁気共鳴断層撮影装置の MRI と放射線治療装置である Linac が融合し、1つのシステムとなった MRI-Linac (MRL) が開発され、本邦においても臨床利用されるようになった。MRL と従来の Linac を用いた放射線治療の違いとして以下 3 点をあげることができる。追加被ばく無しに MR 画像を用いた患者、腫瘍の位置合わせが可能、治療直前の患者の状態に合わせた放射線治療の提供 (Online-Adaptive Radiation Therapy; Online-ART)、磁場からの影響により放射線が被写体に落とすエネルギー分布 (線量分布) へ歪みが発生。本研究では、この線量分布への影響に着目した。放射線治療では、主に荷電粒子が被写体にエネルギーを落とすことで腫瘍細胞へダメージを与える。この荷電粒子は、磁場中ではローレンツ力を受けてカーブを描きながら輸送されるため、従来の Linac では見られなかったような左右へ歪んだ線量分布が MRL 中では生じる。この現象を再現するために使用されるのがモンテカルロシミュレーション法 (MC 法) である。MC 法は、放射線の発生、物質との相互作用、輸送といった事象を乱数を用いて解く方法である。高精度にシミュレーションが可能であるという利点の他、粒子 1 つ 1 つについて計算するため、一般に長い計算時間を要するという欠点がある。マルチコア CPU や Graphical Processing Unit (GPU) を用いた並列計算を使用することで計算時間の短縮が図られているものの、解析的手法を用いたアルゴリズムと比較すると計算時間が延長してしまう。計算時間の延長は、Online-ART 中の患者待機時間や装置のスループットにも影響する。また、超高速線量計算アルゴリズムが開発されれば、患者への投与線量分布を治療と同時にリアルタイムに監視することも可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、MRL に対応した線量計算アルゴリズム Collapsed Cone Convolution 法 (CCC 法) を開発することを目的とする。CCC 法は、MC 法で予め取得した任意媒質中の線量分布の点拡がり関数 (Energy Deposition Kernel; EDK) を用いて被写体中の線量分布を算出する。また、EDK を離散化し計算量を減らすことで高速に線量分布を取得することができるアルゴリズムである。磁場中における EDK を取得し、CCC 法への応用の可能性を評価する。

3. 研究の方法

線量分布は、最も高精度に導出することのできる MC 法が基準となる。はじめに、本研究で使用する汎用モンテカルロコード Electron Gamma Shower version 5 (EGS5) の磁場中の粒子の輸送精度をファノ空洞試験を用いて評価した。ファノ空洞試験には、グラフィットで構成される 3 層構造の円柱ファントムを使用した。1, 3 層目には $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、2 層目 (Gap) には $0.0017\text{g}/\text{cm}^3$ のグラフィットを設置し、円柱の中心軸上から密度に比例した個数の電子を等方性に放出させた。2 層目の吸収線量を理論値と比較することでシミュレーション精度を評価した。今回は、円柱軸に対して垂直方向に 0.35T と 1.5T 磁場を加え、電子の初期運動エネルギーを 0.01, 0.1, 1, 10MeV とした。また、Gap の幅を 0.2, 2cm としたときの輸送精度を評価した。輸送精度を左右するパラメータとして、荷電粒子の最大輸送長 (mxustep) と多重散乱時のエネルギー損失割合の上下限を設定する EFRACH, EFRACL をそれぞれ 0.02 ~ 0.25 にし、磁場中のシミュレーションに最適なパラメータを探索した。ファノ空洞試験に使用したシミュレーションジオメトリーを図 1 に示す。連続減速近似飛行 (CSDA) の値は、NIST の ESTAR データベースの値を用いた。

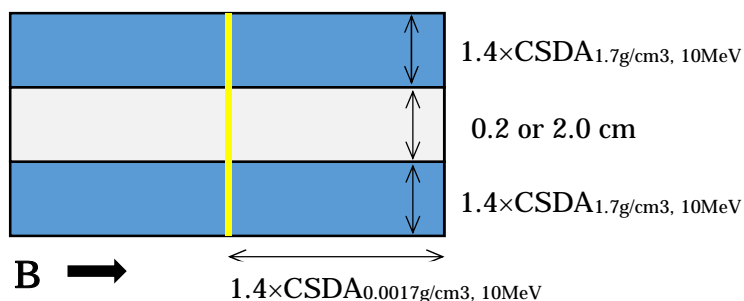


図 1 ファノ空洞試験のシミュレーションジオメトリー。中心の黄色い領域から密度に比例した個数の電子を等方性に放出させ、2 層目 (Gap) の吸収線量を取得し、理論値と比較した。

次に、ファノ空洞試験で明らかにした計算パラメータを用いて磁場中における EDK を取得した。水で構成された半径 60cm の球体の中心で光子を相互作用させたときの点拡がり線量分布を

離散化することで EDK を取得した。磁場が存在しない場合、左右対称な点拡がり線量分布となるため球体中の 3 次元の線量分布を 2 次元に落とし込むことで EDK を取得することができる。しかし、磁場中では先に示したようにローレンツ力によって荷電粒子がカーブを描くため左右非対称な点拡がり線量分布が生じ、従来の 2 次元 EDK を用いてこれを再現することは困難となる。そこで、本研究では点拡がり線量分布を 6 度間隔で離散化することで 3 次元の EDK を取得した。また、光子のエネルギー、磁場の強さと向きによって荷電粒子がどのように振る舞うのかを Primary Charged Particle の輸送方向を深さ方向 (\bar{z})、放射方向 (\bar{r})、垂直方向 (\bar{y}) に分類し、定量化した。また、EDK の磁場中における歪み度合 (\bar{z}/\bar{y}) も評価した。光子のエネルギーは、0.5~7MeV とし、磁場強度は 1.5T、磁場の向きは光子と垂直方向とした。

最後に、作成した EDK を用いて CCC 法による水中の線量分布導出を試みた。CCC 法は、1 次光子の強度分布である Total energy released by primary photon interactions per unit mass (TERMA) と EDK のコンボリューションによって線量分布を算出する。光子は、磁場の影響を受けないことから従来通りの方法を用いて TERMA を取得することができる。線量計算において重要となるのが不均質補正であり、密度や媒質の違いによるエネルギー沈着の変化を補正する。MC 法を用いたこれまでの報告から、密度の変化の大きな境界面において粒子の挙動が大きく変化し、Hot/Cold spot が生じることが明らかとなっている。従来の放射線等価長を基にエネルギー沈着を補正する不均質補正では、現状では Hot/Cold spot を再現することが不可能である。したがって、今回は均一な水中における線量分布の取得を試みた。図 2 に線量計算に使用したデジタルファントム画像を示す。CCC 法を用いて取得した線量分布を MC 法で取得した線量分布と比較することで MRL 用 CCC 法の可能性を評価した。

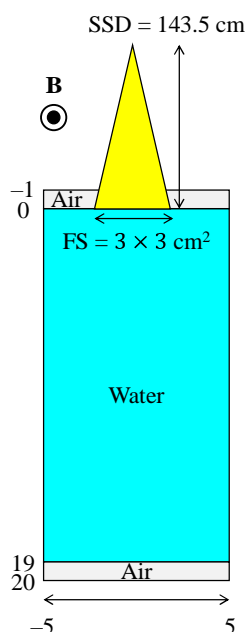


図 2 線量分布の取得に使用したシミュレーションジオメトリー。水で構成される均一ファントムを作成し、Source-to-Surface Distance (SSD) を 143.5cm、ファントム表面で照射野サイズ (FS) が $3 \times 3 \text{cm}^2$ となるように設定した。

4. 研究成果

1.5T 磁場のファノ空洞試験の結果を図 3 に示す。mxustep と EFRACH/EFRACL に依存して計算精度が変化した。mxustep を 0.001cm に設定することで理論値と誤差 0.2%以内でシミュレーションできることが判明した。また、mxustep を 0.01cm とすると 0.1MeV 以下では誤差 0.2%でシミュレーションできるものの、エネルギーが 1MeV 以上となると 1.0%近い誤差を示した。ファノ空洞試験の結果から mxustep : 0.001cm, EFRACH/EFRACL : 0.02 と設定することで精度の担保された MC シミュレーションを実施できることが判明した。この設定値を用いて以降の MC シミュレーションを実施した。また、磁場強度 0.35T の結果は示していないが、パラメータの精度への影響は小さく、設定値によらず誤差 0.2%以内でシミュレーションできることが判明した。

EGS5 を用いて取得した磁場中の EDK の 1 例を図 4 に示す。Primary Photon の相互作用点から半径 5cm の領域の EDK を示している。また、Primary Charged Particle の輸送方向を解析した結果を図 5 に示す。1.5T 磁場の存在によって Primary Charged Particle の輸送方向が変化していることがわかる。また、1.5T 磁場の存在下ではエネルギーによらず Primary Charged Particle は横方向へ輸送されていることが z/y のグラフから判明した。

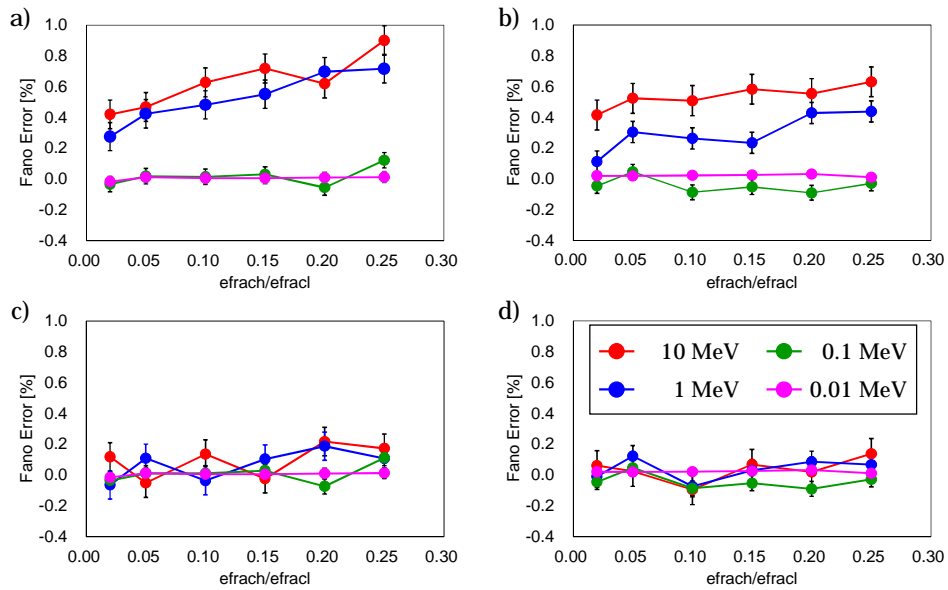


図3 1.5T 磁場のファノ空洞試験の結果．縦軸は，計算値と理論値の差 [%]，横軸は，EFRACH/EFRACL の値を表す．a) Gap 幅：0.2cm，mxustep：0.01cm，b) Gap 幅：2cm，mxustep：0.01cm，c) Gap 幅：0.2cm，mxustep：0.001cm，d) Gap 幅：2cm，mxustep：0.001cmの結果をそれぞれ示す．

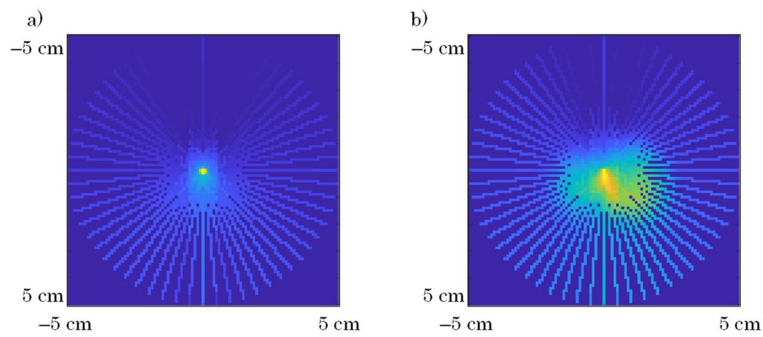


図4 1.5T 磁場中の EDK の 1 例．Primary Photon Energy 0.5 MeV の EDK を a)，7.0 MeV の EDK を b) にそれぞれ示す．

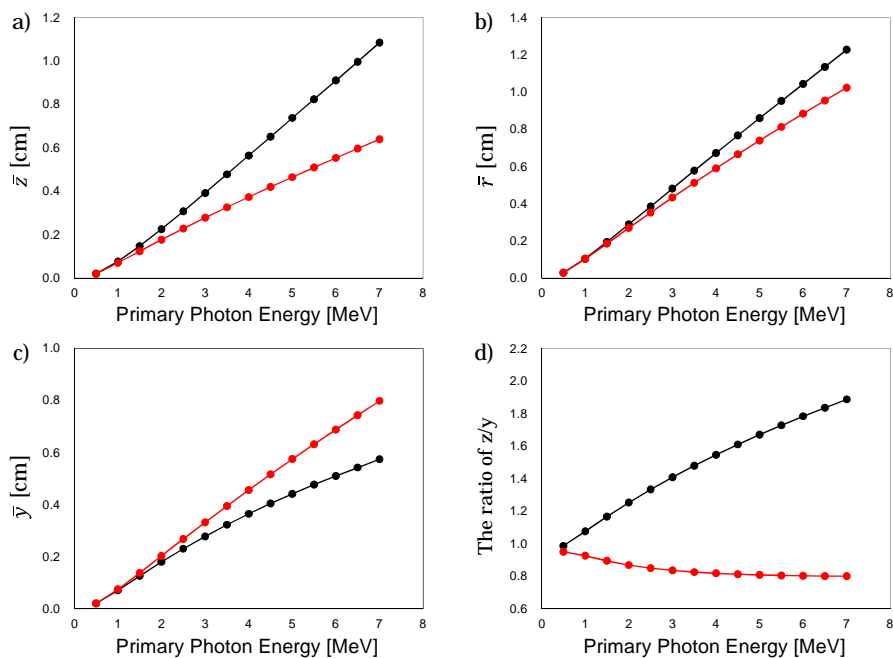


図5 Primary Charged Particle の輸送方向を a) 深さ方向 (\bar{z})，b)放射方向 (\bar{r})，c) 垂直方向 (\bar{y}) ごとに評価した結果．d) \bar{z}/\bar{y} は EDK の左右への歪み度合を表す．赤が 1.5T 磁場中にお

ける値，黒が磁場無しの結果となる．

1.5T 磁場中における 4MeV の EDK を用いて算出した CCC 法の線量分布を図 6a に示す．また，中心軸上，および深さ 9cm における線量プロファイルを経験的 EGS5 の結果と比較したものを図 6b, c に示す．中心軸上における線量値は EGS5 とよく一致していた．また，横方向における線量プロファイルでは，左右への歪みが観測され磁場中における線量分布の変化が再現されていた．

今後は，密度の境界面で発生する線量の Hot/Cold spot を再現できる不均質補正を提案し，CCC 法に組み込んでいく予定である．CCC 法は，マルチコア CPU や GPU を用いた並列計算へも対応できる．今回取得した 3 次元 EDK を用いた CCC 法が臨床へ実装されるようになれば今後 MRL の独立検証や real-time dosimetry といった領域にも貢献できるものと考えられる．

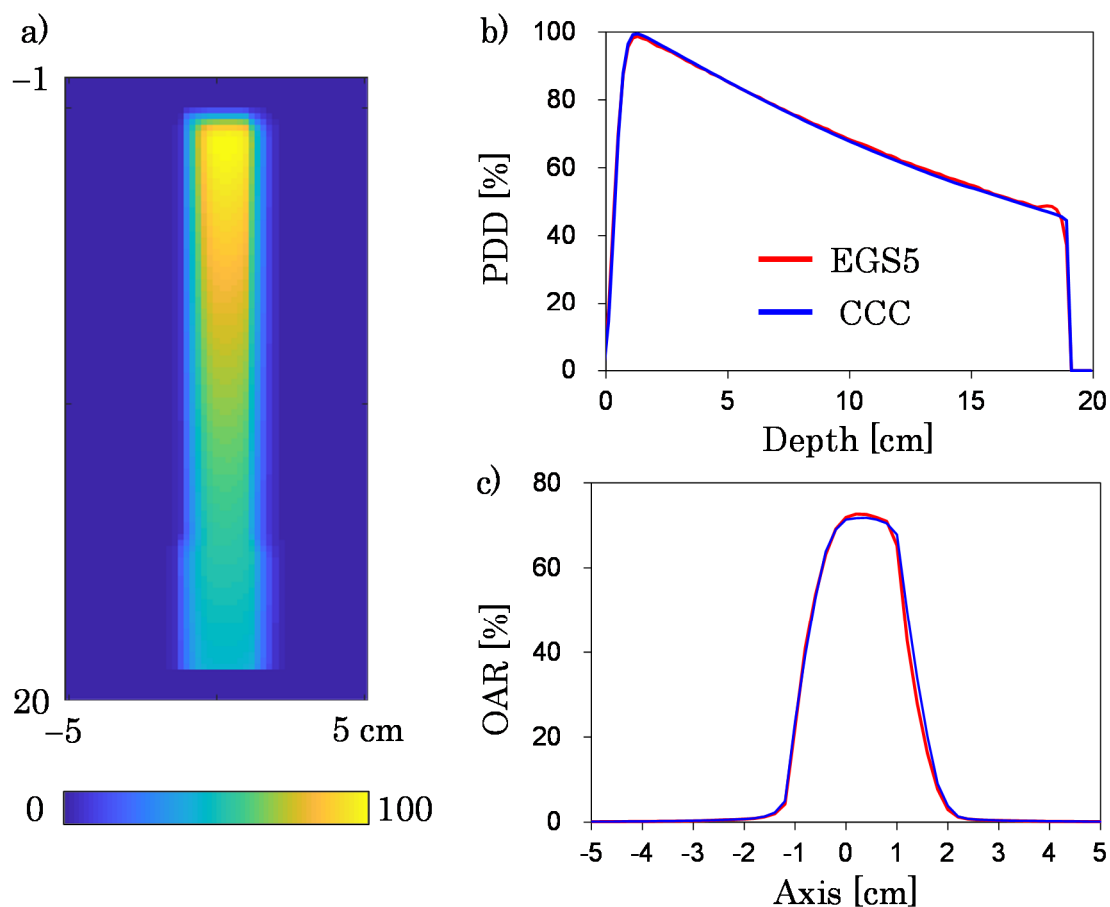


図 6 CCC 法にて取得した水中の線量分布と線量プロファイルの MC 法との比較．a) 取得した磁場中における 3 次元 EDK を用いた線量分布．b) 中心軸上の線量プロファイル (PDD) の EGS5 と CCC 法の比較．c) 深さ 9cm における横方向のプロファイル (OAR) の EGS5 と CCC 法の比較．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ito Kengo, Kadoya Noriyuki, Katsuta Yoshiyuki, Tanaka Shohei, Dobashi Suguru, Takeda Ken, Jingu Keiichi	4. 巻 93
2. 論文標題 Evaluation of the electron transport algorithm in magnetic field in EGS5 Monte Carlo code	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physica Medica	6. 最初と最後の頁 46 ~ 51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ejmp.2021.12.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤謙吾
2. 発表標題 MRI-Linac用CCC-based線量計算アルゴリズムの有効性
3. 学会等名 日本放射線腫瘍学会第32回学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------