

令和 4 年 5 月 12 日現在

機関番号：13101
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：19K08168
研究課題名（和文）粒子線がん治療計画のためのデュアルエネルギーを用いたCT値 - 阻止能比変換法の開発

研究課題名（英文）A simple derivation of stopping power ratio in the human body from dual-energy CT data

研究代表者
齋藤 正敏（Saito, Masatoshi）
新潟大学・医歯学系・教授

研究者番号：40241583
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、粒子線がん治療計画における線量計算の高精度化を可能とするデュアルエネルギーを用いた新しい『CT値 - 阻止能比変換』の開発である。研究期間内において、デュアルエネルギーCT装置を用いた撮影を通して本手法の基本原則の妥当性を調べるとともに、本手法に適した画像ノイズ低減法を検証した。その結果、本手法により1%以下の精度で阻止能比を決定できることが明らかとなった。ただし、得られた阻止能比画像のノイズはCT画像と比較して2倍以上の増加が見込まれるが、エッジ保存ノイズ低減法を適用することにより、被写体内の微細構造の描写能を損なうことなく、画像ノイズを1/3以下に低減できることが判明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
デュアルエネルギーCT（2種類のX線管電圧）を使い、その“電子密度画像とCT画像の重み付きの引き算”という極めてシンプルな演算処理により「阻止能比」を計算でき得ることを世界に先駆けて見出した。本手法の最大のメリットはその「シンプルさ」にある。つまり、デュアルエネルギーCT装置を有する施設であれば、本手法を容易に実行可能となる。したがって、デュアルエネルギーCT装置が世界の医療施設に導入されつつある現状から、本手法が短期間で広く波及する可能性は十分高いと予想される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to present a simple method for deriving the stopping power ratio (SPR) from dual-energy (DE) CT data via electron density and effective atomic number calibration. It is found that the DECT-SPR conversion with excellent SPR agreement can be achieved at the cost of increased image noise due to the subtraction process of the method. Guided filtering effectively reduced the image noise to a third of the original value or less without significant loss of subtle structures in the SPR images.

研究分野：医学物理学・放射線技術学

キーワード：dual-energy CT stopping power ratio

1. 研究開始当初の背景

粒子線（陽子や重イオン）を利用するがん治療は、従来の光子線（X線）治療よりもがん病巣に線量を集中して照射し、周りの正常細胞へのダメージを最小限に抑えることのできる治療法として注目を集めている。この粒子線治療のメリットを最大限に活かすためには、粒子線の停止位置“飛程”を決定付ける体内の「阻止能比」情報を正確に取得しなければならない。通常、阻止能比が既知の校正用ファントムを CT 装置（1種類の X 線管電圧＝シングルエネルギー CT）で撮影し、実測した CT 値と阻止能比の関係『CT 値－阻止能比変換』に基づいて、被写体（患者）内の線量分布が計算される（図 1 上部）。しかし、従来の CT 撮影で得られる「CT 値」は“X 線と物質の相互作用係数”であって、“荷電粒子と物質の相互作用係数”である「阻止能比」との間に比例関係は成立せず、また 1 対 1 にも対応しない。さらに、被写体サイズの違いによって生じる「ビームハードニング効果」に起因した CT 値から阻止能比への変換誤差は、より高精度の飛程計算を要するリスク臓器近傍のがん治療を計画する上での懸案事項であった。このような状況から、より正確かつ簡便な『CT 値－阻止能比変換』の開発が求められていた。本申請者はこれまで“光子線治療計画”のためのデュアルエネルギーCTを用いた新しい『CT 値－電子密度変換』を開発・研究を進めてきた [Med. Phys., 39, 2021 (2012)]。その手法の測定精度は、今日臨床で使われている解析アルゴリズムより高いことが、欧州の研究グループによって報告されている [Med. Phys., 44, 171 (2017)]。本研究で対象とする“粒子線治療計画”における必須入力データ“阻止能比”が“電子密度”に大きく依存することから、「デュアルエネルギーCT 値から電子密度への変換」を「阻止能比への変換」に比較的容易に応用・展開できると考え、本研究の着想に至った。

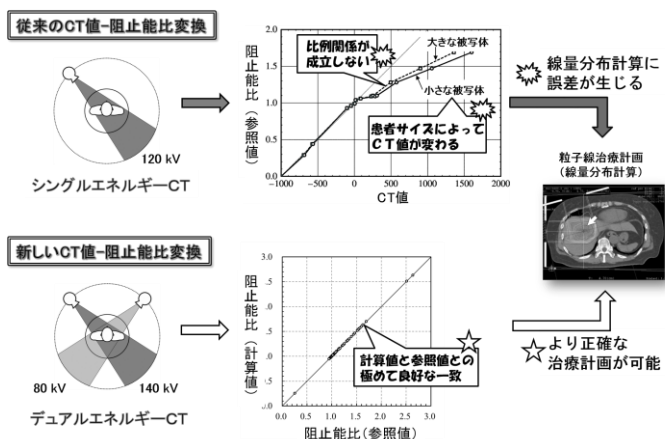


図 1 「デュアルエネルギーを用いた『CT 値－阻止能比変換法』のメリット

2. 研究の目的

本研究の目的は、がんの粒子線治療におけるリスク臓器の被曝低減のために、より正確な阻止能比（粒子の飛程）計算を実現可能とする、デュアルエネルギーを用いた CT 値－阻止能比変換（以下、『デュアルエネルギーCT 値－阻止能比変換』）の開発である。本目的達成のため研究期間内に、臨床用デュアルエネルギーCT 装置を用いた撮影実験を通して本手法の阻止能比（粒子の体内飛程）の計算精度を調べるとともに、本手法に適した画像ノイズ低減アルゴリズムを検証する。

3. 研究の方法

本申請者は、図 1 下部に示すようなデュアルエネルギー CT（2種類の X 線管電圧）を使い、その“電子密度画像と CT 画像の重み付きの引き算”という極めてシンプルな演算処理により「阻止能比」を計算でき得ることを世界に先駆けて見出した。具体的に DECT データから SPR に変換するための基本式を以下に示す。

$$SPR = (1 + \delta_0 + \eta_L)\rho_e - \eta_L u_L \tag{1}$$

$$\rho_e = (1 + \alpha) u_H - \alpha u_L \tag{2}$$

ここで ρ_e は水を基準とした相対電子密度で、次式のように高エネルギー ($k=H$) および低エネルギー ($k=L$) スキャンで得られる CT 値 u_k の重み付き減算により求めることができる。

本研究におけるデュアルエネルギーCT 撮影は、新潟大学医歯学総合病院に設置されている Dual-source CT (DSCT) 装置 SOMATOM Somatom FORCE (SIEMENS 社) を用いて行った。管電圧は低エネルギー側を 90 kV に、高エネルギー側を 150 kV (Sn フィルタを付加) に設定し、校正用ファントム (Gammex 467) の撮影を行った。この Gammex 467 ファントムには 13 種類の組織等価ロッドを配置可能であり、各ロッドの既知である密度と組成から求めた阻止能比を参照値とした。得られた画像解析には MATLAB Image Processing Toolbox (MathWorks, Inc, Natick, MA) を用いて行った。

4. 研究成果

図2(a)は、デュアルエネルギーCTデータから式(1)により求めた Gammex467 ファントムの SPR 画像である。各組織等価ロッドに設定した関心領域 (ROI) における相対的誤差を図2(b)に示す。SPR の実測値と参照値は、ファントム内のすべての材料でよく一致しており、全体の二乗平均平方根誤差 (RMSE) は 1%未満 (0.7%) であった。Solid Water の RMSE が最大 (-1.3%) となった原因は、SPR 計算における実際の水との不十分な等価性によるものと考えられる。そして、校正した Solid Water の平均励起エネルギーの値は 76.1 eV であったが、既知の元素組成から Bragg の加法則を用いて算出した参照値は 69.5 eV であり、両者間の 6.6 eV のずれにより SPR の約 1% の過小評価を定性的に説明できる。しかしながら、SPR の計算値と参照値の良好な一致は、『デュアルエネルギーCT値-阻止能比変換』における式(1)の減算処理による画像ノイズの増加を伴って達成されている。図2(c)は、各組織等価ロッドの ROI において求めた SPR 値の標準偏差 (すなわち画像ノイズ) を、高エネルギーおよび低エネルギーの CT 値 (u_H と u_L) とともに示したものである。軟部組織等価のロッドの SPR 値のノイズレベルは、 u_H と u_L のノイズの 2 倍以上となった。したがって、画像劣化を防ぐために何らかのノイズ低減処理の導入が必要である。そこで本研究では、ノイズ画像のエッジを維持したまま画像ノイズの低減を可能とする、MATLAB Image Processing Toolbox のガイド付きノイズフィルタリング機能「imguidedfilter」による SPR 画像の後処理を試みた。図3は、Gammex 467 ファントムのノイズ処理前後の画像における各種ロッドの SPR 値の標準偏差 (SD) を比較した。ガイド付きフィルタリングにより、RMSE 値をほとんど変えることなく (0.66%)、処理前の原画像と比較して、SD を 1/3 以下に低減することが可能であることが分かった。このように本研究では、『デュアルエネルギーCT値-阻止能比変換』と「ガイド付きフィルタリング」の組み合わせが、正確な SPR 予測に極めて有効な手法であることが示唆された。しかし、今後の課題として、実組織における陽子線の飛程計測から直接得られた SPR 基準値と比較することにより、本手法の SPR 計算精度を検証する必要があると思われる。

以上の結果から、Gammex ファントムのすべての組織等価ロッドについて、デュアルエネルギーCT値-阻止能比変換による SPR の計算値と参照値の間に良好な一致を見出し、全体で 1% 未満の RMSE を達成可能であることが分かった。しかし、結果として得られる SPR 画像のノイズレベルは、高または低エネルギーCT画像の 2 倍以上にまで劣化してしまうが、Guided Filtering を使ったエッジ保存ノイズ除去アルゴリズムを適用することにより、SPR の計算精度や被写体の微細な構造の描出能を大きく損なうことなく、そのノイズレベルを十分低減できることが確かめられた。本手法の最大のメリットはその「シンプルさ」にある。つまり、デュアルエネルギー CT 装置を有する施設であれば、本手法を容易に実行可能となる。したがって、デュアルエネルギー CT 装置が世界の医療施設に導入されつつある現状から、本手法が短期間で広く波及する可能性は高いと予想される。

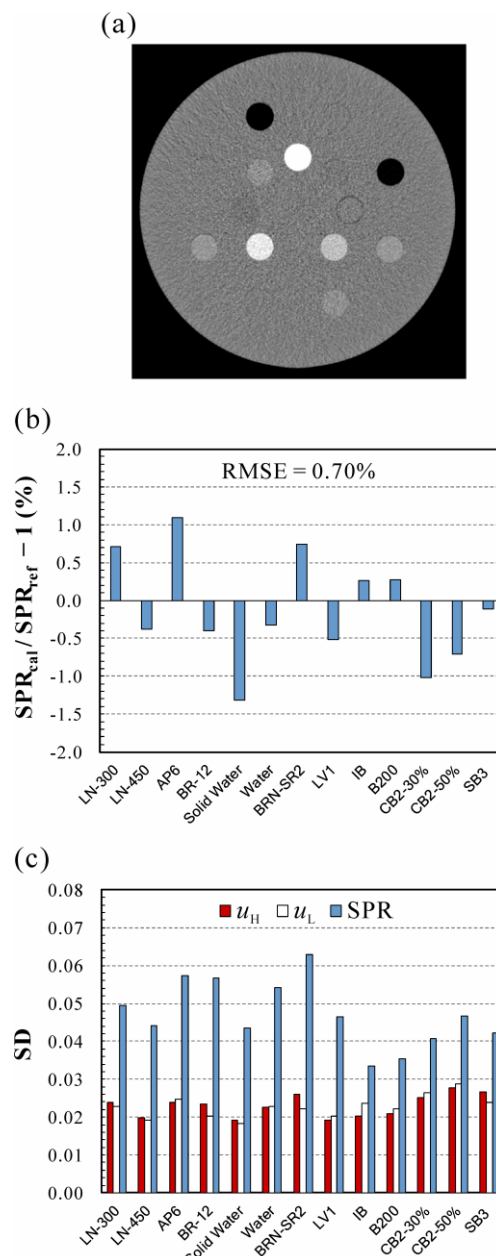


図2 (a)Gammex 467 ファントムの SPR 画像 (b)ファントム内各ロッドの ROI における SPR 値の相対誤差 (c)各ロッドの SPR 値、CT 値 (u_H と u_L) の標準偏差 (SD)

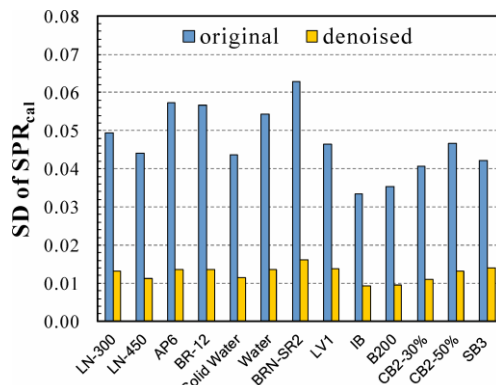


図3 ノイズ低減処理の有無による Gammex-467 ファントム画像の各ロッドにおける SPR 値の標準偏差 (SD) の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Tanaka Sodai, Noto Yoshiyuki, Utsunomiya Satoru, Yoshimura Takaaki, Matsuura Taeko, Saito Masatoshi	4. 巻 65
2. 論文標題 Proton dose calculation based on converting dual-energy CT data to stopping power ratio (DEEDZ-SPR): a beam-hardening assessment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 235046 ~ 235046
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6560/abae09	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 -

1. 著者名 Saito Masatoshi	4. 巻 48
2. 論文標題 Quadratic relation for mass density calibration in human body using dual energy CT data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Medical Physics	6. 最初と最後の頁 3065 ~ 3073
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/mp.14899	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0件

〔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
研究協力者	早川 岳英 (Hayakawa Takahide)		

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
---------	---------