

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 14 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25461908

研究課題名(和文)放射線治療計画におけるDual Energyを用いた新しいCT値 - 電子密度変換

研究課題名(英文) Conversion of the energy-subtracted CT number to electron density based on a single linear relationship

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) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、がんの放射線治療における無駄な被曝低減のために、より正確な3次元線量分布計算を実現可能とする、Dual-Energyを用いた全く新しい『CT値 - 電子密度変換法』の開発である。本目的達成のため研究期間内に、臨床用Dual-Energy CT装置や放射線治療計画装置への本手法の導入・実行を通して、本手法の基本原理の妥当性を実証するとともに、放射線治療計画における線量分布計算の精度を検証した。

研究成果の概要(英文)：To achieve accurate tissue inhomogeneity corrections in radiotherapy treatment planning, we have previously proposed a novel conversion of the energy-subtracted CT number to an electron density (HU- e conversion). In the present study, we investigate an initial implementation of the HU- e conversion method for a treatment planning system. Two radiotherapy plans were used to compare the reliabilities of dose calculations based on the novel HU- e conversion and the conventional method. The HU- e conversion generally offered superior reliability. Based on our results, HU- e conversion appears to be a promising method of providing a reliable inhomogeneity correction in treatment planning for ill-conditioned scans.

研究分野：医学物理学

キーワード：electron density dual-energy CT treatment planning

1. 研究開始当初の背景

がんの放射線治療計画において、線量分布を決定付ける因子の一つ「不均質補正」を正確に施すためには、生体内の電子密度情報が必要不可欠である。通常、電子密度が既知である様々な組織等価ロッドを挿入した電子密度ファントムを CT 装置で撮影し、得られる CT 画像の各ロッド部位で実測した CT 値と電子密度の関係『CT 値 - 電子密度変換』に基づいて、被写体（患者）内の 3 次元線量分布が計算される。しかし、図 1 上部のように、従来の CT スキャン（1 種類の X 線管電圧のみ利用 = Single-Energy CT）で得られる「CT 値」と「電子密度」の間に比例関係は成立せず、また 1 対 1 に対応する保証もない。さらに、被写体サイズの違いによって CT 値が変動する「ビームハードニング効果」に起因した線量分布計算上の不確かさのために、特に精度を必要とする重要臓器近傍のがんに対する放射線治療に支障をきたしている。このような現状から、より正確かつ簡便な『CT 値 - 電子密度変換』が求められていた。本報告者は、図 1 下部に示すような Dual-Energy CT（2 種類の X 線管電圧を利用）を使い、その高電圧画像と低電圧画像の CT 値の差で定義される「エネルギー差分 CT 値」と「電子密度」の間に極めて良好な比例関係ならびに 1 対 1 対応が成立することを理論的に世界に先駆けて見出した。さらに、その比例関係は被写体サイズの変化に対しても十分に安定であることから、この新規『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法』が、上記のような従来法の問題点を克服できるものと考え、本研究の着想に至った。

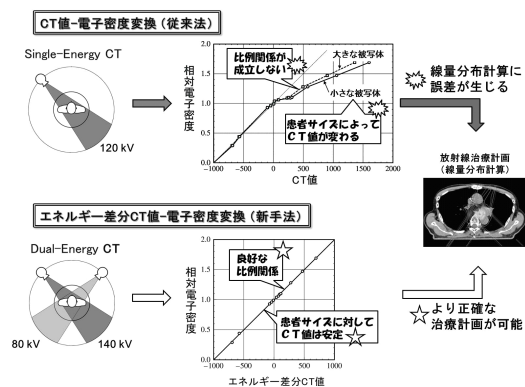


図 1 従来の CT スキャン（1 種類の X 線管電圧のみ利用 = Single-Energy CT）に対する、Dual-Energy CT（2 種類の X 線管電圧を利用）を用いた『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』に基づく放射線治療計画のメリット。

2. 研究の目的

本研究の目的は、がんの放射線治療における無駄な被曝低減のために、より正確な 3 次元線量分布計算を実現可能とする、Dual-Energy を用いた全く新しい『CT 値 - 電子密度変換法』の開発である。本目的達成の

ため研究期間内に、臨床用 Dual-Energy CT 装置や放射線治療計画装置への本手法の導入・実行を通して、本手法の基本原理の妥当性を実証するとともに、放射線治療計画における線量分布計算の精度を検証した。

3. 研究の方法

臨床用 Dual-Energy CT 装置を用いた電子密度ファントム撮影を実施し、得られる『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』に関する以下の項目について研究を遂行した。

(1) エネルギー差分 CT 値と電子密度との対応関係について

理論的に予測されている「エネルギー差分 CT 値」と「電子密度」間の比例関係を実験的に確認するとともに、本手法の適用可能な電子密度範囲を明らかにする。

(2) 各種撮影条件変化の影響について

電子密度ファントムの中心部（頭部に相当）あるいは周辺部のみ（胸部に相当）を被写体として使用し、そのサイズ変化によって生ずるビームハードニング効果の『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』への影響を調べる。

X 線管への付加フィルタ（スズなど）の有無による『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』の安定化や、被曝線量の低減効果を明らかにする。

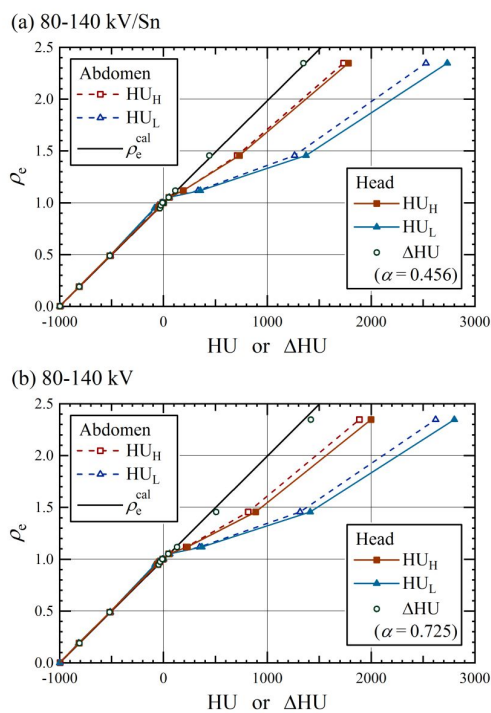


図 2 (a) 80 kV-140 kV/Sn および (b) 80 kV-140 kV の条件における「頭部用」電子密度ファントムの $HU_k - \rho_e$ ($k = H$ (高電圧), L (低電圧)) と $HU - \rho_e$ のプロット図。それぞれの条件における「腹部用」電子密度ファントムの $HU_k - \rho_e$ および $HU - \rho_e$ 直線も比較のために重ねて示した。

また、『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』を放射線治療計画装置に導入し、3次元線量分布計算に関する以下の項目について研究を遂行した。

(3)様々な撮影条件で取得した『エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換』の結果が、3次元線量分布計算に与える影響を定量的に検証する。

(4)より確かに、より低い被曝で放射線治療計画を実行するための Dual-Energy CT 装置の撮影条件(管電圧, 付加フィルタなど)を最適化する。

4. 研究成果

本研究では、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法を臨床で実際に用いられている DECT 装置および放射線治療計画装置に導入し、その有用性を実験的に検証した。まず、臨床で使用されている Dual-source CT を用いて HU と ρ_e の比例関係や 1 対 1 対応を調べた。その結果、 ρ_e が 0.00(空気)から 2.35(アルミニウム)の広い範囲で HU と ρ_e の間に比例関係が成立し、ほとんどの組織等価ロッドにおいて誤差 1%程度の精度で電子密度が得られることがわかった(図 2)。また、フィッティングさせた直線式の決定係数、傾き、切片は、理想的な値である 1 に極めて近

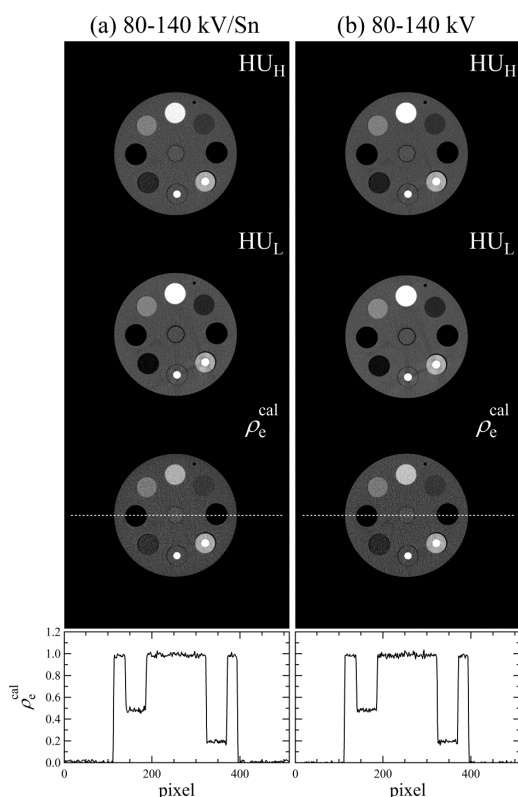


図 3 (a) 80 kV-140 kV/Sn および (b) 80 kV-140 kV の条件で撮影した頭部用電子密度ファントムの高・低管電圧 CT 画像と、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法により校正した電子密度 ρ_e 画像。また、それぞれの画像最下部に ρ_e 画像の破線部におけるプロファイルを示した。

い値を示した。さらに、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法では、高電圧側の管球に Sn フィルタを付加することで、ビームハードニング効果の影響が減少し、被写体のサイズの変化に対しても精密な電子密度を得ることができる。また、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法では、ビームハードニング効果により引き起こされるストリーキングアーチファクト低減させることができることが分かった(図 3)。

次に、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法を放射線治療計画装置に導入し、得られる線量分布の精度・安定性を従来の single energy CT による CT 値 - 電子密度変換法と比較した。骨組織などの高電子密度領域の画素頻度の小さい軟部組織等価領域を主とした放射線治療計画においては、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法および CT 値 - 電子密度変換法ともにビームハードニング効果の影響が少なく、両手法の線量分布計算の安定性に有意の差はみられないことがわかった(図 4)。一方、大量の歯や骨を含み、高電子密度領域の画素頻度の大きい口腔部の放射線治療計画では、CT 値 - 電子密度変換法において線量分布にビームハードニング効果の影響が顕著に表れた。しかし、エネルギー差分 CT 値 - 電子密度変換法では、歯や骨を含むような部位においてもビームハードニング効果の影響が少なく、特に、100 kV-140 kV/Sn の条件では、より安定した線量分布が得られることがわかった(図 5)。本手法の最

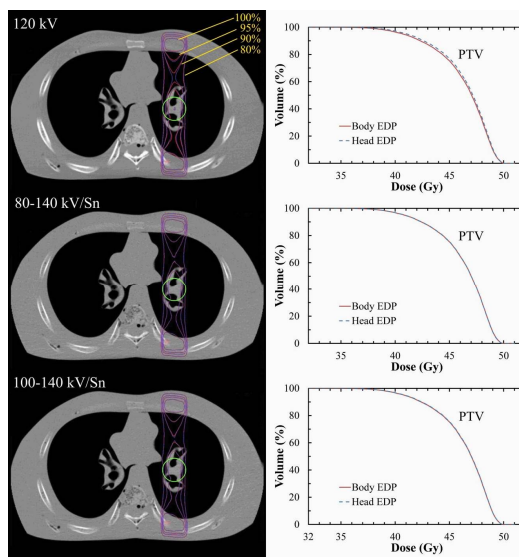


図 4 120 kV、80 kV-140 kV/Sn、100 kV-140 kV/Sn の撮影条件における腹部用電子密度ファントム(赤線)および頭部用電子密度ファントム(青線)により校正して計算した人体ファントムの胸部の線量分布(2門照射)。等線量曲線は 100%、95%、90%、80%である。また、それぞれの線量分布図の右側に、対応する計画標的体積(PTV: Planning Target Volume)の線量体積分布(DVH: Dose Volume Histogram)を示した。

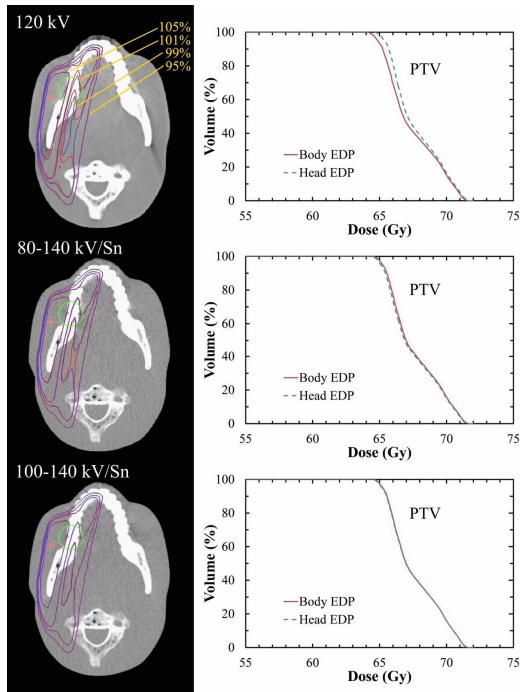


図5 120 kV、80 kV-140 kV/Sn、100 kV-140 kV/Snの撮影条件における腹部用電子密度ファントム(赤線)および頭部用電子密度ファントム(青線)により校正して計算した、人体ファントムの口腔部の線量分布(2門照射)。等線量曲線は105%、101%、99%、95%である。また、それぞれの線量分布図の右側に、対応する計画標的体積(PTV)の線量体積分布(DVH)を示した。

大のメリットはその「簡便性」にある、つまり、Dual-energy CT装置を持つ施設であれば、本手法を容易に実行可能となる。したがって、Dual-energy 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ことが期待される。

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3件)

Masatoshi Saito: Technical Note: Relation between dual-energy subtraction of CT images for electron density calibration and virtual monochromatic imaging Med. Phys., 42(7) (2015) 4088-4093. (査読有)

DOI:10.1118/1.4921999

Masayoshi Tsukihara, Yoshiyuki Noto, Ryuta Sasamoto, Takahide Hayakawa and Masatoshi Saito: Initial implementation of the conversion from the energy-subtracted CT number to electron density in tissue inhomogeneity corrections: An anthropomorphic phantom study of

radiotherapy treatment planning Med. Phys., 42(3) (2015) 1378-1388. (査読有)

DOI:10.1118/1.4908207

Masatoshi Saito and Masayoshi Tsukihara: Technical note: Exploring the limit for the conversion of energy-subtracted CT number to electron density for high-atomic-number materials Med. Phys., 41(7) (2014) 2850-2858. (査読有)

DOI:10.1118/1.4881327

〔学会発表〕(計3件)

齋藤正敏, 電子密度校正のためのエネルギー差分CT画像と仮想単色CT画像との関係 日本医学物理学会第111回学術大会(2016.4.15)パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

Masayoshi Tsukihara¹, Yoshiyuki Noto, Ryuta Sasamoto, Takahide Hayakawa, Masatoshi Saito, Calculation of dose distribution in radiotherapy by conversion of energy subtracted CT number to electron density 日本医学物理学会第107回学術大会(2014.4.10)パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

月原正喜, 能登義幸, 早川岳英, 齋藤正敏, Dual energy CTを用いたエネルギー差分CT値-電子密度変換法の検討 第128回日本医学放射線学会北日本地方会(2013.6.14)朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

6. 研究組織

(1)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

(2)連携研究者

早川 岳英 (Hayakawa Takahide)

新潟大学・医歯学系・助教

研究者番号: 00377194