

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月1日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22611007

研究課題名（和文） 医用X線源を用いた2色X線CTによる電子密度計測

研究課題名（英文） Dual-energy CT for electron density measurements using clinical x-ray source

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

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いて不均質部補正のための必須入力データである電子密度の絶対測定が可能な2色X線CTを、バランスドフィルタ法を導入した医用X線源を用いて実現することである。本目的達成のため研究期間内に、一般撮影用X線源を使った2色X線CT装置のプロトタイプを作製し、そのビームパラメータの理論的最適化とその実験的検証を行った。

研究成果の概要（英文）：Dual-energy computed tomography (DECT) has the potential for measuring electron density distribution in a human body to predict the range of particle beams for treatment planning in proton or heavy-ion radiotherapy. However, thus far, a practical dual-energy method that can be used to precisely determine electron density for treatment planning in particle radiotherapy has not been developed. In this study, another DECT technique involving a balanced filter method using a conventional x-ray tube has been proposed. From the viewpoint of beam hardening and the tube-loading efficiency, the DECT using balanced filters would be significantly more effective in measuring the electron density than the conventional DECT.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	300,000	90,000	390,000
2012年度	200,000	60,000	260,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：医学物理学・放射線技術学

キーワード：electron density, dual-energy CT

1. 研究開始当初の背景

飛程末端で最大の癌殺傷作用を持つ粒子線を利用する粒子線がん治療において、正確な線量分布を求めるためには、粒子線の体内飛程を決定付ける電子密度情報が必要不可欠である。今迄のところ、従来のCTスキャ

ナで得られるCT値から電子密度を推定しているが、しかし、連続X線の使用に起因する線質硬化のために精密な定量化が難しく、特に精度を必要とする重要臓器近傍の腫瘍に対する治療に支障をきたしている。この課題に対して、放射線医学総合研究所のグループ

により「放射光を用いた 2 色 X 線 CT による電子密度測定」の提案・検証がなされてきた。2 色 X 線 CT とは、2 種類の X 線エネルギーでそれぞれ CT スキャンを行い、得られた線源弱係数分布のエネルギー依存性を調べることによって電子密度分布を導出する方法である。この方法では、±1%の精度で電子密度の測定が可能だが、しかし、従来の医用 X 線源での有効な単色化法が見出されていない現状において、放射光施設の利用が前提となるため、「被写体（患者）は立位あるいは座位」であることが要求される。さらに、「被写体自身が高速で回転する」という負担も加わり、2 色 X 線 CT の臨床利用への展開は困難な状況にある。

2. 研究の目的

本報告者は上記の臨床応用上の隘路を打破するため、従来の医用 X 線源の使用を可能とする「バランスドフィルタ法を組み合わせた 2 色 X 線 CT による電子密度測定」を新たに考案した。バランスドフィルタ法とは、互いに近いエネルギーの吸収端を持ち、かつ厚さを適当に調整された 2 種類のフィルタを使い、各フィルタを透過した X 線強度の差分処理によって、両吸収端に挟まれたエネルギー領域の X 線のみを得る準単色化法である。本研究の目的は、粒子線がん治療計画において不均質部補正のための必須入力データである電子密度の絶対測定が可能となる 2 色 X 線 CT を、バランスドフィルタ法を導入した医用 X 線源を用いて実現することである。本目的達成のため研究期間内に、一般撮影用 X 線源を使った 2 色 X 線 CT 装置のプロトタイプを作製し、標準物質や電子密度ファントムの電子密度分布計測を通して、本手法の原理の妥当性を検証した。

3. 研究の方法

医用 X 線源を用いた 2 色 X 線 CT 装置の構築と評価について以下の研究を実施した。

○2 色 X 線 CT 装置の構築

- ・一般撮影用 X 線源を用いたプロトタイプの作製
- ・データ解析用ソフトウェアの作製

○2 色 X 線 CT 装置の評価

- ・X 線スペクトル測定・評価
- ・標準物質および電子密度ファントムの電子密度分布測定・評価

4. 研究成果

研究初年度に「バランスドフィルタ法を組み合わせた 2 色 X 線 CT 装置」のプロトタイプ (Fig. 1) を作製するとともに、そのビームパラメータの理論的最適化を試みた。また、通常のデュアルエネルギー CT とのビームハードニング効果低減に関する能力比較も行

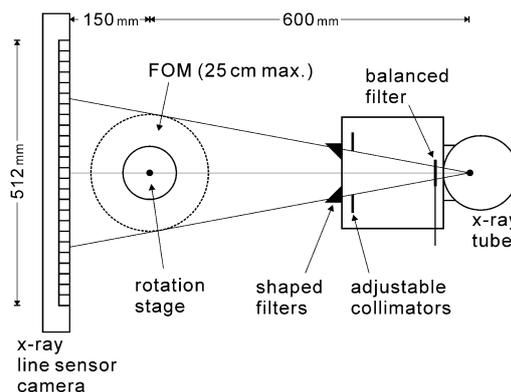
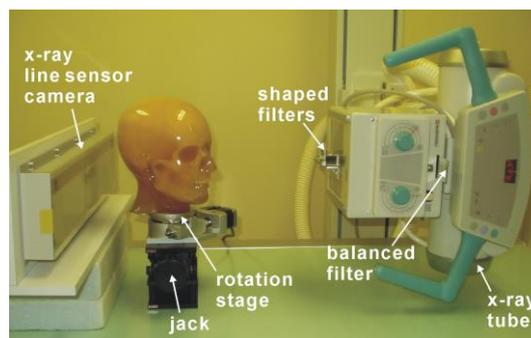


Fig. 1 Prototype of CT scanner equipped with balanced filter. Upper: photograph, lower: schematic top view of the scanning geometry and the components of x-ray CT system.

った。X 線ビームの線質は、使用するフィルタの種類や使用管電圧といったパラメータによって決定づけられる。本研究では、直径 50cm の円筒状水ファントムを被写体とした CT スキャンを想定し、ビームハードニング効果による電子密度および実効原子番号の誤差を評価する figure of merit (FOM) が最大になるようビームパラメータの最適化を行った。その結果、80 kV および 140kV の管電圧において FOM を最大かつ X 線出力を最小とする Tb/Hf および Bi/Mo が最適なバランスドフィルタの組み合わせの一つであることが分かった (Fig. 2 と Fig. 3)。

次年度以降の研究計画項目は、①データ解析用ソフトウェアの作成、②バランスドフィルタ付加後の X 線エネルギースペクトルの測定、の 2 点である。「データ解析用ソフトウェアの作成」では、昨年度作製した「バランスドフィルタ法を組み合わせた 2 色 X 線 CT 装置」のプロトタイプで測定し得られる投影データから線減弱係数の分布としての CT 画像へ再構成し、さらに電子密度分布画像への変換プログラムを FORTRAN 言語によりコーディングを行った。本プログラムを使用することにより、短時間且つ測定条件に対する高い

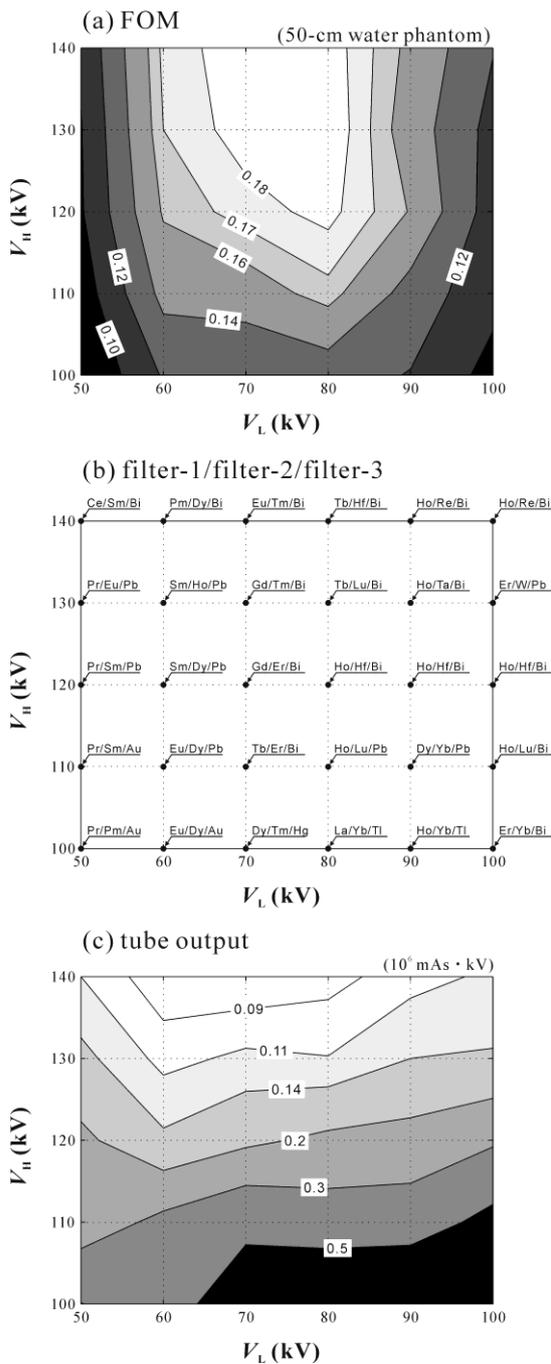


Fig. 2 Contour plots of (a) FOM, (b) combination of balanced filters, which yields the largest FOM at each kV pair condition among all possible filter combinations, and (c) tube output, calculated for various tube voltage combinations V_L for low-energy scan and V_H for high energy scan.

自由度を持って電子密度分布画像を表示することができる。併せて、2色X線CTシミュレーションプログラムも独自に開発し、様々な被写体や撮影条件（管電圧、管電流、FOV、付加フィルタ）において得られる電子密度分布画像の変化を予測することが可能となっ

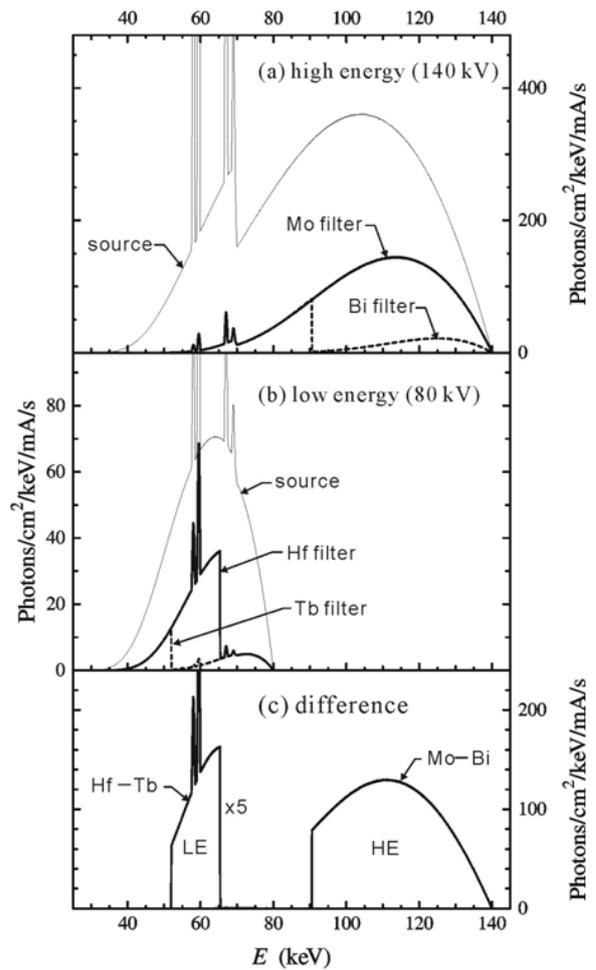


Fig. 3 X-ray spectra at the detector input passing through the center of the 50-cm-diameter water phantom, simulated under the optimal condition of tube voltage pair of 80 kV/140 kV using Tb/Hf and Bi/Mo filters.

た (Fig. 4)。一方、「バランスドフィルタ付加後のX線スペクトルの測定」では、種々の管電圧条件におけるバランスドフィルタを透過したX線のエネルギースペクトルを半導体検出器を用いて測定し、理論値との比較・検討を行った。その結果、当初計画通りの厚さ、平均エネルギー、エネルギー幅を有するX線ビームが生成できていることが確認できた。

本研究で作製した2色X線CTシミュレーション解析プログラムにより、実用化に向けたハードウェアの仕様の検討と被曝線量の評価を行った。その結果、これまで最適と考えられていた撮影条件では、現存する臨床機の管電流定格を超過するため実用化は容易ではないことが予測された。そこでX線発生装置負荷のさらなる低減のため、電子密度の画質を実効原子番号よりも優先することにより、2色X線CTの撮影条件の再最適化を行

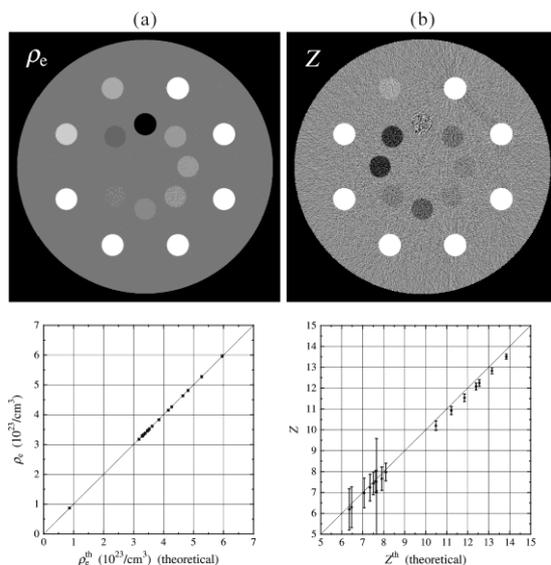


Fig. 4 Simulated images of (a) ρ_e and (b) Z of 33-cm-diameter solid water phantom with 16 tissue inserts. Averaged ρ_e or Z data of tissues plotted against the theoretical values are also shown in the lower portions.

った。それにより、必要とされる管電流を大幅に低減でき、実用化の可能性が高まることが確認できた。

バランスドフィルタを用いたX線CTは、AAPMの50周年記念論文“Development of x-ray computed tomography: The role of Medical Physics and AAPM from the 1970s to present”中で引用されているように、申請者の独自の発想に基づく手法であり、国内外での報告例は全くない。この「医用X線源を用いる2色X線CT」の実用化に向けた基礎が本研究により確立され、また今日まで蓄積されてきた商用X線CTのハード及びソフトウェアの基盤技術を本手法ではほとんどそのまま利用できることから、短期間かつ低コストで高精度電子密度測定用2色X線CT臨床機の開発が将来可能と思われる。

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4件)

- ① Masayoshi Tsukihara, Yoshiyuki Noto, Takahide Hayakawa and Masatoshi Saito: Conversion of the energy-subtracted CT number to electron density based on a single linear relationship: an experimental verification using a clinical dual-source CT scanner Phys. Med. Biol., 58(9) (2013) N135-N144. (査読有)
DOI: 10.1088/0031-9155/58/9/N135
- ② Masatoshi Saito: Potential of

dual-energy subtraction for converting CT numbers to electron density based on a single linear relationship Med. Phys., 39(4) (2012) 2021-2030. (査読有)

DOI: 10.1118/1.3694111

- ③ Masatoshi Saito: Optimized low-kV spectrum of dual-energy CT equipped with high-kV tin filtration for electron density measurements Med. Phys., 38(6) (2011) 2850-2858. (査読有)

DOI: 10.1118/1.3584200

- ④ Masatoshi Saito: Technical note: Optimization for improved tube-loading efficiency in the dual-energy computed tomography coupled with balanced filter method Med. Phys., 37(8) (2010) 4182-4185. (査読有)

DOI: 10.1118/1.3467754

[学会発表] (計2件)

- ① Masayoshi Tsukihara, Yoshiyuki Noto, Takahide Hayakawa, Masatoshi Saito, Study of conversion of energy subtracted CT number to electron density using dual energy CT 日本医学物理学会第105回学術大会 (2013.4.11) 横浜
- ② 齋藤正敏, バランスドフィルタ法を組み合わせた2色X線CTの検討 日本医学物理学会第99回学術大会 (2010.4.9) 横浜

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