

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011 ~ 2012

課題番号：23760824

研究課題名（和文）

第三世代コンプトン散乱X線CTによる高速電子密度イメージング

研究課題名（英文）

Fast electron density imaging with third generation Compton scattered X-ray CT

研究代表者

渡辺 賢一 (WATANABE KENICHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30324461

研究成果の概要（和文）：

X線管、ファンビームコリメータ、被写体回転用の自動ステージ、平行平板コリメータ、フラットパネルX線検出器を用いることで、第三世代コンプトン散乱X線CT装置のプロトタイプ機を試作した。プロトタイプ機を用いた基礎試験において、現実的な時間内にコンプトン散乱X線CT画像を取得可能であることを確認した。また、透過X線CTと組み合わせ合わせた複合CT法を採用することで、従来のCT像と同等の画質で、より正確な電子密度分を得られることが確認された。

研究成果の概要（英文）：

The third generation Compton scattered X-ray CT system was fabricated by combining a X-ray tube, a fan-beam collimator, a rotational stage, a parallel plate collimator and flat-panel X-ray imager. Through basic experiments, we confirmed the third generation system can obtain the scattered X-ray CT image within feasible measurement time. In addition, the combining CT technique between transmission and Compton scattered X-ray CT was confirmed to obtain a more accurate electron density image with same image quality as the conventional X-ray CT.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力計測・放射線物理

## 1. 研究開始当初の背景

がんの放射線治療のひとつである陽子線治療は、高い線量分布制御性からその有効性が認められ先進医療としても認可されており次世代がん治療法として期待が大きい。陽子線治療では、健全な臓器への被曝量を抑えつつ腫瘍への線量を高めるため、どの方向からどれだけ照射するかという治療計画を立てることが非常に重要である。治療計画作成には各部位における粒子線の阻止能（荷電粒子を止める能力）分布を取得することが必要

不可欠となる。重荷電粒子は主として物質中の電子と相互作用しエネルギーを失うため、その阻止能は物質の電子密度に比例する。従って、治療計画には電子密度分布が必要になるが、現状では、治療前に透過X線CT像を取得し、各々の位置で得られるCT値（CTで得られる画素値、X線の吸収率の指標）から、体内組織の標準物質で得られた変換テーブルを利用して電子密度に変換し、これを元に治療計画を立案している。X線の吸収率であるCT値は、あくまで、光子の減衰の度合い

を示す指標で、電子密度よりも原子番号に大きく依存するため、組成の似た組織同士ではCT値と電子密度の間に良い直線性を示す(X線吸収率は同一組成であれば密度 $\propto$ 電子密度に比例する)ものの、体の大部分を占める軟組織と組成の異なる骨のような組織では、直線からはずれ、密度が変換テーブルの範囲を超えて変化するような場合には、正しい電子密度を推定できなくなる。このため、品質管理・品質保証と言った観点から、治療計画を立案する際には、従来のCT値でなく電子密度分布を求めることが望まれていると言える。

こういった要求から、3次元電子密度分布を取得する手法としてDual-Energy CTによる電子密度イメージング法の開発も進められているが、この手法では、強力な単色X線光源が必要で、これを発生するためにモノクロメータを備えた放射光施設といった大型の施設が必要で、これが粒子線治療のための検査法として普及するには大きな障害となっている。

電子密度を測定するもう一つの手法として、コンプトン散乱強度を用いる手法がある。コンプトン散乱は、原則としては自由電子との散乱で、その反応断面積が電子密度に比例するため、その散乱強度は電子密度の良い指標となる。コンプトン散乱X線により断層撮像をおこなうコンプトン散乱トモグラフィーといったアイデアは古くから提案されていたが、1) 検出効率が低いため被曝量が高くなること、2) 検出効率を上げるために散乱角度を大きく取ると位置分解能が劣化することが原因で長らく脚光を浴びることがなかった。しかしながら、近年、大きな有感面積のX線撮像素子が開発されるとともに、画像再構成技術の進展も著しいため、申請者はコンプトン散乱X線CT技術に再びスポットを当て、従来提案されていたものとは全く異なる“古くて新しい”散乱X線CTに基づく電子密度イメージング技術を提案する

## 2. 研究の目的

本提案課題では、コンプトン散乱X線CT技術を実現するために、1) フラットパネルX線検出器・平行平板コリメータ・ファンビームX線を組み合わせた第三世代コンプトン散乱X線CT技術の開発、2) 本方式に適した画像再構成アルゴリズムの考案、3) コリメータ形状等の各種パラメータの最適化を研究項目として挙げている。

以上の項目を実施することで、新しい電子密度イメージング法について、1) その成立性の実証を行うと共に、2) 性能の最適化に向けた系統的な基礎検討と3) 実用化のためのシステム設計提案を行うことを目的とする。提案する実用化システムでは、以下のよ

うな性能目標を掲げる。

- 1) 第三世代CT技術を採用することで、実現可能な時間で画像取得可能
- 2) 線量を放射線治療ガイドラインで示される線量低減目標値(65 mGy: 頭部CT)以下に抑制
- 3) 粒子線治療の治療計画立案に必要なmmオーダーの空間分解能の達成

## 3. 研究の方法

本提案課題では、コンプトン散乱X線CT技術を実現するために、実施する項目は以下の3項目である。

- 1) フラットパネルX線検出器・平行平板コリメータ・ファンビームX線を組み合わせた第三世代コンプトン散乱X線CT技術の開発

本項目を実施することで、実用的な時間内でも許容可能な被曝線量で電子密度イメージを取得可能な技術を確認。

- 2) 本方式に適した画像再構成アルゴリズムの考案

本項目を実施することで、精度の高い電子密度推定値と高い空間分解能の両立を図ることが実現。

- 3) コリメータ形状等の各種パラメータの最適化

本項目を実施することで本手法における性能改善と、本方式の適用限界を評価可能となる。

## 4. 研究成果

図1に示すような、X線管、ファンビームコリメータ、被写体回転用の自動ステージ、平行平板コリメータ、フラットパネルX線検出器を用いることで、第三世代コンプトン散乱X線CT装置のプロトタイプ機を試作した。

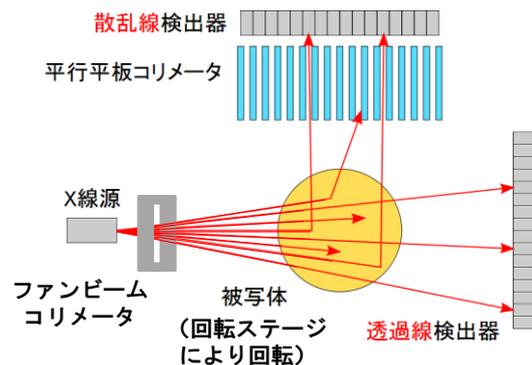


図1 第三世代コンプトン散乱X線CTプロトタイプ機の概略図

ファンビームコリメータを設置することで、断層撮像面を限定しつつ、撮像面とは垂直な方向に対しては立体角を限定しない平行平板コリメータを設置することで、比較的高い効率でコンプトン散乱X線による画像を取得できる幾何学的配置を採用した。

これにより、現実的な時間内に、コンプトン散乱 X 線による断層撮像が可能となった。また、本装置のもう一つの特徴としては、コンプトン散乱 X 画像と同時に透過 X 線画像も取得している点である。

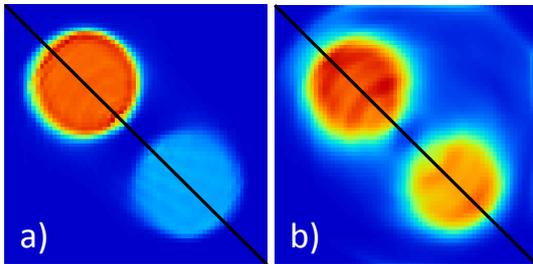


図2 a)透過 X 線および b)コンプトン散乱 X 線によって得られた CT 再構成画像

透過 X 線およびコンプトン散乱 X 線により得られた CT 再構成画像を図2に示す。被写体は、アクリル樹脂およびアルミニウム製で直径 10 mm 円柱である。ここでは、画像再構成法として最尤推定期待値最大化 (ML-EM) 法を採用している。また、得られた CT 像の断面プロフィールを図3に示す。

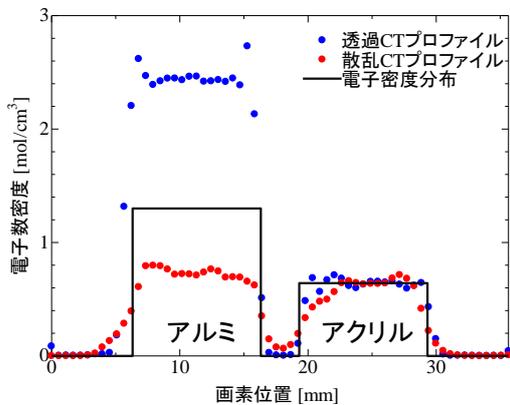


図3 透過 X 線およびコンプトン散乱 X 線によって得られた CT 再構成画像の断面プロフィール

再構成画像の画素値は、アクリル部の値で規格化されている。透過 X 線によって得られた CT 像では、アルミニウム部で過大評価となっている。これは、透過 X 線画像が X 線の減弱、つまり光電吸収の強度を元に画像を再構成しているため、アクリルを基準にした際、アルミニウムの電子密度より高い値を示す結果となっている。一方、コンプトン散乱 X 線により得られた CT 像では、アルミニウム部で過小評価となっている。これは、アルミニウム中での散乱 X

線が減衰され、コンプトン散乱された X 線の情報すべてを取得できていないことに起因している。また、コンプトン散乱 X 線で得られた画像の位置分解能は、透過 X 線画像に比べ劣っていることも確認された。

そこで、両者の欠点を補うべく、二つの手法を複合することとした。具体的には、ML-EM 法において初期画像として透過 X 線により得られた画像を用い、コンプトン散乱 X 線により得られたデータを用いて逐次計算を進めて行き、画素値を補正する手法を考案した。得られた再構成画像および断面プロフィールを図4、図5に示す。

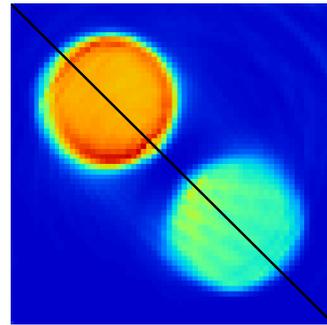


図4 透過/散乱 X 線複合 CT による再構成画像

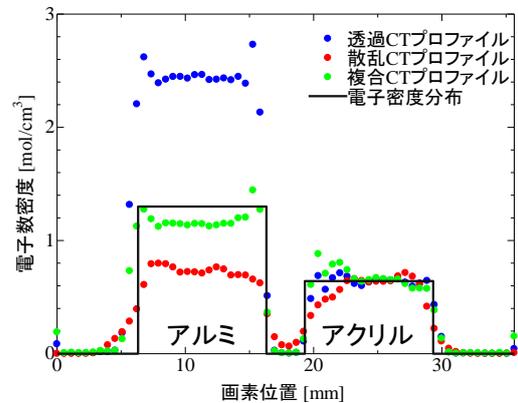


図5 透過/散乱 X 線複合 CT による再構成画像の断面プロフィール

複合 CT で得られた画像では、透過 X 線により得られた CT 像と遜色ない画質を有していることが見て取れる。画像の空間分解能としては、2-3 mm 程度が得られていることが確認できる。このことから、画質に関しては目標を達成できたと言える。また、断面プロフィールからは、アルミニウム部において期待される電子密度に近い値を示すことが分かった。以上のことから、透過/散乱 X 線複合 CT 法を採用することで、従来の透過 X 線 CT と同等の画質で、より電子密度に近い値を出力することが可

能となることが分かった。以上、プロトタイプ機による基礎特性評価試験を通して、現実的な時間内にコンプトン散乱 X 線 CT 像を取得可能であることを示すと共に、透過 X 線 CT との複合 CT 法を採用することで、従来の透過 X 線 CT と同等の画質で、有効原子番号に依らずより電子密度に近い画素値を出力できることが確認され、コンプトン散乱 X 線 CT あるいは複合 CT が新しい電子密度イメージング法として有用であることが示された。次に、本方式を実施した際の被曝量をモンテカルロシミュレーションコード EGS5 により評価した。成人の頭部を想定したアクリル製で 160 mm のファントム中の付与エネルギー分布を計算し、その結果より CT 装置の線量評価に一般的に用いられる指標である CTDI (Computed Tomography Dose Index) を算出した。結果としては 44 mGy という値が得られ、ICRP のガイドラインで示されている 60 mGy という値を下回っており、頭部であれば、本手法は適用可能であることが確認された。

コンプトン散乱 X 線 CT の画質に大きな影響を与えるパラメータとして、平行平板コリメータの幾何形状、特にコリメータの開口角がある。様々なコリメータ長さ・間隔の平行平板コリメータを製作し、各々で CT 画像取得実験を行い、画像再構成を行った。画質の指標として、再構成された画像について、被写体の形状に対するコサイン類似度を算出した。平行平板コリメータの開口角とコサイン類似度の関係を図 6 に示す。

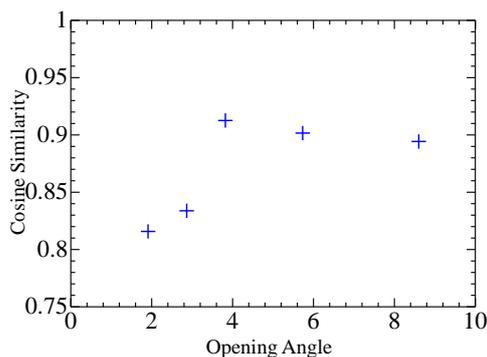


図 6 平行平板コリメータの開口角とコサイン類似度の関係

開口角が広くなるにつれて、散乱 X 線に対する立体角が広がるため、散乱 X 線の放出位置を限定できなくなるため、空間分解能が悪くなり、結果として画像のコサイン類似度も低下していることがわかる。一方、開口角を狭くしすぎると、検出器に到

達する X 線量が減ってしまい、画像の統計的揺らぎが増大する結果となっていることが確認できる。このことから、平行平板コリメータの開口角には、最適値が存在することがわかる。実際の装置の設計においては、被写体を設置するスペースを確保した上で、X 線管および透過・散乱 X 線検出器の配置を決め、その配置で許される X 線照射量を決定する必要がある。そういった条件を決めた上で、最も画質が良くなるように平行平板コリメータの開口角を決定する必要がある。以上に、今回の検討の結果、本方式を採用した CT 装置を設計するための指針が得られたと言える。

#### 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 1 件)

- ① Ryota Masuji, Kenichi Watanabe, Atsushi Yamazaki, Akira Uritani, "A study on electron density imaging using the Compton scattered X-ray CT technique", *Nuclear Instruments and Methods*, **A652** (2011) 620-624

[学会発表] (計 5 件)

- ① 吉田 迅, 山崎 淳, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 「透過/散乱複合 CT で用いる平行平板コリメータの幾何形状に関する検討」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 3 月 27-30 日, 神奈川工科大学
- ② 吉田 迅, 山崎 淳, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 「透過/散乱複合 CT で用いる平行平板コリメータの幾何形状に関する検討」, 第 27 回研究会「放射線検出器とその応用」, 2013 年 2 月 5-7 日, KEK つくば
- ③ Jin Yoshida, Atsushi Yamazaki, Kenichi Watanabe, Akira Uritani, "Electron Density Imaging Combining Transmission and Compton Scattered X-ray CT Technique", 2012 IEEE Nuclear Science Symposium/Medical Imaging Conference, Anaheim, California, USA, Oct. 28 - Nov. 3, 2012
- ④ 吉田 迅, 山崎 淳, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 「透過/散乱複合 CT による電子密度分布イメージング法に関する研究」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12p-C7-6, 2012 年 9 月 11-14 日, 松山大学
- ⑤ 吉田 迅, 山崎 淳, 渡辺 賢一, 瓜谷 章, 「透過/散乱複合 CT による電子密度分布イメージング法における電子密度再現性の検証」, 応用物理学会 放射線分科会 第 24 回放射線夏の学校 2012 年 8 月 6-8 日, つくばグランドホテル

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特にございません。

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

渡辺 賢一 (WATANABE KENICHI)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30324461

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし