

### 緒言

X線 computed tomography (CT)装置の進歩は目覚 ましく,近年では256 列や320 列 multi-slice computed tomography (MSCT)のように,体軸方向に対し て広い範囲を一度に曝射して患者情報を得る装置も使 われるようになった.特に320 列 MSCT では体軸方 向に約16 cm の照射範囲があることから,頭部の血管 造影や心臓の冠状動脈造影検査を対象として,被検者 を体軸方向へ移動することなく広い範囲の検査が可能 となっている<sup>1.2</sup>. 画像を形成する値として採用する CT 値は物質の線減弱係数で算出しており, X-Y 平面 上だけに限らず体軸方向においても X 線質が一定で あることが望ましい.

X線管内の陽極内で電子と相互作用することに起

# Investigation of the Columnar Carbon-scatterer Length for X-ray Spectral Measurement on 320-slice Computed Tomography

Yohei Kasai,<sup>1, 2</sup> Sadamitsu Nishihara,<sup>3, 4\*</sup> Masao Yuasa,<sup>5</sup> Toshiya Kanoshige,<sup>1, 5</sup> and Takaaki Matsuura<sup>1, 6</sup>

<sup>1</sup> Department of Radiological Technology, Tokushima University School of Health Sciences

<sup>2</sup> Current affiliation: Department of Radiological Technology, Tokushima Red Cross Hospital

<sup>3</sup> Institute of Health Biosciences, University of Tokushima Graduate School

Current affiliation: Institute of Biomedical Sciences, Tokushima University Graduate School

Current affiliation: Division of Clinical Technology, Tokushima University Hospital

<sup>6</sup> Current affiliation: Hiroshima High Precision Radiotherapy Cancer Center

Received December 16, 2014; Revision accepted April 3, 2015 Code No. 810

#### Summary

A short length scatterer is adopted to measure the X-ray spectrum of computed tomography (CT) equipment with a wide irradiation field in the body axis direction. The purpose of this study is to compare X-ray spectra measured using different length scatterers and determine the most appropriate length for the scatterer. 320-slice CT equipment (Aquilion ONE) was used in this study. Circular carbon rods (3 cm diameter) with five different lengths (1–16 cm) were used as scatterers. The effect of the beam hardening phenomenon from different length carbon rods was evaluated according to the effective energy. The measurement accuracy for photon information was also evaluated based on the photon count corresponding to the characteristic X-ray. As a result, the beam hardening effect was scarcely observed when the 1 cm long scatterer was used, and the number of the photons measured for the characteristic X-ray was the most. Therefore, it was concluded that the 1 cm long circular carbon rod scatterer was the most suitable.

Key words: X-ray CT, X-ray spectrum, length of scatterer, effective energy, characteristic X-ray

\*Proceeding author

因しX線質不均一に影響する因子として, ヒール効 果が挙げられる. ヒール効果はX線管の長軸方向に 対して平行な位置において, 陰極側よりも陽極側のX 線の低エネルギー成分がより減弱する現象のことであ る. この現象のため実効エネルギーを計測したとき, 同じ撮影条件であっても陽極側のX線エネルギーは 相対的に高くなる.

少ない列数の CT 装置では体軸方向の照射範囲が狭いため、ヒール効果の影響を考慮する必要はなかったが、体軸方向に移動しない 320 列 MSCT による検査では、ヒール効果の影響が無視できない状況となっている<sup>3)</sup>.

CT 装置の一次 X 線スペクトルを推定するときに は、クライン-仁科の微分散乱断面積から求める方法 (カーボンの円柱散乱体に X 線を照射し, その散乱体 から発生する散乱 X 線のスペクトルから推定する) や、モンテカルロ法によって推定する方法を用いるこ とが一般的である4~8).前者では、散乱体の大きさに よって測定されるスペクトルは変化する可能性がある にもかかわらず、使用されるカーボンの直径や長さの 規定などについてはあまり議論されていない、体軸方 向に広い範囲をもつ CT 装置における X 線スペクト ルを測定するためには、できるだけ薄い散乱体を使用 するほうがヒール効果の影響を細かな点で測定でき, ガントリ内のスペクトルを精度良く測定することが可 能である. そこで本研究では、直径を一定として、そ れぞれ異なる長さのカーボンで得るスペクトルを比較 し、最適な散乱体の長さを検討することを目的とした.

# 1. 方 法

### 1-1 X線スペクトルの計測

Fig. 1 に測定時の模式図を示した.使用した CT 装置は 320 列 MSCT である東芝メディカルシステムズ 株式会社製 Aquilion ONE である. 直径が 3 cm  $\phi$  で それぞれ長さ 1, 2, 4, 8, 16 cm の異なる 5 種類の カーボン円柱体を散乱体として,CT 装置のガントリ 内体軸方向に配置し,そこから発生する 90° 散乱 X 線 を cadmium telluride 検出器 (EMF123-0 型 CdTe 放射 線検出器,EMF ジャパン社製)で測定した.検出器素 子の大きさは 3 mm(縦)×3 mm(横)×1 mm(高さ)であ り,多チャンネル波高分析器 (multi-channel analyzer: MCA) のチャネル数を 1024 チャネルとした.使用し たカーボン円柱体の密度は 2.699 g/cm<sup>3</sup> であった.こ のとき,ピンホール直径 0.8 mm  $\phi$  のコリメータ (EMF123-1 型コリメータセット,EMF ジャパン)2枚 を検出器の散乱体側に装着し,アイソセンタを各散乱



Fig. 1 Diagram of the measurement arrangement.

体の中心に合わせ、散乱体の中心と検出器との距離が 100 cm となるように設置した.また、寝台から発生 する散乱の影響を少なくするため散乱体を発泡スチ ロールで寝台から離して固定した.照射条件を管電圧 120 kV,管電流 250 mA,回転時間 0.5 sec/rotation と 設定し、CdTe 検出器(検出器)で計測した光子数が 10 万カウント程度となるように照射時間を調整した.こ こで、光子数を 10 万カウント程度測定したことの理 由は、相対標準偏差を 0.316%に抑えることができ、統 計的変動の影響が問題とならない程度の測定結果を得 ることができるからである.

散乱による X 線スペクトルからクライン-仁科の微 分散乱断面積の式を用いて一次 X 線スペクトルを逆 算する<sup>8)</sup>. このとき, EMF ジャパンによるレスポンス 補正ソフトウェア(EMF123-3 型)を使ってストリッピ ング法による補正を行った. 逆算後の一次 X 線光子 数は約 30 万カウントとなった.

### 1-2 計数率と実効エネルギーの算出

各散乱体で得た一次 X 線スペクトルから散乱体1 cm 当たりの計数率を求め,長さ1cm,直径3cm φの 空間における散乱体による減弱が生じなかったときの 90°散乱線の1秒当たりのカウント数を外挿した.ま た,一次 X 線スペクトルを利用して,以下の方法で実 効エネルギーを求めた<sup>9</sup>.

- 各エネルギーに対する強度に空気の質量エネル ギー吸収係数を掛け算し aluminum (Al)の厚さが0 cm となるときの線減弱係数との積を算出する.
- 算出した面積を1として正規化し、各散乱体の長 さごとに減弱曲線を作成する.このとき、仮想的に 挿入した Al の厚さを 0.25~2 cm まで、0.25 cm 間 隔とした.
- 3. この減弱曲線から、面積の相対強度が0.5となる Alの厚さを求め、その厚さを半価層とすることで



Fig. 2 Estimated primary X-ray spectra obtained from each length of carbon rod (especially, 1 cm and 16 cm).

Table 1	Measurement data obtained by each length of carbon rod	

Carbon (cm)	Total counts	Exposure time (sec)	Counts rate (count/sec)
16	101249	8.5	11911.7
8	102407	8.5	12047.9
4	102285	11	9298.64
2	101482	18	5637.89
1	104213	35	2977.51

実効エネルギーに対応する Al の線減弱係数を取得し、実効エネルギーを求める.

### 1-3 特性 X 線の解析

X線管陽極である tungsten(W)の特性 X線(Kal 線)は59.3 keV であるので、使用した検出器における その値での半値幅を実測する.測定には診断用 X線 照射装置(東芝メディカルシステムズ社製 MRAD-A50S/70)を用い、検出器に X線を照射することで得 られるスペクトルから半値幅を算出する.撮影条件に ついては、管電圧を 120 kV として検出器の計数率が 2000~3000 cps 程度となるように管電流を設定しなが ら、総カウントが 10 万カウント程度となるように総 mAs 値を調整した.解析には EMF ジャパンの MCA ソフトを用いた.中間値を 59.3 keV として、実測によ る半値幅を各散乱体で得た一次 X線スペクトルに適 応し、その幅内のカウント数を求めた.

### 2. 結果

各散乱体で得た一次 X 線スペクトルを Fig.2 に, 測

Table 2Counts rate per 1 cm against<br/>each length of a scatterer

Carbon (cm)	Counts rate per 1 cm (count/sec)
16	744.5
8	1506.0
4	2324.7
2	2818.9
1	2977.5
0	3326.6

定時のデータを Table 1 に示す. そのデータから,長 さ 1 cm,直径 3 cm  $\phi$  の空間における散乱体による減 弱が生じなかった(散乱体長 0 cm)ときの 90° 散乱 X 線の 1 秒当たりのカウント数を外挿した結果を Table 2 と Fig. 3 に示す.また,一次 X 線に変換後のスペク トルから求めた実効エネルギーを Table 3 に示す.

方法の1-3で示した実験によって、Wの特性X線 (59.3 keV)での半値幅を実測した結果0.623 keVと なった.そこで、得られた一次X線スペクトルの結 果に対して半値幅を適用し、半値幅内(59.0-59.6 keV)



Fig. 3 Counts rate per 1 cm against the length of a carbon rod scatterer.

Table 3	Calculated half value layer, effective energy, and counts in the range of FWHM against
	each scatterer

Carbon (cm)	Half value layer of aluminum (cm)	Effective energy (keV)	Counts in the range of FWHM*
16	0.750	52.4	7775
8	0.708	50.5	8026
4	0.678	49.3	7961
2	0.665	48.8	8386
1	0.665	48.8	9439

\*FWHM means full width at half maximum.

のカウント数も Table 3 に示した.

## 3.考察

Table 2(Fig. 3)をみると、1秒あたりに90°散乱する カウント数は3326.6 count/sec であった. 散乱体が長 くなるほど光子数は指数関数的減少を示す<sup>8)</sup>. CT 装 置の一次 X 線スペクトル測定を直接行うことは現実 的に不可能であるため90°散乱した X 線を利用する が、主として散乱体の自己吸収による低エネルギー成 分が減弱することが問題となる. 散乱体長0 cm(自己 吸収なし)と1 cm のときでの計数率を比較すると、 3326.6 count/sec と 2977.5 count/sec であり、自己吸 収の影響によって 349.1 count/sec 分の減弱が生じて いる. これは、散乱体1 cm における total の照射時間 が 35 sec であったので、減弱分(349.1 count/sec)×照 射時間(35 sec)=12218 count のうちの主に低エネル ギー成分が減弱したものと考える. また、測定した total カウント数が 104213 count であったことから、

18 0.105	12218	減弱カウント銰	
-12218 = 0.105	ラント数 <sup>=</sup> 104213+12218 <sup>=</sup>	カウント数+減弱カ	Total
$\cdots \cdots (1)$			

となり,結果として検出したい X 線スペクトル成分 のうち 10.5%分が検出できなかったことになる.以上 のことから,可能な限り自己吸収の影響が少なくなる 散乱体の大きさを考慮することが,CT 装置の X 線ス ペクトル測定において重要であると考える.

Table 3 で示した実効エネルギーを利用して散乱体 の長さの違いに対する線質硬化の状況を比較すると, 1 cm と 2 cm では 48.8 keV, 16 cm では 52.4 keV と, 最大で 3.6 keV の違いが認められた. 散乱体の長さを 短くすることで,線質硬化の抑えられたスペクトル測 定が可能となり, 1 cm と 2 cm では X 線の低エネル ギー成分の測定が可能であることがわかる.

また散乱体を短くすることで, W の特性 X 線のカ ウント数にも変化が現れた. Table 3 に W の特性 X 線にあたる領域の半値幅内に含まれるカウント数を示 した. 散乱体の長さを短くしていくことで半値幅内の カウントは増加していき,長さが1 cm のカーボンで は、W の特性 X 線を他の散乱体長よりも 1000 カウン ト以上多く測定できた. 特性 X 線をより多く測定す ることは、個々の光子が持つ情報をより正確に測定で き、真のスペクトルに近いものが検出できていること を意味する. このことから、特性 X 線を精度よく測 定できた1 cm の散乱体は、他の長さと比較して非常 に有用な長さであるといえる.

本研究で利用したレスポンス補正ソフトでは、測定 した散乱線はすべて 90° 散乱であるとみなして一次 X 線を算出している. ここで散乱体長1 cm のときには 体軸方向に長さが短いことから、測定した散乱 X 線 はほぼすべてが 90° 散乱 X 線であると考えることが できる、しかし散乱体長が長くなると、90°散乱以外 の散乱線も90°散乱として計算に利用することにな る. つまり、長い散乱体で得た一次 X 線スペクトル では、90° 散乱以外の影響も含むことになる、このこ とも, Table 3 で示す Counts in the range of FWHM に影響を与えていると考える.本来であれば、すべて の散乱 X 線を 90° 散乱とするような補正方法を検討 し、それを反映したソフトウェアで X 線スペクトル の比較をすることが重要である.しかし、本研究では 既存のソフトウェアの特徴も含めて議論することと し、散乱体長を短くすることによって、既存のソフト ウェアを有効に活用できる可能性を示した.

## 4. 結 語

本論文では,カーボン円柱散乱体を用いて CT 装置 の一次 X 線スペクトルを算出した.算出にはクライ ン-仁科の微分散乱断面積の式を用い,散乱体の長さ

#### 参考文献

- Siebert E, Bohner G, Dewey M, et al. 320-slice CT neuroimaging: initial clinical experience and image quality evaluation. Br J Radiol 2009; 82(979): 561-570.
- 2) de Graaf FR, van Velzen JE, Witkowska AJ, et al. Diagnostic performance of 320-slice multidetector computed tomography coronary angiography in patients after coronary artery bypass grafting. Eur Radiol 2011; 21(11): 2285-2296.
- 3) 松本政雄. 診断領域の X 線スペクトル測定. 計測分科会 誌 2008; 16(2): 24-28.
- 4) 山崎隆治,隅田伊織,松本政雄,他. CT 装置の一次 X 線 スペクトルの解析. 医用画像情報会誌 2000; 17(2): 88-96.
- 5) Matscheko G, Ribberfors R. A Compton scattering spectrome-

問合先 〒770-8509 徳島県徳島市蔵本町 3-18-15 徳島大学大学院医歯薬学研究部 西原貞光 を変えることで得られるスペクトルを比較することに よって,直径を一定としたときの最適な散乱体の長さ を検討した.

散乱体長が0 cm(自己吸収がないとき)の想定結果 において、散乱体長1 cm のときに検出されるべき光 子数の10.5%が減弱によって測定できなかった.した がって、散乱体の体積を適切な大きさとするなど、可 能な限り散乱体の自己吸収の影響を減らすよう配慮す ることが CT 装置のスペクトル測定に必要である.

散乱体の長さの違いで実効エネルギーと特性 X 線 のカウント数に違いが生じた.散乱体の長さが短いほ ど,低エネルギー成分の減弱が少なく,線質硬化の抑 えられたスペクトル測定が可能である.また本研究で 使用したソフトウェアでは,散乱体の長さが短いほ ど,特性 X 線のカウントをより多く測定することが でき,個々の光子情報を正確に測定できることがわ かった.

以上をまとめると、散乱体長1 cm であれば、線質 硬化が少なく低エネルギー成分の測定に優位であっ た.また、特性 X 線の光子数を最も効率よく測定で き、個々の光子情報を正確に測定可能である.

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり,実験を支援してくだ さった徳島大学病院診療支援部放射線技術部門の武市 直也技師と清水陸登技師に感謝いたします.

本研究の要旨は,平成26年10月4・5日,岡山で開 催された第10回中四国放射線医療技術フォーラム (CSFRT2014)で発表した.

ter for determining X-ray photon energy spectra. Phys Med Biol 1987; 32(5): 577-594.

- Maeda K, Matsumoto M, Taniguchi A. Compton-scattering measurement of diagnostic x-ray spectrum using highresolution Schottky CdTe detector. Med Phys 2005; 32 (6): 1542-1547.
- 7) 佐藤 斉, 荒薪佳加. X線 CT 装置の X線スペクトルと 線質の解析. 計測分科会誌 2008; 16(2): 36-39.
- 8) 西臺武弘. 放射線医学物理学(第三版). 東京:文光堂, 1993.
- 9) 大釜 昇. 診断領域 X 線の実効エネルギー測定. 日放技 学誌 2001; 57(5): 550-556.