

《原 著》

## Triple Energy Window 散乱線補正法における 収集エネルギーウィンドウ設定方法の一般化

高山 卓三\* 市原 隆\* 本村 信篤\* 尾川 浩一\*\*

**要旨** ガンマカメラのイメージングでは、RI が集積した位置情報と放出される  $\gamma$  線のエネルギー情報を持っている Primary photon のみを可能な限り多く捕らえて画像化すれば画質上では S/N を改善することが期待できる。そこで Primary photon を効率よく捕らえ、かつ収集エネルギーウィンドウ内に混入する散乱線を Triple Energy Window (TEW) 法で精度よく補正することが可能な収集エネルギーウィンドウ (幅と位置) の設定方法を提案する。提案する方法の評価はモンテカルロシミュレーションを用いて行い、TEW 法での散乱線除去の精度を検討した。モンテカルロシミュレーションの検証として、局所のエネルギースペクトラムを実測しシミュレーションと比較した結果、よく一致した。光電ピークが 1 本の  $^{99m}\text{Tc}$  では 20%、複数本の  $^{201}\text{Tl}$  では 47.3%、また今後シンチグラムに应用が期待される例えば、エネルギー分解能の高い半導体検出器では 9.8% が提案する方法から得られた収集エネルギーウィンドウである。また、これらのエネルギーウィンドウで TEW 法で散乱線補正を行うことで精度よく散乱線補正ができ、 $^{201}\text{Tl}$  では SPECT 画像のカウントが 20% 収集の場合より 2.09 倍増加した。

(核医学 35: 51-59, 1998)

### I. はじめに

近年モンテカルロ法によるシミュレーションにより、光電ピーク内に存在する散乱していない一次光子 (Scatter free photon; Primary photon) の分布、および散乱した光子 (散乱線) の分布をそれぞれ推定することが可能となった。この Primary photon は、RI が集積した位置情報と放出される  $\gamma$  線のエネルギー情報を持っていることから、これのみを可能な限り多く捕らえて画像化することで画質上では S/N を改善することが期待できる。

Primary photon を可能な限り多く捕らえるためには、収集エネルギーウィンドウを広く設定することで可能であるが、同時に収集エネルギーウィンドウ内に混入する散乱線も増加し、画質上では S/N が劣化する可能性がある。そこでわれわれは可能な限り多くの Primary photon を捕らえ、かつ収集エネルギーウィンドウ内に混入する散乱線を Triple Energy Window 法<sup>1,2)</sup> (TEW 法) にて精度よく補正することが可能なエネルギーウィンドウの位置を決定する方法を開発した。TEW 法の収集エネルギーウィンドウ設定方法は  $^{99m}\text{Tc}$  についてはシミュレーションで検討され、メインウィンドウとサブウィンドウを変化させて真の Primary photon のカウントプロファイルとの平均自乗誤差 (mean square error) が最小になる点を最適なウィンドウとして設定していた。 $^{201}\text{Tl}$  については同様にシミュレーションで検討されていたが<sup>3)</sup>  $^{99m}\text{Tc}$  と同様に光電ピークを 1 本と仮定して行っていた<sup>3)</sup>。

\* (株)東芝 医用機器・システム技術研究所

\*\* 法政大学工学部

受付: 9 年 6 月 23 日

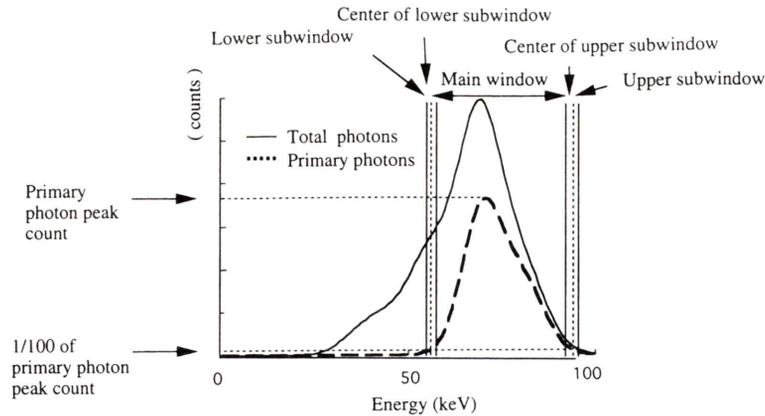
最終稿受付: 9 年 12 月 24 日

別刷請求先: 栃木県大田原市下石上 1385

(☎ 324-8550)

(株)東芝 医用機器・システム技術研究所

高山 卓三



**Fig. 1** Proposed method for determining the energy window width and position in the TEW scatter compensation method to collect as many of the primary photons as possible. The measured primary photons are more than 98% of all primary photons.

今回、提案する方法の有用性を検討するために光電ピークが1本の $^{99m}\text{Tc}$ 、および複数本のピークを仮定した $^{201}\text{Tl}$ のイメージングでのシミュレーションを行った。さらに今後シンチグラムに応用が期待される例えば、エネルギー分解能が高い半導体検出器におけるイメージングに対する有用性についても検討した。

## II. 理論と方法

### (A) 収集エネルギーウィンドウ設定方法

Primary photonを可能な限り多く収集し、かつTEW法にて散乱線を精度よく補正するためのエネルギーウィンドウ設定方法としてわれわれは以下の方法を提案する (Fig. 1)。

(1) Primary photonは散乱することなく検出器に入射するために、散乱体の形状によらずにエネルギースペクトラムの形が同じであることを利用する。核種により決まっている $\gamma$ 線のエネルギー、比率で $\gamma$ 線を発生させ、得られたエネルギースペクトラムに対して検出器のエネルギー分解能を考慮してガウス関数を用いて畳み込み積分することでPrimary photonのエネルギースペクトラムを求める。

(2) 得られたPrimary photonのエネルギースペクトラムのカウント値がピーク値の1/100になる

エネルギーをピークの左右両側で求める。これは、Primary photonの98%以上を測定できるエネルギーウィンドウ設定方法である。

(3) (2)で得られたエネルギーを中心にサブウィンドウを開く。

(4) (3)のサブウィンドウの間にメインウィンドウを開く。

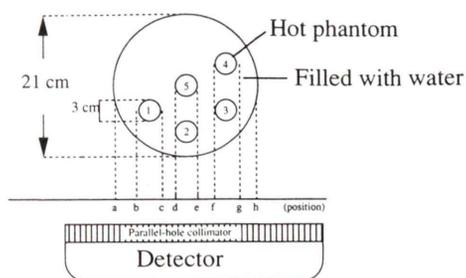
### (B) シミュレーション

3次元モンテカルロシミュレーションにはElectron Gamma Shower Version 4 (EGS4)<sup>4)</sup>を使用した。発生させた $^{201}\text{Tl}$ の $\gamma$ 線のエネルギーと発生比率は68.9 keV (25.51%), 70.8 keV (43.33%), 80.1 keV (14.99%), 82.6 keV (4.15%), 135.3 keV (2.49%), 167.4 keV (9.53%)<sup>5)</sup>とした。 $^{99m}\text{Tc}$ は140 keV (100%)とした。検出器のエネルギー分解能は12.6 keV ( $^{201}\text{Tl}$ ), 16.9 keV ( $^{99m}\text{Tc}$ ), また今後シンチグラムに応用が期待される半導体検出器でのエネルギー分解能を7.0 keV ( $^{99m}\text{Tc}$ )と仮定した。

ファントムは、外径21 cm、長さ20 cmの水で満たされたアクリル製の円柱ファントムの中に直径3 cm、長さ11 cmのアクリル製円柱ロッドを1本は中心に、他の4本は中心から7.5 cm円周上に60度間隔に配置したものである。それぞれのロッドに入れた $^{201}\text{Tl}$ または $^{99m}\text{Tc}$ の比放射能の割合を1:2:3:4:5とした (Fig. 2)。

エネルギー幅と範囲は  $^{99m}\text{Tc}$  は 1 keV ごと 20–200 keV,  $^{201}\text{Tl}$  は 20–100 keV までは 0.5 keV ごと, 100–200 keV までは 1 keV ごとで計算を行った。γ線の cut-off エネルギーを 20 keV に設定し, エネルギーが cut-off エネルギーになるまで散乱を行うように設定した。

シミュレーションではエネルギースペクトラムとプロジェクション画像を作成した。投影数は 0 度から 360 度まで 6 度間隔で 60 方向とした。発生させた γ線の数 は 1 投影方向当たり  $10^7$  カウント,  $5 \times 10^6$  カウント,  $10^6$  カウントの 3 種類で行った。収集画像は  $64 \times 64$  マトリックスで 1 ピ



**Fig. 2** The geometry of the detector and phantoms used in this study. Five inner rod phantoms filled with varying activities of RI were placed inside a water-filled cylindrical phantom. The ratios of the activity of RI were determined. A low energy high resolution collimator (LEHR) was used. The position of the count profile of the projection data was indicated.

クセル当たり 5 mm である。コリメータの開口径は  $\pm 2$  度 (低エネルギー高分解能コリメータ: LEHR) とした。検出器の収集効率は 100% とした。

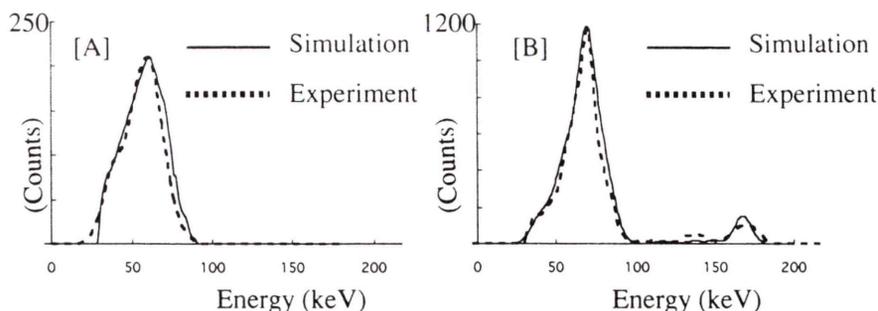
### (C) ファントム実験

モンテカルロシミュレーションの検証のため, 局所のエネルギースペクトラムを測定した。有効視野が  $40 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$  の角形検出器を搭載した東芝製デジタルガンマカメラ GCA-7200A/DI で LEHR コリメータを装着してスペクトラムスタティック収集<sup>6)</sup>を行った。使用したファントムはシミュレーションを行ったものと同じもので, RI は  $^{201}\text{Tl}$  のみで行った。エネルギー設定は 30 keV から 120 keV までを 1 keV 幅で 1 投影方向のみプロジェクション画像を収集した。エネルギースペクトラムデータは全有効視野の各ピクセル毎にすべて収集した。収集した時の検出器とファントムとの位置関係は Fig. 2 に示した。収集画像マトリックスサイズ  $128 \times 128$ , ピクセルサイズは 4.3 mm, 収集時間は 30 分であった。

### (D) 評価方法

#### (1) モンテカルロシミュレーションの検証

モンテカルロシミュレーションの結果を検証するために, ロッドの中に  $^{201}\text{Tl}$  を注入したファントム中の同じ投影方向での局所のエネルギースペクトラムの形状を実測データとモンテカルロシミュレーションによるデータ間で比較した。比較



**Fig. 3** Comparison of simulated and measured energy spectra. [A] shows the energy spectrum measured at the c–d position shown in Fig. 2. Only scattered photons exist at that position. [B] shows the energy spectrum measured at the d–e position shown in Fig. 2. Primary photons and scattered photons exist at that position.

した局所のスペクトラムは Fig. 2 で示した Primary photon が存在しない場所である c-d の間、および Primary photon が存在する場所である d-e の間で測定されたものである。測定値のエネルギースペクトラムは 71 keV と 167 keV のピークを用いてエネルギーキャリブレーションを行った後、71 keV のピークの最大値で規格化した。

(2) 収集エネルギーウィンドウの最適化評価  
提案する収集エネルギーウィンドウが最適であることを示すために  $^{201}\text{Tl}$  のシミュレーションにおける投影データを用いて真の Primary photon と TEW 法で推定した Primary photon との平均自乗誤差による評価を行った。評価した収集エネルギーウィンドウは 20% から 50% まで、サブウィンドウは 7% で固定値とした。

(3) 収集エネルギーウィンドウの S/N 評価  
提案する収集エネルギーウィンドウで収集する場合と従来の 20% ウィンドウで収集する場合の S/N を評価する。評価は  $^{201}\text{Tl}$  を用いたシミュレーションで行い、発生させる Photon の数を  $10^6$  カウントから  $10^7$  カウントまで変化させて SPECT カウントの標準偏差を求めた。関心領域はホットロッドファントムが存在する場所に直径 3 cm の円形で設定した。

(4) 収集エネルギーウィンドウのプロジェクション画像での評価

われわれが提案するエネルギーウィンドウで収集した場合の、TEW 法での散乱線除去効果をシミュレーションされたプロジェクション画像を用いて評価した。評価はすべてモンテカルロシミュレーションで作成した真の Primary photon と TEW 法で推定した Primary photon の投影データに対して、カウントプロファイルカーブを作成し比較することにより行った。

また、提案する方法で収集エネルギーウィンドウを設定した場合と従来の方法とを比較するために  $^{201}\text{Tl}$  を中心が 71 keV で Main Window 20%, Sub Window 7% で収集した場合と比較した。

$^{201}\text{Tl}$  に対しては収集エネルギーウィンドウ幅を 20%, 30%, 40%, 47.3%, 50% と変化させた時の

真の Primary photon と TEW 法で推定した Primary photon の投影データの平均自乗誤差を計算した。

(5) 収集エネルギーウィンドウの SPECT 画像での評価

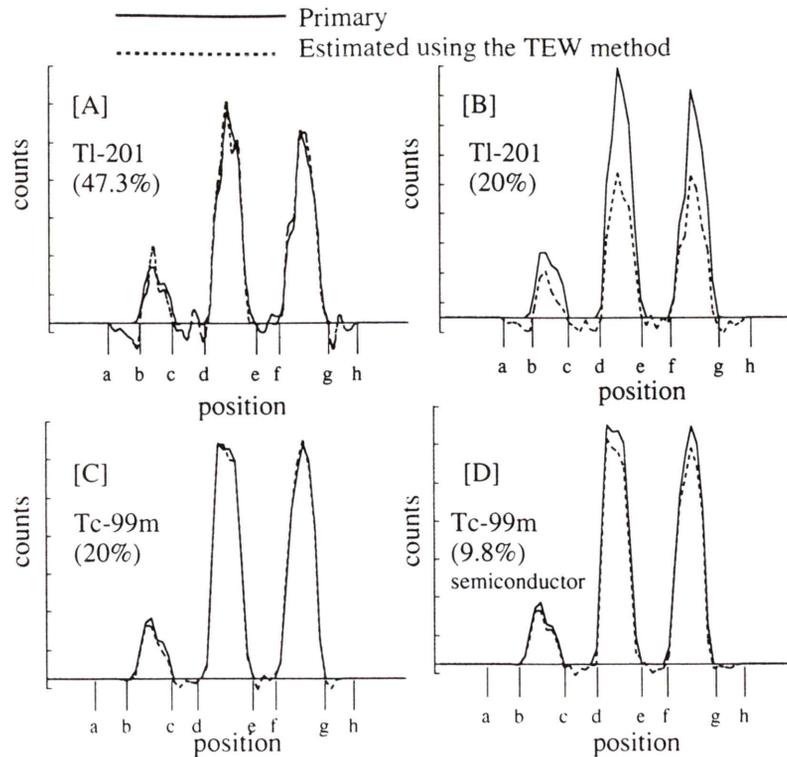
われわれが提案するエネルギーウィンドウで収集した場合の、TEW 法での散乱線除去効果をモンテカルロシミュレーションにより得られた SPECT 画像を用いて評価した。評価はモンテカルロシミュレーションで作成した真の Primary photon と TEW 法で推定した Primary photon のプロジェクション画像を再構成し、不均一体逐次近似減弱補正<sup>7)</sup>を行った後にそれぞれをロード内の SPECT カウントで比較した。減弱補正で使用した減弱係数マップは直径 21 cm の円柱内をすべて水とみなし作成した。水の減弱係数は  $^{201}\text{Tl}$  では  $0.187\text{ cm}^{-1}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  では  $0.15\text{ cm}^{-1}$  を使用した。

また、提案する方法で収集エネルギーウィンドウを設定した場合と従来の方法とを比較するために  $^{201}\text{Tl}$  を中心が 71 keV で Main Window 20%, Sub Window 7% で収集した場合と比較した。

### III. 結 果

#### (1) 収集エネルギーウィンドウの決定

提案する方法で最適な収集エネルギーウィンドウを求めた。 $^{201}\text{Tl}$ 、および  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  でのシミュレーションで使用した Sub Window の幅は 7% で固定にした。また半導体検出器を用いて  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  を収集する場合の Sub Window の幅は 3% とした。 $^{201}\text{Tl}$  での収集エネルギーウィンドウの値は中心が 74 keV で Main Window 47.3% (56.5 keV–91.5 keV), Sub Window 7% (Lower sub window: 51.3 keV–56.5 keV / Upper sub window: 91.5 keV–96.7 keV) となった。同様に  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  では、中心が 140 keV で Main Window 20% (126.0 keV–154.0 keV), Sub Window 7% (Lower sub window: 116.2 keV–126.0 keV / Upper sub window: 154.0 keV–163.8 keV) となった。また半導体検出器を用いて  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  を収集することを仮定した場合は、中心が 140 keV で Main Window 9.8% (133.1 keV–146.9 keV), Sub Window 3% (Lower sub window: 128.9 keV–133.1 keV / Upper



**Fig. 4** Comparison of the count profile of the projection data for true primary photons and the projection data for primary photons estimated using the TEW scatter compensation method. The solid line is the projection data for true primary photons. The dotted line is the projection data for primary photons estimated using the TEW scatter compensation method. The positions of (a) to (h) in this figure are shown in Fig. 2. [A] shows the projection data for  $^{201}\text{Tl}$ , and the width of the main window is 47.3% (proposed method). [B] shows the projection data for  $^{201}\text{Tl}$ , and the width of the main window is 20.0% (conventional method). The energy resolution of the detector is 12.6 keV (FWHM). [C] shows the projection data for  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and the width of the main window is 20.0%. The energy resolution of the detector is 16.9 keV (FWHM). [D] shows the projection data for  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and the width of the main window is 9.8%. The energy resolution of the detector is 7.0 keV (FWHM).

sub window: 146.9 keV–151.1 keV) となった。

## (2) モンテカルロシミュレーションの検証

Primary photon が存在しない場所である c–d の間でのエネルギースペクトラムを Fig. 3 [A] に示した。Primary photon が存在する場所である d–e の間でのエネルギースペクトラムを Fig. 3 [B] に示した。

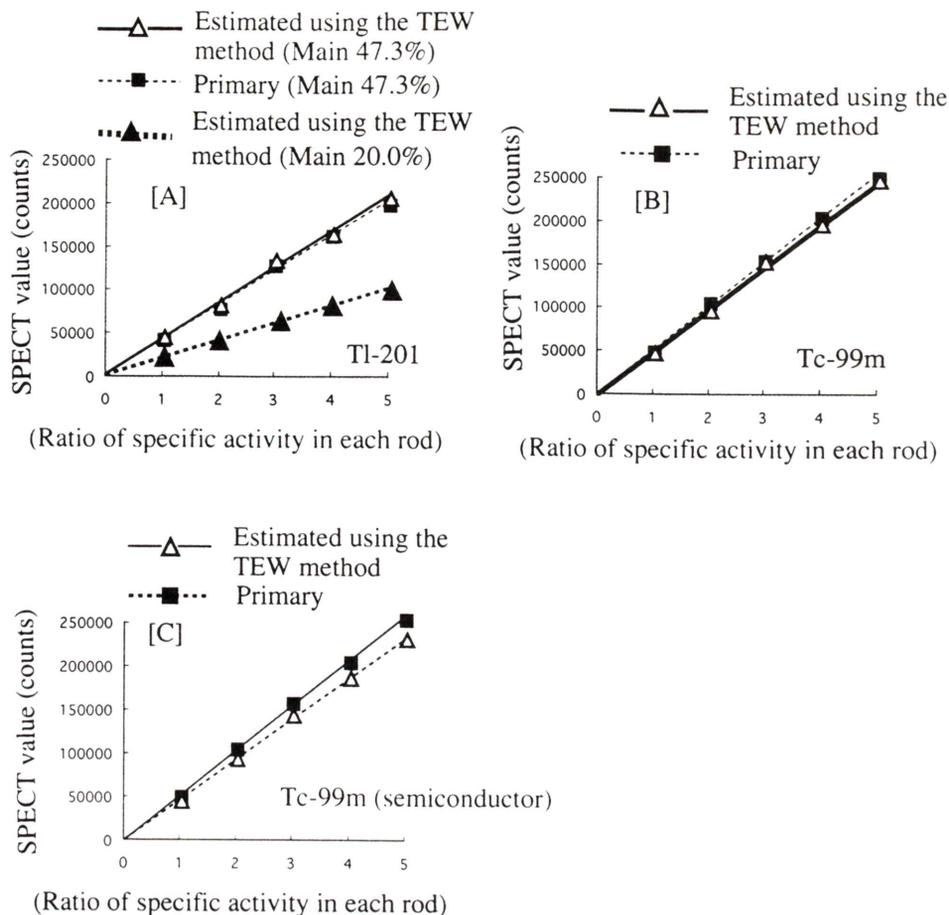
実測値とシミュレーションで得られたスペクトラムの形がほぼ一致した。これより今回使用した

モンテカルロシミュレーションの正当性が検証された。

## (3) 収集エネルギーウィンドウの最適化評価

Fig. 6 に得られた結果を示す。メインウィンドウが提案する 47.3% で平均自乗誤差が最小値を得ることが示された。

これにより  $^{201}\text{Tl}$  において提案する収集エネルギーウィンドウが最適であることが示された。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  においてはわれわれが提案するエネルギー



**Fig. 5** Comparison of the SPECT value of true primary photons and the SPECT value of primary photons estimated using the TEW scatter compensation method. The solid line is the SPECT value of true primary photons. The dotted line is the SPECT value of primary photons estimated using the TEW scatter compensation method. [A] shows the simulated data for  $^{201}\text{Tl}$ , and the widths of the main windows are 47.3% and 20.0%. The energy resolution of the detector is 12.6 keV (FWHM). [B] shows the simulated data for  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and the width of the main window is 20.0%. The energy resolution of the detector is 16.9 keV (FWHM). [C] shows the simulated data for  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and the width of the main window is 9.8%. The energy resolution of the detector is 7.0 keV (FWHM).

ウィンドウと尾川ら<sup>3)</sup>により最適の収集エネルギーウィンドウであることが示されている 20% が一致した。

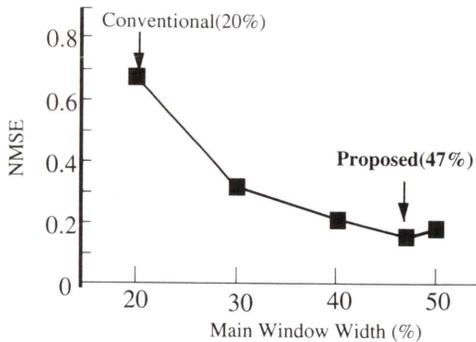
#### (4) 収集エネルギーウィンドウでの S/N 評価

Fig. 7 に得られた結果を示す。提案する 47.3% ウィンドウが従来の 20% ウィンドウよりも S/N

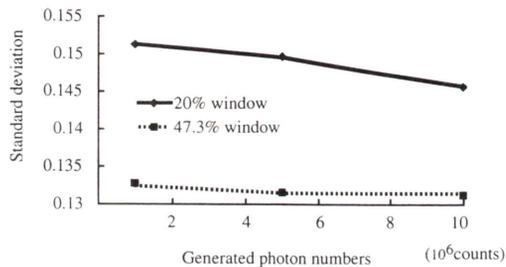
がすべてのカウントで向上していることが示された。

#### (5) 収集エネルギーウィンドウのプロジェクション画像での評価

各収集で得られたプロジェクション画像のカウントプロファイルカーブを Fig. 4 に示す。提案す



**Fig. 6** The normalized mean square error (NMSE) of the projection data for  $^{201}\text{Tl}$  between the true primary photons and those estimated by the TEW method.



**Fig. 7** The standard deviation of the SPECT values for  $^{201}\text{Tl}$  using the TEW method. The solid line is the standard deviation using the 20% window. The dotted line is the standard deviation using the 47.3% window.

る方法で収集エネルギーウィンドウを決めた場合、真の Primary photon のカウントプロファイルカーブと TEW 法で推定した Primary photon のカウントプロファイルカーブは Primary photon が存在する場所でのカウントの総和と比較すると、 $^{201}\text{Tl}$  で誤差 0.3%、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  で誤差 2.0%、半導体検出器で誤差 10% で一致した。また、従来の方法である  $^{201}\text{Tl}$  を中心が 71 keV で Main Window 20%、Sub Window 7% で収集した場合は、TEW 法で推定した Primary photon は約 40% 過小評価している。またわれわれが提案する中心が 74 keV で Main Window 47.3%、Sub Window 7% での結果と比較するとプロジェクション画像のカウント値が 2.25 倍になった。

#### (6) 収集エネルギーウィンドウの SPECT 画像での評価

SPECT 画像の長軸方向をすべて加算した画像のホットロッドファントムに設定した関心領域 (ROI) 内のカウントを Fig. 5 に示す。各ロッドでの平均値では  $^{201}\text{Tl}$  で 6.1%、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  で 4.0%、半導体検出器で 8.6% の誤差で TEW 法による推定と真の Primary photon による値が一致した。

また、 $^{201}\text{Tl}$  を中心が 71 keV で Main Window 20%、Sub Window 7% で収集した場合と今回われわれが提案した方法で決めた中心が 74 keV で Main Window 47.3%、Sub Window 7% での結果と比較すると、TEW 散乱線補正後の SPECT 画像のカウント値が 2.09 倍になった。

#### IV. 考 察

今回の検討により従来、TEW 法のために設定されていた Main Window 20%、Sub Window 7%、または Main Window 24%、Sub Window 3% のエネルギーウィンドウ位置と範囲<sup>2,6)</sup> (以下、従来法) は、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  に対して収集条件が最適のものであることが示された。一方  $^{201}\text{Tl}$  に対してはメインウィンドウ内の散乱成分を過大評価する結果になった。しかし、その場合でも、定量性が保証されていることは Fig. 5 より確認された。すなわち Primary photon が存在しないところに対しては散乱線を精度よく推定しており過補正がおきていない。しかし Primary photon が存在する場所で Primary photon を 60% しか計測できていなかったことがわかった。ここで示した定量性とは体内の RI の比放射能を同定することであり、たとえ Primary photon を 60% しか計測できていなかったとしても測定結果が、測定する RI の比放射能に比例することで定量性が保証されていると考える。

Primary photon を効率よく収集可能な本方法では、従来の方法と比較して  $^{201}\text{Tl}$  では Fig. 2 に示した検出器の位置での投影データのカウント値が平均 2.25 倍になった。この時ウィンドウを広くすることで収集ウィンドウ内に混入する散乱線が増加するが、精度よく TEW 法により散乱線補正さ

れていることから  $^{201}\text{Tl}$  の画質が向上することが推測される。

さらに検出器のエネルギー分解能が向上しても収集ウィンドウ内に混入する散乱線は存在し、これを精度よく補正することは定量化に必須であると考えられることより、半導体検出器のようなエネルギー分解能が高い検出器で収集した場合も Primary photon を効率よく捉え、かつ TEW 法で精度よく散乱線補正ができることが示された。以上より提案する方法は汎用的に適用できることが示唆された。

また、古嶋ら<sup>8)</sup>は実験により 73 keV に中心を持つ 34 keV 幅のメインウィンドウと 5.1 keV のサブウィンドウで散乱線除去計数を 0.55 を用いて散乱線補正を行うことで良好な結果を得たとの報告をしているが、ほぼ同じ結果をシミュレーションを使って得ることができた。

## V. 結 論

核種や検出器のエネルギー分解能によらず、可能な限り多くの Primary photon を収集して、かつ TEW 法で精度よく散乱線補正を行うための収集エネルギーウィンドウ設定方法を提案した。この設定方法で収集を行うことにより、画質上では S/N を改善することが期待できることを示した。またこの方法は、今後シンチグラムに應用が期待される。たとえば、エネルギー分解能が高い半導体検出器におけるイメージングのための収集エネルギーウィンドウの設定(幅と位置)条件としても

有効であることが示された。

## 文 献

- 1) Ogawa K, Harata H, Ichihara T, Kubo A, Hashimoto S: A Practical Method for Position Dependent Compton-Scatter Correction in Single Photon Emission CT. *IEEE Trans Med Imag* **10**: 408-412, 1991
- 2) Ichihara T, Ogawa K, Motomura N, Kubo A, Hashimoto S: Compton-scatter compensation using the triple energy window method for single and dual isotope SPECT. *J Nucl Med* **34**: 2216-2221, 1993
- 3) Ogawa K, Ichihara T, Kubo A: Accurate scatter correction in single photon emission CT. *Ann Nucl Med* **7**: 145-150, 1994
- 4) Nelson WR, Hirayama H, Rogers DWO: The EGS4 Code System. SLAC Report-265, 1985
- 5) Jia Li, Benjamin MW, Welch TA, Frey EC, Gullberg GT: Energy Window Optimization in Simultaneous Technetium-99m TCT and Thallium-201 SPECT Data Acquisition. *IEEE Trans Nucl Sci* **42**: 1207-1213, 1995
- 6) Ichihara T, Motomura N, Ogawa K, Hasegawa H, Hashimoto J, Kubo A: Evaluation of SPECT quantification of simultaneous emission and transmission imaging of the brain using a multidetector SPET system with the TEW scatter compensation method and fan-beam collimation. *Eur J Nucl Med* **23**: 1292-1299, 1996
- 7) 尾川浩一, 高木八重子, 久保敦司, 橋本省三, 三宮敏和, 岡野義幸, 他:  $\gamma$ 線による透過型 CT データを用いたシングルフォトン ECT における吸収補正. *核医学* **22**: 477-490, 1985
- 8) 小嶋昭博, 松本政典, 大山洋一, 富口静二, 吉良光子, 高橋睦正:  $^{201}\text{Tl}$  イメージングにおける off-peak triple energy window 収集による散乱線補正. *核医学* **34**: 789-796, 1997

## Summary

### Determination of Energy Window Width and Position for the Triple Energy Window (TEW) Scatter Compensation Method

Takuzo TAKAYAMA\*, Takashi ICHIHARA\*, Nobutoku MOTOMURA\* and Koichi OGAWA\*\*

*\*Medical Engineering Laboratory, Toshiba Corporation*

*\*\*Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Hosei University*

Since primary photons can provide information concerning the position of radioisotope (RI) accumulation and the energy of the photons, it would seem reasonable to vary the position and width of the energy window depending on the type of RI and the energy resolution of the detector to collect as many of the primary photons as possible. We propose a method for determining energy window width and position for scintigraphic imaging to collect as many of the primary photons as possible, and studied the influence on the Triple Energy Window (TEW) scatter compensation method of setting such energy window levels for

$^{99m}\text{Tc}$  (single photopeak) and  $^{201}\text{Tl}$  (multiple photopeaks) using detector with different energy resolution through simulation. The Monte Carlo simulations were verified by comparing the regional energy spectrum at the phantom obtained from the simulation against experimental measurements.

The energy window with our proposed method for  $^{99m}\text{Tc}$  is 20% and 47.3% for  $^{201}\text{Tl}$  using gamma camera, and 9.8% for  $^{99m}\text{Tc}$  using a semiconductor detector with a theorized energy resolution of 7.0 keV.

**Key words:** Energy window, Scatter, Imaging, Monte Carlo, SPECT.