

《ノート》

SPECT 装置の性能試験条件に関する検討

Considerations of Quality Assurance Methods in Single Photon Emission CT

野上 修二* 尾川 浩一** 福士 政広*** 鈴木 謙三*

Shuji NOGAMI*, Koichi OGAWA**, Masahiro FUKUSHI*** and Kenzo SUZUKI*

*Department of Radiology, Tokyo Metropolitan Komagome Hospital, Tokyo

**Department of Radiology, School of Medicine, Keio University, Tokyo

***Department of Radiological Technology, Tokyo Metropolitan College of Allied Medical Science, Tokyo

I. はじめに

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT) の臨床評価が確立しつつある現在において、SPECT 装置の品質管理は、診断上有用な画像を定常的に得る上で重要である。このための試験条件として、日本アイソトープ協会医学・薬学部会核医学イメージング規格化専門委員会より、「Single Photon Emission Computed Tomography 装置の性能試験条件¹⁾」(以下、試験条件と呼ぶ)が提示されている。しかしこの試験条件では、性能評価のための測定法および評価法について詳細には述べられていないため、実際に病院等の現場でこれに従った性能試験を実施する際にさまざまな問題点に直面する。本論文は、試験条件のうち、SPECT の画質評価の中の空間分解能と不均一性の項目に関して、試験結果に影響を与えるパラメータについて調査したものである。また、画質評価の対象となる SPECT 画像は、ガンマカメラの感度の不均一性、ガンマ線のファントム内での吸収、コンプトン散乱などによって画質劣化が生ず

る。この結果、再構成画像にアーチファクトや濃度歪あるいはボケを生じ、性能評価を行う上で誤差の原因となる。そこで本論文では、上記の因子に対する補正を実施した場合、性能試験結果にどのような影響を及ぼすのかについても言及する。

II. 方法および結果

使用した SPECT システムは、東芝製双頭型ガンマカメラ (GCA-90A-E2) とそれに接続しているデータ処理用コンピュータ (GMS-55A) より構成されたシステムである。

本論文では、試験条件の項目に挙げられているものの中で、画質の評価を行う際、最も重要である空間分解能の測定 (Point Spread Function [PSF] および Cold Spot 検出能) と不均一性の測定の 2 点に絞り、^{99m}Tc 線源を用いたファントム実験を行った。全体にわたる測定条件として、検出器の回転半径を 25 cm、エネルギーウインドウ幅を 140 keV \pm 20%、コリメータを低エネルギー用平行多孔型高分解能コリメータとした。SPECT 画像のスライス厚は一画素とし、画像再生にはフィルターバックプロジェクション法を用い、Shepp & Logan のコンボリューションフィルター²⁾を使用した。散乱補正は行わないものとした。

Key words: Single photon emission CT, Quality assurance, Spatial resolution, Uniformity, Evaluation method.

* 東京都立駒込病院放射線診療科

** 慶應義塾大学医学部放射線科学教室

*** 東京都立医療技術短期大学診療放射線学科

受付: 62年2月26日

最終稿受付: 62年2月26日

別刷請求先: 東京都文京区本駒込 3-18-22 (☎ 113)

東京都立駒込病院放射線診療科

野上 修二

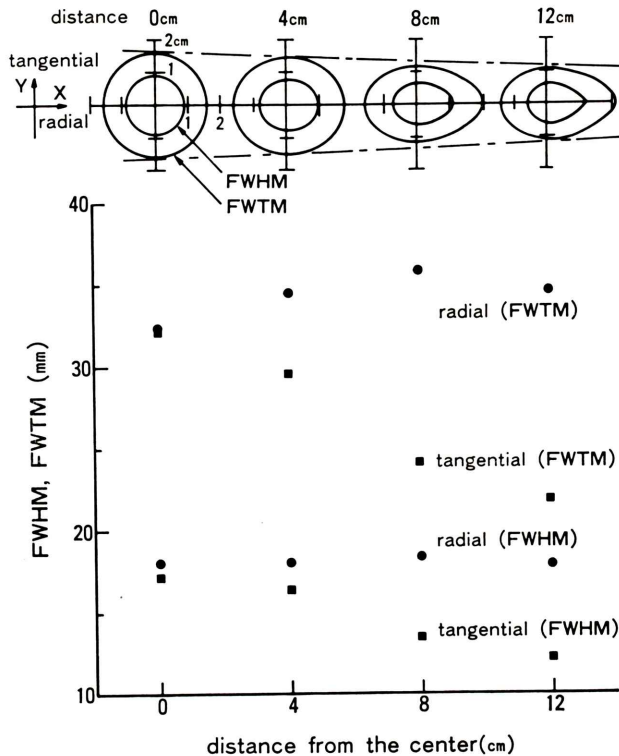


Fig. 1 FWHM and FWTM in radial and tangential direction.

1. 空間分解能の測定 (PSF)

1) 半径・接線方向の FWHM, FWTM

線線源のファントム内での位置, すなわち検出器から線源までの距離が, 半径方向と接線方向の FWHM, FWTM に与える影響について調査した. ファントムは, 直径 30 cm, 厚さ 5 cm の円柱状の分解能測定用ファントム (安西総業株 AZ-617) と線線源 (内径 2 mm) を使用した. 投影データに相当するプレーナ画像 (128×128 画素) は, 4 度ごとに 360 度まで 90 方向収集し, 横断 SPECT 像を得てその PSF の半値幅 (FWHM) と 10 分の 1 値幅 (FWTM) を測定した. 1 方向当たりの収集時間は, 1 画素の最高カウント数が 200 カウント以上になるように設定した. 測定点はファントムの中心, および半径 4, 8, 12 cm の位置とした. 吸収補正と均一性補正は行わなかった. 実験は単一の線源を用い, この位置のみを変えて行った. プロフィールカーブの設定幅は, PSF の FWHM に

相当する幅でとった. 線線源の内径およびプロフィールカーブの設定幅が空間分解能の測定精度に及ぼす影響についてはそれぞれ 1-2) および 1-3) で, 散乱線の影響については 1-4) で論ずる. 1-2) 以下についても特記されていないものは, 以上の条件で実験を行った.

Figure 1 は, ファントム内各測定点における半径方向 (X 軸) と接線方向 (Y 軸) の FWHM, FWTM を用いて, PSF の概形を示したものである. ここで X, Y 軸の交点は PSF の最大値である. 接線方向の FWHM と FWTM は, 線線源の位置が中心から離れるに従って大きく減少した. これに対し, 半径方向の FWHM は変化せず, FWTM はファントムの外周に近づくほどわずかに増加傾向を示した. FWTM に関するこれらの結果は, ファントム内部における散乱線量と関連すると思われる. また PSF は, 半径方向に関して非対称となることわかる. これはコリメータの開口特

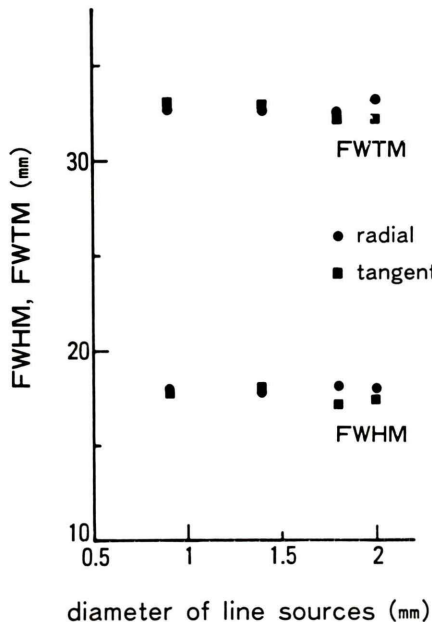


Fig. 2 Diameter of line sources vs. FWHM and FWTM.

性によるものと考えられる。なぜならば、コリメータの開口特性に起因するボケは、中心部で等方的であり、回転中心からの距離が増加するに従って非等方的になるからである³⁾。

2) 線線源の内径

試験条件では、線線源の内径は 1 mm 以下としているが、この内径の大きさが FWHM, FWTM に与える影響について調査した。測定は円柱ファントムの中心に内径の異なる 4 種類の線線源 (内径 0.9, 1.4, 1.8, 2.0 mm) を順次挿入した。Fig. 2 に FWHM, FWTM を求めた結果を示す。線線源の内径が 1 mm 以上でも FWHM, FWTM の測定結果に影響を与えないことがわかる。これはプラナー画像の 1 画素の大きさが 4×4 mm であること、ナイキスト周波数を考えれば当然である。したがって、線線源の内径として 1 mm にこだわる必要がなく、画像再生に使用するプラナー画像の画素の大きさの半分以内であり、かつ散乱線の影響が小さい範囲で選択すれば、実際の測定にはさしつかえないと考えられる。

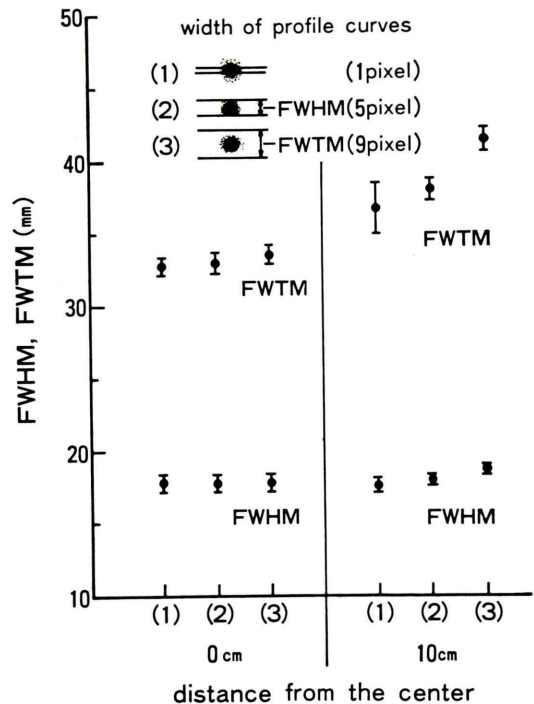


Fig. 3 Width of profile curves vs. FWHM and FWTM.

3) 評価法(プロフィールカーブ)

PSF より FWHM, FWTM を求める際のプロフィールカーブを、PSF の最大値を含む直線上とした場合と、PSF の拡がり considering 設定した場合とでは、測定結果に差が生ずると考えられる。そこでこのプロフィールカーブの設定幅を FWHM, FWTM に与える影響について調査した。この設定幅を、(1) 最大値を含む直線と、(2) FWHM に相当する幅と、(3) FWTM に相当する幅と、と定義し、おのおの得られたプロフィールカーブより FWHM, FWTM を求めた結果を Fig. 3 に示す。測定点はファントム中心と中心より 10 cm の位置である。中心では FWHM, FWTM とともに設定幅に依存していない。これは PSF の形状が等方的であり、その拡がりも小さいためと考えられる。10 cm の位置では設定幅を広げるとこれらの値が増加する傾向があり、また (1) の FWTM には大きな変動が表われているのがわかる。これは設定幅を広げるにより、

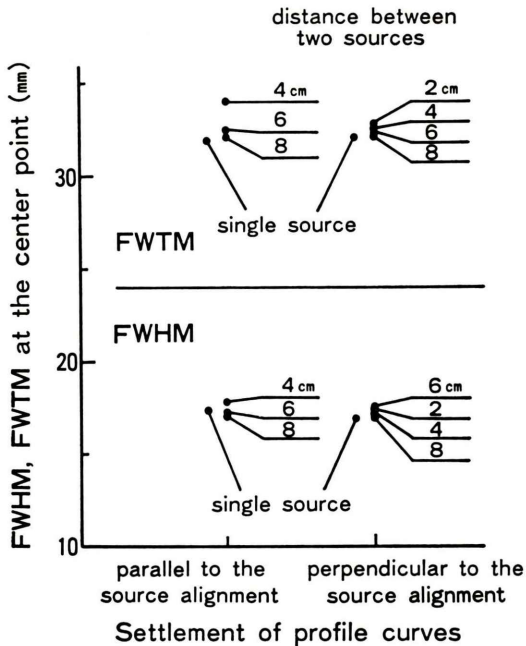


Fig. 4 Scatter effects of multiple line sources.

PSF の散乱成分をより多く含むため、FWHM, FWTM が増加したためと考えられる。また (1) の場合で変動が大きくなった原因は、PSF の最大値がその中心からずれることがあるためと考えられる。よってプロフィールカーブの設定幅を、FWHM 程度にするべきであると思われる。

4) 線源の配置

試験条件では、空間分解能は検出器からの距離によって異なるため、ファントム内の数点について FWHM, FWTM を求めるとされている。またファントム内に複数の線線源を挿入して、数か所での FWHM, FWTM を一度に求めてもよいとされている。ところが、散乱線成分を考えると、PSF の FWTM 程度の距離に他の線源がある場合には、FWTM に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、2つの線線源間の距離 (2, 4, 6, 8 cm) の影響について調査した。

Figure 4 は、ファントムの中心位置における PSF について、2つの線線源が並ぶ方向と、それに対して垂直方向の FWHM, FWTM を求めたものである。線線源間距離が 4 cm のとき、2線源が

並ぶ方向の FWTM がわずかに増加することがわかる。単一線源の FWTM が約 30 mmであることを考えると、PSF の散乱線成分が重なり、FWTM を増加させたものと考えられる。複数の線線源を用いる測定では、配列する線線源間の距離に関して注意が必要であることを示唆する結果である。

2. 空間分解能 (Cold spot)

1) 評価方法

試験条件では、視覚的な評価だけでは主観的な評価となるため、cold spot の中心を通るプロフィールカーブの FWHM で空間分解能を評価としている。しかし、プロフィールカーブにおける cold spot 部の凹部分の深さに差が生じている場合でも、FWHM が同一になることがあり、このような場合では分解能の差を評価することは困難である。そこで、コントラスト値を用いる評価方法について検討した。

実験は直径 16 cm, 厚さ 13 cm のアクリル製の円筒内に、直径 5, 10, 20, 30, 50 mm の内部に水を満たした小円筒をもつ分解能測定用ファントムに、 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 溶液を 3 mCi 満たして行った。プレーン画像 (64×64 画素) は、6度ごとに 360度まで 60 方向収集した。均一性補正と吸収補正は行わなかった。1 方向当たりの収集時間は、1 画素当たりの最高カウント数が 1,500 カウント以上になるように設定した。このカウントの設定理由については、2-2) において論ずる。

Figure 5 は、検出器回転半径 15, 20, 25, 30 cm における分解能を、図に示した定義によるコントラスト法と、FWHM 法とで比較したものである。検出器の回転半径を増加させた場合の分解能の低下を、FWHM では明確に表わすことが困難であるのがわかる。これに対しコントラスト値を用いることで明らかな分解能の低下が示されている。よって cold spot 検出能による空間分解能の評価に、コントラスト値を用いた方法も加えるべきであると考えられる。

2) 収集カウント数

試験条件では、cold spot 検出能により分解能を

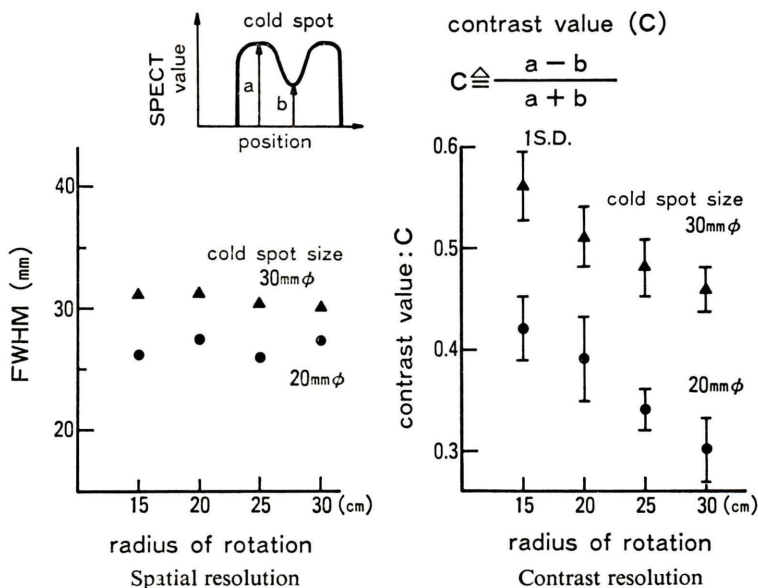


Fig. 5 Spatial resolution vs. contrast resolution.

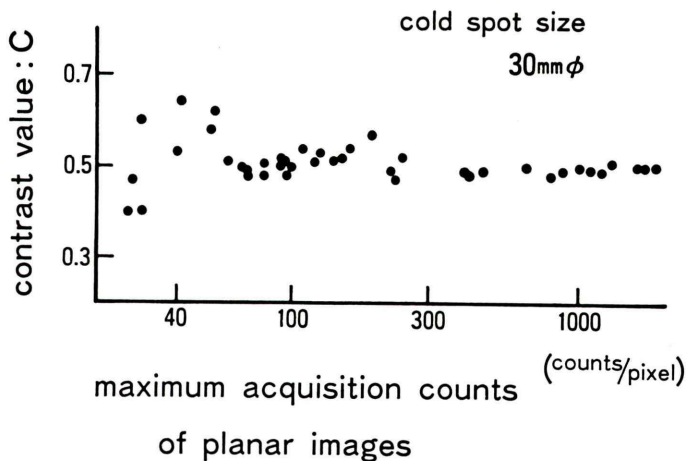


Fig. 6 Effects of statistical noise. (cold spot)

測定するときの収集カウント数について示されていない。そこで、収集カウント数による統計変動成分の影響について調査した。測定は(2-1)と同様に行い、プラナー画像の収集時間を1画素当たりの最高カウント数で、10カウントから1,800カウントまで40段階変化させて収集を行った。

Figure 6は、内径30mmのcold spot中心を含む直線上(幅:1画素)のプロフィールカーブより

コントラスト値を求め、収集時の最高カウント数と分解能との関係を示したものである。300カウント程度まではコントラスト値が変動するが、カウント数を増加させることにより一定値に近づくことがわかる。よってcold spot検出能を評価する際には、1画素当たり300カウント程度以上必要であると考えられる。

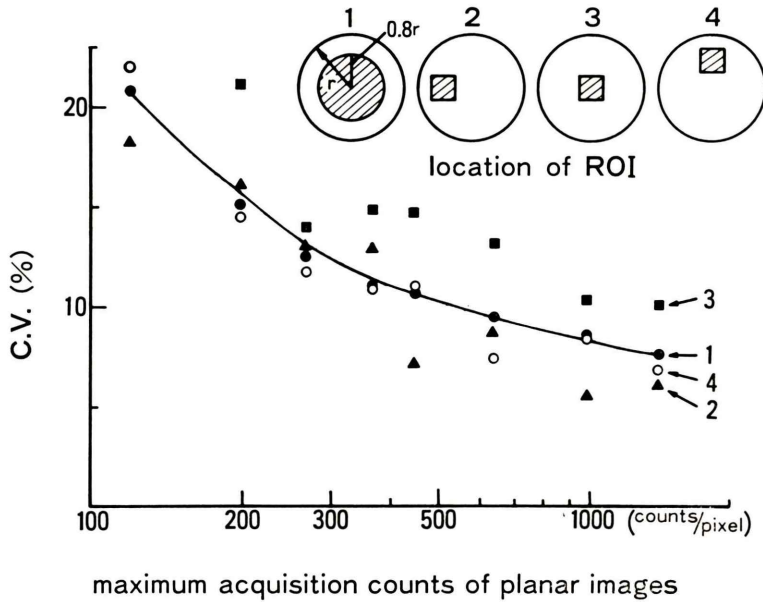


Fig. 7 Effects of statistical noise. (uniformity)

3. 不均一性

1) 評価方法

試験条件では、SPECT 像の中央部および周辺部数か所に 5×5 cm 程度の矩形 ROI を設定し、その各部における変動係数 (C.V.) を求めて評価するとされている。この ROI の設定が、不均一性評価に与える影響について調査した。

ファントムは、直径 30 cm、厚さ 13 cm のアクリル製の円柱ファントムで、内部に $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 溶液 (30 mCi) を満たしたものを使用した。プラナー画像 (64×64 画素) は、6 度ごとに 360 度まで 60 方向収集した。不均一性の評価においては、統計変動成分も同時に考慮する必要があるので、収集カウント数は、1 画素当たりの最高カウント数で 75 カウントから 1,800 カウントまで 11 段階変化させ、この影響についても同時に調査した。再構成画像には、吸収補正 ($\mu = 0.08 \text{ cm}^{-1}$) を施してある。

Figure 7 は収集カウント数と不均一性との関係を、ROI の設定位置をパラメータとして、その変動係数で示したものである。ROI 1 はファントムの半径の約 80% の ROI であり、ROI 2, 3, 4 は

試験条件に従った ROI である。ROI 1 は収集カウント数の増加に対して順次変動係数が低下しているが、ROI 2, 3, 4 では不規則に変動しているのがわかる。これは、統計変動とガンマカメラの不均一性による画像劣化が影響していると考えられる。統計変動による画像劣化は再構成画像全体に生ずるブロック状のノイズパターンであり⁴⁾、不均一性によるものは回転中心に同心円上のアーチファクトとして生じる⁵⁾。ROI 1 の変動係数は、同心円状のアーチファクトによる劣化成分の平均値と統計変動による劣化成分によって構成される。このうち不均一性による画像劣化は、収集カウント数とは無関係であると考えられ、収集カウント数を増加させることにより統計変動成分が減少し、変動係数が順次低下したものと考えられる。ROI 2, 3, 4 の変動係数について考えると、統計変動成分は SPECT 画像の位置に依存しないので、本来ならば同一の変動係数となるはずである。しかしながら、リング型のアーチファクトは位置に依存したものであるために、このように ROI 2, 3, 4 の変動係数がばらついたものと考えられる。したがって、ROI 1 は統計変動による画像劣化の評価

に、ROI 2, 3, 4 はガンマカメラの不均一性による画像劣化の評価に適していると考えられる。

III. 考 察

1. 性能試験を行う際の留意点

1) PSF による分解能評価

今回使用したファントムは、線線源を円柱ファントムの外部から挿入できる構造になっている。このため、ファントムを固定したまま一つの線線源を使用して、実験系を固定したままファントム内数点についての測定が可能であった。これは、複数の線線源を用いて実験する場合に生じる線線源の内径、放射能等の線源の違いによる影響を避けるという意味で重要であった。この結果、ファントム内の各測定点と検出器との距離による半径方向の FWHM, FWTM の僅かな違いが検出できたと考えられる。またこのファントムは、一度に複数の位置について測定が可能となっているが、散乱線の影響を考えると、線源間距離は PSF の FWTM 以上とすべきであり、PSF の形状について検討するためには、線源位置に対する配慮が必要であると思われる。

線線源の内径は、今回の実験(画素:4×4 mm)では、2 mm 以下ならば測定結果に影響を与えないことが確認された。より太い線源は、収集カウント値を大きくすることができ、結果的に統計変動成分を低下させることができるので効率的である。

プロフィールカーブの作成に当たっては、PSF の FWHM に相当する幅を持たせることにより、測定誤差の少ない結果が得られることが示された。また設定方向により FWHM, FWTM に大きな差が生じるため、必ず半径方向と接線方向についての測定を行うべきであると考えられる。

2) Cold spot による分解能評価

評価方法としてコントラスト法を使用することにより、僅かな cold spot 検出能の違いを明らかにすることができた。また、このコントラスト値を変動させる因子として、cold spot の内径、cold spot 内の物質(水、空気)、数、配置さらにはプロフィールカーブの設定方向等が考えられる。今

回使用したファントムでは cold spot 径 2 cm と 3 cm でコントラスト値で 0.1, 水と空気では 0.15, プロフィールカーブの設定方向で 0.1 の差が生じた。よって性能評価をする場合、これらの条件を明確にする必要があると考える。

3) 不均一性

不均一性に影響を与える因子として、投影データに含まれる統計変動成分、ベッド等、ファントムを固定するための支持台によるガンマ線の吸収、ファントム内での吸収、散乱、ガンマカメラの感度不均一性等が考えられる。統計変動成分については、II-3-1) に示したように、収集カウント数との関係を知る必要がある。実験では、ファントムの支持台による吸収を避けるために、内径が等しい長さ 80 cm の円筒の一端に測定用ファントムを固定し、もう一端をベッドに固定することでカメラの視野から支持台を外している。

2. 性能評価と画質劣化補正

性能評価を行う上で、誤差の原因となっている画質劣化因子、すなわち、コンプトン散乱、ガンマ線のファントム内での吸収、ガンマカメラの感度の不均一性に関して、以下に示す補正手法を試み、これらの与える影響について検討した。散乱線の補正方法としては、エネルギーウィンドウとして $140 \pm 10\%$ と $108 \pm 15\%$ とを設定し、おのこのエネルギーのプラナー画像より再構成された SPECT 像を用いて補正する手法⁶⁾を用いた。吸収補正はコレクションマトリクス法^{7,8)}で行った。均一性補正の方法としては、平板線源を用いる簡易的な方法を採用した。これは、 $^{99m}\text{TcO}_4^-$ 溶液(8 mCi)が入った平板線源をガンマカメラのコリメータ面に密着させて、10 k count/pixel となるようにデータの収集(画素:256×256)を行い、次にこのデータの平均値を求め、この値を画素ごとのカウント値で除したものを補正係数とする方法である^{9,10)}。

1) 空間分解能 (PSF)

Figure 8 は II-1-1) の実験データに対して、上記の補正を実施したものである。図から散乱補正のみが FWTM 値を低下させることがわかる。こ

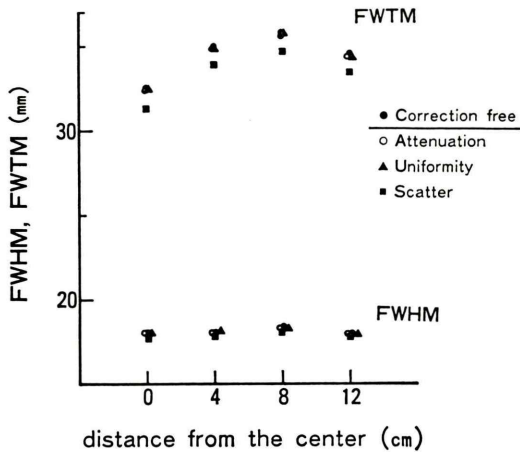


Fig. 8 Correction types vs. FWHM and FWTM.

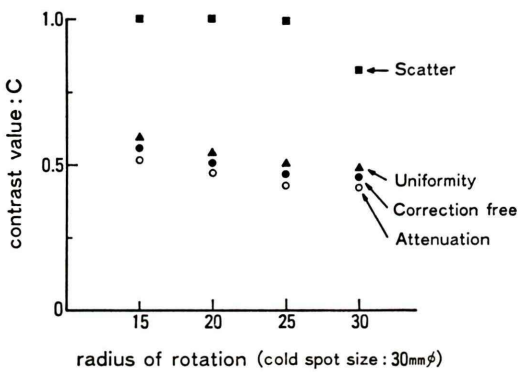


Fig. 9 Correction types vs. contrast value.

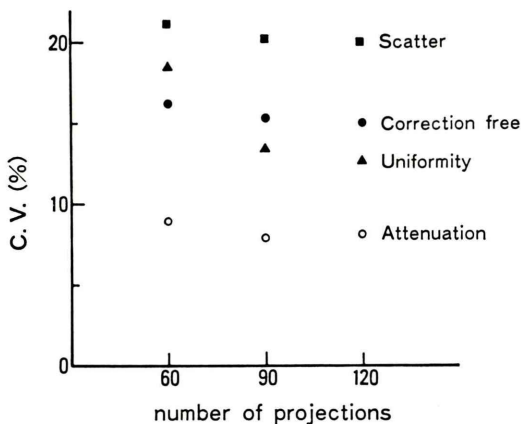


Fig. 10 Correction types vs. C.V.

これは FWTM 値が主にコンプトン散乱の量に依存していることを示す結果である。

2) 空間分解能 (Cold spot)

Figure 9 は II-2-1) の実験データに対して、上記の補正方法を実施しコントラスト値を求めたものである。図から、散乱補正によりコントラスト値が向上し、吸収補正により低下することがわかる。これは、散乱補正では散乱線のために、本来線源のない cold spot 部分に線源があるように再構成されたものが除去され、コントラストが向上したためである。吸収補正では吸収係数を一様と仮定しているために、cold spot の部分が過補正になりコントラスト差が少なくなったことに起因すると考えられる。

3) 不均一性

Figure 10 は II-3-1) の実験方法により、投影データの収集方向数と不均一性との関係を、上記補正方法により実施して求めたものである。変動係数はファントムの半径の 80% の ROI より求め、全収集カウント数は投影方向数に依存しないで一定となるように収集時間を設定した。

ガンマカメラの感度の均一補正、吸収補正により再構成画像の均一度が向上し、散乱補正によりこの均一度が低下することがわかる。吸収補正に関しては、未補正の再構成画像はファントム中央部では端部に比べ SPECT 値が半分以下になる。吸収補正を行うことにより SPECT 値の差が減少し、変動係数が低下したものと考えられる。散乱補正に関しては、コンプトン散乱線による画像は中央部がやや盛り上がった画像となり、これを光電ピーク画像から減じるため、SPECT 値の差が増加し変動係数が上昇したものと考えられる。また均一度に関しては、投影データ数を増加させることにより、放射状のアーチファクトの影響が少なくなり、変動係数がやや低下したものと考えられる。

謝辞 実験に際して協力をいただいた東京都癌検診センター小笠原技師長ならびに駒込病院アイソトープ室技師諸氏に感謝します。

文 献

- 1) (社)日本アイソトープ協会医学・薬学部会核医学イメージング規格化専門委員会：Single Photon Emission Computed Tomography 装置の性能試験条件. *Radioisotopes* **33**: 162-169, 1984
- 2) Shepp LA, Logan BF: The Fourier reconstruction of a head section. *IEEE Trans Nucl Sci NS-21*: 21-43, 1974
- 3) 岩田 敏, 吉田千秋, 中島真人, 他：エミッション CT におけるコリメータ開口特性の補正法. *電子通信学会論文誌 J68-D* (No. 6): 1312-1319, 1985
- 4) 尾川浩一, 高木八重子, 久保敦司, 他： γ 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
- 5) 尾川浩一, 野上修二, 久保敦司, 他：SPECT におけるガンマカメラの不均一性に伴うアーチファクトの除去法. *核医学* **23**: 35-41, 1986
- 6) Jaszczak RJ, Greer KL, Floyd CE, et al: Improved SPECT Quantification Using Compensation for Scattered Photons. *J Nucl Med* **25**: 893-900, 1984
- 7) Chang LT: A method for attenuation correction in radionuclide computed tomography. *IEEE Trans Nucl Sci NS-25*: 638-642, 1978
- 8) Chang LT: Attenuation correction and incomplete projection in single photon emission computed tomography. *IEEE Trans Nucl Sci NS-26*: 2780-2789, 1978
- 9) Rogers WL, Clinthorne NH, Harkness BA, et al: Field-Flood Requirements for Emission Computed Tomography with an Anger Camera. *J Nucl Med* **23**: 162-168, 1982
- 10) English RJ, Polak JF, Holman BL: An iterative method for verifying systematic nonuniformities in refillable flood sources. *J Nucl Med Technol* **12**: 7-9, 1984