

《技術報告》

2 検出器ガンマカメラによる超高分解能ピンホール SPECT システムの開発と性能評価

横井 孝司* 貴志 治夫*

要旨 2 検出器ガンマカメラ (PRISM-2000XP) を用いて小視野用ピンホール SPECT 装置を開発し、その性能評価を行った。構造は 2 個の鉛製ピンホールインサートを同一のユニットに固定し、それを検出器とは独立させてガントリーに固定する方式を取った。ピンホール径は 1 mm で、回転半径が 40 mm (Type-I) と 50 mm (Type-II) の 2 種類を作成した。SPECT 視野 (FOV) と拡大率は、Type-I で 45.8 mm ϕ と 4.25 倍、Type-II で 57.4 mm ϕ と 3.40 倍に設計した。 ^{99m}Tc のライン線源によって空間分解能を測定した結果、中心スライスの視野中心付近で 1.65 mm FWHM (Type-I) と 1.91 mm FWHM (Type-II) であった。円柱ファントムで感度を測定した結果、2 検出器の視野全体で 8.54 kcps/MBq/ml (Type-I) と 5.68 kcps/MBq/ml (Type-II) であった。分解能ファントムでの評価では、Type-I を用いて 1.2 mm ϕ のコールドスポットが観測可能であった。本システムは小動物などの SPECT 測定に適した装置であると考えられた。

(核医学 35: 901-907, 1998)

I. はじめに

最近、ピンホールコリメータを用いた小視野用の SPECT 装置が開発され、その有用性が報告されている¹⁻⁵⁾。ピンホールコリメータを用いた SPECT では回転半径を小さくできるので、感度を落とさずに高分解能画像が期待できる。今回、われわれは 2 検出器ガンマカメラを用いた小視野用ピンホール SPECT システムを開発した。本システムの基本性能 (分解能, 感度) をファントム実験から評価したので報告する。

II. 方 法

1. 装置構成

SPECT 装置は 2 検出器ガンマカメラ PRISM-2000XP (Picker International) を用いた。Fig. 1 (a) に示すような 2 個の鉛製ピンホールインサートを固定したユニットを作成して、Fig. 1 (b) に示すようにユニットを検出器ではなくガントリーに取り付ける方式にした。測定時には検出器に取り付けた円錐状のインサート支持部を近づけ、2 つのピンホールに密着させる。このような構造を取ることによって、検出器が回転した時にコリメータの自重による位置ずれを防ぐことができる。コリメータ交換はこのユニット全体を交換することになる。

本システムのパラメータを Fig. 2 に示す。検出器面からピンホールまでの距離 a は 170 mm である。SPECT 回転半径 b は 40 mm (Type-I) と 50 mm (Type-II) の 2 種類を用意した。ピンホール径

* (株) 島津製作所 医用技術部

受付: 10 年 7 月 2 日

最終稿受付: 10 年 9 月 2 日

別刷請求先: 京都市中京区西ノ京桑原町 1

(☎ 604-8511)

(株) 島津製作所 医用技術部

横井 孝司

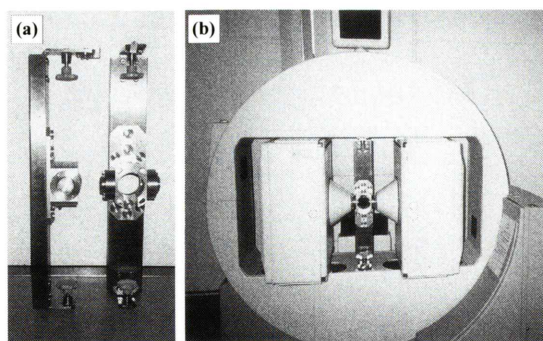


Fig. 1 Dual-pinhole SPECT system for small animal studies using PRISM-2000XP gamma camera. Two pinhole-inserts are mounted on the same unit, and it was not attached to the camera detector but to the gantry. The material of pinhole-insert is lead (Pb).

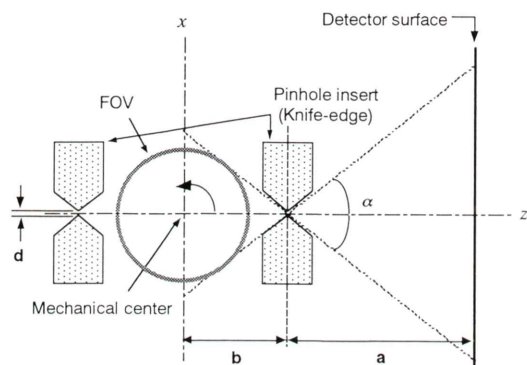


Fig. 2 Geometry of the dual-pinhole SPECT system. Notation a and b represent the distance from pinhole aperture to the detector-surface and to mechanical center, respectively. The diameter of pinhole aperture is indicated as d and the acceptance angle is α . In our system, $a=170$ mm, $b=40$ or 50 mm, $d=1$ mm, and $\alpha=70$ degree were employed.

d はどちらも $1\text{ mm}\phi$, 許容角度 α は 70° である. ピンホールコリメータの性能は以下の式で計算される.

1) 感度 S

$$S = k \frac{d_c^2}{b^2} \quad (1)$$

k は感度定数, d_c はピンホールの実効孔径で次式で表される.

$$d_c = \sqrt{d \left\{ d + \frac{2}{\mu} \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right\}} \quad (2)$$

μ は鉛の線源弱係数で, ^{99m}Tc の 140 keV に対しては約 2.77 cm^{-1} である. 本システムの ^{99m}Tc に対する実効孔径 d_c は約 1.23 mm となる.

2) コリメータ分解能 R_g

$$R_g = \frac{a+b}{a} d_c \quad (3)$$

3) 総合分解能 R

$$R = \sqrt{R_g^2 + \left(\frac{b}{a} R_i \right)^2} \quad (4)$$

ここで, R_i は検出器の固有分解能である.

4) 拡大率 M

$$M = \frac{a}{b} \quad (5)$$

5) SPECT 視野 (FOV)

$$\text{FOV} = 2b \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (6)$$

式 (5) (6) から FOV と拡大率は, Type-I で $45.8\text{ mm}\phi$ と 4.25 倍, Type-II で $57.4\text{ mm}\phi$ と 3.40 倍になる.

2. アライメント方法

2つのピンホールを通る軸がカメラの視野中心に垂直に入射するように調整する必要がある. この目的のために, 基準となる十字ライン線源ファントムを作成した. このファントムはコリメータユニットに装着すると, 2つのピンホールから等しい距離にセットされるように設計されている (Fig. 3). この十字ライン線源 (内径 $1.5\text{ mm}\phi$, 長さ 30 mm) を収集して, どちらの検出器においても視野中心にくるように調整する. 本来, アライメントは, X, Y, Z 軸に対する回転, および平行移動の合計 6つのパラメータを調整する必要がある. しかし, Z 軸に対する回転はピンホールコリメータの対称性より調整不要である. また, Z 軸方向の平行移動も機械的に距離が決定されているので不要である. また, Y 軸方向の移動量は中心スライスがずれるに過ぎないので, ずれ量のみ求めておいてソフト的に補正すればよい. よって本システムでは, X, Y 軸まわりの回転 (θ_x, θ_y) と

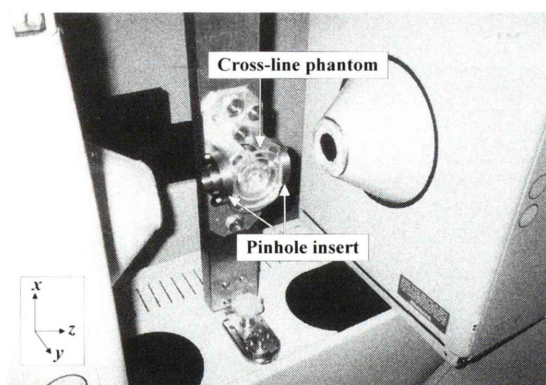


Fig. 3 Cross-line phantom for pinhole alignment. The phantom is designed to be fixed at the mechanical center of two pinhole inserts. The cross-line source in the phantom is 1.5 mm ϕ and 30 mm long.

X 軸方向の移動 (Δx) の 3 つのパラメータを機械的に微調整できるように設計した。Fig. 4 に示すように x_1, x_2 を検出器 1, 2 における中心軸からのずれ量とすれば、 Δx と θ_y は次式で算出できる。

$$\Delta x = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (7)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left\{ \frac{x_1 - x_2}{2l} \right\} \quad (8)$$

$L \div a + b$ である。 Δy と θx に関しても同様である。これを測定データから計算するソフトウェアを用意した。

上記の調整後、ライン線源を使って SPECT 収集し、中心スライスのサイノグラムから従来と同様な方法で検出器の機械的回転中心のずれを計算した。このずれは画像再構成時に補正した。

3. 性能評価

ファントムを使って ^{99m}Tc に対する SPECT 空間分解能と総合感度の評価を行った¹⁰⁾。空間分解能は、テフロンチューブ (内径 0.5 mm) に ^{99m}Tc 溶液 (500 MBq/ml) を封入したラインソースを回転中心に置いて SPECT 測定し、線応答関数 (LSF) の半値幅 (FWHM) で評価した。半値幅の計算は再構成画像上に矩形の関心領域を設定し、この領域内で水平方向、垂直方向に積分し、それぞれの

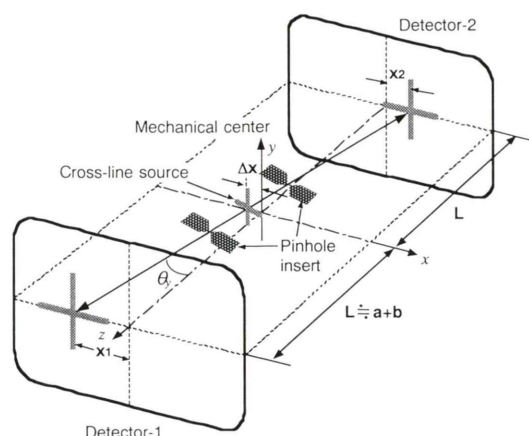


Fig. 4 Schematic diagram of pinhole alignment. Distance of images from the center-line of each detector are x_1 and x_2 . Deviation of pinhole system along to x-axis and rotation angle around y-axis denote as Δx and θ_y , respectively. The value of Δx and θ_y can be obtained by equation (7) and (8), respectively.

プロファイルカーブの FWHM を算出した.

次に分解能ファントムを用いて視覚的に分解能を評価した。分解能ファントムは内径 45 mm, 長さ 50 mm の円柱ファントムと, 6 種類のコードロッド (1.2, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 4.8 mm ϕ) で構成されている。これに ^{99m}Tc 溶液 (38.8 MBq/ml) を封入し SPECT 測定を行った。

システム感度は前記の円柱ファントムに ^{99m}Tc 溶液 (4.59 MBq/ml) を封入して行った。計算は次のように行った。まず、ファントム内の放射能濃度 A (MBq/ml) を測定し、この時刻を基準時刻とする。SPECT 測定後、投影データをすべて加算しトータルカウントを算出する。このトータルカウントを、収集に要した時間で除することによって平均計数率 B (kcps) が求められる。次に基準時刻からの減衰を考慮して、SPECT 収集の中心時刻での放射能濃度 A' (MBq/ml) を算出する。感度 S は B/A' (kcps/MBq/ml) で定義される。

なお, すべての SPECT 収集はマトリックスサイズを 256×256 , 角度ステップを 3° , 収集時間を 1 方向あたり 60 秒とした. また, エネルギー

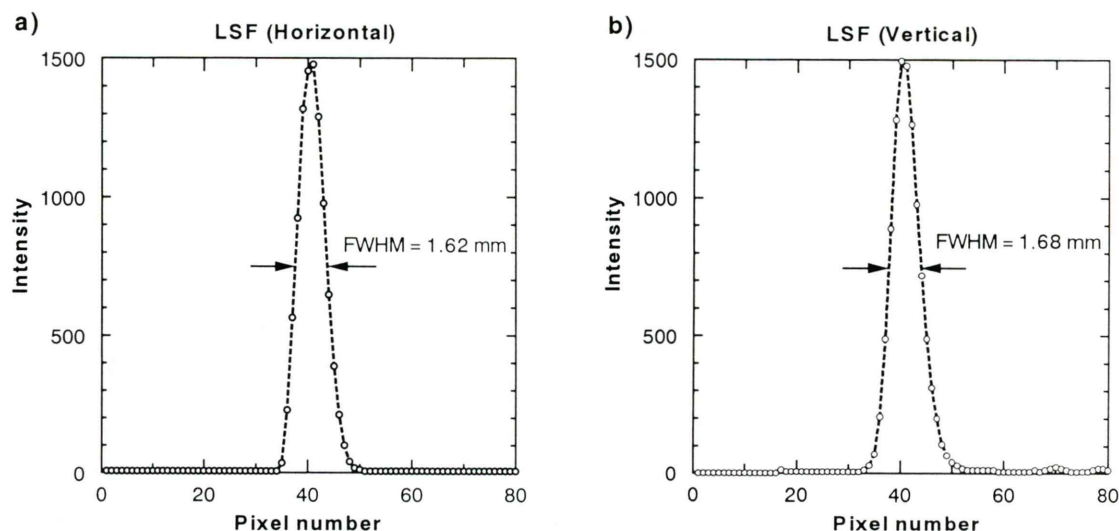


Fig. 5 Line spread functions (LSF) measured by Type-I collimator ($b=40$ mm). The values of FWHM of LSF for horizontal and vertical directions were 1.68 and 1.62 mm, respectively.

ウインドウを 140 keV, ウインドウ幅を 20% に設定した。感度測定時には, すべての補正 (直線性, 均一性) 回路を OFF にした。

収集後のデータは幾何学的な感度補正を行った後, Feldkamp らの方法⁶⁾で画像再構成 (256×256 マトリックス)を行った。再構成後のピクセルサイズとスライス厚は, Type-I ($b=40$ mm)で約 0.272 mm と 0.55 mm, Type-II ($b=50$ mm)で約 0.340 mm と 0.69 mm である。データ処理は核医学データ処理装置 ODYSSEY-VP (Picker International)で行った。

III. 結 果

中心スライスにおける視野中心の線応答関数 (LSF) の水平方向, 垂直方向の FWHM は, Type-I で 1.62 mm と 1.68 mm (平均 1.65 mm), Type-II で 1.93 mm と 1.89 mm (平均 1.91 mm)であった。Type-I で得られた水平方向, 垂直方向の LSF のプロファイルを Fig. 5 (a, b) に示す。

Fig. 6 は Type-I で得られた分解能ファントムの画像を示す。画像はスライスの加算を行って, スライス厚 2.75 mm としている。どのスライスにお

いても, 最も細かい 1.2 mm ϕ のコールドスポットが観測可能であった。

システム感度は 2 検出器の合計で 8.54 kcps/MBq/ml (Type-I) と 5.68 kcps/MBq/ml (Type-II)であった。この結果から式 (1) の感度定数 k を計算すると, Type-I では 9.08 kcps/kBq/ml, Type-II では 9.43 kcps/kBq/ml となり, 両者はほぼ一致した。

IV. 考 察

ピンホールコリメータを使った小視野用 SPECT 装置は, いくつかのグループから報告されており¹⁻⁵⁾, 高分解能の装置では 2.0 mm 以下の空間分解能が得られている。一方, 小視野用のポジトロン CT (PET) 装置では, リング径が 115 mm の装置で空間分解能が 2.3 mm FWHM と報告されている⁹⁾。PET の場合, 陽電子が体内の電子と結合するまでに移動する距離 (飛程) の存在と, その結合の直前に持っていた電子の運動量分だけ対向角度 (180°) からずれて放出される現象がある。よって, PET では空間分解能の理論限界が存在することになる。SPECT ではこのような限界

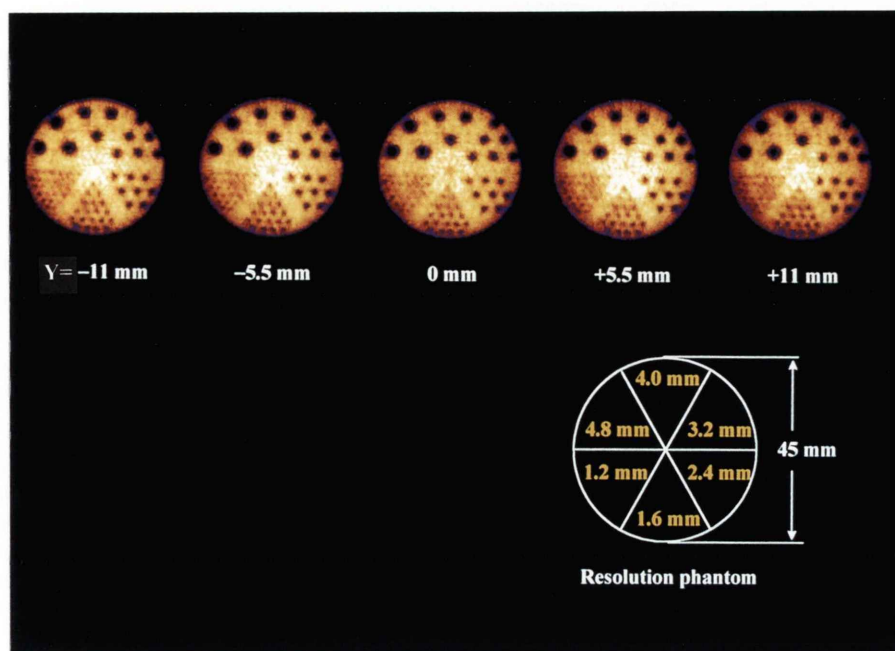


Fig. 6 Resolution phantom images (256×256 matrix, pixel size is about 0.272 mm) measured by 40 mm radius collimator. The slices were added by five slices (the thickness is 2.75 mm). The smallest cold rod (1.2 mm ϕ) could be observed on each slice.

は存在しない。むしろ、ピンホールコリメータの機械的な設計によって決定される。空間分解能をよくするためには、式(3)から分かるようにピンホール径 d を小さくすればよいが、感度が二乗で低下するので回転半径 b を小さくする方が望ましい。しかし、 b を小さくするとFOVが小さくなり、測定できる対象が限られてしまうことになる。FOVを広くするには許容角度 α を大きくすればよいのだが、式(2)より実効孔径 d_e が大きくなり空間分解能が低下してしまう。このように各パラメータは相互に関連しているので、目的とする対象物と分解能／感度を決めてからピンホールコリメータの設計を行う必要がある。Jaszczakら¹⁾によると、ピンホール径1.2 mm ϕ の時、約50 mm以下の回転半径にすれば超高分解能パラレルコリメータより感度が高く、一方、空間分解能を2倍向上できることを示している。回転半径50

mmのFOVは許容角度 α によって多少異なるが約60 mm ϕ である。よって、この範囲に収まる小動物ならピンホールコリメータの方が、感度、分解能共に有利であるといえる。本システムのパラメータは、以上のことを考慮して決定した。

本装置のSPECT感度は2検出器合計で8.54 kcps/MBq/ml (Type-Iの場合)であり、1検出器あたりの感度に換算すると、すでに報告されている同様な装置³⁾と比較してほぼ同じであった。実験結果から式(1)の感度定数 k を計算すると、Type-Iでは9.08 kcps/kBq/ml、Type-IIでは9.43 kcps/kBq/mlとなり、両者間でほぼ一致した。一方、空間分解能はカメラの固有分解能 R_i を3.5 mmと仮定すると、式(4)より1.72 mm (Type-I)と1.89 mm (Type-II)になる。これはプランナー測定での空間分解能であり、SPECT測定での空間分解能とは比較できないが大きな矛盾はない。以上の結果

より、本システムはほぼ設計通りの性能が出ていると考えられた。

本システムのような多検出器ガンマカメラでのピンホール SPECT では、アライメントが非常に重要である。今回、われわれはアライメント用のファントムと、その測定データから 2 つのピンホール軸のずれ量を計算するプログラムを開発した。機械系もこれに対応して微調整が可能になっている。これらの機構によって、本システムの高分解能が可能になったと考えられた。

最後に画像再構成アルゴリズムに関して考察する。ピンホールデータの取り扱い、基本的にはコーンビームと同じである。現在までに報告されているピンホール再構成法は、1) ファンビーム-パラレル変換を用いた方法³⁾、2) Feldkamp の近似的な方法^{1,6)}、3) EM アルゴリズムを使った逐次法^{1,8)}、4) 厳密なコーンビーム再構成法などである。Feldkamp の方法は、コーンビームデータを傾斜したファンビームデータで近似するという方法である。よって、視野中心から体軸方向に離れるに従ってスライス間のクロストークによるアーチファクトが発生することが報告されている⁸⁾。一方、厳密な画像再構成は、直交二重スキャンや円軌道と直線を組み合わせたスキャン、あるいはヘリカルスキャンが必要である。この点、EM アルゴリズムは通常の単一円軌道でも適用が容易であり、吸収補正などもその式の中を含めることが可能である。よって、再構成時間が短くできれば実用上は有用な方法だと考えられる。これらに関しては今後の検討課題としたい。

V. ま と め

2 検出器ガンマカメラを用いた小視野ピンホール SPECT 装置の開発を行った。本装置の空間分解能とシステム感度は、回転半径 40 mm のコリメータ (Type-I) で 1.65 mm FWHM と 8.54 kcps/MBq/ml、50 mm のコリメータ (Type-II) で 1.91 mm FWHM と 5.68 kcps/MBq/ml であった。回転半径を 40 mm にすれば、分解能ファントムの 1.2 mm ϕ のコールドスポットが観測できることが分

かった。以上から本システムは高い空間分解能を有し、小動物などの SPECT 測定に適した装置であると考えられた。

本論文の一部は第 37 回日本核医学会総会 (大宮, 1997 年) で発表した。

謝辞：機械設計、および、ソフト開発に尽力いただいた熊澤良彦氏、三俣廣嗣氏、西山玲氏に感謝いたします。また、ファントム実験に際して多大な協力をしていただきました、(株) 第一ラジオアイソトープ研究所研究部の方々に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) Jaszcak RJ, Li J, Wang H, Zalutsky MR, Coleman RE: Pinhole collimation for ultra-high-resolution, small-field-of-view SPECT. *Phys Med Biol* **39**: 425-437, 1994
- 2) Weber DA, Ivanovic M, Franceschi D, Strand SE, Erlandsson K, Franceschi M, et al: Pinhole SPECT: an approach to in vivo high resolution SPECT imaging in small laboratory animals. *J Nucl Med* **35**: 342-348, 1994
- 3) Ishizu K, Mukai T, Yonekura Y, Pagani M, Fujita T, Magata Y, et al: Ultra-high resolution SPECT system using four pinhole collimators for small animal studies. *J Nucl Med* **36**: 2282-2287, 1995
- 4) Yukihiro M, Inoue T, Iwasaki T, Tomiyoshi K, Erlandsson K, Endo K: Myocardial infarction in rats: high-resolution single-photon emission tomographic imaging with a pinhole collimator. *Eur J Nucl Med* **23**: 896-900, 1996
- 5) 尾川浩一, 中村佳代子, 久保敦司, 市原 隆: ピンホールコリメータによる超高分解能 SPECT. *核医学* **34**: 702, 1997
- 6) Feldkamp LA, Davis LC, Kress JW: Practical cone-beam algorithm. *J Opt Soc Am* **1**: 612-619, 1984
- 7) Li J, Jaszcak RJ, Coleman RE: Quantitative small field-of-view pinhole SPECT imaging: Initial evaluation. *IEEE Trans Nucl Sci* **42**: 1109-1113, 1995
- 8) Zeng GL, Gullberg GT: A study of reconstruction artifacts in cone beam tomography using filtered backprojection and iterative EM algorithms. *IEEE Trans Nucl Sci* **37**: 759-767, 1990
- 9) Bloomfield PM, Rajeswaran S, Spinks TJ, Hume SP, Myers R, Ashworth S, et al: The design and physical characteristics of a small animal positron emission tomograph. *Phys Med Biol* **40**: 1105-1126, 1995
- 10) ガンマカメラの性能測定法と表示法: 日本放射線機器工業会規格 (JESRA X-51), 1997

Summary

Development of a High-Resolution Pinhole SPECT System Using Dual-Head Gamma Camera for Small Animal Studies

Takashi YOKOI and Haruo KISHI

*Department of Research and Development, Medical Systems Division,
Shimadzu Corporation*

We developed a high-resolution pinhole SPECT system using dual-head gamma camera (PRISM-2000XP) for small animal, and evaluated the performance of this system. Two pinhole-inserts (Pb) were mounted on the same unit, and it was not attached to the detector but the gantry of gamma camera. We designed two kinds of pinhole collimators with different rotating radii, 40 mm (Type-I) and 50 mm (Type-II). The diameter of the pinhole is 1 mm for both types. The field of view (FOV) and magnification were 45.8 mm ϕ and 4.25 for Type-I, 57.4 mm ϕ and 3.40 for Type-II, respectively.

We measured full width at half maximum (FWHM) of line spread function using a ^{99m}Tc line source. Measured FWHM values were 1.65 mm using Type-I and 1.91 mm using Type-II at the center of FOV in the center slice. The volume sensitivity of this system was 8.54 kcps/MBq/ml (Type-I) and 5.68 kcps/MBq/ml (Type-II). We could observed 1.2 mm ϕ cold spot in the resolution phantom using Type-I. In conclusion, this system is available for SPECT measurement of small animal studies.

Key words: Pinhole collimator, SPECT.