

《原 著》

シンチレーションカメラの感度不均一性に関する研究

第2報 各種因子による不均一性の変化の定量的評価

松 本 徹*

I. 緒 言

前報告では、カメラの感度不均一性は不均一性の程度と不均一性パターンの変化をあらわす2つの指標を用いて定量的に評価できることを示した。

本報ではデジタル電子計算機による不均一性補正法を確立するため、各種の不均一性因子の関数としてカメラの感度不均一性をあらわす flood 像を測定し、これより不均一度と不均一性パターンの変化を計算した。次にその結果から不均一性補正の精度に重大な影響を与える因子は何か、不均一性補正を行うにはどんな条件の flood 像を測定しておけばよいか、補正用マトリックスの交換はいつ、いかなる基準で行うべきか、等について検討した。

II. 方 法

アンガー型シンチレーションカメラの感度不均一性を、カメラ、コリメータ、線源の3つに分割して考えることにし、次のような測定を行った。

(a) カメラ自体の不均一性

本報では、まず不均一性に関してもっとも基本的な情報を与えらると思われる、カメラ自体の不均一性を次のような geometry で測定した。すなわ

ち、コリメータを取りはずし、点線源をコリメータより十分離れた状態 (2 m) でクリスタルの全視野に、均等に γ 線を入射させた。このようにして得られる flood 像を (1) 核種 (^{99m}Tc , ^{57}Co) (2) 光電ピークのゲイン (利得) (3) エネルギーウィンドー幅 (4) 計数率, (5) 時間 (安定性) の関数として収集した。実験に使用したシンチカメラは東芝製 GCA 202 遅延線型である。flood 像の収集はオンライン電子計算機システム (TOSBAC 3400 Model 31 DAC システム) で行った。その時の計数率は (4) の実験以外は測定系の分解時間による数え落としの影響が少い 10^4cps 以下とした。また、標準的な flood 像は $2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ の計数値を含む 64×64 マトリックスとした。

(b) コリメータの不均一性

コリメータを装着し、それに ^{99m}Tc または ^{57}Co を一様に満たした板線源をコリメータ表面に押し当てた状態でウィンドー幅を変数として flood 像を収集した。その後各ウィンドー幅ごとに (a) で測定した flood 像を用いてカメラの不均一性を除去し、コリメータ自身の不均一性を求めた。解析の対象となったコリメータは以下の2種類である。

- (1) 高エネルギー (^{131}I) 用, 1600 孔コリメータ
- (2) 高分解能 (^{99m}Tc) 用, 40000 孔コリメータ

(c) 板線源の不均一性

板線源をシンチスキャナー (Elsint 社製) にして走査し、板線源自身の不均一性をあらわすデジタルシンチグラムを求めた。

次に、以上の種々の条件で測定した flood 像が

* 放射線医学総合研究所 臨床研究部

受付: 52年3月24日

最終稿受付: 52年3月24日

別刷請求先: 千葉市六川4-9-1 (〒280)

放射線医学総合研究所臨床研究部

松本 徹

ら不均一性の程度と不均一性パターンの変化を検出した。(詳細は第1報参照)

(d) 不均一度の計算

不均一度は周辺の高感度領域を除外した, 関心領域内の画素の計数を用いて, 次式により計算した.

$$\begin{aligned} \text{不均一度} &= \frac{\sigma_u}{\bar{c}} \times 100 \\ &= \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\sigma_t^2 - \bar{c}} \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし, σ_t^2 は関心領域内の分散, \bar{c} は1画素当りの平均計数値, σ_u は不均一性に由来する標準偏差である.

(e) 不均一性パターンの変化の計算

flood 像にガウス関数を convolute することにより, 1画素当りの計数値の統計誤差を1%以下に減少させた. その後, 2種の flood 像 A, B 間の相関係数 r を計算した.

$$r = \frac{\sigma_{A \cdot B}}{\sigma_A \cdot \sigma_B} - 1 \leq r \leq 1 \quad (2)$$

ただし, σ_A, σ_B はガウス関数による smoothing 後の flood 像 A, B の関心領域内での標準偏差, $\sigma_{A \cdot B}$ は共分散の平方根である.

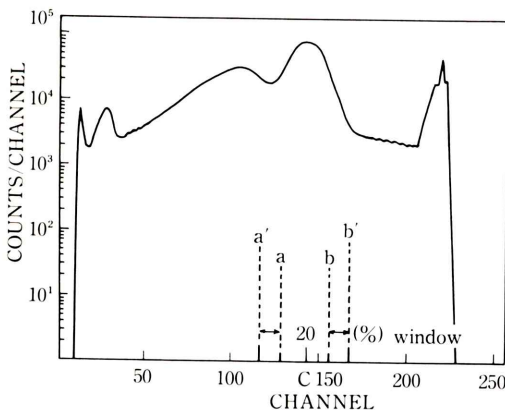


Fig. 1 Range of variations of isotope peak centering (gain-variations) on the spectrum of ^{99m}Tc point source in air. Window: 20%

Position	Gain-variation	
c-b'	-10%	peak 10% high window
a-b	0%	peak centered
a'-c	+10%	peak 10% low window

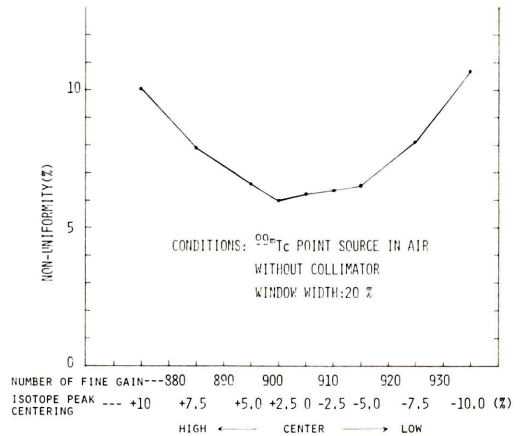


Fig. 2 The quantity of non-uniformity (%) as a function of gain-variation.

III. 結 果

(a) カメラ自体の不均一性

(1) ゲイン変動

Fig. 1 に示すごとく, ^{99m}Tc 点線源, 空气中, エネルギーウィンドー幅は20%一定とし, ウィンドーの中心が10%マイナス側 (a'-c) の位置から10%プラス側 (c-b') の位置まで変化するようにゲインを変動させ, flood 像を測定した, これより不均一度を計算した結果を Fig. 2 に示す. ウィンドーが (a'-c), (c-b') の位置に来るようなゲインの時, 不均一度はそれぞれ, 10.6%, 10.1%

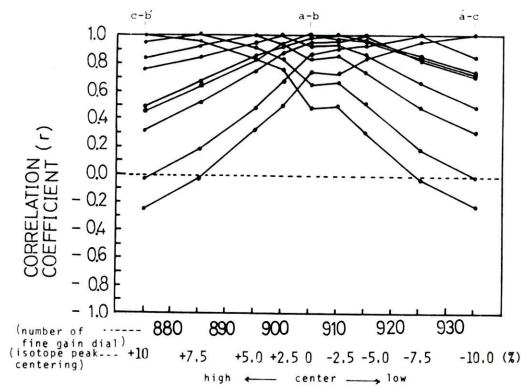
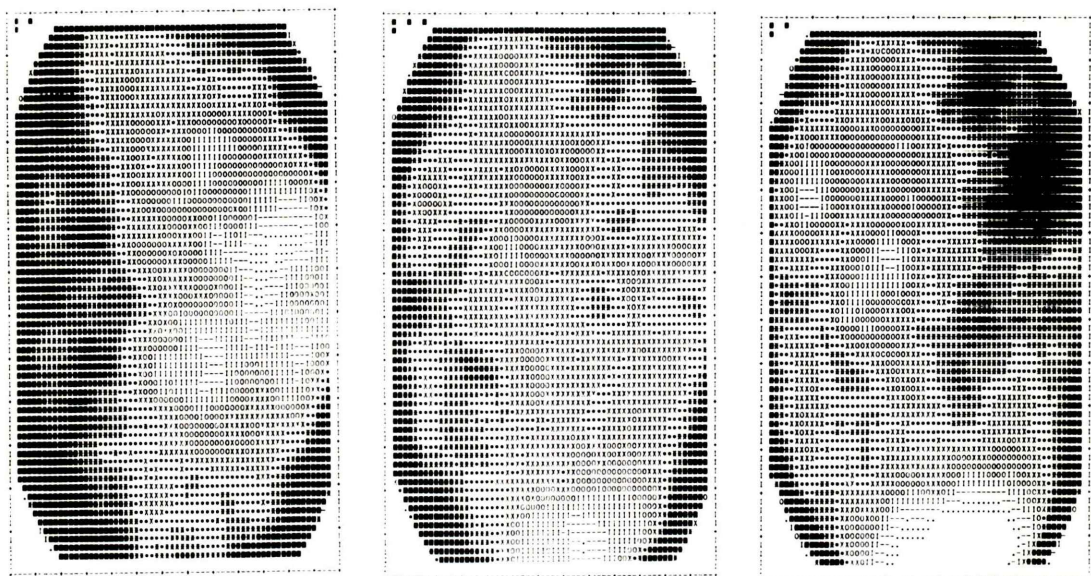


Fig. 3 The effect of using a symmetrical or asymmetrical energy window on the pattern of non-uniformity.



Position on the

spectrum of Fig. 4

Isotope peak +10% high

(a-b)

0

(a'-c)

-10% low

Grey scale	Pixel counts/ $\bar{\epsilon} \times 100\%$	Characters
1	$\leq 75\%$	blank
2	75- 80%	·
3	80- 85%	—
4	85- 90%	I
5	90- 95%	O
6	95-100%	X
7	100-105%	*
8	105-110%	X+
9	110-115%	X+O
10	115-120%	X+OM
11	120<	X+OMW

 $\bar{\epsilon}$: average counts/pixel

Fig. 4 Flood images as a function of isotope peak centering.

と高値を示す。一方、光電ピークがウィンドーの中心に来るように設定した (a-b) の位置付近が最低で6%程度である。光電ピークからのウィンドー位置のずれが大きい程不均一度は大きくなった。

次に、ゲイン変動による不均一性パターンの変化を検討するため flood 像間の相関係数 r を計算した。その結果を Fig. 3 に示す。(a'-c) の flood 像を基準にした場合は、ウィンドーが高エネルギー

側に移動するにつれ、 r は小さくなる。最後に (c-b') のところではマイナスとなる。すなわち Fig. 4 に示すごとく、感度の高低が局所において逆転したイメージを形成した。また、通常の測定は (a-b) のゲイン設定で行われるが、この flood 像を基準にした場合の相関係数は、(a-b) を境にして、それよりマイナス側、プラス側にゲインがずれると r の値が下ってくる。すなわち、基準パターンのある局所における計数が、ゲインのプラ

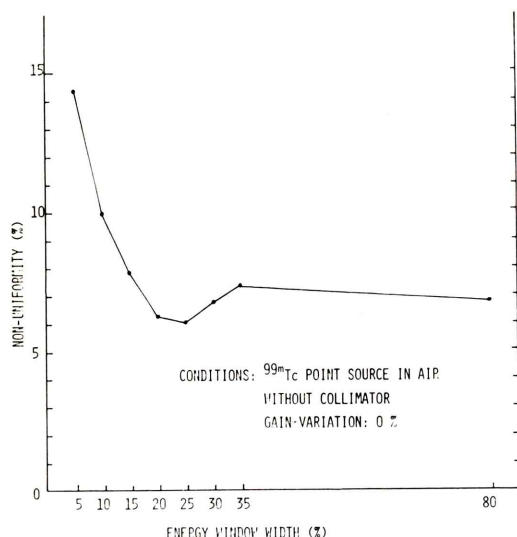


Fig. 5 The quantity of non-uniformity (%) as a function of energy window width.

ス側 (c-b') へのずれによって増加した場合は、逆にマイナス側 (a'-c) にゲインをずらすと、その計数が減少するようなパターンの変化があらわれた。

(2) エネルギーウィンドー

^{99m}Tc 、および ^{57}Co 点線源、空气中でウィンドー幅を 8 通り (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 80%) に変化させて flood 像を収集した。この時のゲインは光電ピークがウィンドーの中央にくるように設定した。Fig. 5 は 8 個のウィンドー幅の関数として不均一度を表示したものである (ただし ^{99m}Tc 点線源、空气中、コリメータ無しの場合)。不均一度はウィンドー幅 5% で最大、25% で最小となり、35%, 80% とウィンドー幅が広がるにつれて再び大きくなった。また、不均一性パターンの変化を 5% ウィンドー幅の flood 像を基準パターンとしてあらわした場合は、「ゲイン変動」の結果と同じ傾向を示した。例えば、ウィンドー幅 10% で $r=0.92$, 20% で $r=0.48$, 80% では $r=-0.21$ となった。すなわちウィンドー幅の変化により不均一性パターンが逆転する現象があらわれた。また、他のウィンドー幅の flood 像を基準パターンとして r を計算した場合でも、計算対象のウィンドー

幅と基準のウィンドー幅との差が大きいほど不均一性パターンの変化が大となることが示された。

(3) 計数率

Activity の異なる ^{57}Co 点線源を空气中、ウィンドー幅 20% で、計数率を 1000 cps から 28000 cps まで変化させて flood 像を収集した。不均一度は平均 6.81%, その変動範囲は 6.64~7.00% と小さかった。また、不均一性パターンの変化は計数率 10000 cps を基準パターンとした時、 $r<0.94$ であり、ほとんど変化しなかった。

(4) 不均一性の安定性

週平均 2 回の頻度で条件一定 (^{57}Co 点線源、空气中、20% ウィンドー幅、光電ピークはウィンドーの中心) とし合計 26 個の flood 像を 3 ヶ月間にわたり収集した。この時の不均一度は平均 8.48%, 変動範囲は 7.86~9.22% であった。また、測定開始日の flood 像を基準パターンとして、その後に測定した 25 個の flood 像との相関係数 r を計算した。平均値は $r=0.97$ 変動範囲は 0.968~0.982 であった。検定の結果、不均一性と時間との間に相関は認められなかった。

(b) コリメータおよび板線源の不均一性

Fig. 6 (1) は高分解能 (40000 孔) コリメータおよび高エネルギー用 (1600 孔) コリメータを装着し、板線源を用いて測定した flood 像を示す。(2) は同じウィンドー幅によるカメラ自体の不均一性をあらわす flood 像である。(3) は (1) の中に含まれている (2) の不均一性を補正により除去したものである。これより 40000 孔コリメータを使用した場合について、(1) (2) (3) の flood 像の不均一度を比較すると次のようになる。ウィンドー幅 20% の (1) の不均一度は 7.6% であるのに対して、(2) の不均一度は 6.2% であった。(1) の不均一度が (2) にくらべてやや大きいのは、カメラ自体の不均一性のほかにコリメータや板線源自身の不均一性が重なっているためであると考えられる。(1) から (2) の不均一性を除去した (3) の不均一度は 2.5% であった。また、板線源自身の不均一度は板線源をシンチスキャナーで走査して求めたシンチグラムより、1.5% (関心領域内の最大計数値

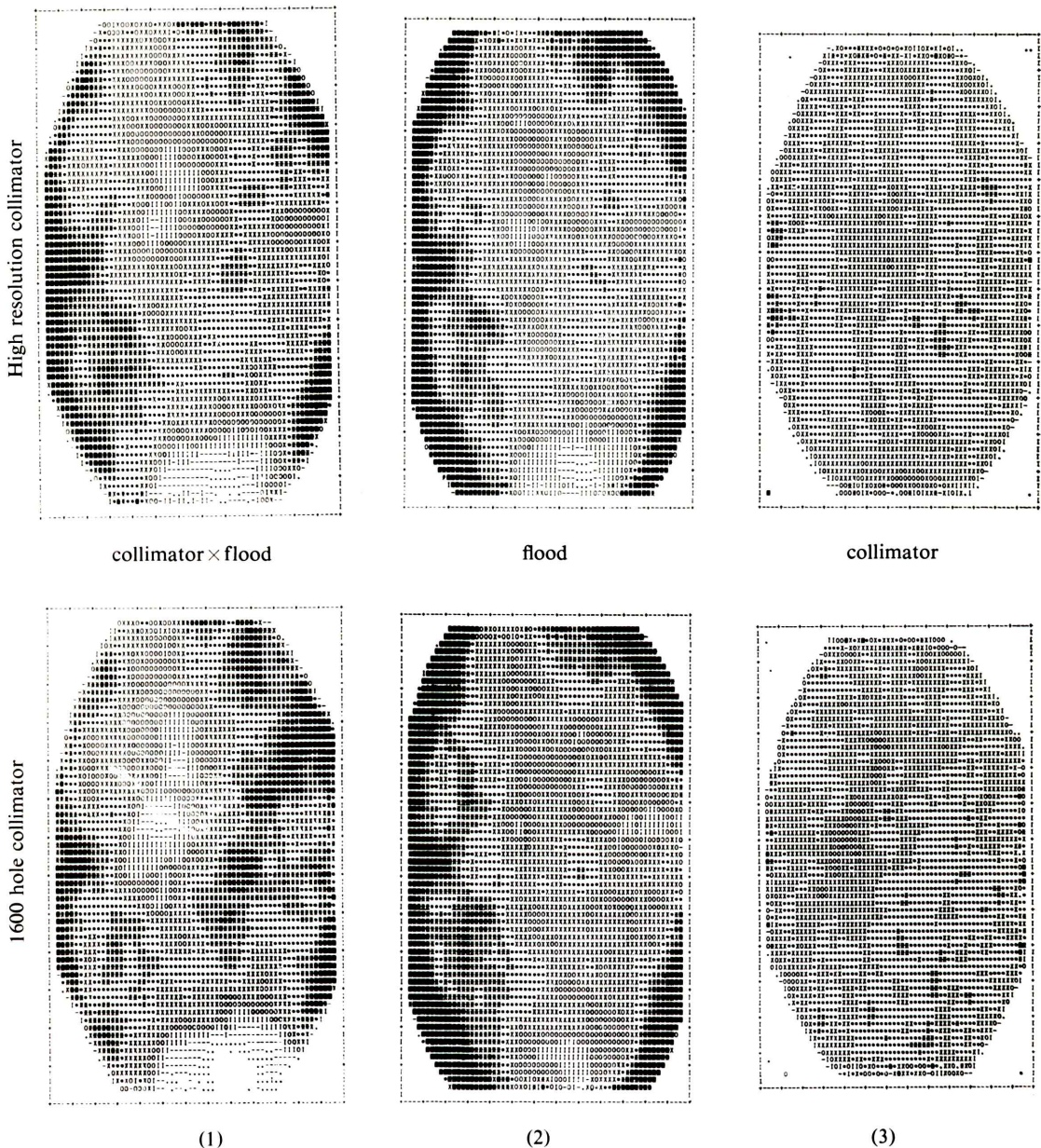


Fig. 6 (1): Flood image with high resolution collimator (40000 hole) and 1600 hole collimator.

(2): Flood image without collimator.

(3): Non-uniformity pattern of each collimator (= (1)/(2))

と最小計数値の差が平均計数値の4%)と計算された。したがってコリメータ自身の不均一性はカメラ自体のものにくらべてほとんど無視し得る位に小さいことがわかった。このような傾向は、1600孔コリメータの場合も同様であった。

IV. 考 察

flood 像の不均一度と不均一性パターンの変化の仕方は各種の不均一性因子によって多少ずつ異なることが考えられる^{1)~11)}。したがって正確な不均一性補正を行うには、それぞれの因子の組合せからなるすべての撮影条件の flood 像を測定し、これから補正用マトリックスを作成しておけばよい。しかし、そうすることは flood 像の測定上の労力や補正用マトリックスのファイリングなどに限界があり、現実には不可能である。本報では種々の因子によって変化する感度不均一性を定量的に評価することにより、各種因子の補正上の重要度を明らかにした。各因子ごとに条件が異なるので重要性のランク付けは簡単に行えないが、因子ごとの結果を使用した条件の範囲に限定すれば、ある程度の比較はできると考える。これより少なくとも次のようなことがいえる。

(a) 不均一性の計数率依存性は解析対象のカメラの場合、ルーチンな使用範囲内(1000~28000 cps)では無視できる。計数率依存性が有意に検出されたとの報告^{1),8)}もあるが、その時使用されたカメラは本報のものとは異なる。不均一性の計数率依存性はカメラのタイプによってちがうものであると考える^{2)~4),11)}。

(b) カメラの不均一性は長期的には変化することが知られている。そこで同一条件で長期にわたって測定した flood 像から不均一性の経時的変動を不均一性の指標により検出し、どの時点で補正用マトリックスを交換すべきか検討した。しかし、解析期間中の3ヵ月間は有意の変化が認められなかった。flood 像の不均一度が時間と共に徐々に増加し、3ヵ月後の調整により再び元の不均一度に戻ったとの報告⁴⁾があるが、その時使用されたカメ

ラは本報のものと異なる。不均一性の経時的変動の直接的な原因は光電子増倍管のゲインの緩慢な時間的な変化によると思われるが、その変化の仕方は、(a)と同じくカメラの性能に依存すると考える。

(c) 2種のコリメータ自身の不均一性はカメラの不均一性にくらべて小さいことがわかった。したがって本報の場合、不均一性の評価や補正にカメラ自体の不均一性パターンを用いても間違いはないように思われる。しかし一般的には、カメラ、コリメータ、および板線源ごとにそれぞれの不均一性を本報で用いた方法により一度は必ず測定しておくべきであり¹⁾、その結果、コリメータの不均一性がカメラのそれに比較して無視できないことがわかれば不均一性の評価や補正用には、やはりコリメータ付きの flood 像を用いる必要がある。

(d) カメラの不均一性はゲイン変動により大きく変化する^{1),9)}(ただし、^{99m}Tc 点線源、空气中、エネルギーウィンドー幅20%一定)実際には本実験のごとく±10%もゲインを変化させて測定することはあまりないと思われる。しかしゲイン設定の仕方によっては、不均一性パターンが以前と全く逆転したパターン(いわゆる、ポジ・ネガパターン)になることを知っておくべきである。また、個々のカメラごとにこのような現象がどの程度のゲイン変動で生じるか確認しておくべきである。

(e) カメラの不均一性はウィンドー幅によって大きく変化する(ただし点線源は空气中)。その変化の仕方は前述の「ゲイン変動」の場合と同様ウィンドーの選び方によって不均一性パターンの逆転現象がある。ウィンドー幅が狭いほど不均一度は大きい。また、再現性よくウィンドーの中心に光電ピークを設定すること¹⁰⁾が難しくなる。ウィンドー幅の設定は不均一性補正に関して実用上もとても重要な因子と考えられる。

V. 結 論

アンガー型シンチレーションカメラの感度不均一性をカメラ、コリメータ、および板線源自身の

3つの不均一性に分け、各種因子によるそれぞれの変化を第1報で提案した方法により定量的に評価した。その結果次のような予備的な結論を得た。

(a) コリメータと板線源の不均一性は個体別に異なるものと考えられる。各々の不均一性はカメラ自体のものと分けて求めておくべきである。

(b) また、カメラ自体の不均一性の因子のうち計数率依存性と安定性はカメラのタイプや個体ごとにちがうものである。

(c) 一方、光電ピークのゲインやエネルギーウィンドー幅はすべてのカメラに共通する因子であり、不均一性パターンの変化に大きく寄与するものである。

(d) したがって、不均一性補正用の flood 像を測定する時は、まず第1に光電ピークのゲイン設定を再現性よく行うことが重要である。

(e) 本報で示したごとく、コリメータ（および板線源）の不均一性がカメラ自体のそれにくらべて十分小さいことが確認された場合は、不均一性を評価するのにコリメータ無しの flood 像を用いることができる。

(f) しかし、不均一性補正を行なう時にはこれをコリメータ装着時の flood 像の代用としてよいとは言えない。何故なら以上の結果はすべて線源(^{99m}Tc , ^{57}Co) 空気中の flood 像から求められたものであるからである。実際に近い状態（散乱体からの散乱線の付加）での不均一性について、さらに検討する必要があると考える。

(g) 補正をルーチンに行うには補正用マトリックスの経時的変動を定期点検することが重要である。本報では如何なる基準でどのような時期に補正用マトリックスの交換を行うべきかを明らかにできなかったが、不均一性パターンの経時的変動は基準パターンとテストパターンとの相互相関から検出できることを示した。また、経時的変動のエネルギー依存性は無視できると推定されるため、不均一性の経時的変動の検出には ^{99m}Tc の擬似線源である ^{57}Co を代用してもよいと考える。

謝 辞

本論文の作成に当たり、御校閲を賜った群馬大学医学部放射線科永井輝夫教授、御指導下さった放射線医学総合研究所臨床研究部飯沼武室長、御協力いただいた技術部福久健二郎主任研究官、千葉県ガンセンター物理室秋山芳久氏、埼玉県ガンセンター物理室田伏勝義氏に深謝する。（本論文の要旨は第15回、第16回日本核医学会総会で発表した）

文 献

- 1) Morrison LM, Bruno FP, and Manderli W: Sources of Gamma Camera Image Inequalities. *J Nucl Med* **12**: 785-791, 1971
- 2) Hannan WJ and Bessent RG: Pitfalls in Gamma Camera Field Uniformity Correction. *Brit J Radiol* **47**: 820-821, 1974
- 3) Jansson LG and Parker RP: Pitfalls in Gamma Camera Field Uniformity Correction. *Brit J Radiol* **48**: 408-409, 1975
- 4) Tolwinski J, Mackiewicz H, Siwicki H et al: Investigation of Distortions in Gamma Camera Scintigraphic Pictures. *Nuclear-Medizin* **9**: 70-77, 1970
- 5) Cohen H, Kereiakes JG, Padikal TN et al: Quantitative Assessment of Field Flood Uniformity of Gamma Cameras. *Radiology* **118**: 197-200, 1976.
- 6) 松本政典: Delay-line を用いたガンマカメラの性能に関する基礎的研究. *日医放会誌* **33**: 31-43, 1973
- 7) Mackey DJ: The Uniformity of Gamma Cameras. *Phys Med Biol* **17**: 857-858, 1972
- 8) Smith EM: On Methods for Normalizing the Response of the Anger Camera Imaging Systems. *Quantitative Organ Visualization in Nuclear Medicine* Compiled Edited by Kenny PJ & Smith EM, University of Miami Press, 1970, 261-278.
- 9) Wolf JR: Calibration Methods for Scintillation Camera. *Quantitative Organ Visualization in Nuclear Medicine*, Compiled Edited by Kenny DJ & Smith EM, University of Miami Press, 1970, 229-260
- 10) Strange DR and Thomas FD: Functional Analysis of Gamma Camera Field Uniformity with Important clinical Implications. *J Nucl Med* **11**: 334-335, 1970
- 11) Hasman A, Groothedde RT: Gamma-Camera Uniformity as a Function of Energy and Count-Rate. *Brit J Radiol* **49**: 718-722, 1976

Summary

Non-Uniform Sensitivity of Delay-Line Scintillation Camera (No. 2); Quantitative Assessment of the Non-Uniformity of the Camera under the Various Conditions

Toru MATUMOTO

Clinical Division, National Institute of Radiological Sciences 4-9-1, Anagawa, Chiba, Japan

In order to establish a useful method of correcting non-uniform sensitivity of the camera by a digital computer system, non-uniformity measurements were performed under the various conditions and the non-uniformity of the flood images obtained was evaluated quantitatively. The output from a commercial delay-line type camera (TOSHIBA GCA 202) was analyzed using the NIRS on-line computer system (TOSBAC-3400 MODEL 31 DAC system). The flood image data were collected in a 64×64 matrix without a collimator and with two collimators with respect to the point or the plane sources of ^{99m}Tc and ^{57}Co in air. Number of collected data was about 4×10^6 counts/total area. By parameters expressing the extent of

non-uniformity of a flood image and the differences in the non-uniformity pattern among the images, changes in non-uniformity with time, and the effects of varying window settings and counting rates were detected and evaluated with or without a collimator. As results of the above analysis, changes in non-uniformity with time (for three months) and with counting rates from 10^3 to 2.5×10^4 cps are found to be insignificant. It is confirmed that non-uniformity of the two parallel hole collimators (1600 hole and 40000 hole) are insignificant. With energy window width of less than 20% and gain-variations varying from -10% to 10% of peak centering, changes of the extent of the non-uniformity pattern are very sensitive.