

《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1報 不均一性の表示法—

松 本 徹*

I. 緒 言

アンガー型シンチレーションカメラには視野内で感度の不均一性が内在し^{1,2)}、RI イメージの読影の妨げになること³⁻⁵⁾がある。そのため不均一性を補正しようとする試み⁶⁻⁹⁾がなされている。その方法には多くの種類があるが、もっとも厳密な方法はデジタル電子計算機を利用するもの^{10,11)}である。この場合、補正の手順は大きく分けて、次の3段階となる。(a) 感度不均一性の測定、(b) 不均一性の定量的評価、(c) 補正用マトリックスの作成および補正の実行。しかし、実際に不均一性補正を行なう時、上述の各段階において、具体的に手順をどのようにしたらよいかを、系統的に論じた報告はない。そこで著者はデジタル電子計算機によるシンチレーションカメラの感度不均一性補正の方法を確立するため、まず(1) 不均一性の尺度をあらわす指標、および不均一性補正用の、smoothing 処理法について検討した。次に、(2) 不均一性をあらわす後述の flood 像を多くの因子の関数として測定し、各種因子による不均一性の変化を定量的に評価した。

本報では、以上の2点に関して、一連の実験を

行なって得られたいくつかの知見の中から、主として(1)に関するものについて述べる。(2)の結果については、第2, 3報で報告する。

II. 不均一性をあらわす変動係数

シンチレーションカメラ(以下、単にカメラという)の感度不均一性は、適当な線源(コリメータ装着時は厚さの等しい板状線源、コリメータ無しの場合は点線源)を用いてカメラの全視野に、一様に γ 線を入射させることにより測定することができる。このRI イメージを flood 像という。flood のデジタルイメージからカメラの不均一性を数値的に表示することができる。

本報では不均一性を定量的に評価するため次のような不均一性の尺度について検討した。測定された flood 像にはカメラの本来の不均一性による計数値の変動(σ_u^2)と計数値の統計的変動(σ_p^2)の2つが含まれている。そこで、flood 像の計数値から実測して得られる分散を σ_i^2 であらわし、近似的に次式のような分散の加法性が成立すると仮定する。

$$\sigma_i^2 = \sigma_u^2 + \sigma_p^2 \quad (1)$$

ここで flood 像の1画素当たりの平均計数値を \bar{c} とすると、ポアソン分布の法則より、

$$\sigma_p^2 = \bar{c} \quad (2)$$

また、flood 像の分散 σ_i^2 は関心領域を構成する画素数 n 、座標 (x, y) の画素の計数値を、

$$c_i (i=1, 2 \sim n) \text{ とすると、}$$

* 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4月28日

別刷請求先: 千葉市穴川4丁目9番1号(〒280)

放射線医学総合研究所臨床研究部

松 本 徹

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 \quad (3)$$

したがって、

$$\sigma_u^2 = \sigma_i^2 - \bar{c} \quad (4)$$

以上より flood 像の不均一性のみに由来する分散 σ_u^2 を求めることができる。ただし、このままでは flood 像の測定の際計数値を多く集積するほど σ_u^2 の値も大きくなってしまふ。そこで flood 像の計数値とは無関係に不均一性の程度をあらわすことができる指標として、平均計数値 \bar{c} との相対値、すなわち次式のような変動係数(%)を用いることにした。

$$\text{不均一度} = \frac{\sigma_u}{\bar{c}} \times 100 = \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\sigma_i^2 - \bar{c}} \times 100\% \quad (5)$$

次に、この指標が有効であることを証明するため不均一性が変動しないと思われる 24 時間以内に、1 画素当たりの平均計数値 \bar{c} が 9~52,000 カウントにわたるカメラ自体の不均一性をあらわす flood 像を測定した。使用したカメラは東芝製 G CA 202 遅延線型である。flood 像は TOSBAC 3400 Model 31 オンライン電子計算機システム¹³⁾により収集した。

Fig. 1 に $\bar{c}=9$ と 52,144 カウントの場合の flood 像 (⁵⁷Co による) を示す、これより(5)式を用いて不均一度を計算した。結果(A)を Table 1 に示す。ここで flood 像は 64×64 画素で表示し、1 画素は 4.6 mm×4.6 mm である。以下の実験データの解析に際してはカメラの周辺部の高感度領域は臨床

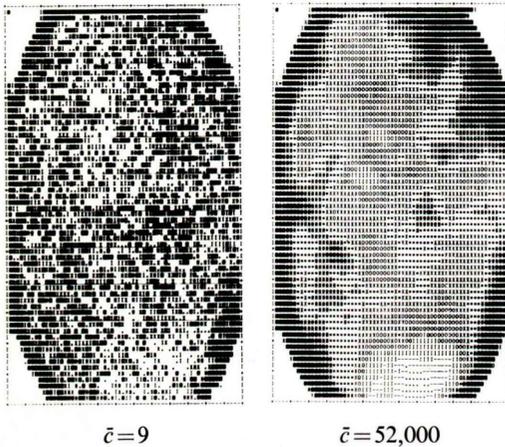


Fig. 1 Flood image as a function of \bar{c} (=average counts/pixel) from 9 to 52144. Conditions: ⁵⁷Co point source in air, isotope peak: centered in window, window width: 20%, without collimator

grey scale	pixel counts/ $\bar{c} \times 100\%$	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 + O M
11	120 <	X + O M W

Table 1 The quantity non-uniformity vs. parameters vs. average counts per field element.

parameters of non-uniformity *	\bar{c} = average counts per element				
	9	165	925	10096	52144
	33%	7.8%	3.3%	1.0%	0.44%
A	6.28%	6.78%	6.71%	6.72%	6.75%
B	75.2%	33.3%	17.1%	13.4%	13.0%
C	33.7%	10.3%	7.48%	6.78%	6.77%
D	103%	34.8%	26.5%	23.9%	24.0%

* : Counting statistics for 1 standard deviation.

A : $\sigma_u/\bar{c} = \sqrt{\sigma^2 - \bar{c}}/\bar{c} \times 100$ (%)

σ = The std. dev. of counts in region of interest.

B : The percentage of number of elements which exist within the range from $(\bar{c} - 10\% \bar{c})$ to $(\bar{c} + 10\% \bar{c})$.^{14), 15), 16)}

C : $\sigma/\bar{c} \times 100$ (%)^{8), 17)}

D : $1/2 \cdot (c_{max} - c_{min})/\bar{c} \times 100$ (%)

c_{max} = The maximum count of element

c_{min} = The minimum count of element^{18), 19)}

Conditions:

Source: ⁵⁷Co point

Without collimator

Head tuning: Near perfect

Isotope peak: Centered in window

Window width: 20%

Note, parameter-A adopted by the authors have fixed value as compared with the parameters B, C, D defined by other reporters.

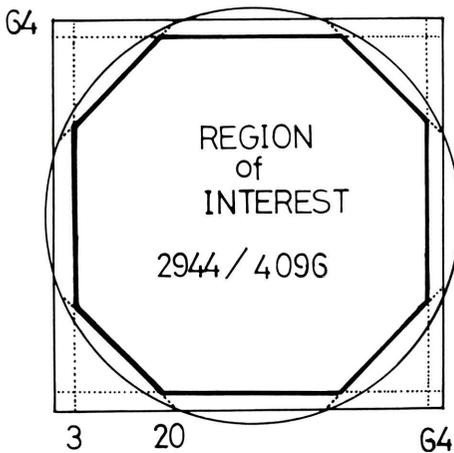


Fig. 2 Region of interest used for quantitative assessment of the non-uniformity. Effective area is 2944/4096 (64×64)

像を求める時、必要でないものを除外した。したがって flood 像の関心領域は Fig. 2 に示す約 3,000 画素で構成される。

Table 1 には他の論文に採用されている不均一性の尺度で計算した結果^{8, 14-19)} B, C, D も示してある。これより次のようなことがいえる。

解析対象の 5 個の flood 像は統計変動 σ_v のみが異なり、不均一性の程度は一定のはずである。しかし指標 B, C, D の値は統計変動に比例して変化するような不均一度を示している。一方、指標 A の不均一度は一定である。指標 C は (3) 式の σ_v と平均計数値 \bar{c} との相対値であるが、統計変動が \bar{c} の 1% 以下の flood 像において指標 A と同じになる。また、この Table から各指標ごとに、 $\bar{c} = 52,144$ (相対標準偏差 0.44%) の時の不均一度を 1 にノーマライズして \bar{c} の関数である曲線を探してみると、それらは $\bar{c} \geq 24,000$ カウントで一致し、大体 1.0 に近い値になることがわかる。すなわち、1 画素当たりの平均計数値が 24,000 以下の flood 像では指標 A のみが不均一度を正しく表示する。また、指標 A において $\bar{c} = 9$ の flood 像の不均一度のみが他に比べて多少小さくなっている。これは flood 像の計数値が余り少な過ぎると (1) 式

の仮定が成立しなくなるとを暗示している。したがって、指標 A で正確に不均一度を算出するには flood 像全体で少なくとも 40,000 カウント以上集める必要がある。

III. flood 像の smoothing 処理

(1) 式に示すごとく、flood 像の分散は不均一性と統計変動が重畳した結果生じると考えられる。したがって、統計変動の大きな flood 像を用いて不均一性補正を行なうと補正後臨床像に統計変動が伝播する。また、不均一性を定量的に評価する時不均一性パターンの変化の検出が鈍感となる。そのため flood 像の統計変動はできるだけ小さい方がよい。統計変動を小さくする第 1 の方法は Fig. 1 に示すようにできる限り計数値を蓄積することである。たとえば 1 画素当たり 10^4 カウント集めれば統計変動は 1% となる。しかし、 64×64 マトリックスの flood 像を形成するには 4×10^7 の計数値が必要である。これを 10^4 cps の計数率で測定したとしても約 1 時間以上の時間がかかる。そのためこの方法は余り実用的でない。一方、カメラに内在する不均一性パターンはゆるやかな変動であるのに対して統計変動は画素ごとの変動であり、高周波成分を多く含んでいる。そこで他の方法として不均一性パターン (σ_u) には余り影響しないで統計変動 (σ_v) のみを大きく減少させるような smoothing 処理法を考えることにした。

(a) 統計変動 (σ_v) に対する smoothing 効果

smoothing 用フィルターとして、関数 $p(x, y)$ を選んだ時、統計変動 σ_v を含む flood 像に smoothing を施した後の変動 σ_v' は一般的に次式のごとくあらわされる。

$$\sigma_v' = \sqrt{\frac{\bar{c}}{A}} \quad (7)$$

ただし、 \bar{c} は flood 像の 1 画素当たりのカウント。

$$A = 1 / \iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y)^2 dx dy \quad (8)$$

$$\iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy = 1 \quad (9)$$

ここで $p(x, y)$ を次式のごとく 2 次元ガウス分布関数とすると、

$$p(x, y) = k \cdot \exp\{-(x^2 + y^2)/2\sigma^2\} \quad (10)$$

$$A = 4\pi\sigma^2 \quad (11)$$

(11)式が得られる。ただし、 σ はガウス分布の標準偏差である。(11)式を(7)式に代入し、

$$\sigma_p' = \sqrt{\bar{c}} / 2\sqrt{\pi} \cdot \sigma \quad (12)$$

すなわち、統計変動 σ_p を含む flood 像にガウスフィルターで smoothing を施した場合、元の統計変動 $\sigma_p = \sqrt{\bar{c}}$ をその $1/2\sqrt{\pi} \cdot \sigma$ に減少させることができる。Fig. 3 は統計変動 σ_p の flood 像に対してガウス分布の σ をいろいろに変えたフィルターで smoothing を施した後の相対標準偏差、 $\sigma_p'/\bar{c} \times 100$ (%) を flood 像の1画素当たりの平均計数値 \bar{c} の関数としてあらわしたものである。たとえば、 $\bar{c} = 800$ の flood 像に対しては $\sigma = 1.0$ 画素 (4.6 mm) のガウスフィルターで smoothing すれば、統計変動を1%以下におさえることができる。この時 flood 像を得るのに必要な測定時間は単に計数を蓄積する方法にくらべて 1/10 以下に短くなる。

(b) 不均一性 (σ_u) に対する smoothing の影響
不均一性、 σ_u と統計変動 σ_p を含む flood 像に smoothing を施すと高周波成分の σ_p は大きく減少するが、低周波成分の σ_u も影響を受ける。不均一性の補正を精度よく行なうには、その影響はできるだけ小さい方がよい。ここでは1画素当たりの平均計数値 \bar{c} の flood 像にガウスフィルターで smoothing を施した時、感度不均一性 $\sigma_u/\bar{c} \times 100$ (%) がどの程度影響を受けるかを推定した。解析対象は Fig. 1 と同じ条件で測定された1画素当たりの平均計数値が $\bar{c} = 684$ の flood 像である。smoothing 処理を行なう前の flood 像の不均一度は(5)式により 5.99% と計算された。一方、(10)式であらわされるガウス分布の標準偏差を、 $\sigma = 0.5$ 画素 (2.3 mm) から $\sigma = 2.5$ 画素 (11.5 mm) まで 0.25 画素 (1.15 mm) のきざみで変化させて9種類のガウスフィルターを作成した。次に $\sigma_p^2 = \bar{c} = 684$ の統計変動をもつ flood 像に対して、以上の各フィルターで smoothing を施した後の統計変動 σ_p' を(12)式により推定した。

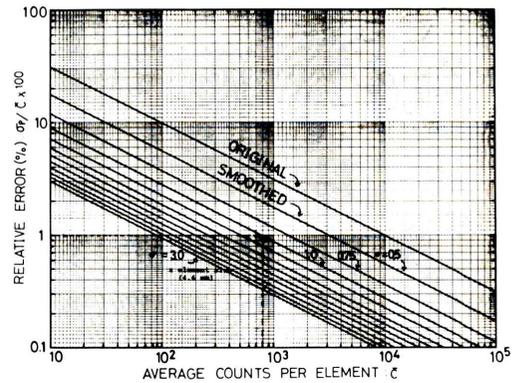


Fig. 3 Relative error ($\sigma_p'/\bar{c} \times 100\%$) of pixel counts of flood image, not smoothed or smoothed by Gaussian function with various standard deviation (σ), as a function of average counts/pixel.

また、実際に各フィルターで smoothing された9個の flood 像からその分散 σ_c^2 を(3)式により計算した。以上より smoothing 後の不均一度は

$$\sigma_u'/\bar{c} = \sqrt{\sigma_c^2 - \sigma_p'^2} / \bar{c} \quad (13)$$

不均一性に対する smoothing 処理の影響は σ_u'/\bar{c} と σ_u/\bar{c} (=5.99%) との比として求めた。その結果、たとえば、平均計数値 $\bar{c} = 684$ の flood 像を、 $\sigma = 1.0$ 画素 (4.6 mm) のガウスフィルターで smoothing した後の統計変動 σ_p' は Fig. 3 より元の 1/3 に減少すると推定されるのに対して、不均一度 σ_u'/\bar{c} は元の 0.96 に減少したに過ぎなかった。また、 $\sigma = 1.5$ 画素 (6.9 mm) および 2.5 画素 (11.5 mm) のフィルターを使用した時の統計変動はそれぞれ 1/5, 1/10 に大きく減少するのに対して、不均一度は 0.93, 0.87 に低下しただけであった。

IV. 不均一性パターンの変化

II においては、不均一性を定量的に評価するのに(5)式の不均一性の程度を表わす指標が有効であることを述べた。しかし不均一性補正を考える時は、条件の変化によって不均一性パターンがどのように変化するかを考慮しておかねばならない。何故なら、2つの flood 像の不均一度がかりに同じであったとしても対応する局所の感度は同じと

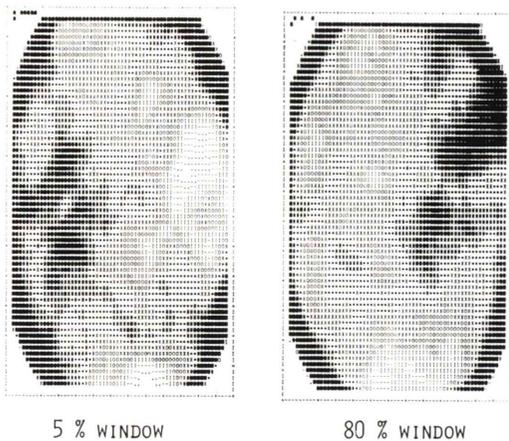


Fig. 4 Flood images of 5%, and 80% window width. Conditions: ^{57}Co point source in air, peak centered in window. Correlation coefficient: $\gamma = -0.21$

は限らないからである。そのため、ある flood 像に対して他の flood 像の不均一性パターンがどの程度変化したか、またはパターンの類似の程度がどのくらいかを表わす指標として flood 像間の相関係数 γ を求めた。

$$\gamma = \frac{\sigma_{A \cdot B}}{\sigma_A \cdot \sigma_B}, \quad -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (14)$$

ただし、 σ_A 、 σ_B は flood 像 A 、 B 、それぞれの計数値から計算した標準偏差、 $\sigma_{A \cdot B}$ は A 、 B の共分散の平方根である。 γ の大小、プラス、マイナスの関係から、ある程度は不均一性パターンの変化を推定することができる。1 例として Fig. 4 を示す。

V. 考 察

flood 像中の統計変動は不均一性の評価をあいまいにし、誤差伝播法則より不均一性補正の精度を低下させる原因になると考えられる。したがって、できるだけ統計変動の小さな flood 像を測定するか、あるいは統計変動を除去するような前処理が必要である。ここでは不均一性の評価を正確に行なうためには flood 像の測定に際してどれくらい多くの計数値を集めればよいかを考察する。

(a) 不均一度を計算する場合

Table 1 の結果より著者の提案した (5) 式の指標を用いるなら、全視野 (64×64 マトリックス) で 40,000 カウント (1 画素当たりの平均計数値 $\bar{c} \doteq 10$) 以上集めれば統計変動と無関係に不均一度を計算することができる。

(b) 不均一性パターンの変化を見つける場合

^{57}Co 点線源、空気中で 10% および 20% ウィンドー幅を用いてカメラ自体の不均一性をあらわす flood 像を測定し、(6) 式より 2 つの flood 像間の相関係数 γ を計算した。この時、10%、20% ウィンドー幅の各 flood 像の統計変動は、それぞれ約 5% (1 画素当たり $\bar{c} \doteq 400$)、3.5% ($\bar{c} \doteq 800$) であり、これから計算された相関係数は $\gamma = 0.59$ であった。

次に $\sigma = 0.25$ 画素 (2.3 mm) から $\sigma = 2.5$ 画素 (11.5 mm) までの 10 種類のガウスフィルターを用いて smoothing を施した後、flood 像間の相関係数を計算した。Fig. 5 はその結果を σ の関数として表示したものである。

これより、 σ に比例して γ の値は次第に大きくなり、 $\sigma = 1.0$ 画素 (4.6 mm) 付近で飽和 ($\gamma = 0.89$) に達した。すなわち、10%、20% ウィンドー幅を用いた時の不均一性パターンの類似度 (γ) は無処理の時の計算値 0.59 でなくて、smoothing 後に計算した飽和値 0.89 が正しいものであるといえ

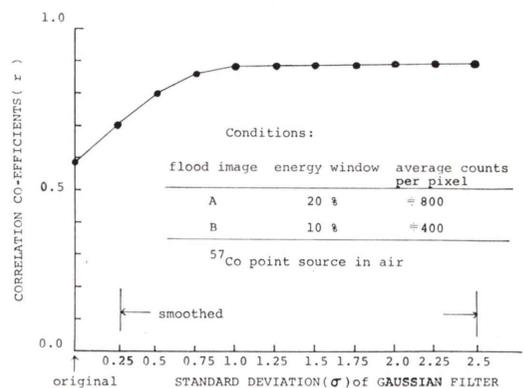


Fig. 5 Correlation coefficients between the flood image A and B, not smoothed or smoothed by Gaussian function with various standard deviation (σ).

る。ここで、統計変動 3.5% ($\bar{c}=800$), 5% ($\bar{c}=400$) の flood 像に $\sigma=1.0$ 画素 (4.6 mm) のガウスフィルターで smoothing した後の変動は Fig. 3 より、それぞれ 1%, 1.4% になっていることが推定できる。したがって、この場合、相関係数 r より不均一性パターンの変化を正確に検出するには flood 像の統計変動が 1~1.4% ぐらいになるまで計数値を集めるべきであることがわかる。しかしこのような測定は、実際には長時間を要する。そこで統計変動を 1% 以下に低下させることを目的にして、本報で検討したような smoothing 処理を実行すると測定時間が大幅に短縮されることになる。ただし、不均一性パターン自身も smoothing の影響を受けるので、III (b) で示したごとく、smoothing 処理法の適用の限界に気をつけなければならない。

IV. 結 論

(a) 不均一性補正を精度よく行なうには、まず種々の因子による不均一性の変化を定量的に評価する必要がある。そのためには本報で提案したような不均一度と不均一性パターンの変化をあらわす 2 つの指標を利用するのが有効である。

(b) flood 像の統計変動に依存せずに不均一度を計算するためには、著者が使用したカメラでは少なくとも 1 画素当たり 10 カウント (64×64 画素の flood 像の場合、全計数約 40,000) 以上の flood 像を測定すればよい。

(c) 不均一性パターンの変化を flood 像の統計変動と無関係に精度よく検出するには、flood 像の 1 画素当たりの変動が 1% 以下であることが望ましい。

(d) 現実には (c) の測定の実行は大変なので、flood 像には適当な smoothing 処理を施すべきである。ガウスフィルターを用いた場合、最適なガウス分布関数の標準偏差 σ を選ぶことにより、不均一性パターンには余り影響せず、統計変動を大幅に減少させる smoothing を行なうことができる。たとえば、1 画素当たり $\bar{c}=800$ (全計数 $3.2 \times 10^6 / 64 \times 64$ 画素) の flood 像に対しては、 $\sigma=1.0$

画素 (4.6 mm) のガウスフィルターを用いると、不均一性パターンを变形させることなく統計変動を 1% 以下にすることができる。

(e) 以上のような処理を行なったイメージによって、不均一性補正用マトリックスや不均一性の変化を検出する参照マトリックスを作成すべきである。

謝辞：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) Hiramoto T, Tanaka E, Nohara N: A Scintillation Camera Based on Delay-Line Time Conversion J Nucl Med 12: 160-165
- 2) 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
- 3) Quinlan MF, Wagner HN: Lung Imaging with the Pinhole Anger Camera. J Nucl Med 9: 497-498, 1968
- 4) Donald W, Fink F: Field Uniformity Distortion with the Pinhole Collimator on the Scintillation Camera. J Nucl Med 13: 338-339, 1972
- 5) Strange DR, Thomas FD: Functional Analysis of Gamma Camera Field Uniformity with Important Clinical Implications. J Nucl Med 11: 334-335, 1970
- 6) Malamud H: Filter to Correct for Inverse Square Law Non-Uniformity in the Pinhole Collimator. J Nucl Med 13: 861-862, 1972
- 7) Wolff JR: Calibration Methods for Camera Systems. Quantitative Organ Visualization in Nuclear Medicine, Complied Edited by Kenny PJ and Smity EM University of Miami Press 229-260, 1970
- 8) Smith EM: On Methods for Normalizing the Response of the Anger Camera Imaging system. Quantitative Organ Visualization in Nuclear Medicine, Complied Edited by Kenny PJ and Smith EM, University of Miami Press 269-278, 1970
- 9) Oberhausen E, Neumann KJ, Sciffler W: Method for Adjusting the Anger Camera. Medical Radioisotope Scintigraphy (Vienna IAEA) 1: 145-150, 1969
- 10) Bruno FP, Morrison LM, Mauderll W et al: Com-

- puter-Generated Correction of Non-uniform Detector Response of a Gamma Camera. *J Nucl Med* **11**: 623-624, 1970
- 11) 朝倉浩一, 伊藤乙正, 小野 慈他: コンピュータによるシンチカメラの均一性補正. その利用法に関して, *核医学* **12**: 382, 1974
 - 12) Beierwaltes WH, Keyes JW, Carey JE: *Manual of Nuclear Medicine Procedures*. CRC-Press p 113, 1971
 - 13) 福久健二郎: 「放医研のオンライン電子計算機システムについて」 *放射線科学* No. 5-7 1970
 - 14) Keyes JW, Gazella GR and Strange DR: Image Analysis by On-Line Minicomputer for Improved Camera Quality Control. *J Nucl Med* **13**: 525-526, 1972
 - 15) Towlinski J, Mackiewicz H, Siwincki H, et al: Investigation of Distortions in Gamma Camera Scintigraphic Pictures. *Nuclear-Medizin* **9**: 70-77, 1970
 - 16) Cohen G, Kereiakes JG, Padikal TN et al: Quantitative Assessment of Field Uniformity for Gamma Cameras. *Radiology* **118**: 197-200, 1976
 - 17) Hasman A, Groothedde RT: Gamma-Camera Uniformity as a function of Energy and Count-Rate. *Brit J Radiol* **49**: 718-722, 1976
 - 18) Macey DJ: The Uniformity of Gamma Cameras. *Phys Med Biol* **17**: 857-858, 1972
 - 19) Constable AR, Hill DW: Quantitative Assessment of the Characteristics of a Gamma Camera without the Use of a Multi-Channel Analyser. *Phys Med Biol* **14**: 139-142, 1969
 - 20) Tanaka E, Iinuma TA: Approaches to Optimal Data Processing in Radioisotope Imaging. *Phys Med Biol* **15**: 683-694, 1970

Summary

Non-Uniform Sensitivity of Delay-Line Scintillation Camera (No. 1); Methods for Expressing the Non-Uniformity

Toru MATSUMOTO

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

Methods for expressing non-uniformity of the camera are presented in this report.

(1) The parameter expressing the extent of non-uniformity is defined as, $\sqrt{\sigma_t^2 - \bar{c}}/\bar{c} \times 100$ (%), where σ_t is the standard deviation of counts per pixel and \bar{c} is the average counts per pixel in a region of interest. It is confirmed by the experiment that even if number of collected data for the flood image varies from 10 to 5×10^4 counts per pixel, this parameter has a constant value as compared with those of others in which the non-uniformity varies inversely with the increase of average counts per pixel in a region of interest.

(2) The parameter expressing the differences in the pattern of non-uniformity between the two

flood images is defined as the correlation coefficients (r) between those images. Calculating this parameter, it is necessary that the statistical fluctuation in flood images must be kept less than 1% of the average counts per pixel \bar{c} .

(3) Because of the elimination of statistical fluctuation and the reduction of time required for non-uniformity measurements, it is effective to apply the smoothing procedures by the Gaussian filter to the flood image. Experimentally and theoretically, it is proved that the statistical fluctuation in a flood image can be reduced by the optimal smoothing procedures without changing the pattern of non-uniformity.