



Title	電子計算機によるRIイメージ形成のシミュレーション (1) 2次元RIイメージにおける欠損の検出
Author(s)	飯沼, 武; 福久, 健二郎
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1972, 31(12), p. 1270-1285
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17264
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

電子計算機による RI イメージ形成のシミュレーション

(1) 2次元 RI イメージにおける欠損の検出

放射線医学総合研究所 (千葉市穴川4-9-1)

物理研究部 飯 沼 武

技術部 福 久 健 二 郎

(昭和46年12月17日受付)

Digital simulation of radioisotope imaging

(1) On the recognition of a defect in plane source by human observer

T.A. Iinuma, Ph.D. and K. Fukuhisa, B.Sc.

National Institute of Radiological Sciences, Anagawa, Chiba-shi, Japan

Research Code No: 208

Key Words: Digital simulation, Radioisotope imaging, Human recognition, Defect

Using a digital computer, the radionuclide-image forming process was simulated assuming a defect in the plane source background and a two-dimensional Gaussian point spread function. Position, size and depth of the defect was determined randomly by means of uniform random number. 30 simulated images containing a defect of various sizes and depths are made generating Poissonian noise and displayed on the CRT units. 14 persons are asked to see the polaroid photographs of the 30 images and to judge whether or not there is a defect in the images. From the result of their answer, signal-to-noise ratio was empirically found as a measure of human detectability of the defect.

1. 緒 言

近年、電子計算機がスキャナーやカメラからの RI 像 データをデジタル的に収集し、平滑化 (smoothing) やぼけ修正 (refocusing) などの画質改良を行なったり、興味ある部位の計数値の時間的変化を観察するなどの研究に広範に利用されている。一方、RI 像の形成は3次元の臓器内の RI 分布に対しイメージ測定装置のもつ3次元空間応答による重ね合せが行なわれ、2次元的な計数値分布に変換されるという過程であり、得られた計数値分布には RI 崩壊率の統計的性質によるポアソン雑音が含まれる。このように RI 像形成過程には RI の物理的特性、各種臓器における

分布状態、イメージ測定系の感度や解像力、イメージ記録系の性質、得られたイメージと人間の眼の相互関係などの多くの因子が複雑に関連しているため、RI 像形成システムの総合的な評価には未だ解決されていない問題が多く残っている。

本研究では電子計算機を用いて RI 像形成過程をできるだけ忠実にシミュレートし、前述の各因子間の相互関係を明らかにすると共に、最良の RI 像 (診断にもつとも役立つ) を得ることを目的とする。シミュレーションの方法は最終的には3次元の RI 分布と測定系の応答関数を用いる必要があるが、今回は第1ステップとして RI 像中の欠損がその大きさおよび周囲組織との濃度比の関

数として、どの程度人間の眼で検知し得るかを判定する目的で、1コのコールド・スポットを含む2次元の均一な線源と2次元ガウス分布で近似した測定系の点線源応答 (point spread function: PSF と略) を用いたシミュレーテッド・RI像を計算機により作成した。本報では先ずシミュレーションの方法論の詳細を述べ、続いて得られた像の読影による欠損検出限界につき論ずる。計算機を用いたRI像のシミュレーションについては今までに2・3の報告があるが⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾本論ではそれらと異なつてさらに一般的な方法論と画質評価法を提案する。

2. シミュレーテッド・RI 像の作成法

放医研の TOSBAC 3400 DAC on-line システム⁽¹⁾を用い先ずイメージ装置のPSFとして2次元のガウス分布を計算し、次に一定濃度のRI分布内に四角形で近似したコールド・スポット(1コまたは0)のある線源を合成する。続いてこれらの両者の重ね合せ積分を計算すると、PSFによる“ぼけ”が導入された像ができる。さらにこの像にポアソン分布の統計変動を含めるためポアソン乱数を発生させ、雑音と“ぼけ”が含まれた最終的な像を磁気テープに記憶させる。その後、磁気テープ中の像をブラウン管表示装置(CRT)およびライン・プリンタ(LP)によつて表示する。

2-1 2次元平面ファントム (Plane Phantom No. 1)

ファントムとして一定の比放射能をもつRIの2次元平面上に正方形の欠損を1コ有するものおよび欠損の全くないものを発生させる。ファントムの大きさは像表示の際の絵素の数とPSFの大きさから、 $85 \times 85 = 7225$ 絵素の正方形とし、欠損の大きさは0(欠損なし)、 3×3 、 5×5 、 7×7 、 9×9 または 11×11 絵素とした。この大きさはPSF(ガウス分布)の標準偏差(σ_p)を後に詳述するように2.5絵素(半値巾は $2.36 \sigma_p = 5.90$ 絵素)としたので、PSFにより“ぼけ”が導入されると、最小の 3×3 では眼による認識が困難であるのに対し、最大の 11×11 では比較的容易に

認識できることを考慮して決定した。

ファントムのRI濃度は欠損部以外の部位(バック・グラウンド部位)が各絵素当りの計数値で25、100および500カウントの3種になるようにし、欠損部の濃度はバック・グラウンド濃度の10%から50%の範囲で10%毎に変化するようにした。

欠損の存在位置(正方形の中心)はファントムの中心($X=43, Y=43$)からX、Y方向共絵素数で±21の範囲にあるようにした (Fig. 1 参照)。

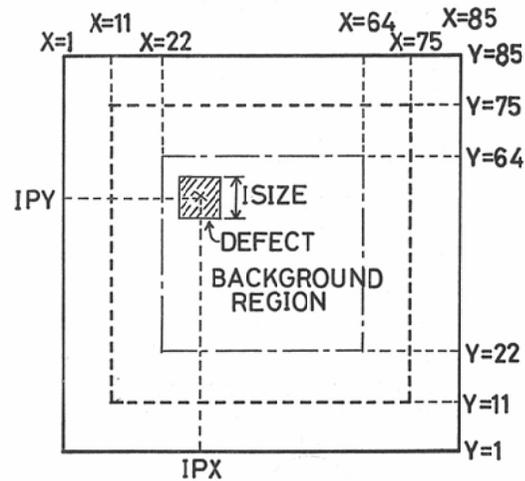


Fig. 1 Configuration of a defect in a simulated phantom. (Plane Phantom No.1)

上述の欠損の位置、大きさ、RI濃度は計算機の乱数によつてランダムに発生させ、1種類のバック・グラウンド計数値につき30コ、合計90コのファントムを合成した。

2-2 点線源応答 (PSF)

(2-1)で述べたファントムにイメージ装置による“ぼけ”を導入するため、PSFの決定が必要となる。今回は第1近似として2次元ガウス分布を用いた。

すなわち

$$PSF(x,y) = A \cdot \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (1)$$

ここで標準偏差 σ_p は前述のように2.5絵素とし、 x と y は $4\sigma_p$ までガウス分布を計算するた

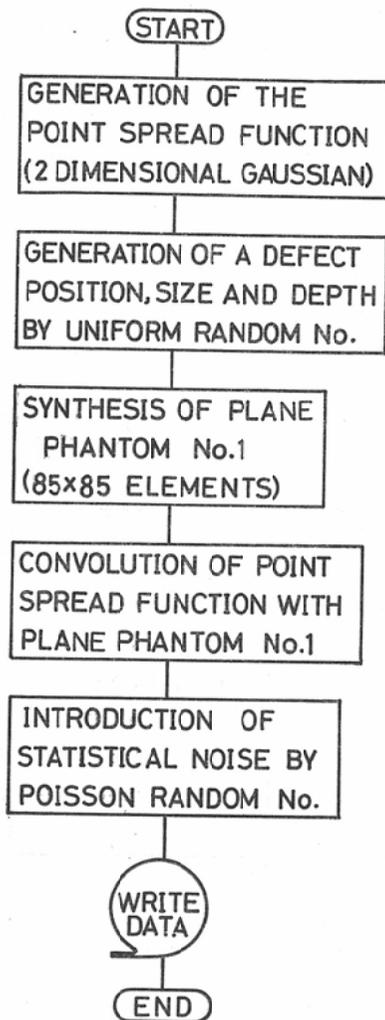


Fig. 2 A block flow chart for a simulation program of Plane Phantom No. 1.

め、 $x = \pm 10$ 絵素、 $y = \pm 10$ 絵素とし全体の P S F の絵素数は中心 ($x = 0, y = 0$) を含め $21 \times 21 = 441$ 絵素となる。A は比例常数でガウス分布を全絵素について合計した時に 1 に規格化されるように決められる。

2-3 シミュレーテッド RI 像プログラム

Fig. 2 に像作成プログラムの基本的なフロー・チャートを示す。最初に P S F を 21×21 絵素の 2 次元ガウス分布として計算する。続いてファントム中に 1 コ存在する場合の欠損の位置、大きさお

よび R I 濃度を一様乱数 (uniform random number) により発生させ、次の Plane Phantom No. 1 合成の際の欠損とする。ファントムは絵素数 85×85 の中に上記で決められる欠損 (コールド・スポット) を 1 コ (または 0) 含むものである。

以上でファントムと P S F が合成されるので、続いて画像データの計算に入る。先ず、Plane Phantom No. 1 に “ぼけ” を導入するために P S F とファントムの重ね合せ積分 (convolution integral) を計算する。デジタル演算における計算は以下の如くなる。

$$C'_{ij} = \sum_l \sum_k C_{i-k, j-l} \cdot P_{k,l} \quad (2)$$

但し、 $k, l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm 10$

C' は計算後の座標 (i, j) の絵素の値。

C は座標 (i, j) のオリジナルの絵素の値。

P は P S F の値で k, l とも 21 コの絵素から成る。

本計算の際、ファントムの絵素のうち周辺 10 絵素は使用できず、計算後得られる像の絵素数は $X = 11 \sim 75, Y = 11 \sim 75$ 計 $65 \times 65 = 4,225$ コとなる。

次に “ぼけ” の導入された像に雑音を重畳させるプログラムに入る。R I 像の雑音は計数値の統計変動によるポアソン雑音であるから、上記の像の各絵素の値 (C') を平均値とするポアソン乱数をサブ・ルーチンによつて発生させ雑音と “ぼけ” が含まれる $65 \times 65 (= 4,225)$ コの絵素から成るシミュレーテッド・R I 像を得、磁気テープ (MT) に書き込んで終了する。

本プログラムは FORTRAN IV で書かれており、2 次元画像のため大量のデータを取扱う必要上、磁気ディスクと磁気テープをバッファとして使用している。

Fig. 3 より Fig. 7 にプログラム・リストの基本的部分を示す。Fig. 3 では 21×21 絵素から成る 2 次元ガウス分布の計算を行なう。その際、標準偏差は SIGMA として数値を読みこみ、最終的に合計が 1 に規格化されたガウス分布として P S F (I, J) に記憶される。

Fig. 4 は一様乱数サブ・ルーチン (RAND

```

SIGMA = 2.0*SIGMA**2
TPSF = 0.0
DO 90 I = 1, 21
  II = I-11
  Y = II
  DO 91 J = 1, 21
    JJ = J-11
    X = JJ
    Z = X**2 + Y**2
    PSF(J,I) = EXP(-Z/SIGMA)
    TPSF = TPSF + PSF(J,I)
91 CONTINUE
90 CONTINUE
DO 12 I = 1, 21
DO 13 J = 1, 21
  PSF(J,I) = PSF(J,I)/TPSF
13 CONTINUE
12 CONTINUE

```

Fig. 3 List of a part of the simulation program:
Generating the point spread function as a
two-dimensional Gaussian function.

```

DO 1960 I = 1, 4
  URAN(I) = RAND 20(JRAND)
1960 CONTINUE
  IPX = URAN(1)*43.0
  IPY = URAN(2)*43.0
  IS = URAN(3)*6.0
  ISPOT = URAN(4)*5.0 + 1.0
  IPX = IPX + 22
  IPY = IPY + 22
  IF(IS. EQ. 0) GO TO 20010
  IF(IS. EQ. 1) ISIZE = 3
  IF(IS. EQ. 1) ISIZE = 3
  IF(IS. EQ. 2) ISIZE = 5
  IF(IS. EQ. 3) ISIZE = 7
  IF(IS. EQ. 4) ISIZE = 9
  IF(IS. GE. 5) ISIZE = 11
  CSP = COLD*FLOAT(ISPOT)
  GO TO 20020
20010 CONTINUE
  ISIZE = 0
  CSP = 0.0
20020 CONTINUE

```

Fig. 4 List of a part of the simulation program:
Generating a defect position, size and depth
using uniform random number.

20) により, 4 コの一様乱数を発生させ, 第1と
第2の乱数 (URAN (1)とURAN (2)) によ
り欠損の中心座標 (IPXとIPY) を決める.

```

NCENT = (NPHANT + 1)/2
DEFECT = CSP*0.1*BGK
IF(ISIZE. GT. 0) GO TO 21000
DO 1970 IY = 1, NPHANT
DO 1971 IX = 1, NPHANT
  SP1(IX) = BGK
1971 CONTINUE
  WRITE(1)(SP1(IX), IX=1, NPHANT)
  WRITE(30)(SP1(IX), IX=1, NPHANT)
1970 CONTINUE
  GO TO 21010
21000 CONTINUE
  K = IPY - (ISIZE + 1)/2
  KK = IPY + (ISIZE + 1)/2
  L = IPX - (ISIZE + 1)/2
  LL = IPX + (ISIZE + 1)/2
  DO 10 IY = 1, K
  DO 11 IX = 1, NPHANT
    SP1(IX) = BGK
11 CONTINUE
    WRITE(1)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
    WRITE(30)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
10 CONTINUE
    KL = K + 1
    KKL = KK - 1
    LM = L + 1
    LLM = LL - 1
    DO 20 IY = KL, KKL
    DO 21 IX = 1, L
      SP1(IX) = BGK
21 CONTINUE
      DO 22 IX = LM, LLM
        SP1(IX) = BGK + DEFECT
22 CONTINUE
      DO 23 IX = LL, NPHANT
        SP1(IX) = BGK
23 CONTINUE
      WRITE(1)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
      WRITE(30)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
20 CONTINUE
      DO 40 IY = KK, NPHANT
      DO 41 IX = 1, NPHANT
        SP1(IX) = BGK
41 CONTINUE
        WRITE(1)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
        WRITE(30)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
40 CONTINUE

```

Fig. 5 List of part of the simulation program:
Synthesis of Plane Phantom No. 1 using
the generated numbers in the program
shown in Fig. 4.

IPX, IPYとも22~64の範囲にある. 第3の乱数(URAN (3))は欠損の大きさ(正方形の一辺)の決定に利用され, 大きさ(ISIZE)は0, 3, 5, 7, 9または11のいずれかになる. 但し ISIZE = 0の時は欠損のRI濃度と周囲のバック・グラント部位のそれとの差が0になるようにした. 第4の乱数(URAN (4))を用いて欠損のRI濃度を定める. 結果はバック・グラウンド濃度の-10~-50%の範囲で10%毎の離散値とし, 変数CSPに保存する. 本プログラムでは欠損はコールド・スポットのみとしたが, ホット・スポットを得たい場合は変数COLDの符号を+とすればよい.

Fig. 5には Plane Phantom No. 1を合成するプログラムを示す. 先ず欠損部位のRI濃度の絶対値(DEFECT)を計算し, 次に, ISIZE=0(欠損なし)の場合はファントムの各絵素(SP1)に一定の計数值(BGK)を代入して磁気テープと磁気ディスクに保存する. 欠損のある場合は最初に Fig. 4のプログラムで決められた大きさ(ISIZE)と中心の座標(IPXとIPY)から, 正方形の欠損の座標を求める(X方向はLとLL, Y方向はKとKK) 続いて欠損のないバック・グラウンド部位の絵素(SP1)に一定の計数值(BGK)を代入, 欠損部位はBGK + DEFECTに相当する計数值を代入して磁気テープと磁気ディスクに保存する. Fig. 5におけるNPHANTはファントムの絵素数で本例の場合, 85に等しい.

Fig. 6は上で合成した Plane Phantom No. 1と Fig. 3のPSFの重ね合せ積分を計算する. 基本式は(2)式に示した通りでPSFが21×21配列なので, CONSP1(85, 21)という配列に一端磁気テープから Fig. 5で書き込んだファントム・データのうち, 初めの85×21コの絵素を読み, Y方向第11行の絵素についてPSFとの重ね合せ積分を実行する. 続いて磁気テープからY方向第22行目のファントム・データを85コ読み, Y方向第1行のデータとおきかえることにより, Y方向第12行の絵素につき積分を行なうという手順を繰り返すことによつて, X=11~75, Y=11~75

```
DO 1010 IY = 21, NPHANT
READ(1)(CONSP1 (IX, 21), IX = 1,
NPHANT)
```

```
DO 1011 IX = 11, 75
SP1(IX) = 0.0
DO 1012 J = 1, 21
DO 1013 I = 1, 21
IIX = IX + I - 11
SP1(IX) = SP1(IX) + CONSP1(IIX, J)*
PSF(I, J)
```

```
1013 CONTINUE
1012 CONTINUE
1011 CONTINUE
DO 1014 IX = 1, 10
IIX = IX + 75
SP1(IX) = CONSP1(IX, 11)
SP1(IIX) = CONSP1(IIX, 11)
1014 CONTINUE
WRITE(3)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
WRITE(30)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
DO 1015 MY = 1, 20
NY = MY + 1
DO 1016 IX = 1, NPHANT
CONSP1(IX, MY) = CONSP1(IX, NY)
1016 CONTINUE
1015 CONTINUE
1010 CONTINUE
```

Fig. 6 List of part of the simulation program: Convolution calculation between the point spread function (Fig. 3) and the Plane Phantom No. 1 (Fig. 5).

```
DO 70 IY = 1, NPHANT
READ(3)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
DO 71 IX = 1, NPHANT
H = SP1(IX)
ISP1(IX) = RAND40(IRAND, H)
SP1(IX) = ISP1(IX)
```

```
71 CONTINUE
WRITE(1)(ISP1(IX = 1, NPHANT)
WRITE(30)(SP1(IX), IX = 1, NPHANT)
70 CONTINUE
```

Fig. 7 List of a part of the simulation program: Introduction of Poisson noise into the convoluted Plane Phantom No. 1.

すなわち $65 \times 65 = 4,225$ 絵素の重ね合せ種分が実行される. これらの結果は再び磁気テープと磁気ディスクに保存される.

Fig. 7は最後のポアソン乱数を導入する過程で, Fig. 6の“ぼけ”のみが含まれる像データ

(雑音なし)を磁気テープから読み、その各絵素の値を平均値(H)とするポアソン乱数サブ・ルーチン(RAND40(IRAND, H))により、ポアソン雑音を発生させ磁気テープおよび磁気ディスクに保存する。ここでIRANDは乱数の初期値でデータとして与えておく。

最終結果としてPlane Phantom No. 1, 重ね合せ積分後の像データおよび雑音が含まれる像データの3種が磁気テープに記録される。

2-4 シミュレーテッド・RI像の表示条件

前節までの方法で合成された像データは各絵素の計数値として記憶されているので、それらを眼で見る画像として表示する必要がある。その方法としてブラウン管表示(CRT表示)とライン・プリンタによる表示を用いた。これらの表示プログラムの詳細についてはすでに報告してあるので²⁾本節では表示機器の概略と計数値を表示画像の濃度や輝度に対応させる方法について述べる。

まず、われわれのシステムのCRT表示装置は有効表示面積 $8 \times 8 \text{ cm}^2$, 輝度は4レベル+暗の5段階である。表示像のポイント数は $64 \times 64 = 4,096$ が最大で、それ以上は像のちらつきと計算機のコア・メモリー容量制限のために困難である。一方、ライン・プリンタは1行当たり120字印字可能でFORTRANで使用できる英数字、特殊記号など48種とその組合せにより像の表示を行なう。

次に計数値と表示レベル(輝度または濃度)の関係については全く欠損を含まないシミュレーテッド・RI像(ISIZE=0の場合)において、各レベルに対応する絵素数が等しい数になるように計数値を決定する方法(等面積分割)と最大計数値と最小計数値の間を等分に区分する方法(等間隔分割)の2種を用いた。

3. シミュレーテッド・RI像による欠損認識能力の判定

人間の眼による欠損検出能力をある程度客観的に判定する目的で、前記(2)の方法で得られる各種の大きさ、濃度の欠損を1コ含むか、欠損を全く含まないシミュレーテッド・RI像を30コ作成

し、CRT表示のポラロイド写真を得た。この30枚の像を複数の人に読影して頂き、欠損の有無とその場所を判定してもらった。その結果に基づき欠損の認識限界と画質との関連を考察した。

3-1 シミュレーテッド・RI像の輝度および濃度パターン表示

シミュレーテッド・RI像はバック・グラウンド部位の計数値500, 100および25カウントの3種につき、各30コ計90コ作成した。30コのパターンにおける欠損の中心座標(IPX, IPY),

Table 1 A defect configuration in 30 different Plane Phantom No. 1

case No.	center coordinate of a defect		size of a defect (ISIZE)	relative depth of a defect (CSP)
	(IPX)	(IPY)		
1	22	60	7 × 7	30%
2	44	25	7 × 7	50
3	46	36	11 × 11	20
4	41	55	3 × 3	50
5	44	35	9 × 9	50
6	59	47	5 × 5	10
7	57	59	7 × 7	50
8	51	59	3 × 3	20
9	32	52	3 × 3	40
10	47	49	11 × 11	30
11	—	—	0	0
12	31	43	3 × 3	40
13	25	23	9 × 9	20
14	24	51	3 × 3	30
15	—	—	0	0
16	42	25	3 × 3	10
17	61	33	11 × 11	30
18	52	29	5 × 5	10
19	48	46	5 × 5	50
20	58	26	7 × 7	10
21	49	37	3 × 3	50
22	61	48	9 × 9	50
23	61	53	7 × 7	40
24	55	24	5 × 5	20
25	31	35	5 × 5	40
26	27	41	5 × 5	30
27	—	—	0	0
28	48	38	11 × 11	30
29	43	25	3 × 3	50
30	53	28	5 × 5	50

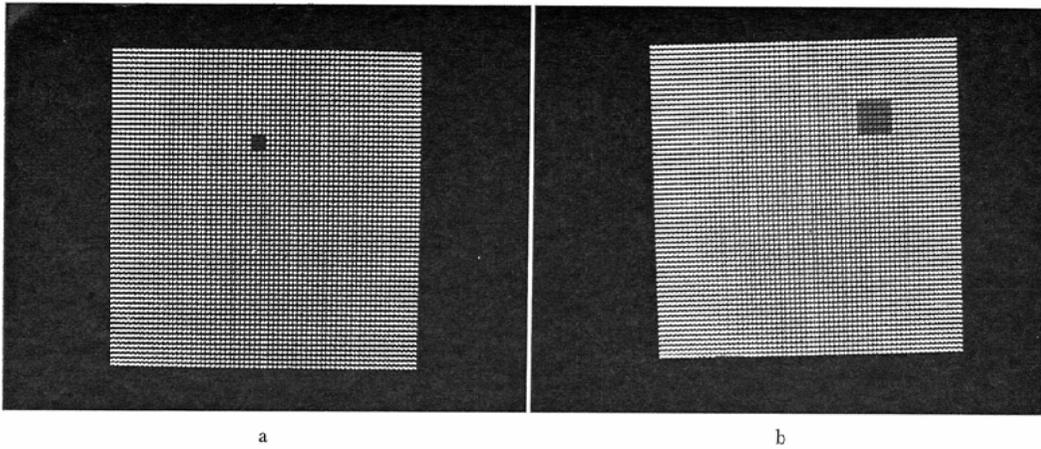


Fig. 8 CRT display of the Plane Phantom No. 1: Defect is shown by dark spots:
 (a) Case number=4, defect size=3×3, and depth=50%
 (b) Case number=7, defect size=7×7, and depth=50%

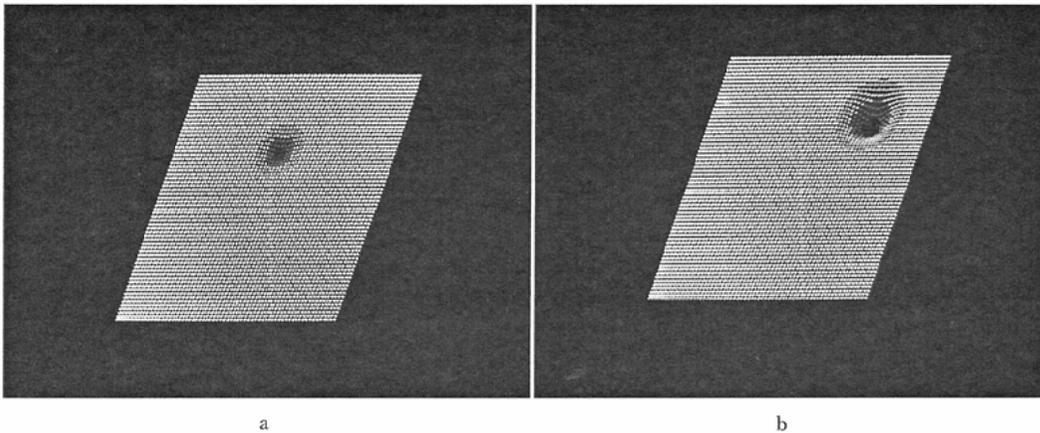


Fig. 9 CRT display of the convoluted Plane Phantom No. 1 corresponding to Fig. 8:
 (a) Case number=4 (b) Case number=7
 Both images are bird-eye views of angle=70°

大きさ（正方形）および濃度比（バック・グラウンド計数値に対する%）を Table 1 に示す。（ファントムと欠損の座標の相互関係については Fig. 1 を参照）Table 1 で大きさ（ISIZE）が 0 の場合は欠損を含まない平面線源であることを意味する。Fig. 8 (a) (b) に示すファントムの CRT 表示写真は Table 1 の case no.= 4 と 7 に対応する。さらに Fig. 8 (a)(b) のファントムに対し P S F を重ね合せ、“ぼけ”を導入した像を

Fig. 9 (a) (b) に示す。

Fig. 10 には実際に読影に用いた雑音を含むシミュレーテッド・R I 像の写真を示す。同図はバック・グラウンド計数値が 100 カウントの場合で、(a), (b), (c), (d), (e) および (f) はおのおの case no.= 4, 6, 7, 9, 10 および 11 と対応する。Table 1 から判るように case no.= 11 は欠損を含まない像であるが、それ以外は全て欠損を 1 コ含んでいる。そのうち no.= 7 と 10 は

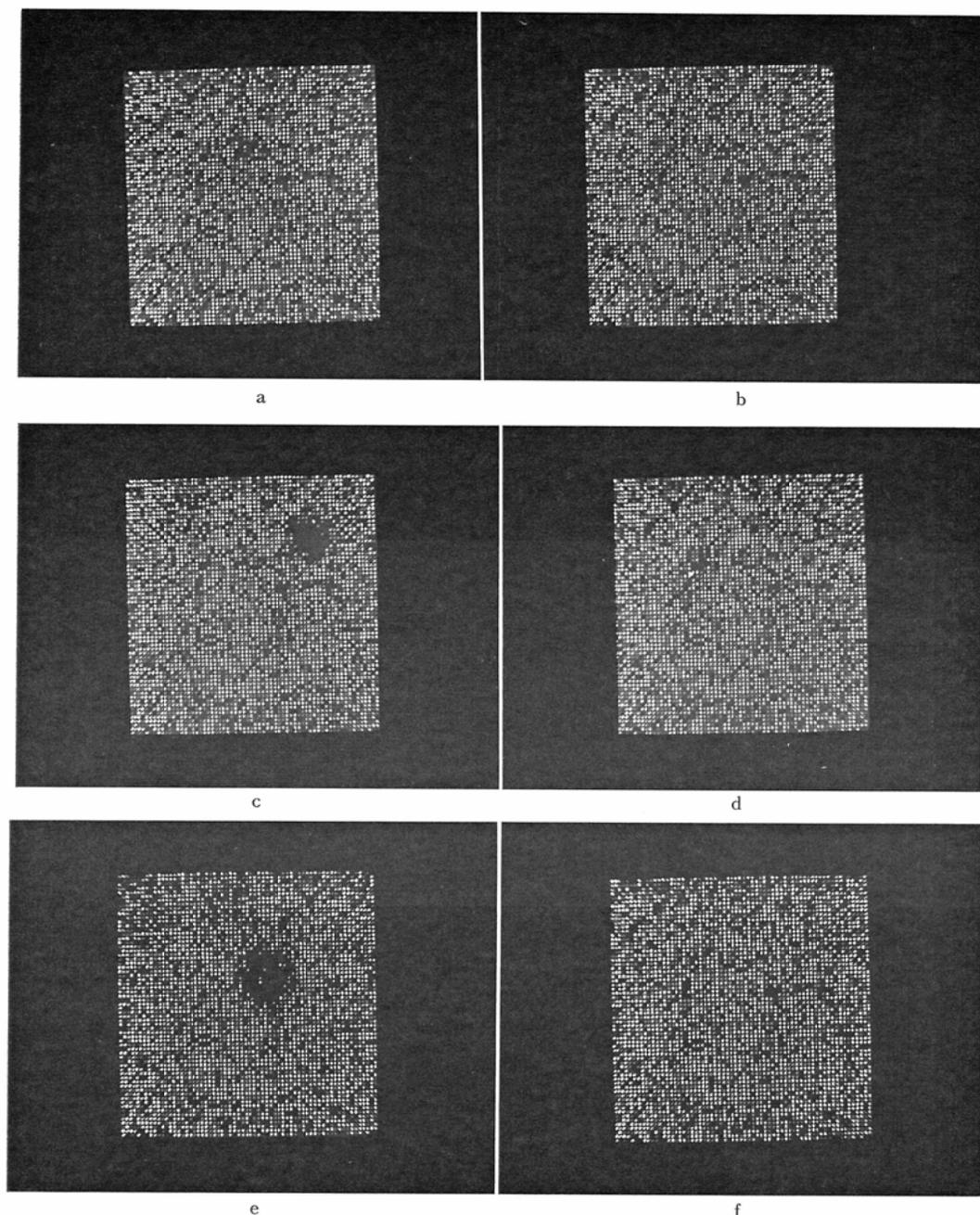


Fig. 10 CRT display of the final images of PlanePhantom No. 1 which include Poissonian noise (background count=100): The images are displayed by four brightness levels as follows: above 109, 108-103, 102-98, and 97-92 counts/image cell. Image cells which contain less than 92 counts are displayed as dark spots.

(a) case number=4 (b) case number=6 (c) case number=7 (d) case number=9 (e) case number=10 (f) case number=11 As for relationship between defect configuration and case number, refer Table 1.

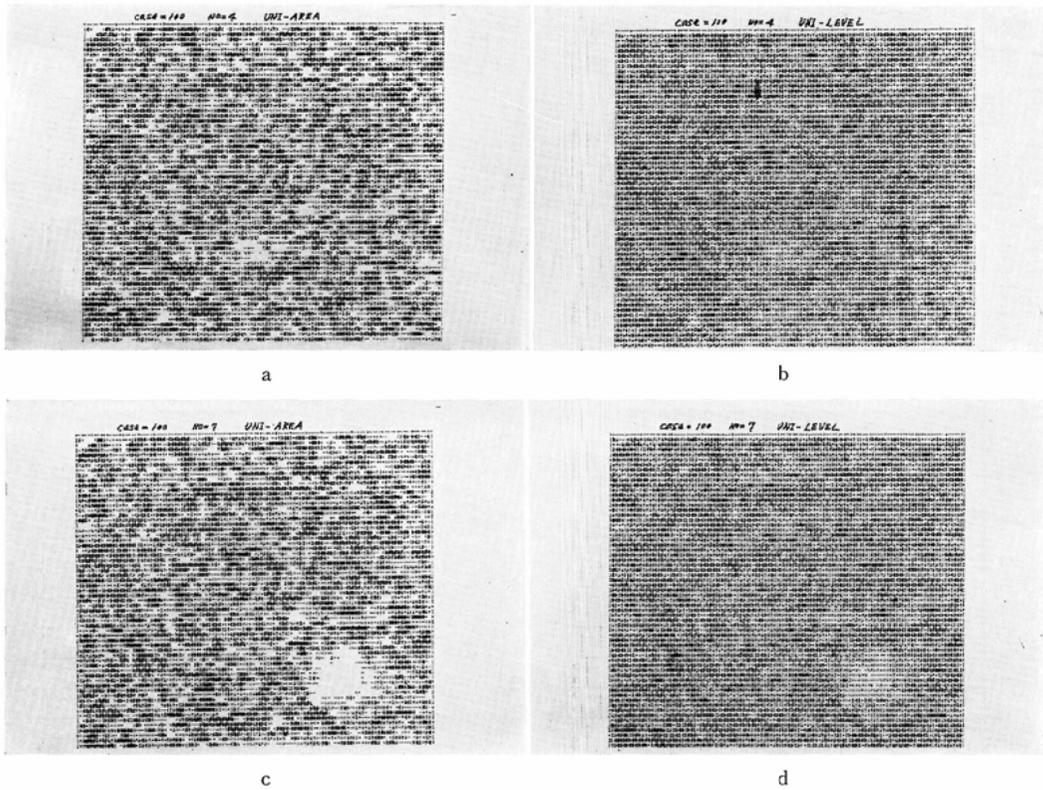


Fig. 11 Line printer display of the final simulated phantom images (background count=100) which are similar to those shown in Fig. 10: The images are displayed by printing various characters according to the pre-determined 10 count-levels (refer Table 2).

Two different modes of display are made such as "Equi-Area Division" and "Equi-Count Division". The former means that 10 count-levels are determined so that number of image cells are approximately equal for each level in the simulated phantom having no defect (case number=11). The latter means that 10 count-levels are equally divided between maximum and minimum counts in the simulated phantom having no defect (case number=11).

(a) case number=4 "Equi-Area Division" (b) case number=4 "Equi-Count Division"
 (c) case number=7 "Equi-Area Division" (d) case number=7 "Equi-Count Division"

欠損の存在が判然とするが、no.=6は Fig. 10

(b)を見ただけでは欠損が不明である。一方、no.=4と9はその中間にある。Fig.10で用いた輝度レベルは(2-4)で述べた2種のうち、5段階のレベルの絵素数が欠損のない像(すなわちno.11)において略ぼ等しくなるように分割する等面積分割プログラムを作成して求めた。そのレベルは109カウント以上が特大輝度、103~108カウントは大輝度、98~102カウントは中輝度、92~97カウントは小輝度、91ウント以下はブラン

ク(暗)である。

一方、同じシミュレーテッド・RI像をライン・プリンタにより濃度パターンとして表示した例を Fig.11に示す。同図には Fig.10と対応させるため、no.=4と7の像を示してある。本例の場合。(2-4)の等面積分割と等間隔分割の両者を用いた。分割レベルは10段階で、用いた記号・文字とそのレベルに対応するカウント数を Table 2に示す。Fig.11(a)(b)はno.=4で、(c)(d)はno.=7、また(a),(c)

Table 2 Various characters and corresponding count-levels used in line printer display of Fig. 11. More than 2 characters means that these are multi-printed.

(a) "Equi-Area Division" for a simulated phantom image (background count=100) which corresponds to Fig. 11 (a) and (c).

blank	Count less than 87
—	87 — 91
=	92 — 94
+	95 — 97
×	98 — 99
×, —	100 — 102
×, —, I	103 — 105
×, =, H	106 — 108
×, =, H, O	109 — 112
×, =, H, O, I	more than 113

(b) "Equi-Count Division" for a simulated phantom image (background count = 100) which corresponds to Fig. 11 (b) and (d).

blank	Count less than 63
—	63 — 70
=	71 — 78
+	79 — 86
×	87 — 94
×, —	95 — 102
×, — I	103 — 110
×, =, H	111 — 118
×, =, H, O	119 — 126
×, =, H, O, I	more than 127

は等面積分割 (equi-area division), (b) (d) は等間隔分割 (equi-count division) である。但し Fig. 11の像は Fig. 8, 9, 10のそれとデータ配列の関係で裏がえしの位置関係になっていることに注意されたい。

3-2 シミュレーテッド・RI 像の読影による欠損の認識

Fig. 10 に示したシミュレーテッド・RI 像のポラロイド写真を複数の人に読影して頂き、欠損があると判断した場合にはその場所を記してもらおうことにした。読影の条件は次の通りとした。先ず、読影担当者に今から示す30枚の画像には (a) 欠損が1コ含まれるか、または全くないこ

と、(b) 欠損は全てコールド・スポットであること、(c) 欠損がある場合でもその大きさと位置はランダムであることなどを前もって通知し、

Table 3. Classification of a defect into three categories according to its detectability by human recognition. "Not Detected" means all persons can not recognize the presence of a defect.

"Not Easily Detected" means some persons can recognize the presence of a defect, but some can not.

"Detected" means all persons can recognize the presence of a defect.

Background Count = 100

	defect size	defect depth (%)
"Not Detected"	3 × 3	10, 20, 30
	5 × 5	10
"Not Easily Detected"	3 × 3	40, 50
	5 × 5	20
	7 × 7	10
"Detected"	5 × 5	30, 40, 50
	7 × 7	20, 30, 40, 50
	9 × 9	20, 50
	11 × 11	20, 30

Background Count = 25

	defect size	defect depth (%)
"Not Detected"	3 × 3	10, 20, 30, 40, 50
	5 × 5	10, 20, 30
	7 × 7	10
"Not Easily Detected"	5 × 5	40
	9 × 9	20
	11 × 11	20
"Detected"	5 × 5	50
	7 × 7	30, 40, 50
	9 × 9	50
	11 × 11	30

Background Count = 500

“Not Detected”	defect size	defect depth (%)
	3 × 3	10, 20
“Not Easily Detected”	3 × 3	30
	5 × 5	10
“Detected”	3 × 3	40, 50
	5 × 5	20, 30, 40, 50
	7 × 7	10, 30, 40, 50
	9 × 9	20, 50
	11 × 11	20, 30

シミュレートッド・R I 像を No. 1 から No. 30 まで読んで頂く。

読影結果は欠損ありと正確に判定できる像 (“Detected”) 欠損の存在が認識できない像 (“Not Detected”) および欠損の認識が読影者によって異なる像 (“Not Easily Detected”) の3種のカテゴリーに分類された (Table 3 参照). 読影者には経験者 (核医学の専門医や放射線技師) と未経験者を略ぼ等しい数で合計14名選んだ. 読影の結果は上記の “Detected” の像と “Not Detected” の像については両者とも全く同一であるが, “Not Easily Detected” の像については前者の方が高正解率を示した.

Table 3 で見られるように 認識可能な欠損の大きさと濃度差はバック・グラウンド計数値の関数であり, 予期される如くバック・グラウンド計数値が大きい程小さい欠損が認識される. また人間の眼に認識され得る限界の欠損は現在用いている表示法の場合, Table 3 の “Not Easily Detected” のカテゴリーに入る大きさと濃度差を有すると考えられる. そこで Table 3 に示された各種の欠損の検出し易さを定量的に表現することを試みるため, 信号対雑音比 (S/N) を以下のように定義した.

$$S/N =$$

$$\frac{\text{ぼけた像における欠損の最大深さ (P)}}{\sqrt{\text{バック・グラウンド計数値 (BGK)}}} \quad (3)$$

ここでPは各種欠損と P S F との重ね合せ積分

(Fig. 6 参照) 後の最小値に対応し, ぼけのみで雑音のない場合の欠損の深さの最大値を表わすので欠損を認識する際の信号成分であると考え. 一方 (B G K) $\frac{1}{3}$ はバック・グラウンド部位の計数値の統計変動 (ポアソン分布) による雑音成分で, この値が大きい程欠損の認識を困難にする.

ここでPの値は次のように求める. 先ず前述した5種類の大きさをもつ正方形の欠損の深さが計数値 = 1.0 (一定) であるとし, その欠損に対し P S F による重ね合せ積分を行なった後求められる欠損の最大深さを P_0 とする. 本法で用いた P S F はガウス分布であるから P_0 は欠損の中心部の深さに等しい. この P_0 に対し実際のファント

Table 4. Peak count (P) and signal to noise ratio (S/N) for various defect sizes and depths in Plane Phantom No. 1. (background count=100)

Size	Depth	Peak Count	S/N
3 × 3	10 counts	$0.20630 \times 10 = 2.063$	0.206
	20	$\times 20 = 4.126$	0.413
	30	$\times 30 = 6.189$	0.619
	40	$\times 40 = 8.252$	0.825
	50	$\times 50 = 10.315$	1.032
5 × 5	10 counts	$0.47054 \times 10 = 4.705$	0.471
	20	$\times 20 = 9.411$	0.941
	30	$\times 30 = 14.116$	1.412
	40	$\times 40 = 18.822$	1.822
	50	$\times 50 = 23.527$	2.353
7 × 7	10 counts	$0.70781 \times 10 = 7.078$	0.708
	20	$\times 20 = 14.156$	1.416
	30	$\times 30 = 21.234$	2.123
	40	$\times 40 = 28.312$	2.831
	50	$\times 50 = 35.391$	3.539
9 × 9	10 counts	$0.86500 \times 10 = 8.650$	0.865
	20	$\times 20 = 17.300$	1.730
	30	$\times 30 = 25.950$	2.595
	40	$\times 40 = 34.600$	3.460
	50	$\times 50 = 43.250$	4.325
11 × 11	10 counts	$0.94721 \times 10 = 9.472$	0.947
	20	$\times 20 = 18.944$	1.894
	30	$\times 30 = 28.416$	2.842
	40	$\times 40 = 37.888$	3.789
	50	$\times 50 = 47.361$	4.736

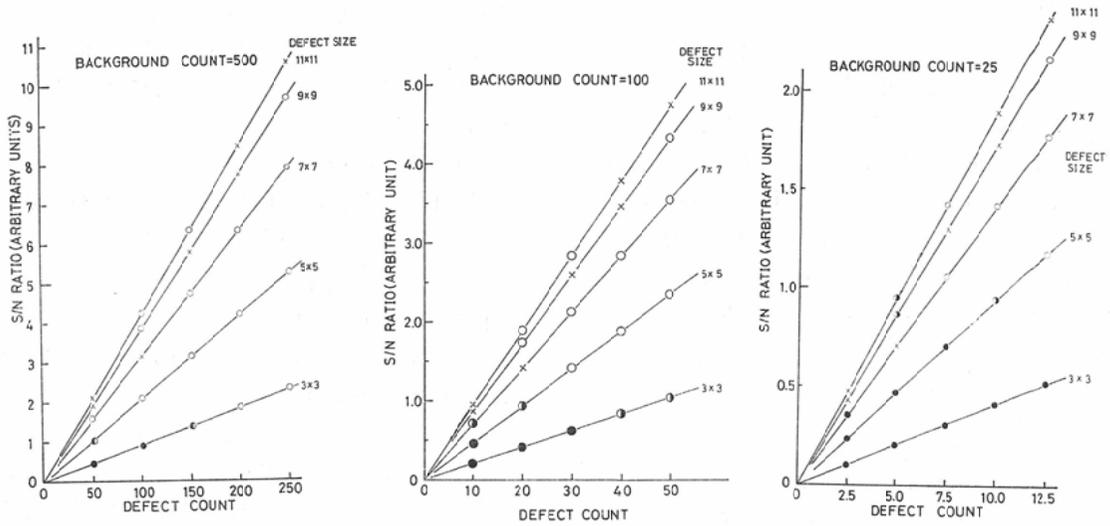


Fig. 12 Signal to noise ratio (S/N) as a function of defect depth(count) and size. Three categories of defect detectability by human recognition are shown by symbols.
 (a) background count=500 (b) background count=100 (c) background count=25
 ○“Detected” ●“Not Easily Detected” ●“Not Detected” ×Calculated value (Not present in 30 Plane Phantom No. 1)

μにおける欠損の深さ(計数值)を乗ずることによつてPが求められた。

従つて P_0 は欠損の大きさ(正方形)と P S F (ガウス分布)の標準偏差の比によつて決まり、その値を以下に示す。

size	size/ σ_p	P_0
3 × 3	3 / 2.5 = 1.2	0.20630
5 × 3	5 / 2.5 = 2.0	0.47054
7 × 7	7 / 2.5 = 2.8	0.70781
9 × 9	9 / 2.5 = 3.6	0.86500
11 × 11	11 / 2.5 = 4.4	0.94721

ここで P_0 は欠損の大きさと P S F の標準偏差の絶対値が変化しても、その比 (size/ σ_p) が変わらないければ同じ値になる。

欠損の大きさと深さの関数として P と S/N をバック・グラウンド計数值 (BGK) = 100の場合につき Table 4 に示す。また Fig. 12 にはバック・グラウンド計数值 (BGK) = 500, 100 および 25 のおのおのにつき、欠損の深さ(計数值)の関数として S/N をプロットした。(Fig. 12 (a) (b) および (c) 参照)。パラメータとして

欠損の大きさを用いている。そこでは Table 3 で示した読影者による判定結果から分類した3のカテゴリーを3種類の記号で表わしており、実線は5種類の大きさの欠損に対する $S/N >$ の計算値を示す。×印の点の欠損は作製した30コのシミュレーテッド・R I 像中には存在しなかつたものである。Fig. 12 から判ることは“Not Easily Detected”のカテゴリーに入る欠損は $S/N = 0.8 \sim 1.4$ (平均値は約 0.9) の間にあり、 $S/N > 1.4$ では“Detected”, $S/N < 0.8$ では“Not Detected”の欠損になることである。すなわちバック・グラウンド計数值や欠損の大きさに関係なく、 $S/N < 0.8$ の欠損は人間の眼によつては認識し得ないことが判明する。

$$S/N = \frac{P}{\sqrt{BGK}} = \frac{P_0 \times a \times BGK}{\sqrt{BGK}} = a \cdot P_0 \sqrt{BGK} \quad (4)$$

但し P_0 は前述の如く単位の深さをもつ正方形の欠損に2次元ガウス分布の P S F をコンボリュートした時の最大値であり、a は欠損の深さのバック・グラウンド計数值に対する比(コントラス

ト)である。

(4) 式よりファントムの計数値を増加した時、すなわち臓器のR I 摂取量が増加すると S/N は (B G K) 1/2 に比例して大きくなることが判る。また Fig. 12 に示したように人間の眼で認識し得る欠損の限界が "Not Easily Detected" のカテゴリーであるとする、S/N は欠損の大きさやバック・グラウンド計数値の如何に係わらず略ぼ一定で、この時の S/N を $(S/N)_L$ で表わすと、

$$(S/N)_L \doteq 1.0 \quad (5)$$

そこで (4) 式に (5) 式を代入して、

$$a \cdot P_0 = \frac{(S/N)_L}{\sqrt{B G K}} \doteq \frac{1}{\sqrt{B G K}} \quad (6)$$

ここで P S F の標準偏差 σ_p を一定とすると、 P_0 が欠損の大きさのみに関係する因子であり、 a はバック・グラウンド計数値と欠損部のコントラストであるから、(6) 式は $a P_0$ が計数値すなわち R I 摂取量の平方根に逆比例して小さくなること、すなわちより小さな大きさやコントラストの欠損を検出し得ることを意味する。例えば B G K = 100 カウントの場合、認識限界の欠損では $a \cdot P_0 = 0.1$ で、この欠損の大きさを 3×3 絵素とすると、前出の表から $P_0 = 0.2063$ であるから $a = 0.5$ すなわち欠損の計数値は $(1 - 0.5) \times 100 = 50$ カウントである。また R I 投与量や測定時間を増やして B G K = 1,000 カウントとすると、 $a \cdot P_0 = 1/\sqrt{1,000} = 0.0316$ となり、 3×3 絵素の欠損 ($P_0 = 0.2063$) の場合、 $a = 0.153$ すなわち欠損の計数値は $(1 - 0.15) \times 100 = 85$ カウントが認識限界となる。

一方コリメータの解像力が変つた場合に、S/N がどのように変化するかを導くために P_0 と欠損の大きさおよび P S F の標準偏差との関係を知る必要がある。本シミュレーテッド・R I 像で用いられている欠損は正方形であるが、これを等価的なガウス分布で表わし、その標準偏差を σ_s とすると P_0 は以下の式で表わされる⁷⁾。

$$P_0 = \frac{C}{(\sigma_s^2 + \sigma_p^2)} \quad (7)$$

ここで σ_p は P S F (2次元ガウス分布) の標

準偏差であり、C は比例常数である。

またコリメータの効率是一般にその半値巾の2乗に比例することが判つており、計数値は効率に比例するので

$$B G K = D \cdot \sigma_p^2 \quad (8)$$

但し D は比例常数で R I 摂取量に正比例する。

(7)、(8) 式を (4) 式に代入すると、

$$S/N = \frac{K \cdot a \cdot \sigma_p}{(\sigma_s^2 + \sigma_p^2)} \quad (9)$$

但し、 $K = C \cdot \sqrt{D}$

(9) 式において欠損の大きさと濃度を一定とすると ($\sigma_s = \text{const.}$, $a = \text{const.}$)、S/N は $\sigma_p = \sigma_s$ の時に最大値を有する。すなわち検出したい欠損の大きさが等価的な標準偏差 σ_s のガウス分布である場合にはコリメータの P S F はその標準偏差 σ_p が σ_s に等しい時にもつとも認識し易くなる。この場合 (8) 式の D が一定であることを仮定している。(例えば NaI 結晶の寸法や R I 投与量を変えれば D が変化する)。

S/N の最大値 $(S/N)_{\text{MAX}}$ は以下の式になる。

$$(S/N)_{\text{MAX}} = \frac{K \cdot a}{2 \sigma_s} \quad (10)$$

例として 3×3 絵素の欠損を取り上げて見よう。この欠損を半値巾 = 3 絵素のガウス分布と見なすと、 $\sigma_s = 3/2.36 = 1.27$ 絵素となる。前述のように $\sigma_p = 2.5$ 絵素であるから

$$S/N = \frac{K \cdot a \cdot 2.5}{(1.27^2 + 2.5^2)} = 0.318 K a \quad (11)$$

ここで $\sigma_p = \sigma_s = 1.27$ とし (10) 式に代入

$$(S/N)_{\text{MAX}} = \frac{K \cdot a}{1.27 \times 2} = 0.394 K a \quad (12)$$

を得る。(11) (12) 式より、

$$(S/N)_{\text{MAX}} = 1.24 (S/N)$$

となり、S/N は 1.24 倍改善される。

また Fig. 12 (b) よりバック・グラウンド計数値 (B G K) = 100 カウントの場合に 3×3 絵素の欠損の認識限界の深さは約 45 カウント (欠損の計数値は $100 - 45 = 55$ カウント) $a = 0.45$ であるから、(11) 式より

$$(S/N)_L \doteq 1 = 0.318 \cdot K \cdot 0.45$$

$$K = 6.99$$

K を (12) 式に代入し、最大の S/N における認識限界の欠損を $(S/N)_{\text{MAX}} = (S/N)_L \doteq 1$ とお

て

$$l = 0.394 \cdot 6.99 \cdot a$$

$$a = 0.363$$

すなわち、認識限界の欠損深さは45カウントから36カウントに改善される。この場合の欠損の計数値は $100 - 36 = 64$ カウントである。

(9) 式を用いて、その他の大きさや濃度の欠損についても同様の計算により認識限界の値を得ることができるし、コリメータの解像力 (σ_p) を変化した場合の計算も行なえる。

4. 討 論

本論ではR I 像形成過程のシミュレーションを汎用電子計算機を用いて行なう第1ステップとして、(2)節において2次元R I 分布と2次元のP S Fを用いたR I 像形成を行なう方法につき汎用性の高いFORTRAN IV で作成したプログラムを述べ、その結果得られるシミュレーテッド・R I 像のブラウン管表示とライン・プリンタによる表示法につき論じた。

ここで述べたシミュレーション・プログラムは汎用性が大きく、磁気ディスク、ドラムまたはテープを有する8 K程度の計算機によつて実行可能であるが、表示用にCRTカタイプライタを附属していることが望ましい。本プログラムで用いているシミュレーテッド・ファントムは最も単純なものであるが、さらに複雑な形状や欠損を有するファントムを合成することも容易であり、またP S Fにはガウス分布の他、実際のコリメータのP S Fを入力することもできる。但し2次元ガウス分布は焦点面におけるコリメータのP S Fをよく近似している。今後の改良点としてポアソン乱数の発生において初期値をランダムに変化させることにより一層精度のよい乱数が得られるためプログラムの変更を考えている。

(3)節では前節で作成した2次元平面に欠損を1コまたは0コ有するファントムのシミュレーテッド・R I 像を複数の人に読影してもらつた結果について論じた。ここで述べたシミュレーテッド・R I 像は一様なバック・グラウンドの中に欠損

が1コあるという単純なものであるが、それは人間の眼による認識という困難な問題を追求するにはこのような単純なモデルから出発する必要があると考えたためである。また実際の臨床例においてもこのようなモデルが基礎になることは明らかである。何故なら実際のシンチグラムはこのようなモデルの複合体で形成されているからである。

そのため(3)節では各種の大きさや濃度の欠損を人間の眼による認識の容易さという観点から3のカテゴリーに分類し、定量的に表現することを試みた。そのため2・3の因子を用いてS/N比を表すことを行なつて見たが、それらのうちで(3)式から求められるS/N値が欠損認識の容易さをもつともよく表現し得ることを経験的に知つた。特に認識限界に近いと思われる“Not Easily Detected”のカテゴリーに入る欠損のS/Nは人間の眼という可成りのばらつきが予想されるシステムを経ているにも係わらず、略ぼ一定値になる。またS/Nがこの値よりも大きい時は欠損が完全に認識でき、それ以下の場合には認識できないことも判明した。本論で用いたシミュレーテッド・R I 像とCRT表示法では認識限界のS/Nすなわち $(S/N)_L$ は0.8~1.4で平均値は約1.0であつた。この値はR I 像の形状、雑音の性質および表示方法などによつて異なると思われる。ここで用いたS/Nは欠損が存在するか否かを問うた場合のもので、欠損の形状などのdetailに関する $(S/N)_L$ は異なることが考えられる。また、シミュレーテッド・R I 像に何らかの画像処理を行なつた場合には雑音の性質がポアソン雑音と異なつてくるため、 $(S/N)_L$ は異なつた値をとると共に別の因子の導入も必要と思われる。表示方法やファントムの形状の変化も $(S/N)_L$ の値に影響すると考えられるが、雑音がポアソン分布である場合にはその値は略ぼ一定値になるものと予想される。

本法で用いたファントムは欠損が1コだけ(または0コ)存在するものであり、かつ読影者には前もつて欠損が存在したとしても2コ以上はない

ことを知らせて読影させたので、false-positiveの発生しにくい条件で行なわれたと言える。実際に欠損の存在しないファントム (No.=11, 15, 27) では欠損ありと判定した人は極めて少なかった。Sharma ら⁶⁾によると欠損の存在の可能性がある (possible) 場合と確実にある (definite positive) 場合とに質問を分けると異なつた結果が得られるという。本法の結果は彼らのいう definite positive に近いものと思われるが、この点の解明は今後に残された問題である。

(3)節で得た結論を実際の臓器から得られるR I像に適用するには臓器の厚さが小さい甲状腺のような場合か、または等感度スキャンのように深さ方向のPSFが大きく変化しないイメージ測定系で得られるR I像に限られる。このような場合には認識できる欠損はその周囲の計数値によつて決められる大きさと濃度をもつ“Not Easily Detected”以上の欠損になる。臨床で見るR I像は必ずぼけと雑音の含まれる画像であるから、そこで欠損を疑つた場合には元のデジタルR I像から欠損部の全計数値と周囲の絵素の平均計数値に欠損部位の面積を乗じて得た計数値との差を求め、それを(3)式のPの値とし、周囲絵素の平均計数値の $1/2$ 乗で除したS/Nがどの位の値になるかによつて判断することができよう。

さらに(3-1)節で述べた等面積分割と等間隔分割表示法のうち、欠損認識用の像としてCRT表示の等面積分割を使用した理由はCRTの輝度レベルが5段階という少ない数であつても、表示パターンにできるだけランダム性が表われるようにしたためである。もしレベル数が64段階以上の連続的な輝度を表示できるCRTの場合には両表示法の差異は殆んどないものと思われる。

(3)式のBGKは単位絵素当りの計数値を表わすが、その絵素の大きさはイメージ測定系のPSFの標準偏差に比して小さくとる必要がある。その理由はイメージ測定系の空間周波数特性における上限附近のdetailを描出するためである。本法で用いた標準偏差は2.5絵素で半値巾にすれば約6絵素である。この値はイメージ系の半値巾を

12mmとすれば1絵素は $2 \times 2 \text{ mm}^2$ となり、ファントム中の最小の欠損は 3×3 絵素であるから $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の大きさになる。

ここで絵素の大きさを变化した場合にS/Nが如何に変化するかを定性的に考えて見よう。今、R I像の全体の計数値を一定にしておいてその中の絵素の大きさを变化させる場合、先ず絵素の大きさがPSFの標準偏差に比して小さいような範囲で絵素の面積を小さくして行くと、1絵素当りの計数値は面積に比例して減少し、S/Nは(4)式においてaと P_0 が一定であるのに対し、BGKが減少するので低下していく。一方絵素の面積を標準偏差と同等かそれ以上に大きくとつたような場合には1絵素当りの計数値は増加するが、像のdetailを失なうことになると共に、(4)式の P_0 の値そのものが變つてしまい、(4)式が成立しなくなってくる。このことはR I像のようなQuantum Limitedな像の特徴であり、最適な絵素面積が存在することを意味している。このことについては更に詳しい検討を必要とする。

本研究で用いた P_0 の値はPSFの標準偏差が2.5絵素、欠損の大きさが 3×3 ないし 11×11 の正方形の場合であり標準偏差と欠損の大きさの比が一定、すなわち $3/2.5$ ないし 11×2.5 の場合にも正しい。しかしこの比が変る場合は P_0 の表から内挿によつて求めることができる。但しPSFや欠損の形状が異なる時には別に P_0 を計算せねばならない。

更に(4)および(9)式より投与量(計数値)とコリメータの解像力の変化に応じて認識可能の欠損の大きさと濃度が定量的に把握でき実際の臨床例においても一応の目安になるものと思われる。但し(7)式の σ_s は正方形の欠損ではガウス分布の場合と異なるので、この式は $\sigma_s \ll \sigma_p$ では成立しなくなる。また(8)式もPSFの標準偏差 σ_p が或る範囲の値にある時のみ成り立つので、(9)式は上の諸条件によつて制限を受ける。しかし本実験でシミュレートされた欠損の大きさの範囲と現在用いられている焦点コリメータでは(9)式は成立する。

R I 像のシミュレーションの応用には多くの研究が考えられる。例えば本論で用いたよりも更に複雑なデジタル・ファントムを利用した認識の研究、各種画質改良処理の研究、パターン認識の基礎研究ならびに R I 像表示法の研究などである。われわれは現在3次元のファントムによる R I 像形成シミュレーションについても研究を進めている。

5. 結 論

(1) R I 像形成過程シミュレーションの第1近似として、2次元の一樣な線源内に1コの欠損があるデジタル・ファントムと、2次元ガウス分布の点線源応答をもつイメージ装置から得られる R I 像をシミュレートするためのプログラムを作成した。

(2) 上述のプログラムにおいて、乱数を用いて発生させた各種の位置、大きさ(正方形)および濃度を有する欠損を1コ(または0)含むシミュレーテッド・R I 像を3種類のバック・グラウンド計数値につきおのおの30枚作成し、CRT表示およびライン・プリンタによる表示を行なった。

(3) CRT表示のポラロイド写真を複数の人々に読影して頂き、欠損の有無とその場所を判定してもらった。その結果に基づいて欠損の認識し易さという観点から、シミュレーテッド・R I 像を3のカテゴリーに分類し、読影結果に差のある“Not Easily Detected”のカテゴリーが認識限界の欠損であると判断した。

(4) 欠損の認識し易さを定量的に表現するため、ぼけのみで雑音の含まれない欠損の最大深さをバック・グラウンド計数値の平方根で除した量

を信号対雑音比(S/N)として定義した。本論で用いたシミュレーテッド・R I 像とCRT表示法では認識限界の欠損の S/N が略ぼ 1.0であり、 $S/N > 1.4$ で欠損は完全に認識でき、 $S/N < 0.8$ では認識することが不可能であつた。

(5) 上記の結果から R I 投与量、コリメータの解像力や感度または欠損の大きさや深さが変化した場合に S/N が如何に変化するかを示す関係式を導き、ある大きさと深さを有する欠損が認識され得る限界を明らかにした。この関係は R I イメージの雑音がポアソン雑音である場合には成立すると考えられるので、実際の臨床例においても一応の目安となるものと考えられる。

謝 辞

本研究に当り、御指導・御討論を賜わつた物理研究部第一研究室田中栄一室長に深謝する。尚、本研究の一部は「コンピュータによるがん診療の総合研究班」(厚生省がん研究助成金)より御援助を頂いている。班長梅垣洋一郎博士(臨床研究部長)に感謝する。

文 献

- 1) 福久健二郎:放射線科学(1970—5),18—20:(1970—6),12—16;(1970—7),11—17.
- 2) 福久健二郎,飯沼武:核医学 8(1971),431—443.
- 3) Krackow, K.A. and Gorten, R.J.: J. Nucl. Med. 11 (1970), 523—526.
- 4) Pizer, S.M.: Communication A.C.M. 9 (1966), 358—362.
- 5) Schulz, A.G., Knowles, L.G., Kolenstein, L.C., Mucci, R.F. and Yates, W.A.: J. Nucl. Med. 11 (1970), 61—68.
- 6) Sharma, R.R. and Fowler, J.F.: Phys. Med. Biol. 15 (1970), 289—300.
- 7) Tanaka, E. and Iinuma, T.A.: Phys. Med. Biol. 15 (1970), 683—694.
- 8) Vetter, H.G. and Pizer, S.M.: Photogrammetric Engineering 36 (1970), 1179—1188.