

【問題 4-38】（平成 12）

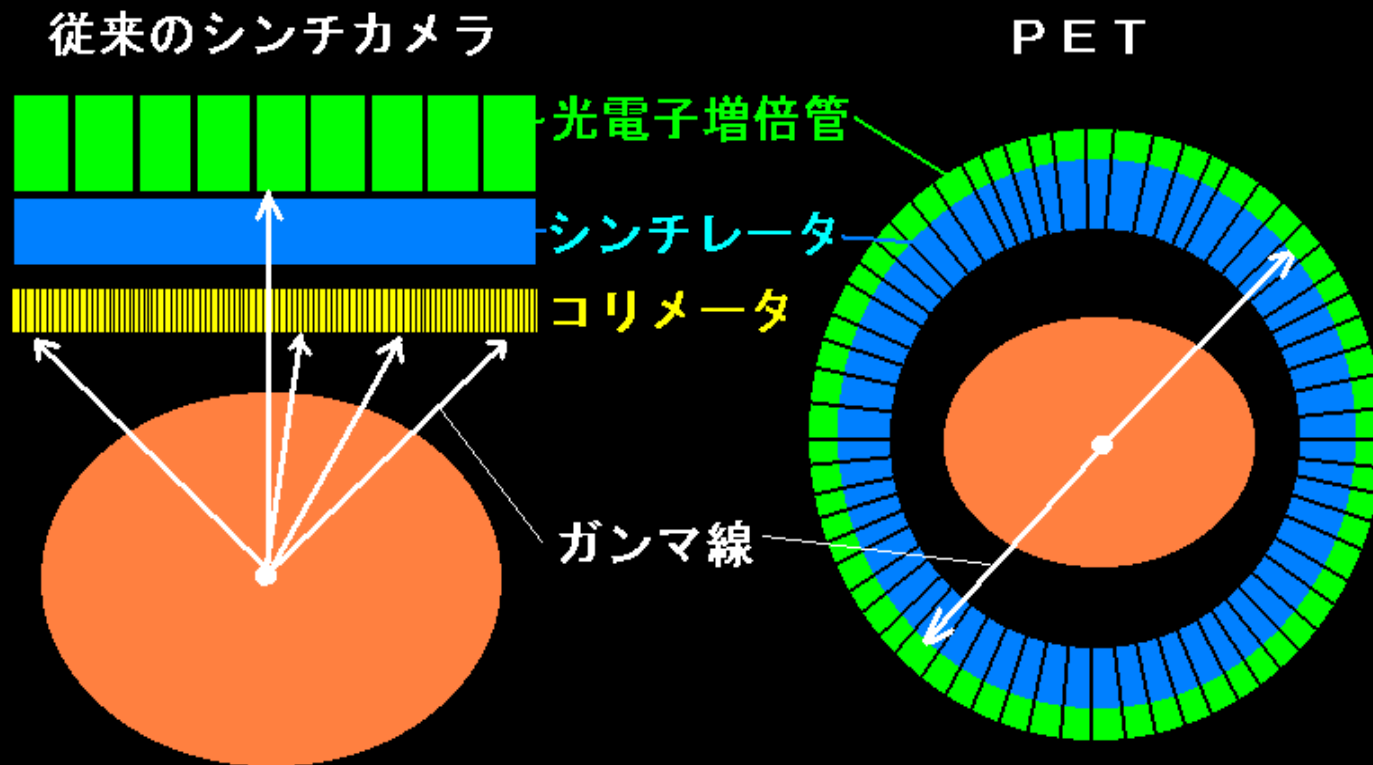
ガンマカメラの固有均一性試験中、視野の1か所に円形の欠損像が出現した。

最も考えられるのはどれか。

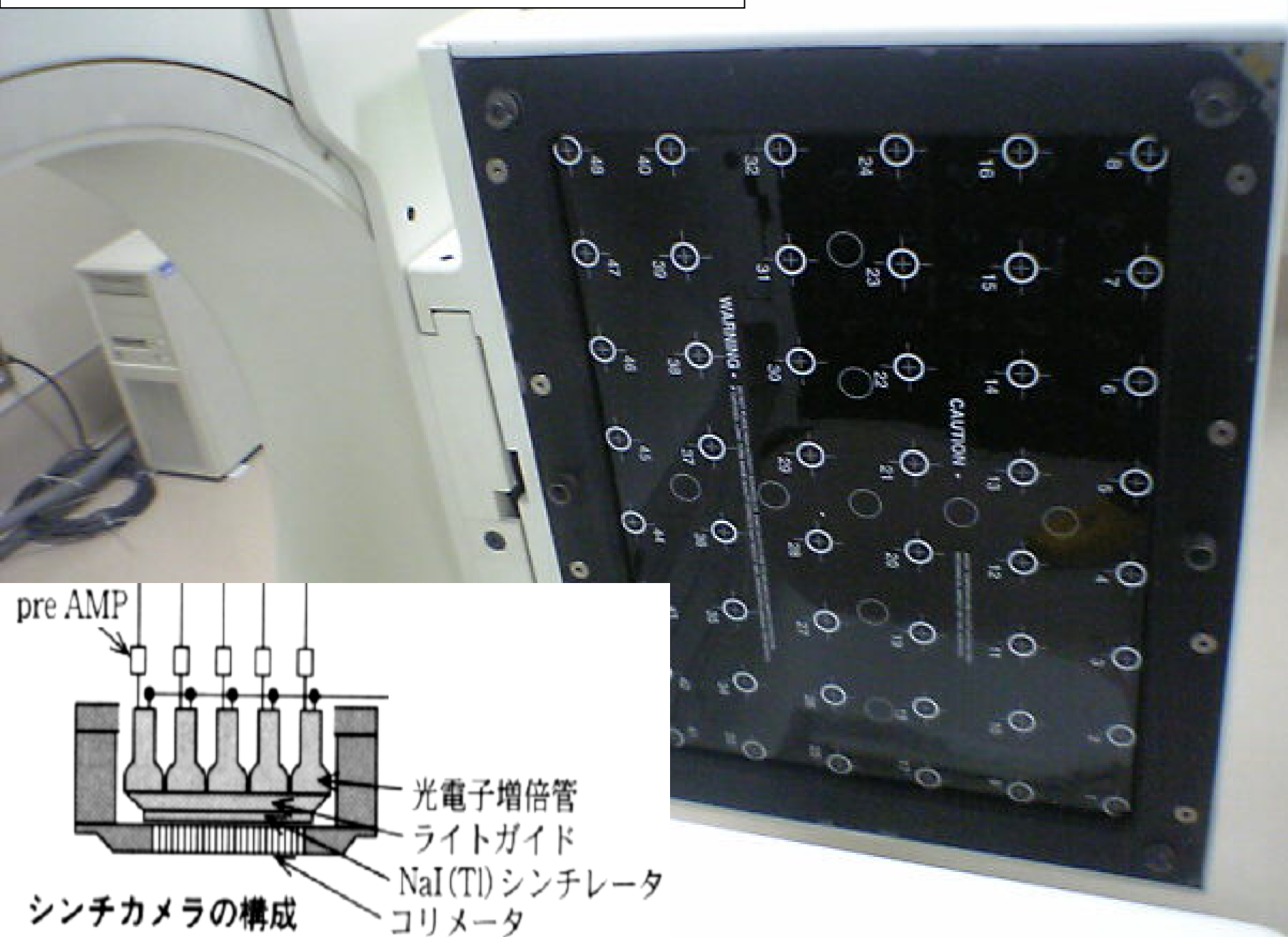
1. 光電ピークエネルギー位置の設定ミス
2. エネルギー幅設定の過少
3. シンチレータの破損
4. コリメータの破損
5. 光電子増倍管の破損

PMT Photo Multiplier Tube 光電子増倍管

光電効果を利用して光エネルギーを電気エネルギーに変換し、電流増幅機能を付加した高感度光検出器。
核医学検査のガンマカメラ、PET装置に使用される。



コリメータをはずした状態の γ カメラ



問題 56 シンチグラム上で数 cm の円形欠損像が生じた。

原因として考えられるのはどれか。

1. 収集カウント過剰
2. シンチレータの破損
3. 光電子増倍管の不良
4. 不適当なコリメータ装着
5. 不適当なエネルギー設定

【問題 4-37】（平成 10）

ガンマカメラの固有分解能に影響しないのはどれか。

1. ガンマ線のシンチレータ内での多重散乱
2. シンチレータ内の発光点の深さの相違
3. シンチレータの経年変化による劣化
4. 使用したコリメータの形状
5. 光電子増倍管からの出力電流の変動

〔注解〕 4. ガンマカメラの固有分解能はコリメータを装着しないときの本体のみの分解能なので、使用したコリメータの形状は関係がない。

1, 2, 3, 5 はいずれも固有分解能に影響する。

18年 国家試験 ガンマカメラで誤っているのはどれか。2つ選べ。

- ☐ 1. 平行多孔コリメータが厚くなると空間分解能は高くなる。
- ☐ 2. シンチレータが厚くなると空間分解能は低くなる。
- ☒ 3. 入射 γ 線エネルギーが高いほどシンチレータの検出効率が高くなる。

γ 線エネルギーが高すぎると、シンチレータ内で相互作用を起こさないで（発光しないで）突き抜けていく γ 線が増え、逆に検出効率が低下する。

- ☒ 4. 光電子増倍管は入射 γ 線エネルギーの弁別に用いられる。

エネルギーの高い γ 線がシンチレータに入射して発光すると、発光量が多く、光電子増倍管も高い電圧を波高分析器に出力する。
エネルギーを弁別する作業は、波高分析器が行う。

- ☐ 5. 位置計算に抵抗マトリックス方式を用いる。

現在ではほとんどの γ カメラはデジタルカメラになっているので位置計算自体が不要だが、昔のアナログ方式のカメラでは発光したシンチレータ内の部位をx、y方向の抵抗器を介して計算して求めている。

Photo Multiplier

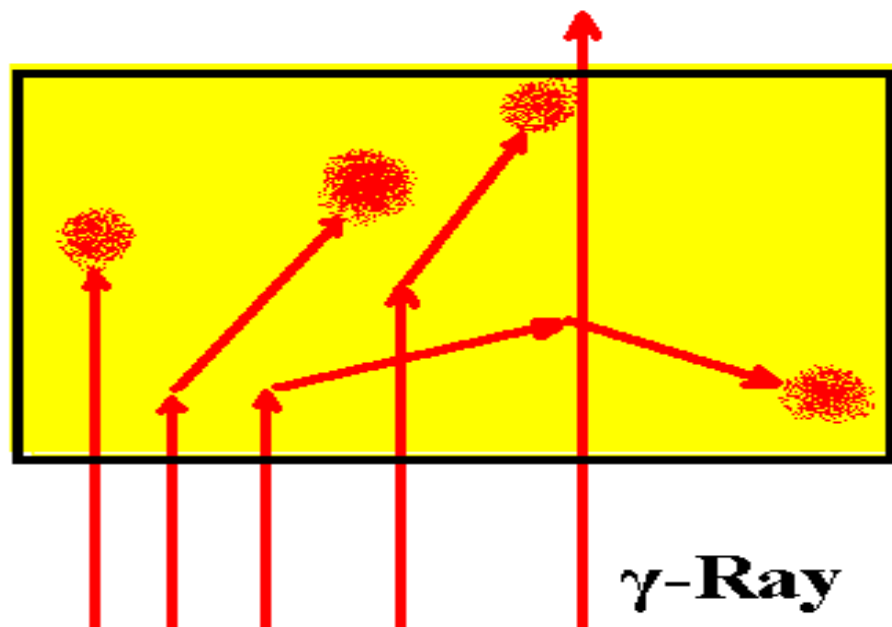
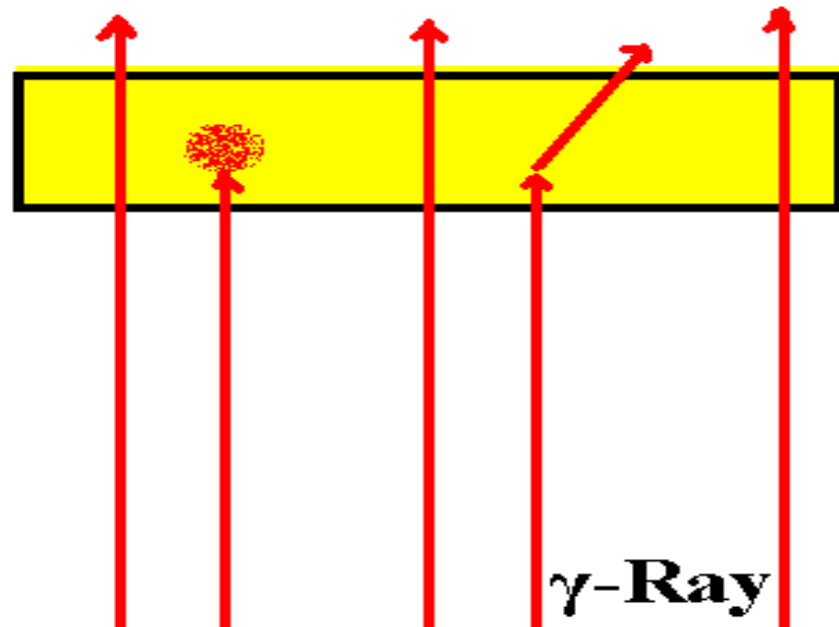


Photo Multiplier



シンチレータ(NaI)が厚いと、感度が良くなる。
(発光量が増える)

シンチレータ(NaI)が薄いと、分解能が良くなる。
(散乱後の発光が減るので、画像がぼけない)

【問題 4-36】（平成 12）

ガンマカメラの分解能で正しいのはどれか。

1. 感度が上がれば総合分解能も上がる。
2. 有効視野が大きいほど総合分解能が上がる。
3. 総合分解能は固有分解能よりも小さい。
4. 総合分解能は半値全幅（FWHM）で表す。
5. 固有分解能の測定に線線源を用いる。

〔注解〕 1. ガンマカメラの感度と分解能はNaIシンチレータの厚さ，光電子増倍管の本数，コリメータの種類により変わる。NaIシンチレータを厚くすれば感度は上がるが分解能は低下するなど，感度と分解能は相反する。

2. 有効視野が大きいほど総合分解能は低下する。

3. 総合分解能は固有分解能より大きい。

4. 正しい。

5. 固有分解能は点線源を遠距離においてコリメータを取り外して測定する。

5・2 シンチカメラの性能評価と保守管理

5・2・1 性能評価

シンチカメラの代表的な性能の維持管理の指針が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から出されている（表5・2）。シンチカメラにおける重要な基本性能には、感度均一性、直線性、空間分解能、エネルギー分解能、計数効率などがあり、これらの性能にコリメータを装着しない状態の固有性能、コリメータをつけた使用時の状態としての総合性能がある。ほとんどのデータ収集が計数率 20 kcps 以下、エネルギーウィンドウ幅 20% でおこなっている。

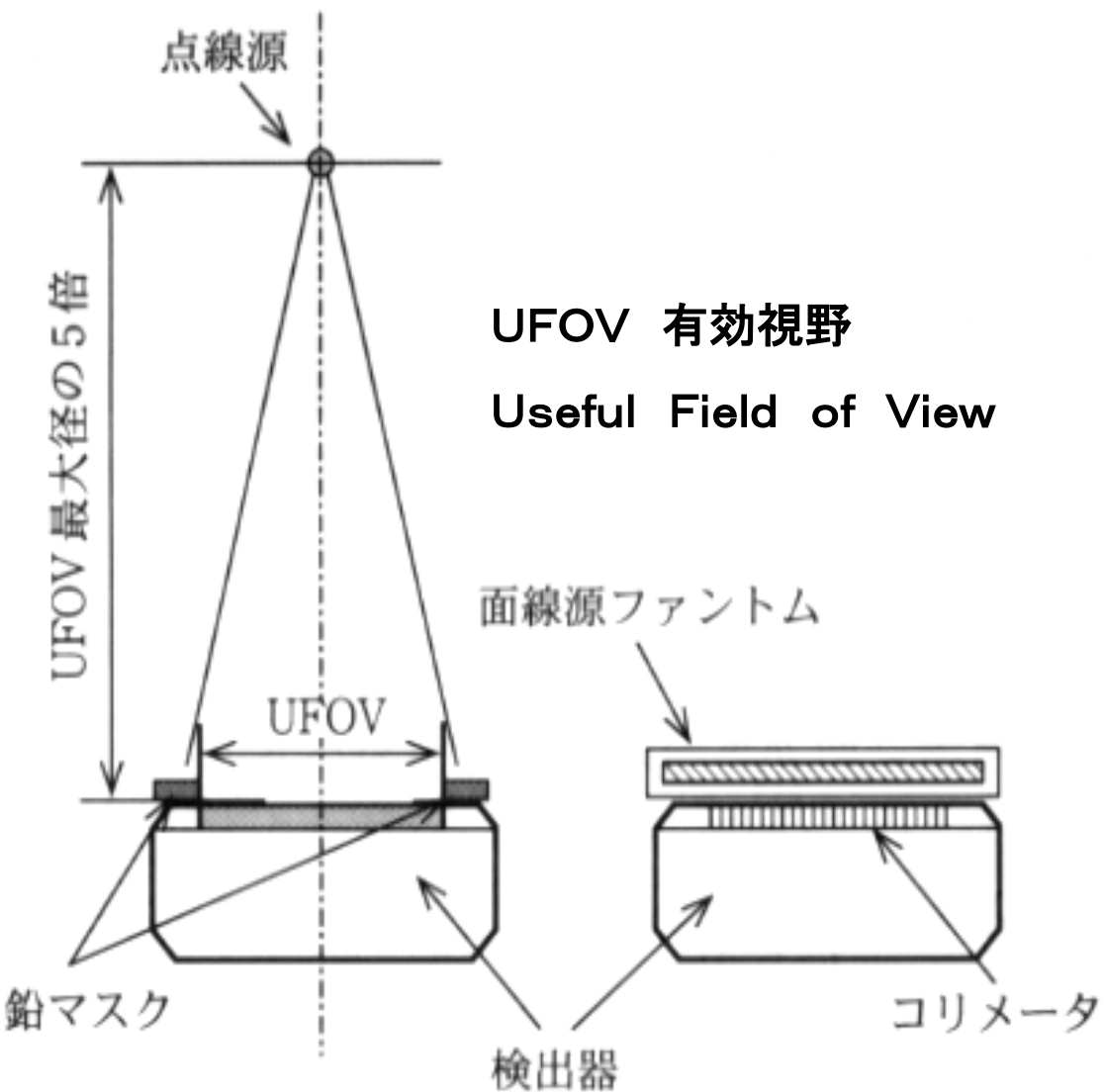
i) 感度均一性

a) 固有感度均一性の測定

図 5・6(a) に示すようにコリメータをはずし有効視野サイズの窓をもつ鉛のマスクを検出面に置き、シンチレータの中心軸上で有効視野の直径（角型カメラでは対角線）の 5 倍以上の距離に点線源を置いて測定する。使用線源は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を用いた点線源で、収集条件はマトリックスサイズ 64×64 または 128×128 で 1 画素当り 4 000 カウント収集する。

b) 総合感度均一性の測定

図 5・6(b) に示すように、コリメータを使用して検出器の上にポリエチレンろ紙を敷き、その上に有効視野サイズよりもやや大きめの面線源（UFOV 最大径 + 50 mm）を置く。面線源自体に線源のムラが生じないようにし、使用核種は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を用いて、マトリックスサイズは 1 画素が 12 mm（ 512×512 , 256×256 ）となるサイズで全画面の収集カウントが 10 M カウント以上になる収集時間でおこなう。

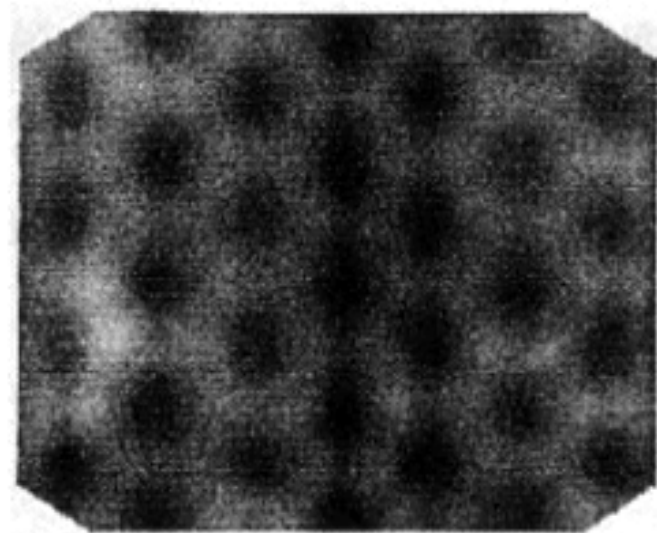


UFOV 有効視野

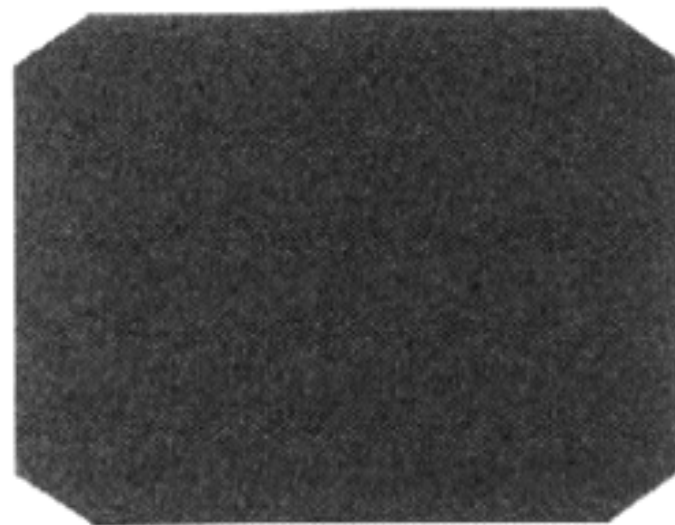
Useful Field of View

(a) 固有感度均一性

(b) 総合感度均一性



補正前



補正後

図 5・6 感度均一性測定

【問題 4-35】（平成 12）

ガンマカメラの均一性試験法について正しいのはどれか。

1. $\pm 15\%$ の結果を得ることができれば良い。
2. 微分均一性試験と積分均一性試験とがある。
3. 計数率が高いほど良い結果が得られる。
4. 固有均一性試験では面線源を用いる。
5. 1画素あたり 10 カウントの収集を行う。

〔注解〕 1. 有効視野内で $\pm 10\%$ 以内であれば良い。

3. 測定計数率は 20 kcps 以下で行う。

4. 固有均一性試験は点線源を用いる。

5. 1画素当たり 4000 カウント以上で収集を行う。

2. 均一性試験法には微分均一性試験と積分均一性試験がある。

評価法としては、画像を撮像し写真に撮り濃度分布から視覚的に評価する方法と、収集したデータに9点スムージング処理をおこない、UFOV (useful field of view) と CFOV (central field of view)^⑤ について積分均一性 (integral uniformity) と微分均一性 (differential uniformity) で評価をおこなう方法とがある。

UFOV 内の最大カウント (max), 最小カウント (min) とすると,

$$\text{積分均一性} = \pm 100 \times (\text{max} - \text{min}) / (\text{max} + \text{min})$$

画像データを 行と列 (スライス) として 5 画素単位で最大変化率を計算する。

$$\text{微分均一性} = \pm 100 \times (\text{max} - \text{min}) / (\text{max} + \text{min})$$

面線源を1画素4000カウント以上収集して均一性を測定。

積分均一性の方が、対象とする画素の数が多いので値が大きくなる(均一性が低い)。

【問題 4-39】（平成 13）

エネルギー分解能試験で正しいのはどれか。

- a. 指標に光電ピークの半値全幅を用いる。
 - b. 分解能は全核種において同一である。
 - c. 半値全幅の値が大きいほど画質が良い。
 - d. 標準線源に ^{67}Ga を用いる。
 - e. 半値全幅を keV の単位で表示する。
1. a, b 2. a, e 3. b, c
4. c, d 5. d, e

〔注解〕 b. エネルギー分解能は核種の γ 線エネルギーにより異なる。

- c. 半値全幅の値が大きいほど画質は悪い。
- d. 標準線源に $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を用いる。
- a, e の記述はいずれも正しい。

iv) エネルギー分解能

図 5・9 に示すように、コリメータをはずし、有効視野の大きさの鉛マスクを装着し、固有均一性と同じ幾何学的配置で点線源を用いて光電ピークカウントが 10 k カウントになるまで収集しエネルギースペクトルを求める。

評価法としてはエネルギー分解能で評価する。得られた光電ピークの半値幅 ΔE と光電ピーク E に対する比をとり、

$$\text{エネルギー分解能} = \Delta E \times 100 / E \text{ (\%)}$$

として表現する。

シンチレータに γ 線が入射した時の発光量は、 γ 線のエネルギーが高いほど多く、光電子増倍管の出力する電圧も高くなる。

発光量の強さを計測する装置(波高分析器)で γ 線のエネルギー(keV)分布が測れる。

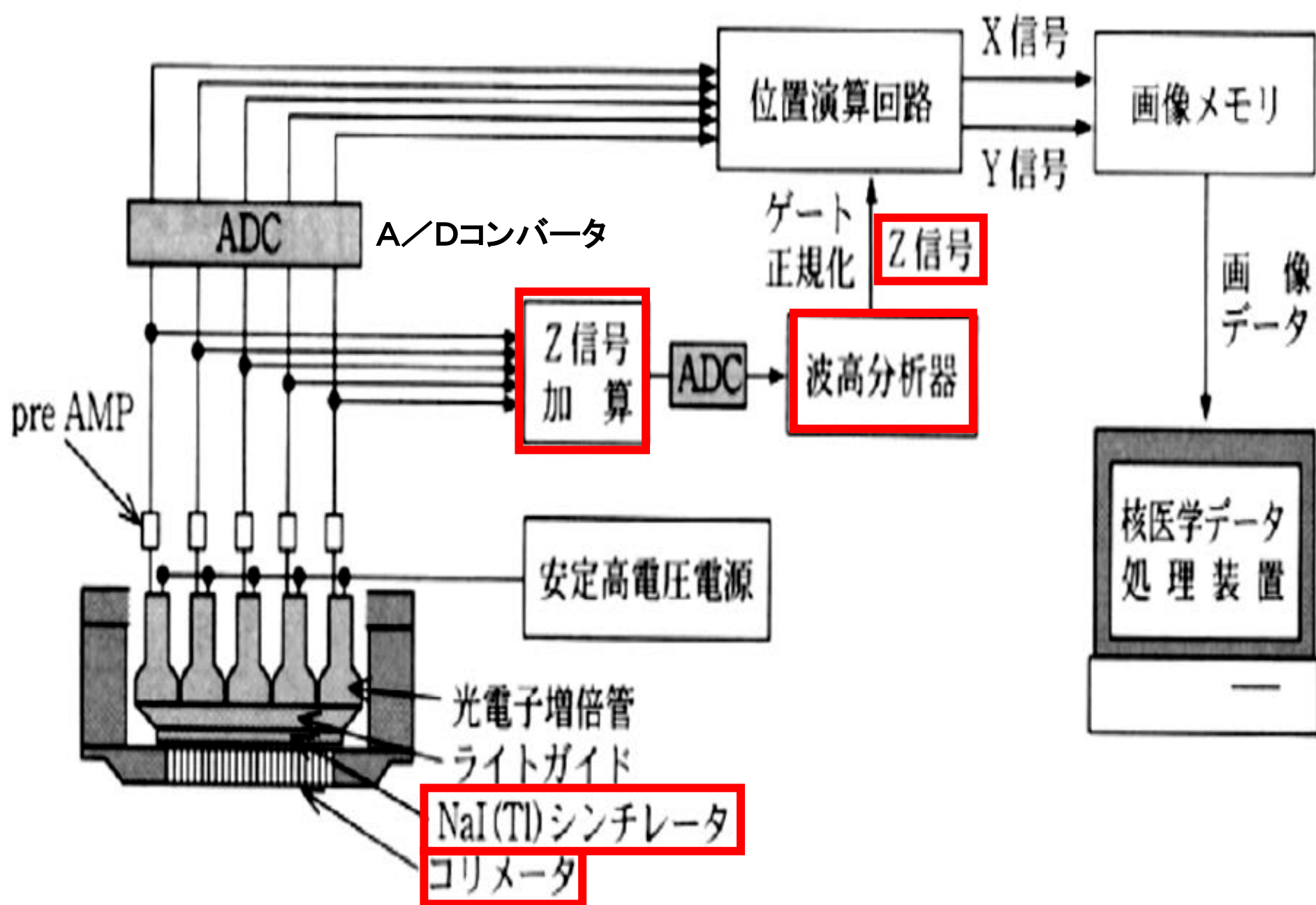


図 3・2 フルデジタルシンチカメラの構成

3.1.6 エネルギー選別機構

Z 信号加算回路と**波高分析器**からなる。 γ 線の入射によるシンチレータの発光に対する光電子増倍管の出力をすべて加算した信号を、位置信号の X, Y 信号に対して**Z 信号**という。Z 信号は、Z 信号加算回路により得られ、エネルギー信号ともいわれ、**入射 γ 線との相互作用によりシンチレータに吸収されたエネルギーに比例した波高値をもっている。**

この Z 信号は波高分析器に送られ、エネルギー選別をおこない、光電ピークに設定されたウィンドウ内の γ 線信号のみが選択される。その出力は位置演算回路へ入力され、位置信号に対するゲート信号および正規化信号^⑦となる。また、その出力はアナログカメラでは CRT 面上に輝点を生じさせるアンプラック信号ともなり、デジタルカメラでは位置信号 X および Y 信号の A-D 変換に対するゲート信号となる。

4. 波高分析器

パルスハイトアナライザ(pulse height analyzer) : PHA と呼び、高さの異なるパルスを選別して、同一パルス高のみを計数回路に送る働きをする。2台の波高選別器(discriminator)と逆同時計数回路を組み合わせたものが最初の基本形で、図 10-16 のように下限ディスクリレベル V (V) と上限ディスクリレベル $V + \Delta V$ の間に入ったパルスのみが次段の計数回路に送られる。 ΔV をウィンド幅(window width)またはチャネル幅(channel width)とよび、また V をレベル電圧とよぶ。これをシングルチャネル波高分析器という。

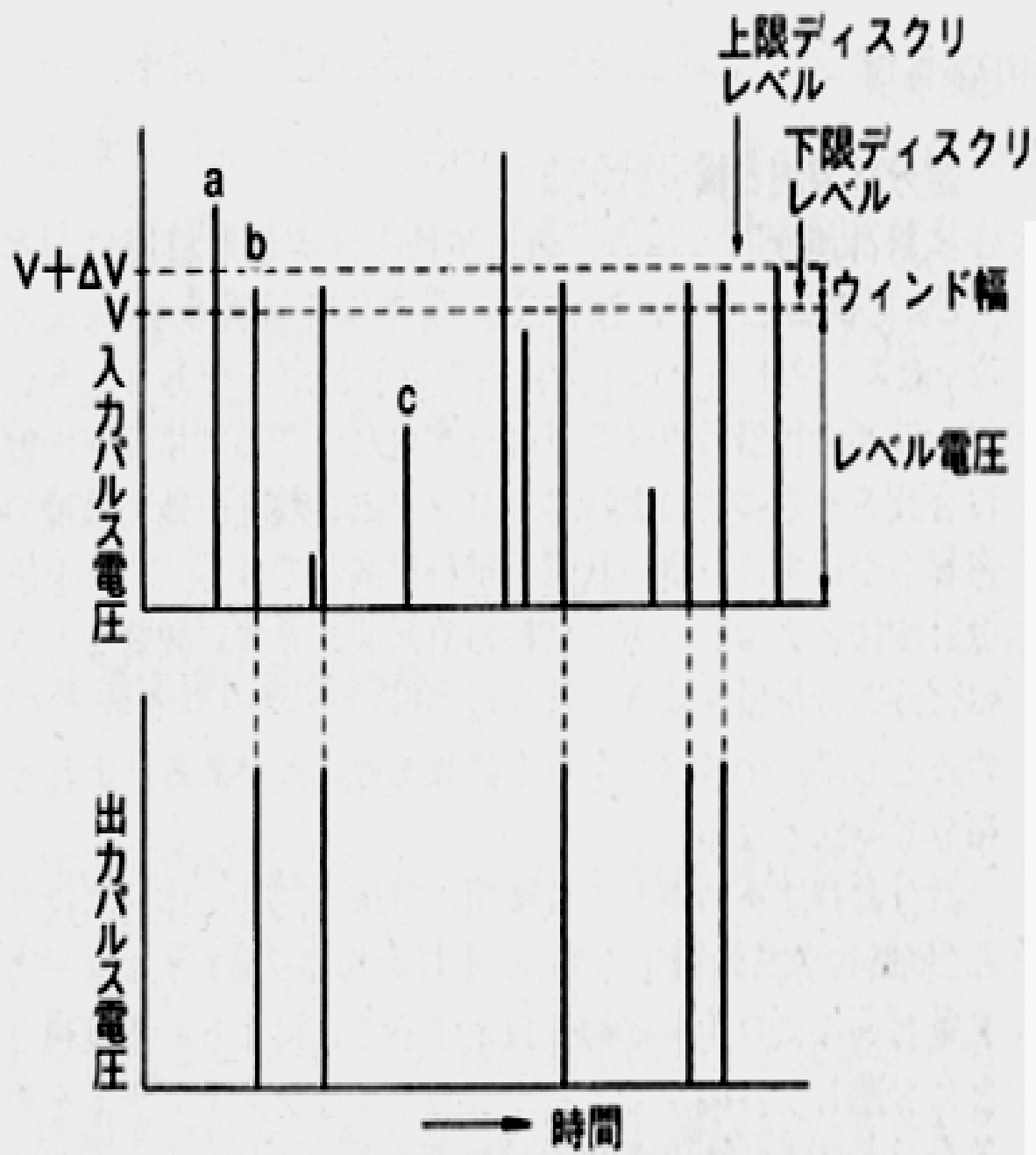
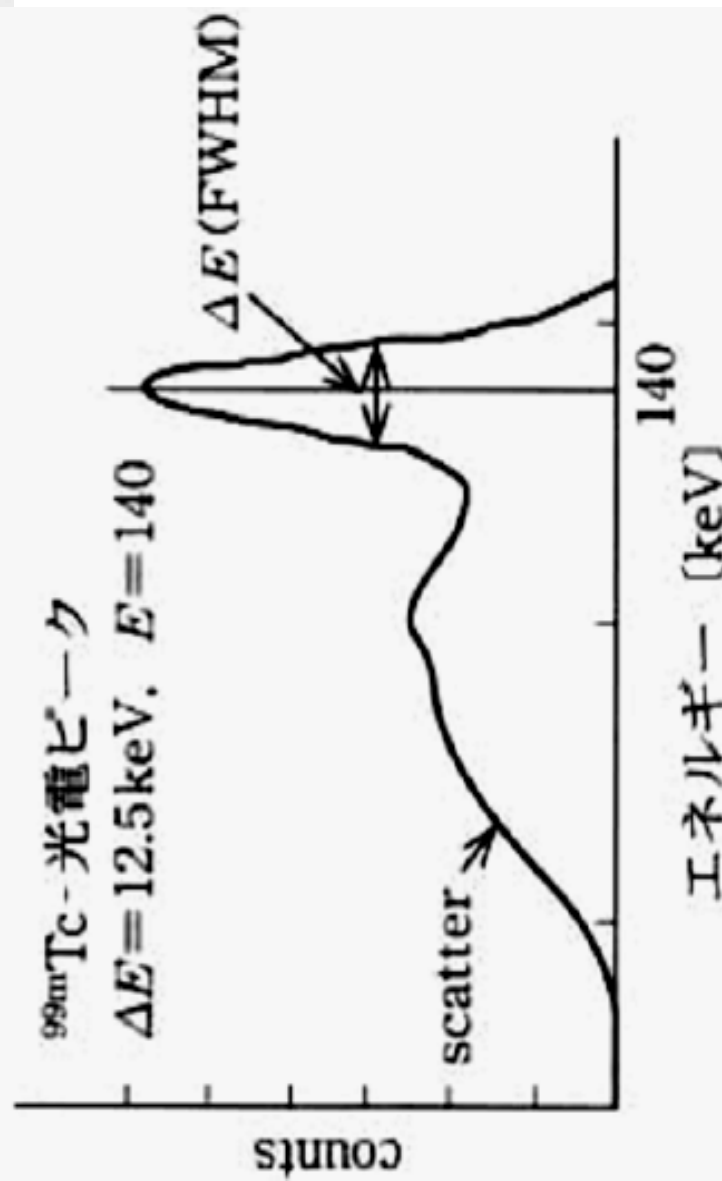


図 10-16 波高分析器の原理



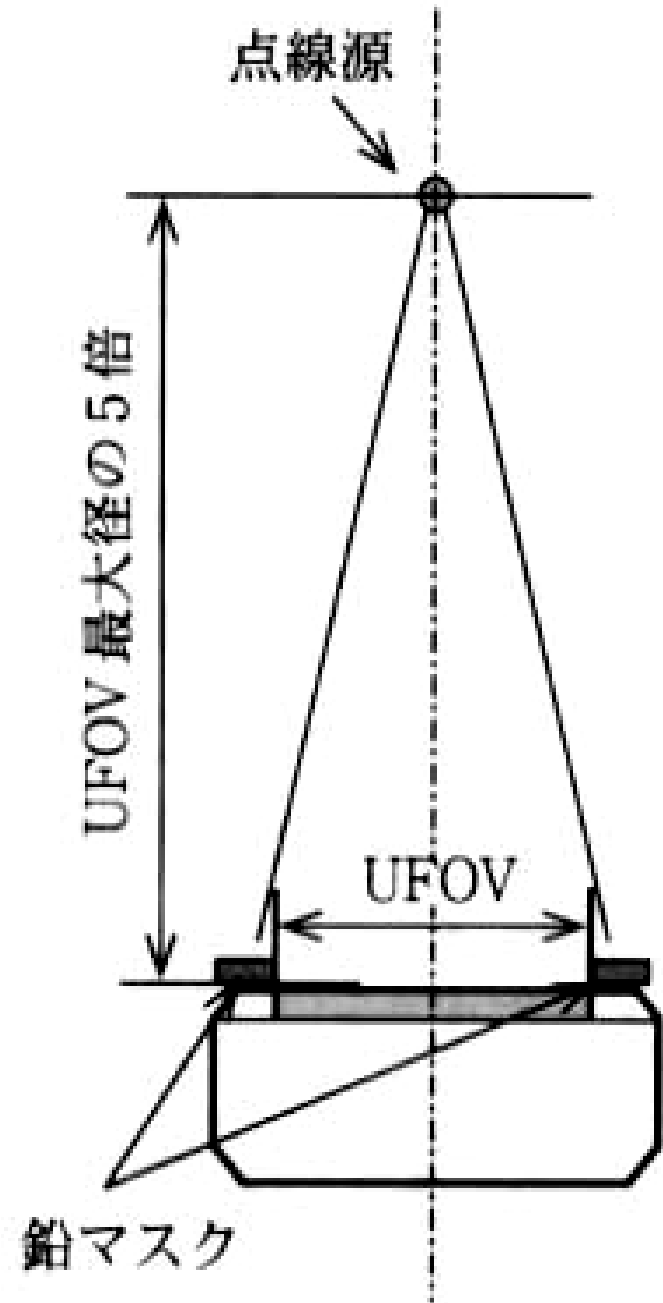
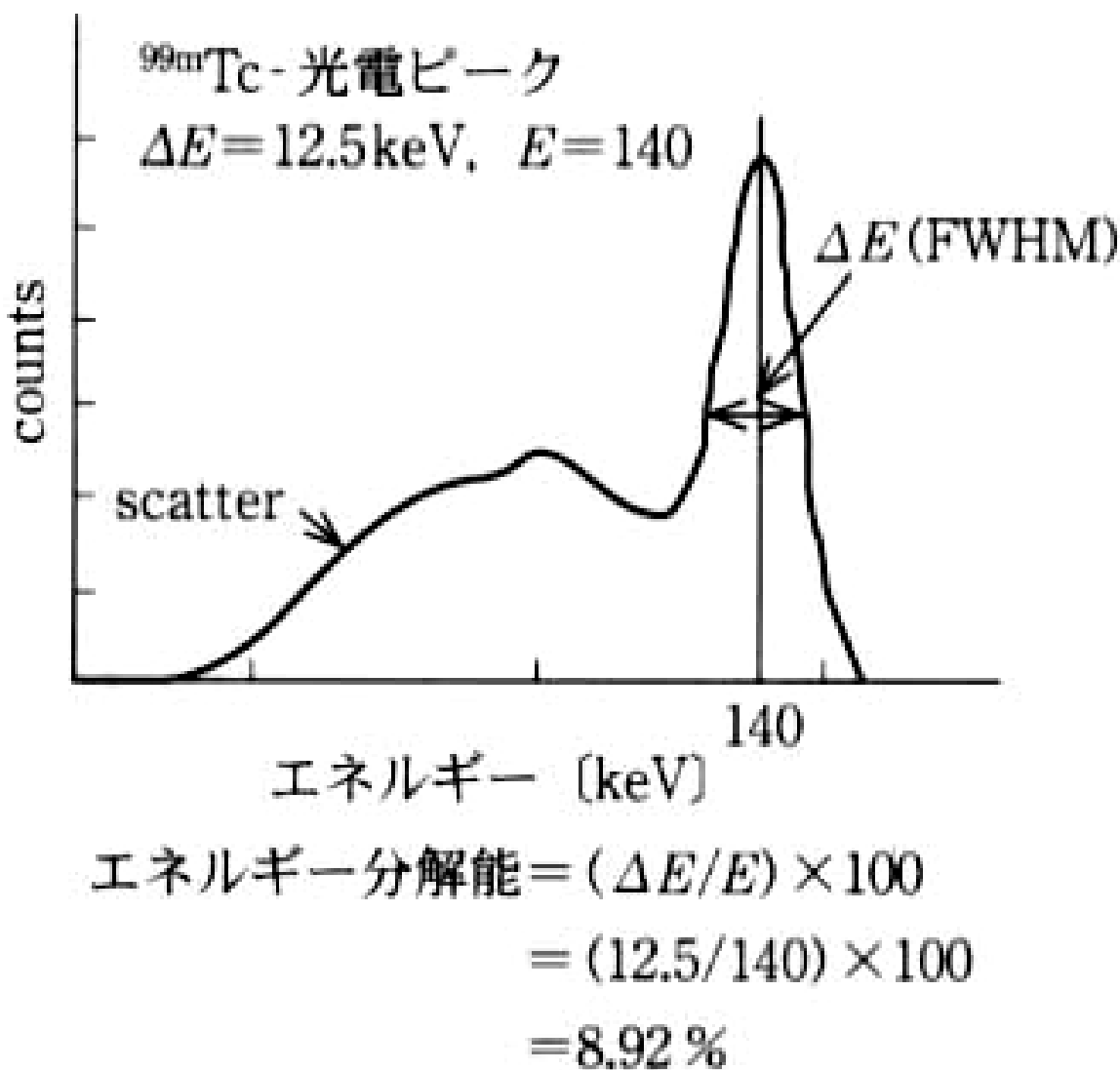


図 5・9 エネルギー分解能測定

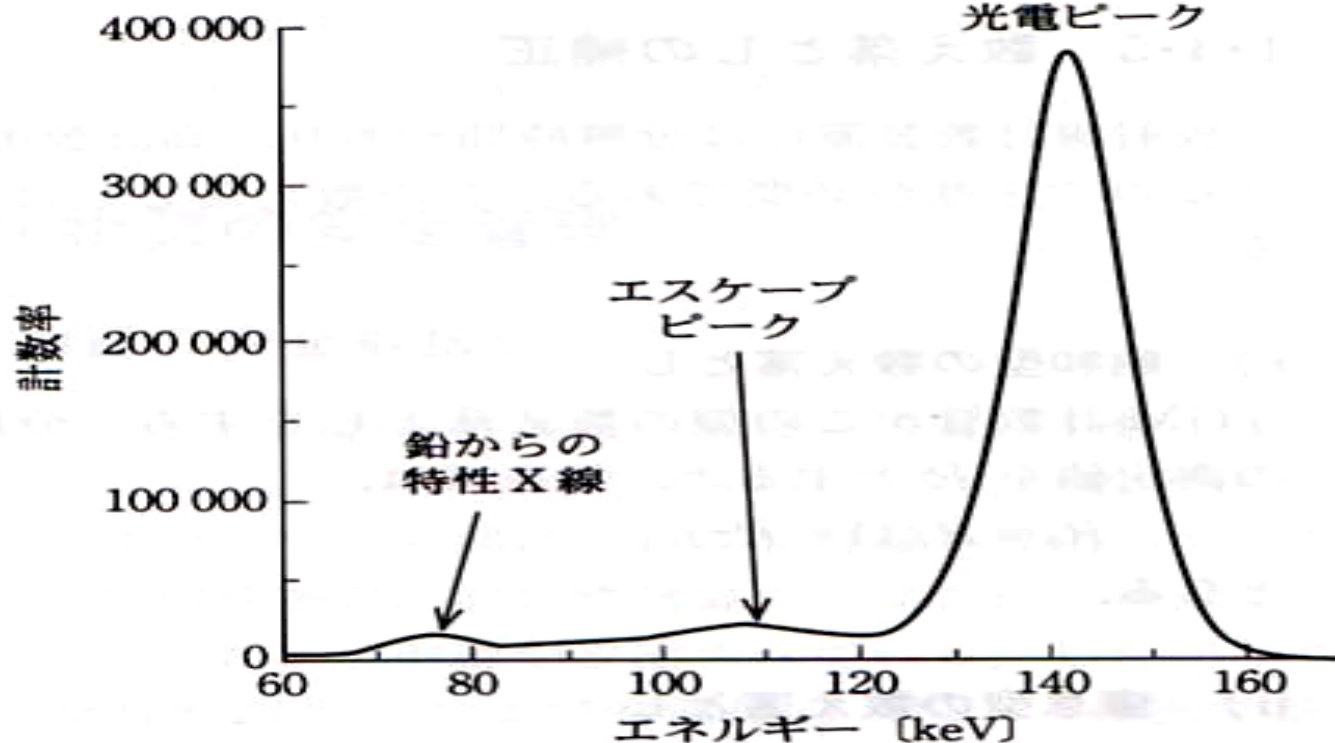


図 1・8 ^{99m}Tc からの γ 線 (140 keV) のエネルギー
スペクトル
(シンチカメラ, 吸収・散乱体なし)

核医学検査で使用する
RIの
 γ 線または特性X線の
エネルギー

^{125}I	27 keV(EC)
^{67}Ga	93, 185, 300 keV
^{99m}Tc	140 keV
^{123}I	159 keV
^{131}I	365 keV

問題 55 ガンマカメラの性能試験で誤っているのはどれか。

1. 固有分解能は総合分解能より良い。
2. 画像直線性には鉛スリットファントムを使用する。
3. 総合均一性には面線源を使用する。
4. エネルギー分解能は半価層から求める。
5. 計数率特性は線源減衰法で求める。

解答 4

半価層は、X線透過率が半減する銅板の厚さ。RIとは無関係。

【問題 4-40】（平成 13）

ガンマカメラの品質管理で正しいのはどれか。

1. 固有分解能の測定はコリメータを装着して行う。
2. 総合分解能の評価には最大偏差〔%〕を用いる。
3. 画像直線性の試験には銅板を用いる。
4. SPECT 回転中心の評価にサイノグラムを用いる。
5. 均一性が不良な場合は SPECT 像に星芒状アーチファクトが発生する。

〔注解〕 1. ガンマカメラの固有分解能はコリメータは取り除き、バーファントムをシンチレータ面にできるだけ密着させて測定する。

2. 総合分解能は半値幅法では波高分析器などにより FWHM 値を mm 表示し評価する。最大偏差は感度不均一性の評価に用いられている。

3. 画像直線性の試験には点線源または面線源により格子状鉛スリットファントムを用いる。

4. 正しい。

5. SPECT 像の均一性は、シンチカメラ自体の感度均一性によって左右される。SPECT では 360° または 180° 方向から収集した投影データを逆投影して加算するため、1 画素の感度変化がリング状のアーチファクトとして発生する。

ii) 画像直線性

画像ひずみを**画像直線性**から評価する。

a) 固有直線性の測定

図 5・7(a) に示すように、コリメータをはずし、格子状鉛スリットファントム (30 mm 間隔で 1 mm 幅のスリット、厚さ 3 mm の鉛板) を検出器面に置き、固有均一性測定と同じように幾何学的配置に点線源を用いてスリットファントム像を撮像する。

b) 総合直線性の測定

図 5・7(b) に示すように、コリメータを装着し、コリメータ面と面線源とで格子状鉛スリットファントムをはさみ込み、スリット方向を縦・横・斜め 45 度の 3 方向についてそれぞれ評価する。

評価方法としてスリット像を視覚評価で直線性を評価する方法と直線性のひずみを**最大偏差**で表現する方法とがある。最大偏差は有効視野の約 80% の円に内接するスリット像について、その格子線像からの最大偏差を計測し、有効視野に対する百分率で表示する。

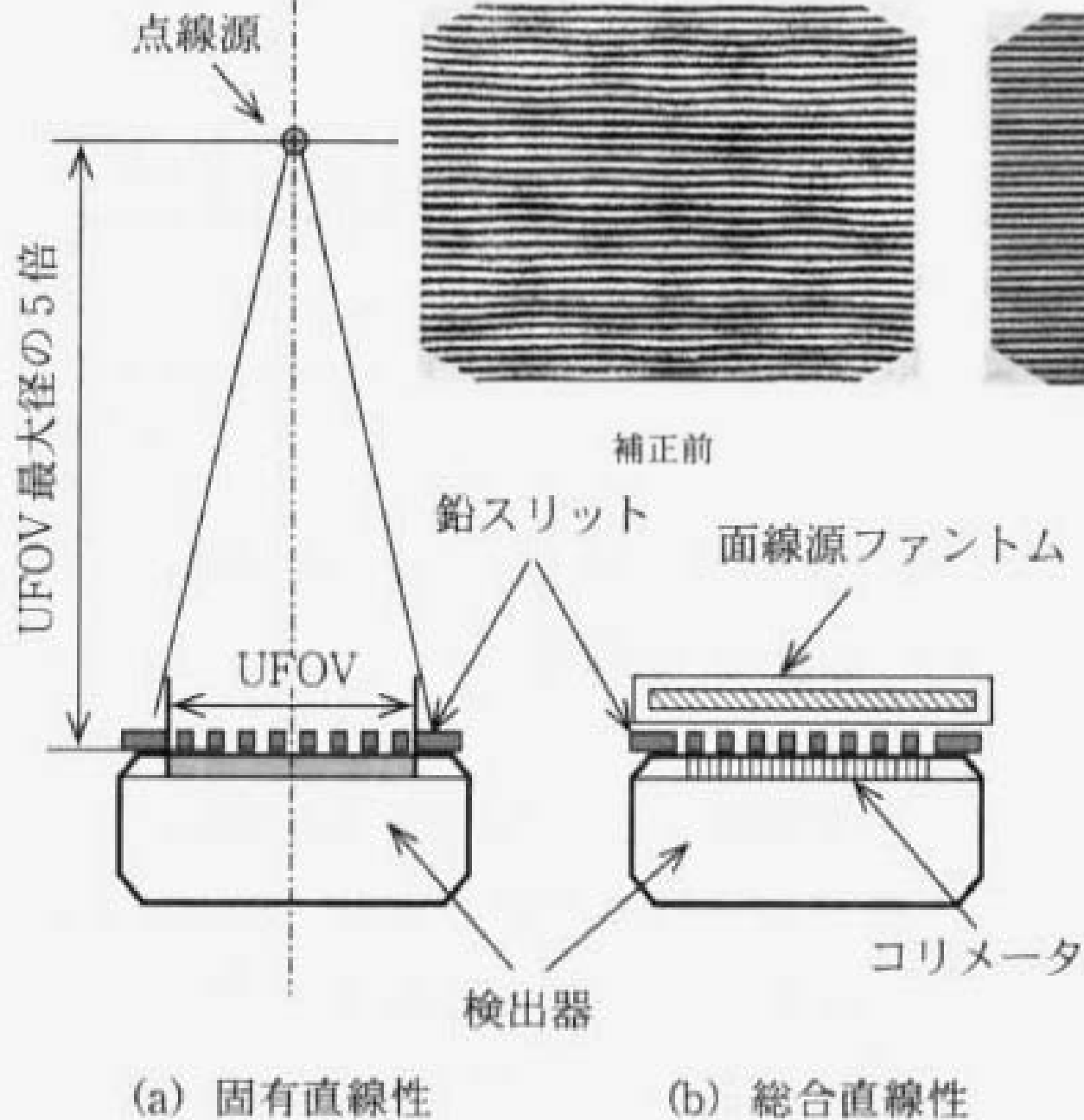


図 5・7 直線性測定

ガンマカメラの固有性能評価で誤っている組合せはどれか。

1. 感度均一性 ————— 点線源
2. 画像直線性 ————— 線線源
3. 計数率特性 ————— 線源減衰法
4. 空間分解能 ————— 線広がり関数
5. エネルギー分解能 ————— 光電ピーク

v) 計数率特性

^{99m}Tc などの短半減期核種による短時間大量投与がおこなわれる動態検査で、放射性核種の量の変化による計数率特性が非常に問題となる。放射能濃度と計数率の直線性が検出器の数え落としが生じるために失われる (図 5・10(a))。このため数え落としの補正が必要となる^⑧。

a) 最高計数率

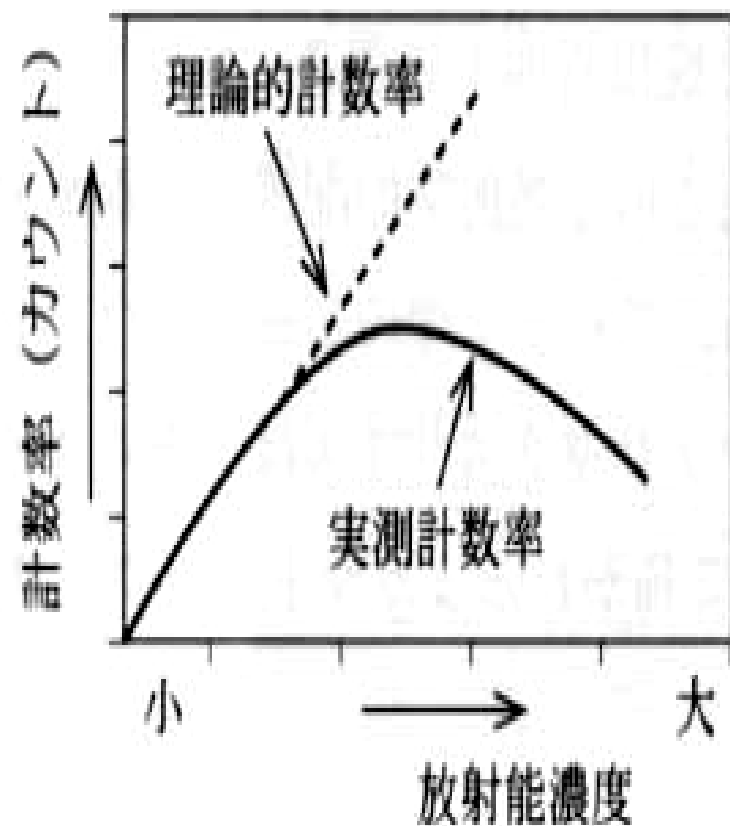
鉛などで視野外をマスクし、20% ウィンドウで 50~100 MBq の ^{99m}Tc -線源を検出器に徐々に近づけて、最大計数率を記録する。

b) 銅吸収法

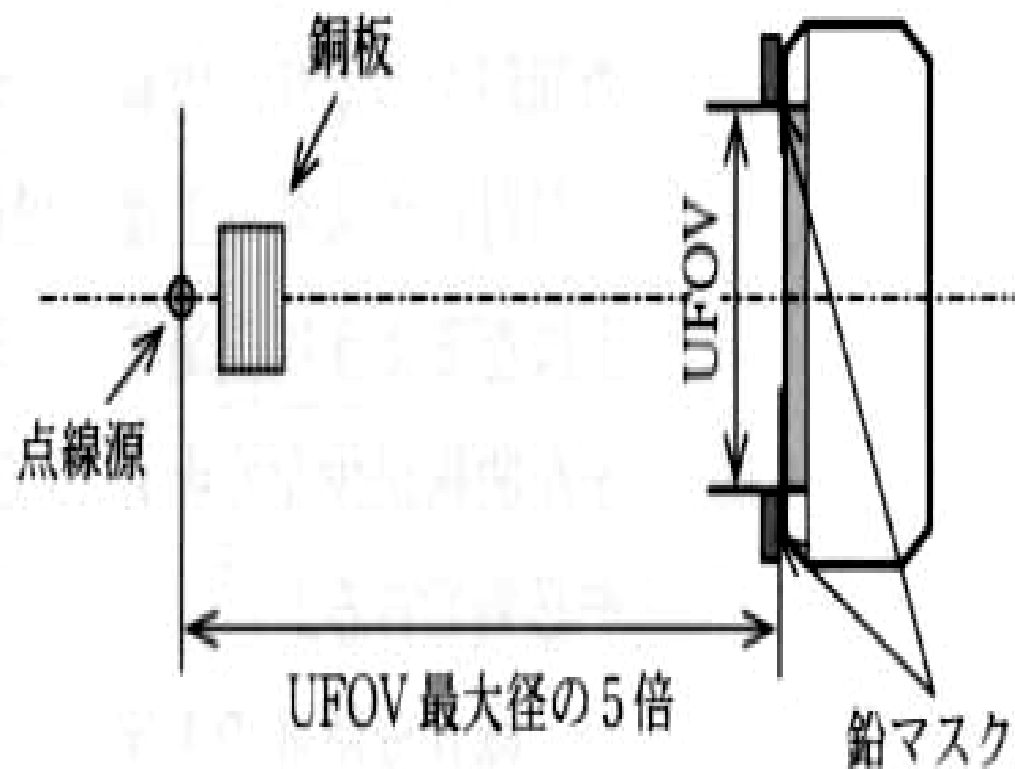
図 5・10(b) に示すようにコリメータをはずし、有効視野の大きさの鉛マスクを装着し、固有均一性と同じ幾何学的配置で点線源を用いる。その点線源の前に銅板を数枚入れて計数率を測定し、その銅板を 1 枚ずつ取り除いて計数率を測定する。

計数率測定

線源の放射能とガンマカメラの計数值(率)との相関を測定。



(a) 放射能濃度と計数率の関係



(b) 銅吸収法の実験配置図

図 5・10 計数率測定

放射能が多すぎると測定器の計数率(カウント数)が低下する理由

NaI シンチレータに γ 線が1個入射すると 230 n sec 発光する。その間に別の γ 線が同じ部位に入射しても、既に発光している部位で新たな発光は計測されない。この発光時間を不感時間 τ (正しくは分解時間)という。

真の放射能(1秒間の入射 γ 線数)を N_0 、測定された放射能を N 、測定時間を 1秒、不感時間を τ 秒とすると($\tau < 1$ 秒)、
測定器は1秒間あたり $N_0 \tau$ 秒間、測定をしていないので

$$N_0 = N (N_0 \tau + 1) \quad N = N_0 / (N_0 \tau + 1)$$

$$N_0 = N / (1 - N \tau) \quad (\text{測定器の数え落とし補正式})$$

表 3・6 おもな PET 検出器用シンチレータ

シンチレータ	NaI (NaI : Tl)	BGO (Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂)	LSO (Lu ₂ SiO ₅ : Ce)	GSO (Gd ₂ SiO ₅ : Ce)	BaF ₂
実効原子番号	51	74	66	59	54
密度 (g/cm ³)	3.7	7.1	7.4	6.7	4.9
減弱係数 (cm ⁻¹)	0.34	0.92	0.87	0.66	0.48
発光量 (相対値)	100	10	75	18	8
光の減衰時間 (nsec)	230	300	40	30~60	0.8
エネルギー分解能 (%)	8	18	12	8	—

(注) 減弱係数は 511keV の消滅放射線に対する値。

密度の高い(重い)結晶ほど、高エネルギー γ 線と相互作用を
起こしやすい(線減弱係数が大きく、光りやすい。感度が高い)。
光の減衰時間が短い結晶ほど数え落しが少ない(計数率直線性がよい)。
数年前のPETには、BGOが使用されていたが、
最近のPETには、LSO、GSOが使用されている。

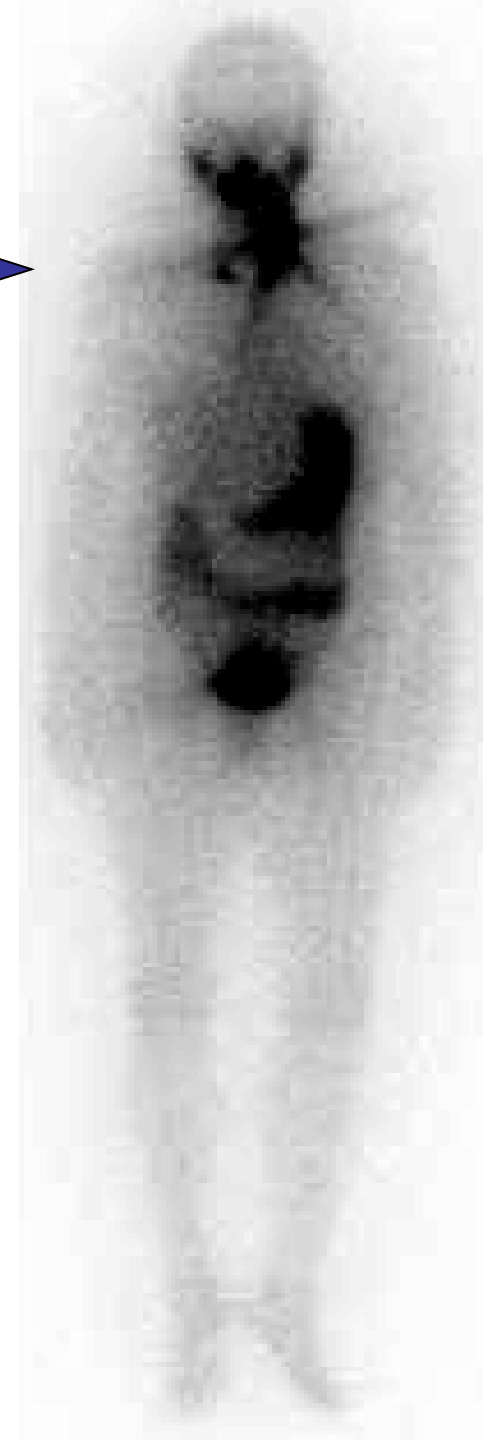
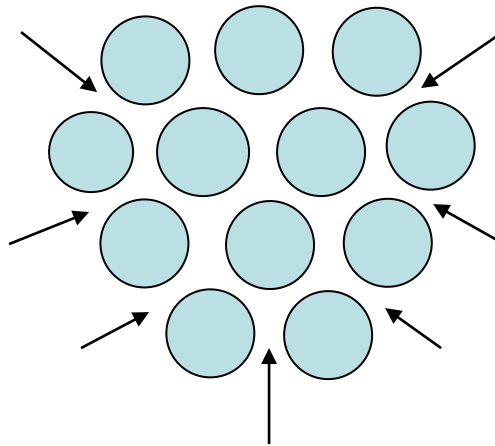
局所的に非常に強い放射能分布が存在すると

星芒状アーチファクトが描画される。



コリメータの孔と孔の間隔(隔壁)に

薄い部位が規則的に存在するのが原因。



^{131}I 全身シンチグラフィ
HEGPコリメータ

5・3 SPECT 装置の性能評価と保守管理

SPECT 画像は、通常のプレーナ画像のような 2 次元画像とは異なり、被検者から収集した投影データをもとに 3 次元像を再構成する。したがって投影データ収集時の回転に関する機械的要因、感度不均一、多検出器の感度差などによる**アーチファクト**^⑨が出現する。SPECT 画像とこれらの要因と結果をよく理解しておく必要があり、JESRA（日本放射線機器工業会）による規格を中心に SPECT の総合空間分解能、総合均一性、総合容積感度および**回転中心補正**を説明する。

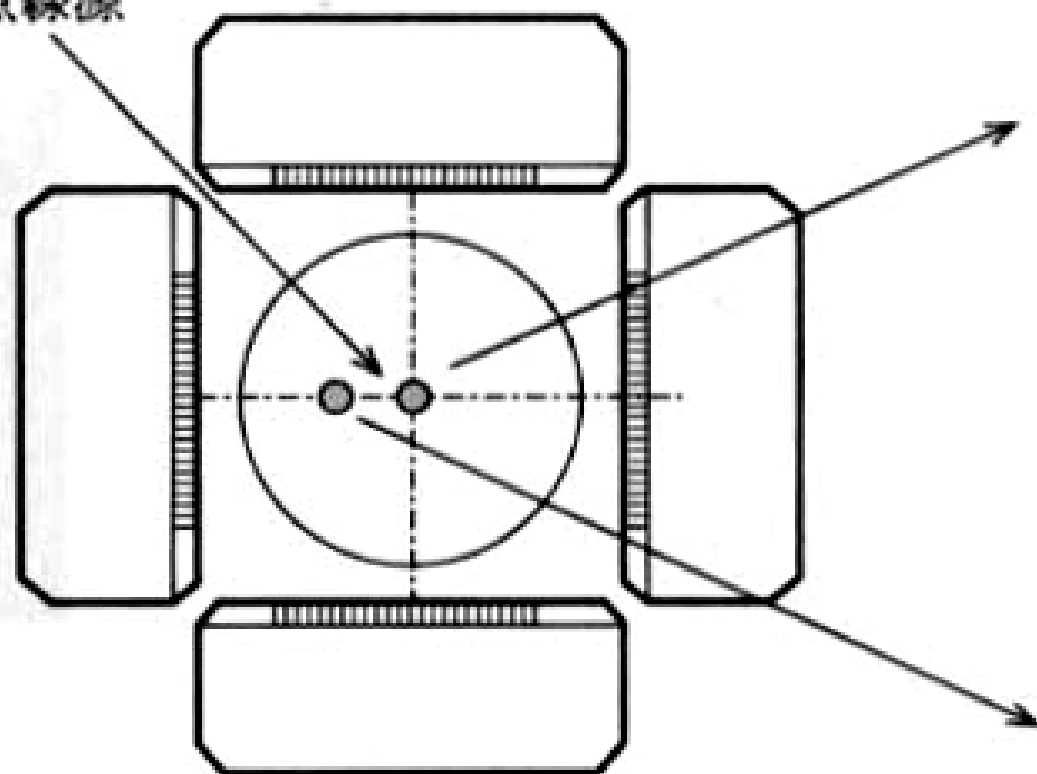
iv) 回転中心試験

検出器の回転中心のずれは再構成画像にひずみを生じさせるため、SPECT 画像の画質管理上、非常に重要なものの一つである。

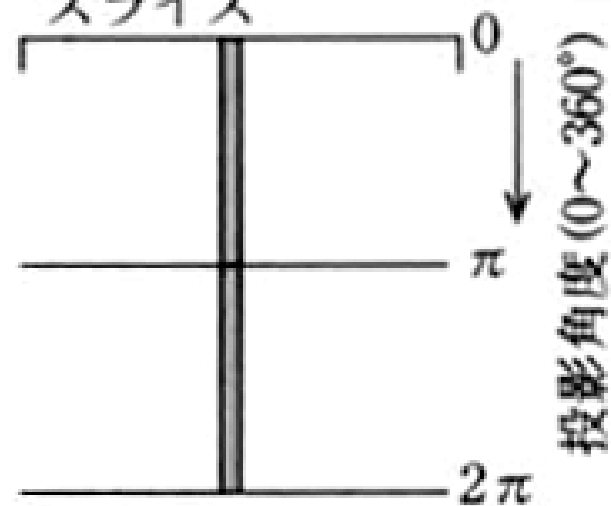
図 5・15 に示すようにシンチカメラ視野内に点線源を配置し SPECT 収集をおこなう。点線源の強さは少しの放射性核種で十分である。収集マトリックスは 64×64 、回転半径は 150 mm 程度が望ましい。

評価法は、投影データからサイノグラム (sinogram)^⑩ をとり、sin 曲線とどの程度ずれているかを検討する。

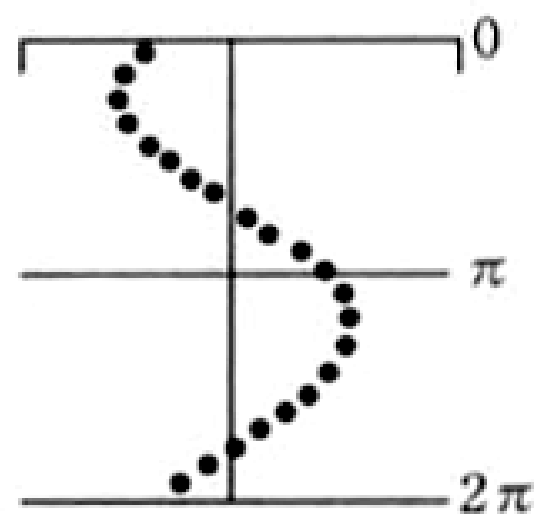
点線源



サイノグラム
スライス



回転中心部



中心部からずれている

ガンマカメラの性能の保守点検基準 (JESRA X—0067 * C⁻²⁰¹⁷) で
6 月ごとに点検するのはどれか。

- | | |
|--------------|------------------|
| 1. 固有均一性 | 4. 固有計数率特性 |
| 2. SPECT 均一性 | 5. SPECT 回転中心のずれ |
| 3. 固有空間分解能 | |

日本画像医療システム工業会規格 JESRA X-0067*C-2017

Japanese Engineering Standards of Radiological Apparatus
(2017年 改正版)

によって、ガンマカメラの性能の保守点検基準が定められている。

4. 定期点検 JESRA X-0067*C-2017

4.1 保守基準値と点検頻度

定期点検の保守基準値と点検頻度は、表4.1の通りとする。

表4.1定期点検項目

性能点検項目		保守基準値	頻度
固有均一性(CFOV)	微分値	仕様値の 1.5 倍以内	毎月
	積分値		
SPECT 回転中心ずれ		0.5 ピクセル以内	毎月
SPECT 均一性		目視にてアーチファクトがないこと	6 月毎

SPECT の分解能に影響しないのはどれか。

1. 回転半径
2. 散乱補正
3. 画像再構成法
4. 放射能減衰補正
5. 収集マトリクスサイズ

【問題 4-41】（平成 14）

ガンマカメラの性能評価試験で正しいのはどれか。

1. 総合視野感度均一性はコリメータを外して測定する。
2. 解像度は線状線源の FWHM（半値全幅）で測定する。
3. 画像直線性とは線源の放射能と収集カウントとが比例することである。（計数率特性）
4. エネルギー分解能は線源の形状の影響を受けない。
5. 鉛格子の撮像では分解能を測定できない。

〔注解〕 1. 総合視野感度均一性はコリメータを装着した状態で行う。2. 解像度は線状線源を用いて撮像した画像の横断面計数率分布を測定し、半値幅の値を測定することにより得られるので正しい。3. ガンマカメラの画像直線性は、カメラのライトガイドの太さや構造、光電子増倍管の本数などに関係する画像ひずみである。4. エネルギー分解能は、点線源によりシンチレータ中心軸上で波高分析を行い、光電ピークの半値幅でエネルギー分解能とするが、線源の形状そのものだけで影響を受けるとは考

えられない。線源の形状により他の因子（散乱線など）により影響を受けることは考えられる。

5. 分解能は鉛バーファントム法により測定することができるが、鉛格子の撮像では画像の歪みの測定は可能であるが分解能の測定には使用されていないと考えられる。5の記述も正しいと思われる。

複数解：2, 4, 5

【問題 4-44】（平成 10）

半値幅について正しいのはどれか。

1. 半値幅は $\frac{1}{10}$ 幅より大きくなる。
2. 散乱体を付加すると小さくなる。
3. 線広がり関数は半値幅の $\frac{1}{10}$ 以下の間隔で求める。
4. 総合分解能より固有分解能の方が大きい。
5. 半値幅を求めるとき線広がり関数の計数値は関係しない。

〔注解〕 1. 半値幅は $1/10$ 幅より小さくなる。

2. 散乱体を付加すると半値幅は大きくなる。

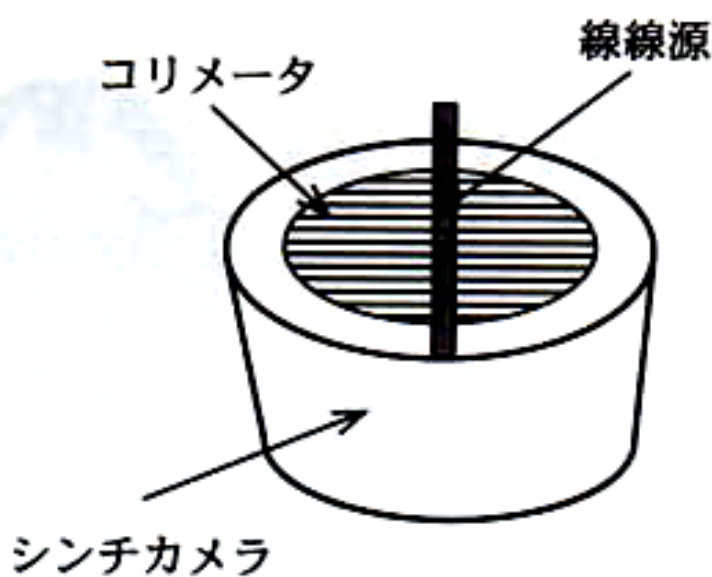
4. 総合分解能より、コリメータを付けない固有分解能の方が半値幅は小さい。

5. 半値幅は線広がり関数 (LSF) の計数値から求める。

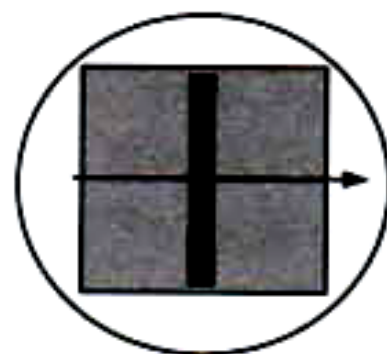
3 の記述は正しい。

iii) FWHM, FWTM

コリメータなどの空間分解能を評価する指標に半値幅 (FWHM: full width at half maximum) と 1/10 幅 (FWTM: full width at tenth maximum) がある。測定する線源形状としては点線源や線線源があるが、おもに線線源が使用される。線線源の場合には、1 mm ϕ の線チューブに線源 (^{99m}Tc などの核種) を封入しコリメータ面に密着させて測定する。観察された画像は 1 本の線状の像を形成し、その線状の像に直交するようなプロファイル曲線をとる。それが線広がり関数 (LSF: line spread function) である。図 5・2 に LSF の撮像方法と LSF 分布を示す。この LSF 分布のピーク値の 1/2 値になるところの幅が半値幅で、ピーク値の 1/10 値になるところの幅が 1/10 幅で定義されている。半値幅測定の精度を高めるために、プレーナ画像においては画素サイズの小さい 512 $\times$ 512 マトリックスを用い、SPECT 画像では SPECT 収集条件下でのマトリックス (64 $\times$ 64, 128 $\times$ 128) などで評価する。ただし、SPECT 画像の LSF 作成は 10 点以上で構成されるマトリックスサイズで収集しなければならない。評価の指標としては、半値幅自体は分解能を示し、1/10 幅は散乱線の影響の評価によく用いられる。SPECT 再構成画



(a) 実験配置図



線画像

画像のプロファイル曲線をとる

(b) 収集画像

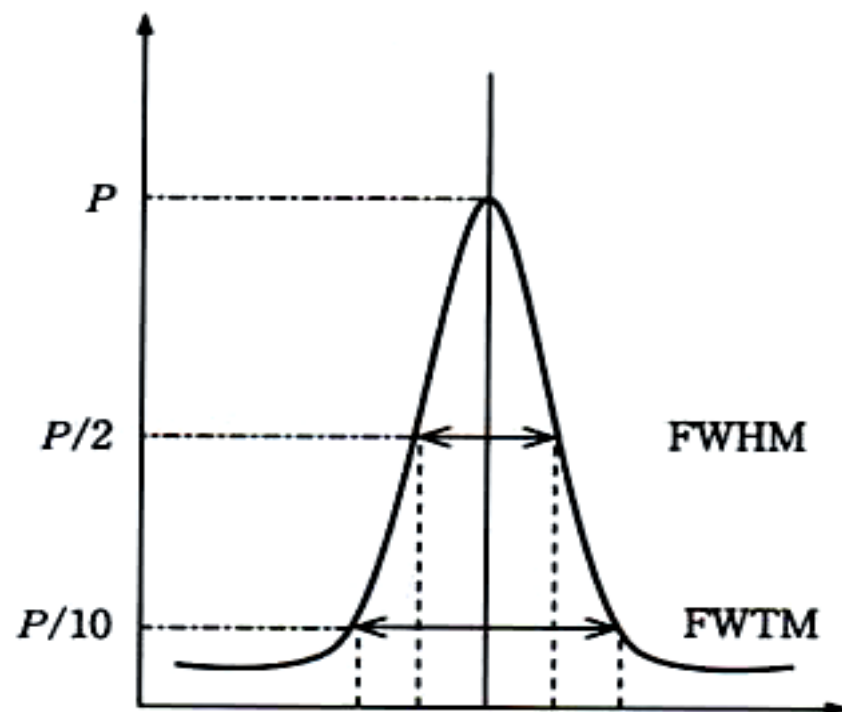
ガウス分布で標準偏差 σ , 平均値 μ とすると式 (5.3) となり,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

ガウス分布のフーリエ変換は式 (5.4) となる.

$$\text{MTF}(f) = \exp\left(\frac{-\pi^2 u^2 m^2}{2.773}\right)$$

ただし, f は周波数, m は LSF の半値幅である.



(c) 線広がり関数

図 5・2 半値幅測定と LSF

問題 54 ガンマカメラの性能評価で正しい組合せはどれか。

1. 総合均一性 ————— 点線源
2. 固有均一性 ————— サイノグラム
3. 固有空間分解能 ————— FWHM
4. 固有計数率特性 ————— 面線源
5. 固有エネルギー分解能 ————— パーファントム

ガンマカメラの性能とその評価に使用するものとの組合せで正しいのはどれか。

1. 総合直線性 ————— 線線源
2. 総合分解能 ————— 面線源
3. 固有空間分解能 ————— 点線源
4. 固有計数率特性 ————— パーファントム
5. 固有エネルギー分解能 - スリットファントム

得られる像が拡大するコリメータはどれか。2つ選べ。

1. 平行多孔
2. ピンホール
3. コンバージング
4. スラントホール
5. ダイバージング

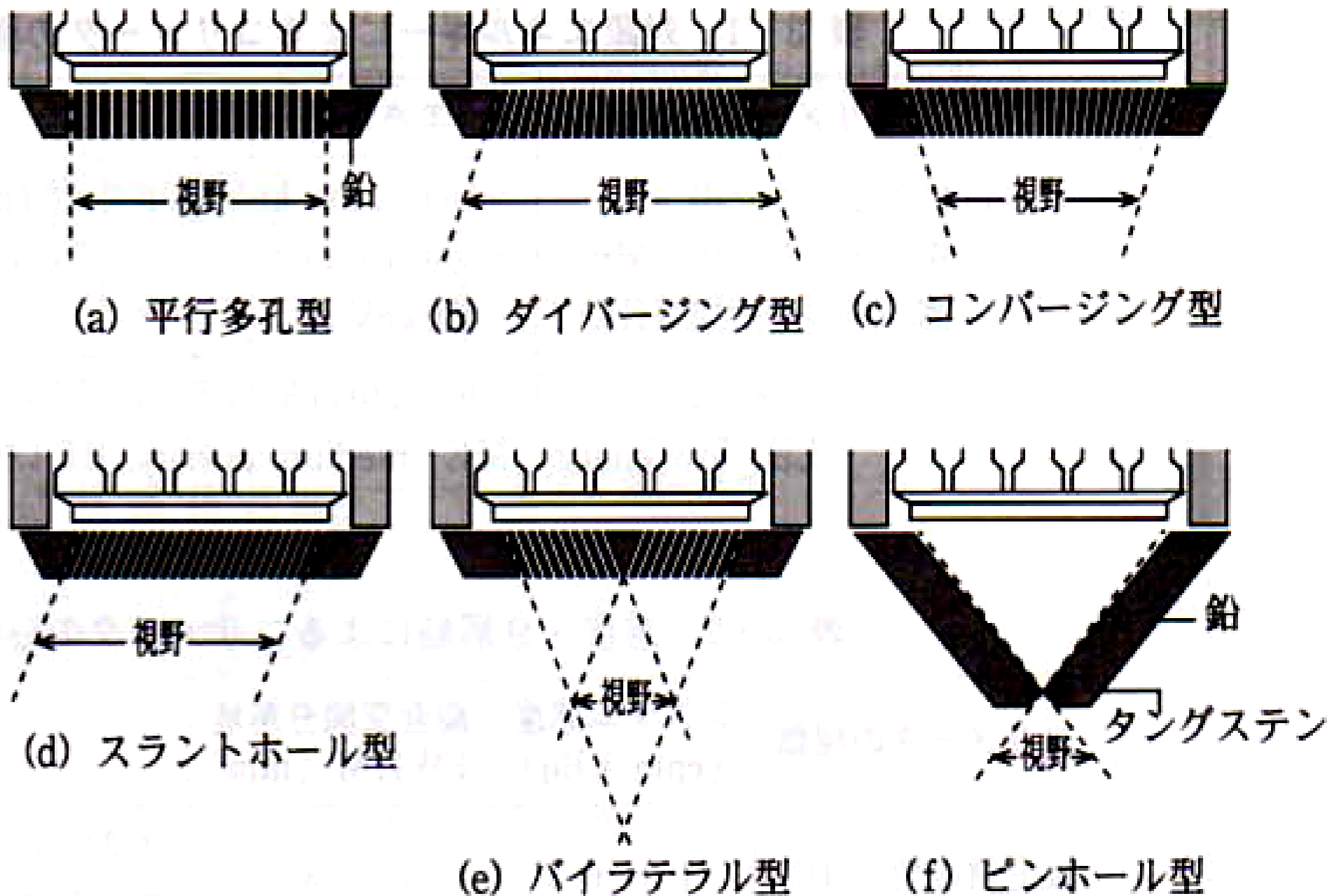


図 3・4 コリメータの断面と視野