

画像分離ラジオアイソトープ検査法

Image separation radioisotope scanning

Kuhl DE, Edwards RQ*. *Radiology* 80:653-62,1963

ラジオアイソトープ検査におけるバックグラウンドと画像の分離は、多くの要因に依存している。フォトスキャン(シンチスキャン)は、コントラスト増強に有用な方法である [1,2]。識別能は、バックグラウンドの他の構造から画像の輪郭をどの程度分離できるかにも依存しており、体内の深度に応じて分離することにより改善できる場合もある。我々は、X線立体撮影およびX線断層撮影の原理をラジオアイソトープ検査に応用してこれを試みた。

線形スキャン (Rectilinear scanning)

線形スキャンは、最も一般的に利用される方法である。すなわち、人体を一連の平行な直線でスキャンする (図1)。この場合、体内の全てのレベルの画像が重畳して記録される。腫瘍の輪郭は、その上層および下層にある放射能の混在により失われうる。

通常の線形スキャンの特性を、他のスキャン法を比較するベースラインとして示した。装置は、製粉機の部品を利用して組立て、オシロスコープの写真記録装置を備えたものである。

直径3インチ、厚さ2インチのNaI (Tl) 結晶検出器を使用した。焦点距離3インチの31孔焦点コリメータにより、焦点位置で約1/4インチの視野が得られた。波高解析を利用して、¹³¹Iからの364kVピーク以外は排除した。スキャン速度0.40cm/秒、ライン間隔0.5cmとした。

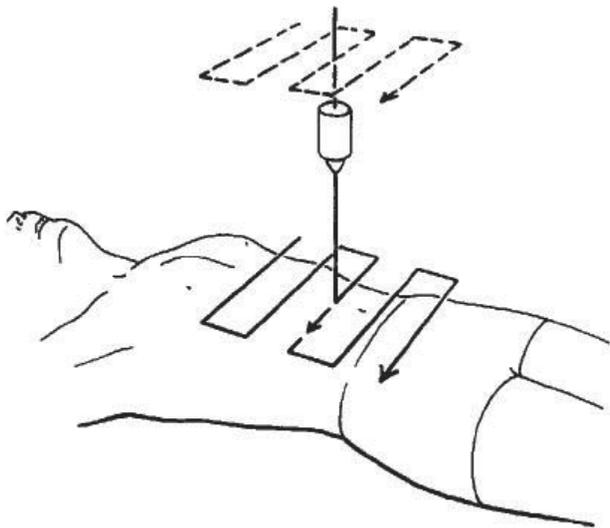


図1. 直線スキャン。現在最も一般的な方法。

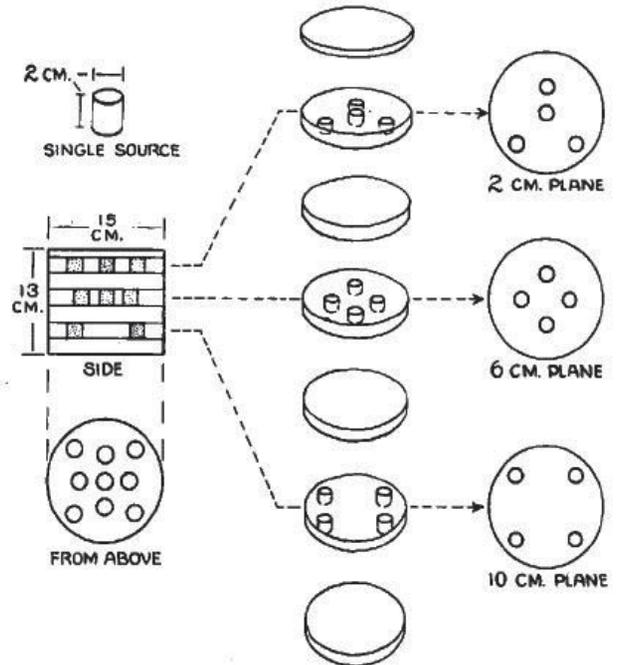


図2. 実験に使ったファントム。15×13cm, 圧縮木材製のシリンダー状で、内部に12個の同型の放射線源が3層に埋め込まれている。各線源は2×2cmのシリンダー状で、5 μCiの¹³¹Iを含む。

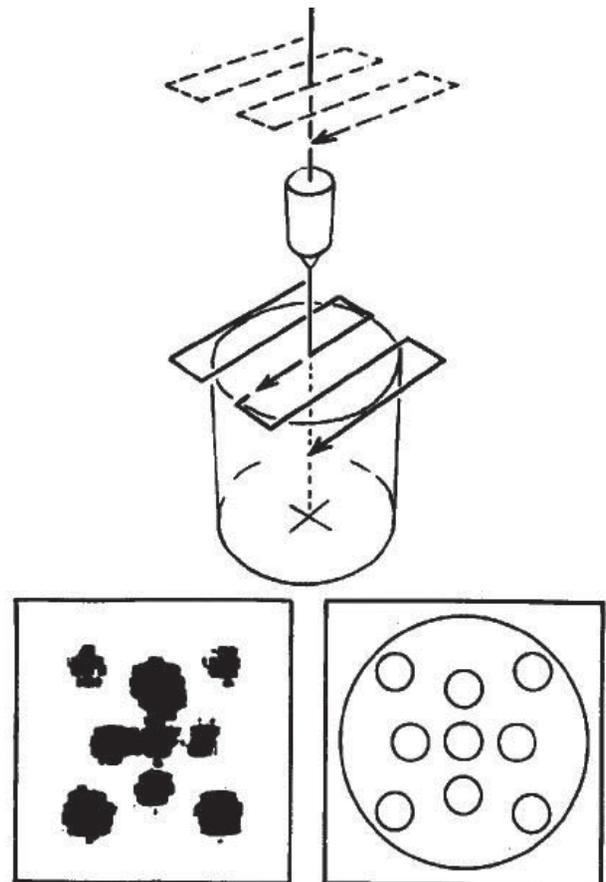


図3. 直線スキャン実験。ファントム内の全ての層の線源が重畳して記録される。

* Department of Radiology, School of Medicine, University of Pennsylvania, Philadelphia (ペンシルベニア大学医学部放射線科)。

人頭大のメゾナイト (訳注: 硬い繊維質の木板) 製ファントムを製作した (図 2). ファントム内の 3 つの異なる層に 12 個の放射性物質のシリンダーを設置した. それぞれのシリンダーは幅, 高さとも 2cm で, $5 \mu\text{Ci}$ の ^{131}I を含有している.

直線スキャンでは, 機械的駆動装置がファントム上面全体を往復して移動する. 同時に, オシロスコープ画面の輝点も, ポテンシオメータ回路により検出器の位置に同期して直線ラスタースとして移動する. オシロスコープの輝点の輝度は, カウント率に応じて電子的に変化する. シャッター付きのオシロスコープカメラにより, スクリーン輝度を写真上で積分してスキャンパターンをフィルム上に記録する.

図 3 に直線スキャンパターンを示す. この図では, 全ての層の線源が深度方向に識別されず, 重畳して表示されている. 上層の放射能によって隠れている層もあり, 何れの層も他の層と区別できない.

立体スキャン (Stereoscopic scanning)

放射能画像の深度分解能を得るために, 我々はまず立体スキャンの可能性を探った.

深度覚は, 両眼がそれぞれ僅かに異なる物体の像を受容する結果である. この 2 つの異なる画像が, 脳の中で合成され 3 次元感覚を生む. 立体 X 線撮影では, 2 枚のフィルムを撮影する. 1 枚は X 線管球を観察者の片眼の位置に, もう 1 枚は他眼の位置に合わせて撮影する. 観察者は 2 枚のフィルムを光学的ステレオスコー

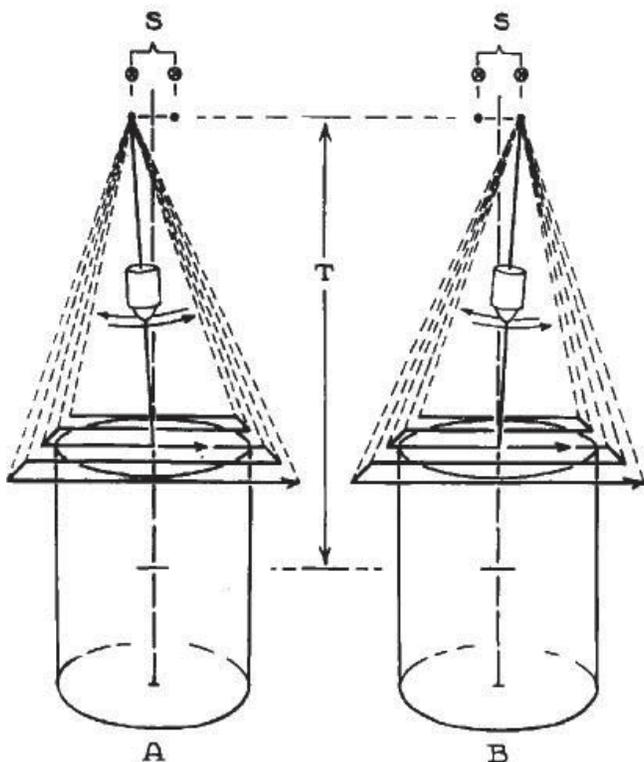


図 4. 立体スキャン. それぞれのスキャンで, 焦点に集束する γ 線を記録する. A の焦点は左眼, B の焦点は右眼に相当する.

で観察する [3]

同様に立体視をスキャンにも応用できる. コリメートされた検出器の軸上の一点を焦点として固定する. 軸を振りながら, コリメータの視野範囲で被写体の表面をスキャンする. すると, 固定焦点に集束する γ 線のみが検出される (図 4A). こうして生成される画像は概ね, 焦点に置いた眼に (γ 線が見えれば) 映る像である. 焦点を他眼の位置に移動しスキャンを繰り返すと, 2 つ目の立体画像が得られる (図 4B).

焦点間の移動距離 (S) と焦点と被写体の中心部の距離 (T) の比は, ステレオスコープに合わせて設定する. すなわち,

$$S/T = \text{瞳孔間距離} / \text{ステレオスコープの眼・フィルム間距離}$$

瞳孔間距離は平均 2.5 インチ, 市販スコープの眼—フィルム距離は 25 インチであることから, 被写体中心までの距離 (T) は移動距離 (S) の 10 倍とすればよい.

・立体スキャンの実験

立体スキャンモードの特性を試験するため, スキャン機構に手を加えて図 4 に示すような運動を行うようにした. 検出装置, オシロスコープ記録装置は直線スキャンの場合と同じである.

焦点—被写体距離 (T) は 25 インチ, 焦点間距離 (S) は 2.5 インチとした.

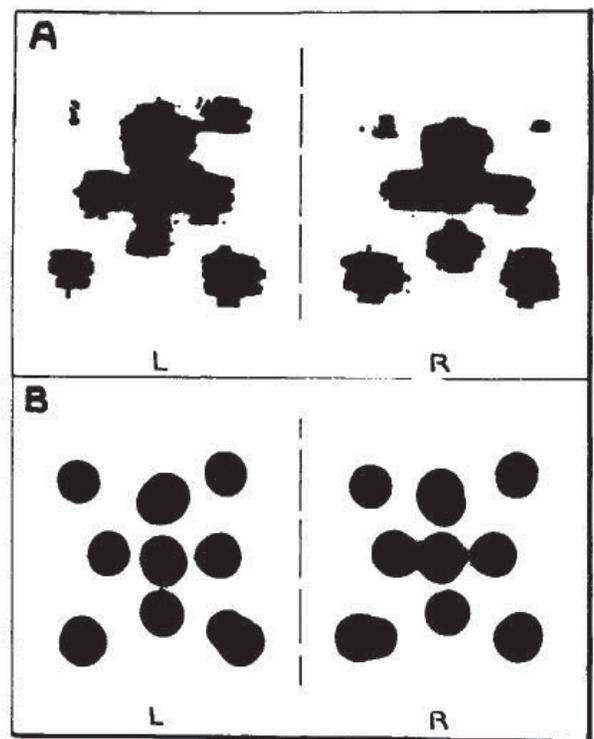


図 5. 立体スキャン実験. A. スキャン記録. 光学的ステレオスコープで観察すると, 隣接する層は充分分離されていない. B. 線源の代わりに金属シリンダーを置いて X 線立体撮影したもの. ステレオスコープで観察すると, 明瞭に分離されている.

検出器の一端を焦点に固定し、検出器をファントム上で前後に振子運動させた。各振子運動毎に検出器の軸の傾斜角を変えて、ファントム表面上のスキャン間隔を0.5cmとした。最終的にファントムの表面全体がこの直線ラスタでカバーされる。最初のスキャン操作完了後に、焦点の位置を2.5インチ側方に移動し、2回目のスキャンを繰り返すことにより、画像のステレオペアが得られる(図5A)。フルサイズに拡大してステレオスコープで観察すると、特に最深層、最浅層の間にはある程度の深度感覚が得られるが、隣接層は充分に区別できない。

ファントム内の放射線源は、同じ大きさの金属シリンダー内にあり、その立体X線写真のペアを、等距離、等間隔で撮影した。これをステレオスコープで観察すると、図5Bの方がラジオアイソトープスキャン像よりもはるかに空間分離が良好である。

この方法が不充分である理由は、検出器システムが立体感覚に必要な僅かな差を充分分離できないことによるものである。

断層スキャン (Section scanning)

スキャン画像の分離法として、立体法よりも優れる可能性がある方法として、体部X線断層法を検討した。体部X線断層法から派生する2つの方法として、縦断層法(longitudinal section scanning)、横断層法(transverse section scanning)がある。

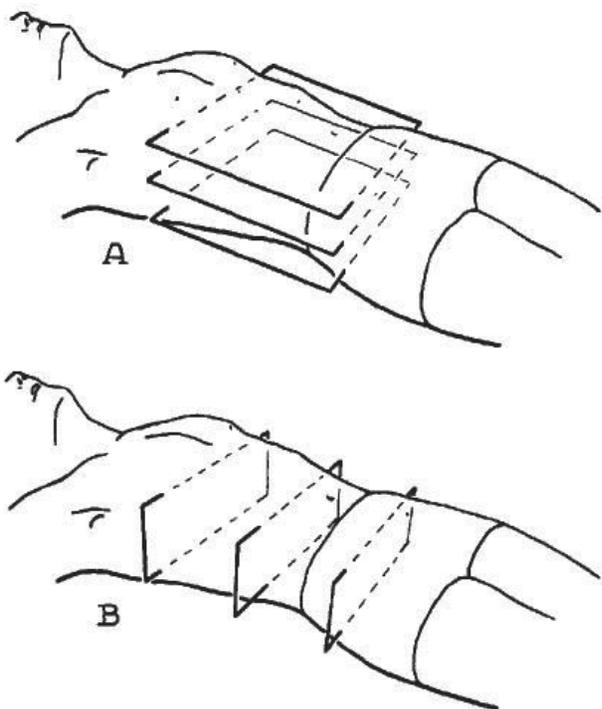


図6. (A) 縦断層スキャンの断層面, (B) 横断層スキャンの断層面.

1. 縦断層スキャンは、体の長軸に平行な選択面の放射能を表示する(図6A).
2. 横断層法スキャン, 体の長軸に垂直な選択面の放射能を表示する(図6B).

縦断層スキャン

X線断層法は、体の特定の面を多くの異なる方向から投影して、X線写真上に一致した画像とするものである[4]。ここでは、X線管球とフィルムを連続的に反対方向に移動する時、それぞれの投影のX線束の回転中心が撮影面内に位置するようにする。しかし、多くの異なる位置でそれぞれ管球とフィルムを固定して撮影し、一連の撮影を1枚のフィルムに統合することでも同様の結果が得られる。

縦断層法では、体部の異なるスキャンをそれぞれ別に記録する。通常の線形スキャン法を用いるが、異なる点は各スキャン毎に検出器の傾斜角を変化させる事である。この画像を、全ての投影像が一致するように重ねて観察すると、特定のレベルの構造が重畳して見える。それぞれの画像を適当にずらすことにより、任意のレベルを表示することができる。

縦断層法の模式図を図7Aに示す。この例では、上下に2個の線源を有する体内を3回スキャンしている。

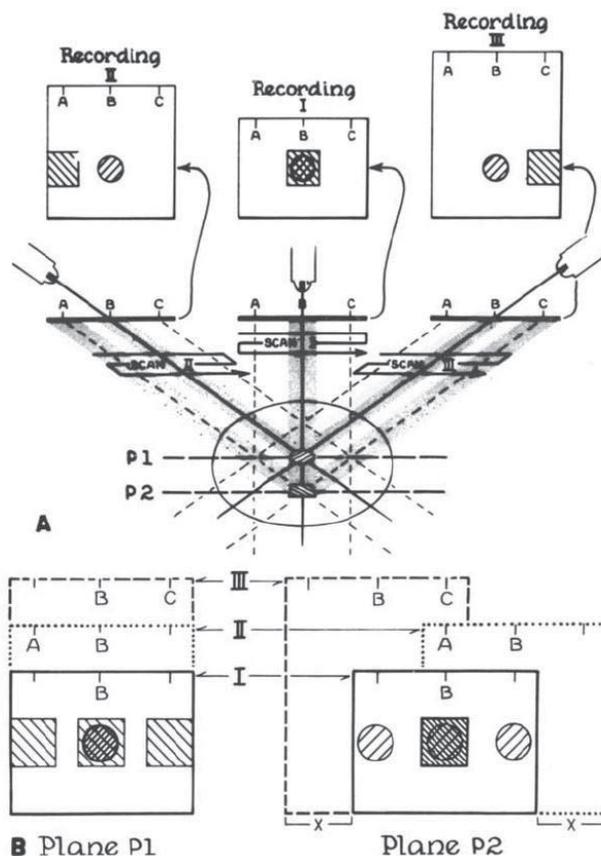


図7. 縦断層スキャン. A. 検出器を異なる角度に傾斜させて3回スキャンする。線源の深度によって、フィルム上の各画像の位置が決まる。Andrew[4] 1265頁 図3を参照。B. Aで得られた3枚の透明な画像を重ねたもの。フィルムの位置を各層に一致するように移動すると、その層の画像のみが重なってみえる。

スキャン I では検出器は垂直に、スキャン II, III では検出器を傾斜させる。画像 I では、画像は通常の直線スキャンのように重畳している。他の 2 つの画像ではそれぞれの画像が分離しているが、いずれも深度に関する情報は与えない。しかし 3 つの透明な画像を、座標 B I, B II, B III が一致するように重ねると、面 P I にある線源の画像のみが重なり、他の面の画像は拡散してボケる (図 7B)。画像をずらして座標 B I, A II, C III が一致するようにすると、面 P II の画像のみが重なって見える。

X 線断層撮影と異なり、このスキャン法では不要な画像のボカしはスキャン操作後に行うので、事前に断層面を選択しておく必要がない。フィルムの相対的な移動量は、関心画像の深度に応じて求める。フィルムの相対的移動量 (X), 検出器の傾斜角 (θ), 撮影する層の深度 (D) の関係は以下のようになる。

$$X = D \tan \theta$$

断層像の画質は、複数回の記録データの総カウント数に依存する。このため、個々の撮影のスキャン時間は通常の線形スキャン法ほど長い必要はない。

縦断層スキャンの実験

縦断層法における検出器の運動は、線形スキャン法と同じである。検出器の傾斜角を調整できるようにし

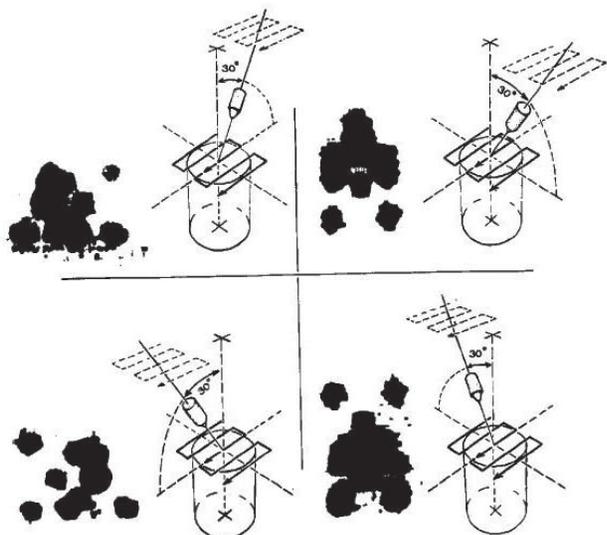


図 8. 縦断層スキャン実験。スキャン毎に、検出器を異なる方向に傾ける。

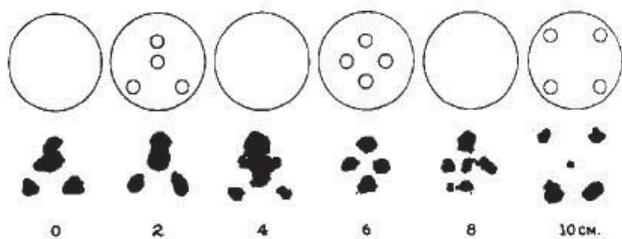


図 9. 縦断層スキャン実験。フィルムの高分解能像。異なる 6 層それぞれについて、計算で求めた位置にフィルムを移動すると、それぞれの線源が明瞭に分離される。

た他は、線形スキャンと同じ検出器、機械的駆動装置、写真記録法を使用した。

ファントム上面を図 7 に示すようにスキャンした。ただし本実験では、解像度を改善するために 3 回ではなく 5 回スキャンした。うち 1 回は、検出器とファントム表面を垂直とし、その他のそれぞれ左右に 30° 傾斜させた (図 8)。

目盛のついた支持器具を使用して、フィルムを正確に重ね、フィルムのフレームを正確に固定し、それぞれの相対的位置を正確に調整できるようにした。フィルムを透光して、6 つそれぞれの深度に対して計算で求めた距離だけ移動させた。

最終的な縦断層スキャン像を図 9 に示す。ファントムの各層に順に合わせて一致させることにより、各層の線源が上下の層から明瞭に分離されている。

横断層スキャン

X 線軸位横断層法は、X 線管球を固定し、患者とフィルムを環状に移動することにより薄い横断層像を得る方法である [5,6]。通常の X 線断層撮影と同じように、一断層面の数多くの投影像がフィルム上に一致して表示され、層外の他の構造は位置ずれによりボケて表示される。

図 10 は、この方法を拡張してラジオアイソトープの像を水平断面に表示する方法である。一對のコリメータ付き検出器が、体の周りを一定の角度毎に回転し、一連の横断スキャンを行う。検出器は放射能をもつ構造を多くの方向から見込むが、これはすべて 1 層の横断面内で行われる。それぞれのスキャンから得られる部分的な画像を、空間的相互関係を維持するように記録システム上で重ね合わせる。具体的には、スキャン中、検出器の軸をオシロスコープ上に細い線として、その方向、動き、角度を表示する。この線の輝度は、2 つの検出器のカウント率の合計に応じて変化する。スキャン中のオシロスコープの画像をフィルム上に合成する。これにより、すべての構造に対応する画像が一致して記録される。この結果、横断面中の放射能の分布像がフィルムに表示されることになる。

横断層スキャン実験

図 10 に示す方法で横断層スキャンの実験を行ったが、検出器は 1 対ではなく 1 個とした。計数装置は他の実験と同じである。

放射能ファントムをターンテーブルに垂直に置き、一定の角度毎に連続的に回転する。各回転間には、機械的駆動装置によって検出器がファントムの曲面に接する面に沿って移動する。これによって、ファントムの同一断層面内で異なる方向に多くの検出器のビューが生成される。

これにより他のスキャン法とは大きく異なる断層像が得られる。オシロスコープスクリーン上の掃引線は、正弦余弦ポテンシオメータによって検出器軸の座標の変化に対応する。別の回路により、カウント率に応じてビーム輝度を連続的に変化させる。最終的に得られた断層像を、スキャン中にオシロスコープのカメラでフィルムに統合する。

深度 10cm の横断像を、異なるファントム回転角でスキャンした。予想される通り、回転角を小さくするほど分解能は向上した (図 11)。

最後に、6つの異なる層を 15° 間隔でスキャンした。コントラストを向上させる写真技術を利用して線源像を増強し、バックグラウンドを抑制した。この方法により、ファントム内の線源の正確な断層像を表示することができた (図 12)。

考察

過去 40 年、X 線断層法が広範に研究され [7]、臨床 X 線撮影における実際的な画像分離法として広く受容されている。

我々の研究は、これと同じ断層原理が、医用ラジオアイソトープスキャンにおける γ 線画像にも同様に適用できることを示した。既存のラジオアイソトープ検査

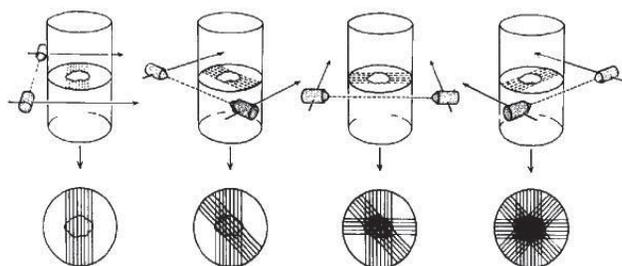


図 10. 横断層スキャン (45° 間隔). オシロスコープカメラ上の画像の模式図。

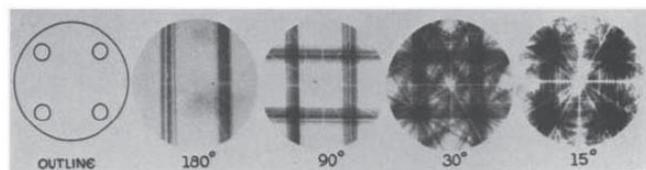


図 11. 横断層スキャン実験. ファントムの最下層を、4つの異なる角度間隔でスキャンした。角度間隔が小さいほど輪郭が明瞭になる。

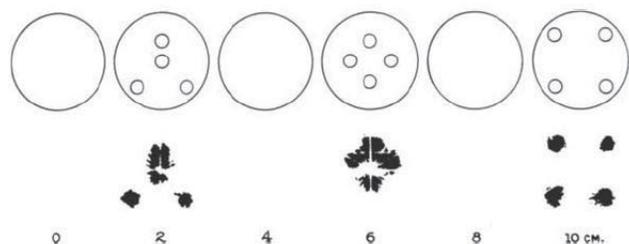


図 12. 横断層スキャン実験. 異なる 6 層について 15° 間隔でスキャンしたもの。線源がよく分離されている。

を改良する臨床用断層スキャナを製作中である。

ラジオアイソトープによる肝転移の検索は、癌が疑われる患者の初期検査として有望である [8,9]。円筒状スキャンでは、肝表面に近接する腫瘍の法が容易に検出できることが最近示された [10]。この方法は、 ^{125}I -ローズベンガルのような低エネルギー γ 線放出核種を併用して補完する必要がある [11,12]。一方、より深部の腫瘍は、 ^{131}I -ローズベンガルあるいは ^{198}Au を使用した断層スキャンによって描出が改善される。この浅在腫瘍、深在腫瘍のための 2つの方法を組み合わせることにより、肝スキャンの全体的な正確度が向上しうる。

脳スキャンは、脳腫瘍が疑われる症例の評価において、脳血管撮影、気脳写の重要な補助診断法となっている [13-16]。断層スキャン法は、頭蓋底、後頭蓋窩の腫瘍の検出精度を向上させることができるが、現状では周囲にある硬膜静脈洞や側頭部、後頭部の筋組織によって腫瘍が不明瞭になる。

トレーサーで標識した血液による心臓、大血管のスキャンは、充実性腫瘍と動脈瘤の鑑別、心嚢液貯溜と心拡大の鑑別において有用である [17]。断層法を利用すれば、これらの血管内プールがより明瞭に描出される。

甲状腺悪性結節のスキャンは、おそらく最も良く研究されたもので、非常に広く利用されている。断層撮影法の応用により、甲状腺の全体構造、異常結節がより明瞭に描出されるであろう。同様に、これらの方法の深度分解能によって、術前の機能性甲状腺癌転移が、現在の方法では不可能な精度で診断できる。

ラジオアイソトープ検査の他領域への拡張は、急速に進んでいる。いくつかの施設で、脾 [18]、腎 [19] についても有用性が報告されている。Blau & Bender は、イヌの膝を ^{75}Se -セレノメチオニンによる描出に成功しており、この診断が困難な臓器の臨床検査も間もなく可能となるであろう [20]。断層スキャン法は、これらの新しい検査法の可能性を十分に活かすものである。

要約

現状のスキャン法では、体の全層が重畳して記録される。小さな腫瘍の像は、上下に重なる画像のため不明瞭になって失われる可能性がある。この重畳は、ラジオアイソトープ検査の診断能を本質的に制約するものである。

スキャンに断層法を応用することで、この制約を回避することができる。体内の特定の層に存在する構造のみが明瞭に描出され、その上下の不要な構造は除去される。断層ラジオアイソトープ検査法では、解剖学的構造がより明瞭に描出され、肝、脳、甲状腺、その他の臓器からより有用な情報をえることができる。

【参考文献】

1. KUHL, D. E., CHAMBERLAIN, R. H., HALE, J., AND GORSON, R. O.: A High-Contrast Photographic Recorder for Scintillation Counter Scanning. *Radiology* **66**: 730-739, May 1956.
2. BENDER, M. A., AND BLAU, M.: Photoscanning. [In] *Medical Radioisotope Scanning*. Vienna, Austria, International Atomic Energy Agency, 1959.
3. WILSEY, R. B.: Stereoradiography. *X-ray Technician* **5**: 4, 1933.
4. ANDREWS, J. R.: Roentgenography: Body-Section. [In] *Medical Physics I*. Edited by O. Glasser. Chicago, Year Book Publishers, 1955.
5. KIEFFER, J.: The Laminagraph and its Variations: Applications and Implications of the Planigraphic Principles. *Am. J. Roentgenol.* **39**: 497-513, April 1938.
6. VALLEBONA, A.: Axial Transverse Laminagraphy. *Radiology* **55**: 271-273, August 1950.
7. ANDREWS, J. R.: Planigraphy I: Introduction and History. *Am. J. Roentgenol.* **36**: 575-587, November 1936.
8. FRIEDEL, H. L., MACINTYRE, W. J., AND REJALI, A. M.: A Method for the Visualization of the Configuration and Structure of the Liver. Part A. Preliminary Clinical Investigations. *Am. J. Roentgenol.* **77**: 455-470, March 1957.
9. BENDER, M. A., AND BLAU, M.: Detection of Liver Tumors with I^{131} Rose Bengal. [In] *Medical Radioisotope Scanning*. Vienna, Austria, International Atomic Energy Agency, 1959.
10. KUHL, D. E.: Rotational Scanning of the Liver. *Radiology* **71**: 875-876, December 1958.
11. HARPER, P. V., LATHROP, K., AND BECK, R.: Low Energy Radiation as Scanning Tool. *Radiation Res.* **12**: 65, 1960.
12. ENDLICH, H., HARPER, P., BECK, R., SIEMENS, W., AND LATHROP, K.: The Use of I^{125} to Increase Isotope Scanning Resolution. *Am. J. Roentgenol.* **87**: 148-155, January 1962.
13. SHY, G. M., BRADLEY, R. B., AND MATTHEWS, W. B., JR.: External Collimation Detection of Intracranial Neoplasia with Unstable Nuclides. Edinburgh and London, E. & S. Livingstone, Ltd., 1958.
14. SWEET, W. H., MEALEY, J., JR., BROWNELL, G. L., AND ARONOW, S.: Coincidence Scanning with Positron-Emitting Arsenic or Copper in the Diagnosis of Focal Intracranial Disease. [In] *Medical Radioisotope Scanning*. Vienna, Austria, International Atomic Energy Agency, 1959.
15. BLAU, M., AND BENDER, M. A.: Clinical Evaluation of Hg-203 Neohydrin and I-131 Albumin in Brain Tumor Localization. *J. Nuclear Med.* **1**: 106-107, April 1960.
16. MCAFEE, J. G., AND TAXDAL, D. R.: Comparison of Radioisotope Scanning with Cerebral Angiography and Air Studies in Brain Tumor Localization. *Radiology* **77**: 207-222, August 1961.
17. REJALI, A. M., MACINTYRE, W. J., AND FRIEDEL, H. L.: A Radioisotope Method of Visualization of Blood Pools. *Am. J. Roentgenol.* **79**: 129-137, January 1958.
18. JOHNSON, P. M., HERION, J. C., AND MOORING, S. L.: Scintillation Scanning of the Normal Human Spleen Utilizing Sensitized Radioactive Erythrocytes. *Radiology* **74**: 99-101, January 1960.
19. MCAFEE, J. G., AND WAGNER, H. N., JR.: Visualization of Renal Parenchyma by Scintiscanning with Hg²⁰³ Neohydrin. *Radiology* **75**: 820-821, November 1960.
20. BLAU, M., AND BENDER, M. A.: Pancreas Visualization with Se-75 Selenomethionine. *J. Nuclear Med.* **2**: 117, April 1961.