

SPECT、PETの最新技術

横井 孝司

島津製作所 医用技術部

New technology for SPECT and PET

Takashi Yokoi

Department of Research for Nuclear Medicine, Medical Systems Division, Shimadzu Corporation

Abstract

The technology of nuclear medicine instrumentation (SPECT, PET) has been progressed in a decade. Current gamma camera systems equip multi-head (two or three) detectors to increase the system sensitivity and efficiency. The fan-beam collimator, which has higher sensitivity with compare to the parallel hole collimator, is commonly used in clinical routine study. In addition, improvement of quantification is focused. For example, the accurate reconstruction technique using the attenuation map measured by the external transmission line source was implemented. The use of gamma cameras to perform positron imaging has been a major focus of research and development. The two methods of positron imaging, the use of "511keV collimator" and of PET-like coincidence mode without collimator, were proposed.

Three-dimensional (3D) acquisition PET systems have been recently developed. The 3D acquisition mode can measure the all coincidence events within an acceptable angle by removing the axial septa. The system sensitivity increase about 5~7 times using the 3D acquisition mode with compared to the conventional 2D mode with the axial septa. The fast processing hardware for the 3D reconstruction was also developed for a practical reconstruction time. Whole body scan is a useful tool in clinical PET study. There is a problem in the whole body mode that the scan time was prolonged with performing an additional transmission scan at each position. Simultaneous emission/transmission scan mode has been implemented to solve this problem.

Research and development for the nuclear medicine instrumentation will be featured high-resolution, high-sensitivity, and improvement of quantification of system.

抄録

最近10年間での核医学装置 (SPECT, PET) の進歩には著しいものがある。ガンマカメラではシステム感度を向上させるために、検出器が2~3台装備した装置が主流になり始めた。また、平行コリメータに比べて感度が高いファンビームコリメータも標準的に使われるようになってきた。また、定量性の向上にも努めている。例えば、トランスミッション測定によって吸収マップを得て正確に吸収補正を行いながら画像再構成をする技術が開発されている。最近、ガンマカメラを用いてポジトロン・イメージングを行う技術が注目を浴びている。方法としては、511keV用のコリメータを用いる方式と、通常のPETと同様に同時計数を測定する方式の2種類が検討されている。

PETでは、三次元収集が可能な装置が登場した。三次元収集はセプタを取り外し、全ての角度の同時計数を測定する収集方法である。これによって、従来の収集方法に比べて感度が5~7倍に向上した。また、三次元再構成に対応した高速演算回路も開発され、実用的な時間内で画像再構成が可能になっている。全身スキャンは、クリニカルPETにおいては必須である。全身スキャンを行う際の問題点は、トランスミッション測定を全身に渡って行くと、検査時間が増加するという点である。しかし、この問題に対してはエミッション/トランスミッション同時収集機構の開発によって解決されつつある。

今後も核医学装置に関しては、高分解能、高感度、定量性の向上などを目標に、研究開発がなされていくものと考えられる。



Fig.1 三検出器ガンマカメラPRISM-3000XP

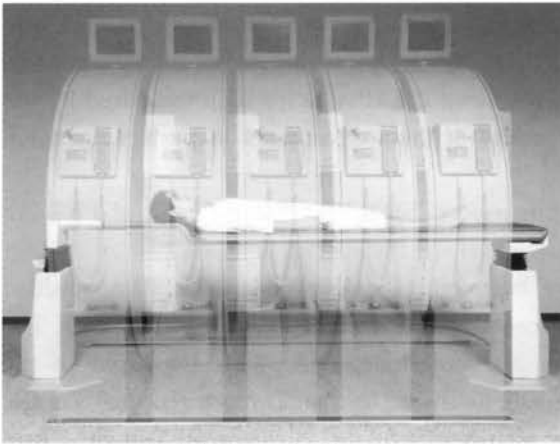


Fig.2 二検出器ガンマカメラPRISM-2000XP

1.はじめに

核医学といえば、その空間分解能の悪さゆえに形態診断には向かず機能診断が中心であった。しかし、最近10年間での装置の進歩は目覚ましく、空間分解能もX線CTやMRIには大きく及ばないものの、年々向上してきているのも事実である。また、分解能の向上以外にも注目すべき進歩もある。

そこで本稿ではSPECT、および、PETについての最新技術を紹介し、今後の研究開発の動向をまとめる。

2.SPECT装置

2-1. 感度・分解能の向上

最近のガンマカメラの特徴は、検出器を2~3個装備してSPECT測定時の検出効率を向上させていることである。これは、従来の単検出器の装置と比べると検査時間が $1/2 \sim 1/3$ になることを意味している。Fig.1に最新の三検出器ガンマカメラPRISM-3000XPを示す。この装置での空間分解能は約7.0mm FWHMである。現在の装置では各種の補正技術が

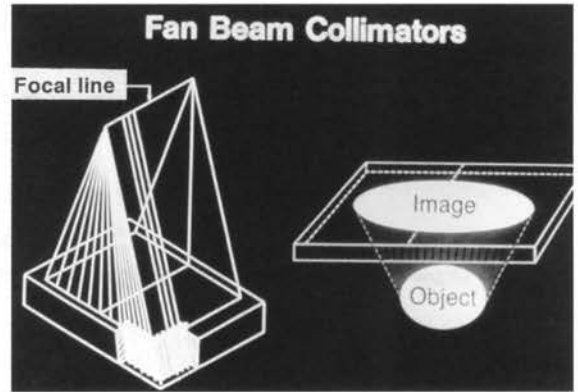


Fig.3 ファンビームコリメータの原理

確立されていて、安定したSPECT測定ができるようになってきている¹⁾。

二検出器ガンマカメラPRISM-2000XPは検出器を対向に配置した装置で、SPECT検査以外にも全身スキャンなどに有効である。これをFig.2に示す。

感度の向上にはコリメータの進歩も寄与している。ファンビームコリメータは線状の焦点(焦点距離:50cm)を持つもので、被検者を見込む立体角を増やすことによって感度を増加させている。ファンビームコリメータの原理をFig.3に示す。しかし、ファンビームコリメータの使用は有効視野を狭くするので、主に頭部検査に限定されていた。最近、心臓検査用の長焦点距離ファンビームコリメータCardioFan(焦点距離:65cm)を開発した。CardioFanを用いることによって、分解能を落とさずに感度を約1.4倍に向上させることができる²⁾。

2-2. 定量性の向上

SPECTでは、体内での γ 線の吸収が定量性を損なう最大の原因である。脳では以前から均一吸収体を仮定した近似的吸収補正法が用いられているが、心臓ではこの様な近似的手法の使用は問題がある。そこで、PRISM-3000では外部線源を用いてトランスミッション測定を行い、吸収係数マップを計算し、ML-EM(maximum likelihood-expectation maximization)アルゴリズムで画像再構成を行うSTEP(simultaneous transmission and emission protocol)機構を開発した(Fig.4)。STEP機構では外部線源を患者に投与する核種と別のエネルギーの核種にすることによって、トランスミッション測定とエミッション測定を同時に行うことが可能となっている。STEP機構によって、心臓の様な不均一吸収体でも正

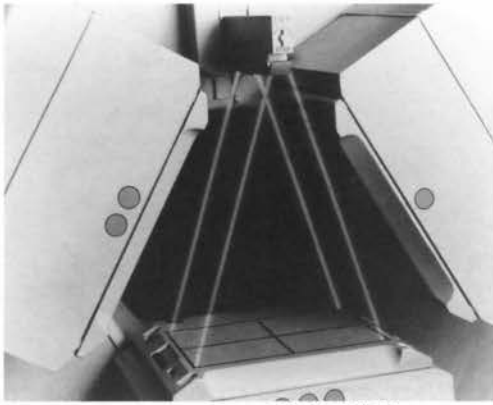


Fig.4 PRISM-3000の吸収補正機構STEP (simultaneous transmission and emission protocol)

確な吸収補正が行え、より定量的なRI分布像を得ることができる。Fig.5に、STEP機構を用いて吸収補正された²⁰¹Tlの正常心筋短軸像を示す。吸収補正なしでは心筋下壁部の分布が不均一だったのが、吸収補正を施した結果、ほぼ均一になっているのがわかる。最近、このSTEP機構に散乱線補正を組み込んだアルゴリズムを開発し、その評価を行っている³⁾

2-3. ポジトロン・イメージング

ガンマカメラによるポジトロン・イメージングが盛んに試みられている。これは¹⁸F標識フルオロデオキシグルコース (FDG) が近い将来、製薬メーカーから供給される可能性を見込んでのことである。現在、ポジトロン・イメージング方式として検討しているのは、次の2種類である。一つは511keV用に設計された壁厚の厚いコリメータを用いて収集を行う方式(コリメータ方式)と、もう一つはPETと同様に2本の消滅フォンの

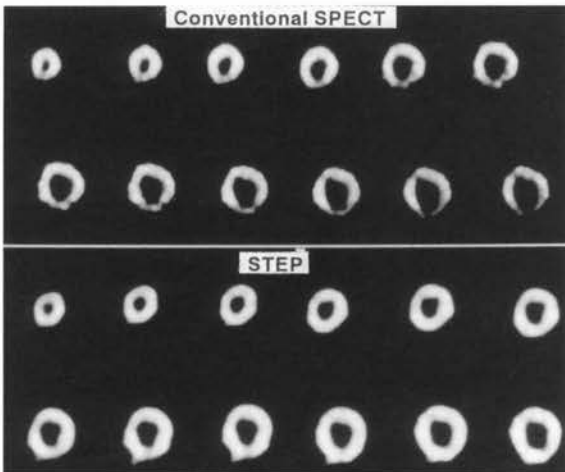


Fig.5 STEPによる心筋吸収補正画像

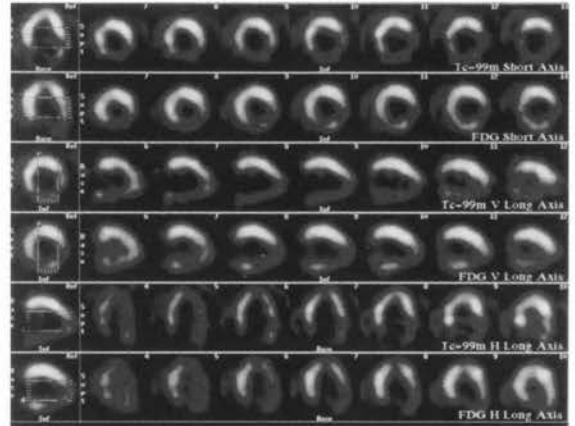


Fig.6 511keVコリメータを用いた¹⁸F-FDGと^{99m}Tc-MIBI同時収集による心筋画像 (Picker社提供)

同時計数を測定する方式(同時計数方式)である。

コリメータ方式は感度が低く分解能も悪い欠点があるが、心筋血流/代謝の画像化には使用可能であるという報告がなされている。この方式の利点は、安価であることと、¹⁸F-FDGと²⁰¹Tlというように、ポジトロン核種とシングルフォトン核種の2核種同時収集も可能であるということである。2核種同時収集を行うことにより、FDGとアンモニア(NH₃)とを別々に収集する従来のPET方式より一人当たりの検査時間は短縮できる可能性がある。Fig.6にコリメータ方式によって得られた心筋の臨床画像を示す。

一方、同時計数方式は基本的にはコリメータを使用しないので、感度も分解能もほぼPETに匹敵し、脳や腫瘍の測定にも適用可能である。二検出器ガンマカメラPRISM-2000用に開発した同時計数検出器(PCD, positron coincidence detection)は、まだ研究段階ではあるが、すでに臨床にも適用されている。Fig.7にPCD機構で得られた臨床画像を示す。この分野の研究開発は始まったばかりであり、今も性能向上を図るべく研究を続けている。

2-4. 処理の高速化

PRISMのデータ処理装置ODYSSEY-FXは、64ビットのRISCプロセッサ(DEC AXP-21064A、300MHz)を用いたUNIXワークステーションで構成されている。ワークステーションの高速化によって、様々な恩恵を受けている。従来の臨床応用ソフトウェアは、ほぼすべてリアルタイムで処理できるが⁴⁾、むしろ、以前は臨床の現場では利用不可能であった処理が可能になっていることに注目すべきである。

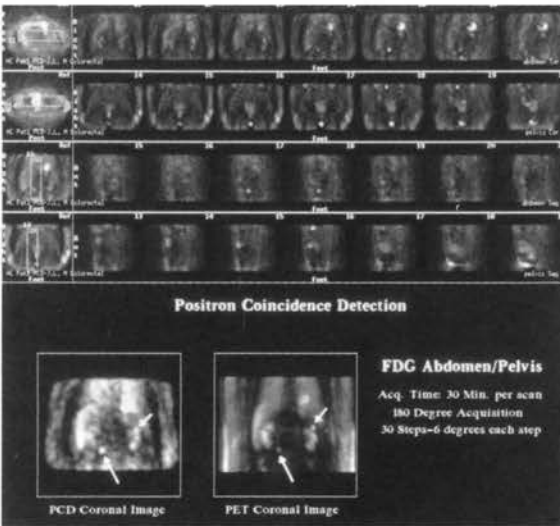


図7. 同時計数回路(PCD)を用いた ^{18}F -FDGによる体幹部の腫瘍画像(Picker社提供)。
下段左PCD機構による画像、
下段右が通常のPET装置による画像

例として、三次元表示やML-EMアルゴリズムなどが代表的である。ML-EMアルゴリズムは、先に説明したSTEP機構の様な画像再構成に使われる。このアルゴリズムは、まず初期値を仮定し、次に人工的に投影データを作りだし、実測の投影データと比較することによって各画素の再構成値を修正していく方法である。よって、繰り返し計算を行う必要があり、膨大な処理時間が掛かっていた。しかし、ワークステーションの高速化によって、EMアルゴリズムによる画像再構成も実用的な時間で実行できるようになった。また、EMアルゴリズムの一種で、OS-EM (ordered subset-expectation maximization)アルゴリズムを導入して処理の高速化を達成している。

3. PET装置

3-1. 感度の向上

最近のポジトロンECT (PET) 装置の特徴は、体軸方向の視野が広く、感度を向上させるための三次元収集が可能となっていることである。Fig.8に、最新のPET装置HEADTOME-V (SET-2400W)⁵⁾を示す。本装置の空間分解能は視野中心で3.8mm FWHM以下である。

従来の装置では、スライス間を仕切る同心円状のセプタ(タングステン製、あるいは、鉛製)を装備している。これによって体軸方向には、幾何学的に許容された角度の同時計数しか収集していなかった(二次元



Fig.8 ポジトロンECT装置HEADTOME-V (SET-2400W)

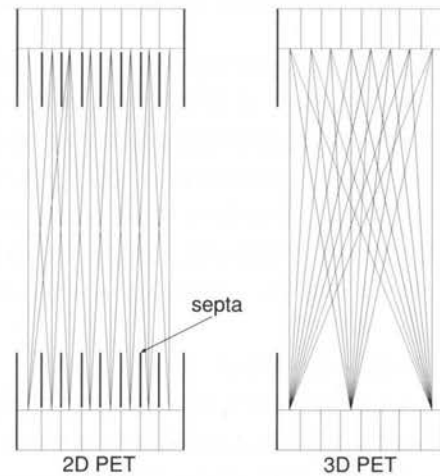


Fig.9 左が従来の二次元収集で、右が三次元収集

収集)。一方、三次元収集はセプタをガントリー外に移動させ、体軸方向の全ての角度の同時計数を収集できるようにしたものである。これをFig.9に示す。三次元収集の利点は、感度の向上が期待できることである。HEADTOME-Vによる実測値によれば、三次元収集は二次元収集に比べて5~7倍の感度上昇が得られた。これは、同一のS/Nの画像を得るのに、投与量が $1/5 \sim 1/7$ で良いことを表している。しかし、散乱線が飛躍的に増加する問題点も指摘されており、これに対する補正は現在いくつかの方法を試みている段階である。

本装置では三次元収集データに対応する画像再構成法として、三次元フィルタ逆投影法を採用した⁶⁾。この方法は基本的には二次元フィルタ逆投影法の拡張であるが、斜めの角度になると実測データの両端が欠落した状態で測定されるので、あらかじめ小さい立体角で二次元再構成した画像を前投影して、欠落している部分を埋めるという手法が取られる。その後、

Colsherフィルターを施し三次元空間に逆投影することによって最終的な再構成画像を得ている。

三次元再構成は計算量が飛躍的に増えるので、処理時間が掛かるという問題点があった。そこで、本装置では専用の高速演算回路を開発し、実用的な時間内で処理が可能なシステムとした⁷⁾。本システムは2つの信号処理プロセッサ(ピーク性能60MFLOPS×2)を1ユニットとし、これを8ユニット並列に接続することによって高速化を達成した。これに対応して並列処理が可能な再構成アルゴリズムを開発した。このシステムによって47スライスの画像再構成が10分以内で可能となった。

3-2. 分解能の向上

PETの検出器はブロック型と呼ばれる構造をしている。HEADTOME-Vに用いられている検出器ユニットは、2回路内蔵の光電子増倍管(PMT)2本、ライトガイド、および、BGOシンチレータから構成される⁸⁾。BGOシンチレータ(幅3.8 mm、奥行き6.25 mm、長さ30 mm)は、角度方向に6個、体軸方向に8個、合計48個並べられ、ライトガイドを介して2本のPMT(4回路)に結合されている。これを一つのユニットとし、直径850mmの円周上に112ユニットが配置され、体軸方向には最大4ブロックリングまで積み重ねることができる。この検出器は、BGOシンチレータに塗布する反射材の量を変化させることによって、ブロック内のどこのBGOに γ 線が入射しても位置演算ができるように設計されている。位置演算後は、直線性補正、均一性補正を行って、空間分解能とエネルギー分解能の向上を図っている。これ以外の補正に関しても、標準装備している⁹⁾。

3-3. スループットの向上

HEADTOME-Vの体軸方向の視野は20cmと広く、クリニカルPETとして必要な全身スキャンを行うのに有利である。

このような全身スキャンを行う際に問題になるのは、トランスミッション測定を全身に渡って行うと検査時間が40分~1時間程度増えるということである。よって、患者の負担や装置の稼働率を考えればエミッション/トランスミッション同時収集が望まれる。そこで、HEADTOME-Vではマスク収集機構を開発して、エミッション/トランスミッション同時収集を可能とした¹⁰⁾。これは、トランスミッション線源からの γ 線の入射

位置を計算して、その部分だけサイノグラム上にマスクを掛けて別のメモリーに格納するようにしたものである。トランスミッション線源は、患者の回りを一定速度で回転しているので、マスクを掛ける部分は線源位置に応じて変化させている。現在、このマスク収集機構によるエミッション/トランスミッション同時収集の臨床評価を行っている。

4. まとめ

本稿ではSPECT、および、PETの最新技術について簡単にまとめた。SPECT装置は国内で約1000台が稼動しており、すでに日常の臨床検査に使用されている。それに対して、PET装置は30台弱程度の普及である。しかし、本稿でも紹介したようにSPECT装置を使ったポジロン・イメージングが注目を浴びていることから、近い将来、両装置の垣根が取り払われ、SPECTと同様にPETも普及していくことになるであろう。

今後も装置の高分解能化、高感度化、定量性の向上などを目標に、研究開発がなされていくものと考えられる。

参考文献

1. 横井孝司,高橋宗尊:脳血流検査装置SPECT&PET, 日本放射線技師会雑誌 42:750-757, 1995
2. 岡 均,高橋宗尊,横井孝司:心臓専用ファンビームコリメータ(CardioFan)の評価:核医学 33:P892,1996
3. 高橋宗尊,岡 均,横井孝司,他:PRISM-3000XPの散乱線補正付きSTEP, 核医学 33:P892,1996
4. 高橋宗尊,稲岡祐一,横井孝司,他:核医学臨床ソフトウェアの開発-PRISMシリーズ画像処理システム Odyssey/Odyssey VP -,島津評論 53: 165-170, 1996
5. 天野昌治,山本誠一,田中和己,他:ポジロンECT装置HEADTOME-V (SET-2000シリーズ)の開発,島津評論 51: 59-65, 1994
6. 田中和己,北村圭司,横井孝司,他:ポジロンECT装置HEADTOME-Vの3次元画像再構成システムの開発, 島津評論 53: 171-176, 1996
7. Kitamura K, Tanaka K, Yokoi T: Parallel processing of 3D PET reconstruction using a DSP array. Ann Nucl Med 10: S55, 1996
8. 山本誠一,飯田秀博,三浦修一,他:PET装置用二次元 γ 線源置検出器の開発, Radioisotopes 45: 229-235, 1996
9. 山本誠一,天野昌治:ポジロンCT,最近の動向, 応用物理61:241-245, 1992
10. 天野昌治,佐藤彦彦,田中和己, 他:HEADTOME-VによるPETのエミッション/トランスミッション同時収集法の開発, 核医学 33: P870, 1996

ダウンロードされた論文は私的利用のみが許諾されています。公衆への再配布については下記をご覧ください。

複写をご希望の方へ

断層映像研究会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、(社)学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が社団法人日本複写権センター(社)学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体)と包括複写許諾契約を締結している場合にあつては、その必要はございません(社外頒布目的の複写については、許諾が必要です)。

権利委託先 一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

複写以外の許諾(著作物の引用、転載、翻訳等)に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。

直接、断層映像研究会へお問い合わせください

Reprographic Reproduction outside Japan

One of the following procedures is required to copy this work.

1. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has concluded a bilateral agreement with an RRO (Reproduction Rights Organisation), please apply for the license to the RRO.

Please visit the following URL for the countries and regions in which JAACC has concluded bilateral agreements.

<http://www.jaacc.org/>

2. If you apply for license for copying in a country or region in which JAACC has no bilateral agreement, please apply for the license to JAACC.

For the license for citation, reprint, and/or translation, etc., please contact the right holder directly.

JAACC (Japan Academic Association for Copyright Clearance) is an official member RRO of the IFRRO (International Federation of Reproduction Rights Organisations).

Japan Academic Association for Copyright Clearance (JAACC)

Address 9-6-41 Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan

E-mail info@jaacc.jp Fax: +81-33475-5619