

虚血心筋における糖代謝の  
定量的イメージング

Glucose metabolism in  
ischemic myocardium :  
Quantitative imaging  
using positron emission  
tomography

高橋 晶  
小野 幸彦  
須藤まき子  
新木 一弘  
穴戸 文男\*  
上村 和夫\*  
門脇 謙\*\*  
熊谷 正之\*\*

Akira TAKAHASHI  
Yukihiko ONO  
Makiko SUDO  
Kazuhiro ARAKI  
Fumio SHISHIDO\*  
Kazuo UEMURA\*  
Ken KADOWAKI\*\*  
Tadayuki KUMAGAI\*\*

**Summary**

We determined the myocardial metabolic rate for glucose (MMRGlc) in the ischemic or infarcted myocardium using 18-F-fluorodeoxyglucose (18-FDG) with positron emission tomography (PET), and studied energy metabolism in the ischemic myocardium. In some cases, we compared glucose metabolism images by 18-FDG with myocardial blood flow images using 15-oxygen water.

Two normal subjects, seven patients with myocardial infarction and four patients with angina pectoris were studied. Coronary angiography was performed within two weeks before or after the PET study to detect ischemic areas.

PET studies were performed for patients who did not eat for 5 to 6 hours after breakfast. Cannulation was performed in the pedal artery to measure free fatty acid, blood sugar, and insulin. After recording the transmission scan for subsequent correction of photon attenuation, blood pool images were recorded for two min. after the inhalation of carbon monoxide (oxygen-15) which labeled the red blood cells in vivo. After 20 min., oxygen-15 water (15 to 20 mCi) was injected for dynamic scans, and flow images were obtained. Thirty min. after this procedure, 18-FDG (5 to 6 mCi) was injected, and 60 min later, a static scan was performed and glucose metabolism images were obtained. Arterial blood sampling for the time activity curve of the tracer was performed at the same time.

According to the method of Phelps et al, MMRGlc was calculated in each of the region of interest (ROI) which was located in the left ventricular wall. MMRGlc obtained from each ROI was 0 to 17 mg/100 ml/min. In normal subjects MMRGlc was 0.4 to 7.3 mg/100 ml/min. In patients with myocardial

秋田県立脳血管研究センター 内科

秋田市千秋久保田町 6-10 (〒010)

\*同 放射線科

\*\*秋田県成人病医療センター

Departments of Internal Medicine and \*Radiology,  
Research Institute of Brain and Blood Vessels Akita,  
Senshu-Kubota-machi 6-10, Akita 010

Received for publication November 15, 1985; accepted January 11, 1986 (Ref. No. 31-53)

infarction, it ranged from 3 to 5 mg/100 ml/min in the infarcted lesion. In patients with angina pectoris and subendocardial infarction, MMRGlc was 7 to 17 mg/100 ml/min in the ischemic lesion. In this lesion, myocardial blood flow was relatively low by oxygen-15 imagings (so-called mismatch).

These results suggest an increase of anaerobic glucose metabolism in the ischemic myocardium. Determining the MMRGlc is useful for evaluating the viability of the ischemic myocardium.

**Key words**

18-F-fluoro-deoxyglucose      Positron emission tomography      Ischemic heart disease

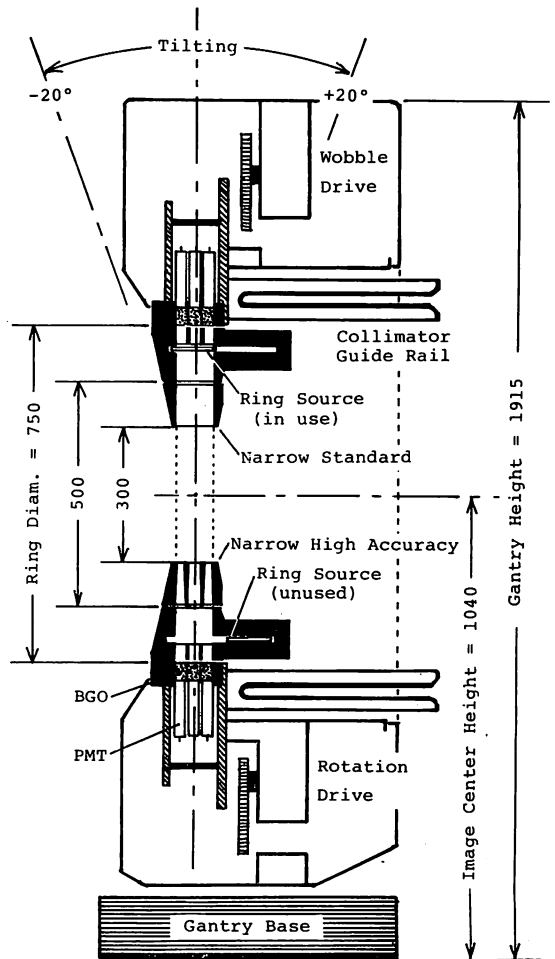
はじめに

心臓核医学診断の新しい方法として、近年、11-C, 13-N, 15-O, あるいは 18-F などのポジトロンをトレーサーとして用いることにより、心筋代謝、心筋血流を定性的、さらには定量的に評価することが可能な positron computed tomography (以下ポジトロン CT) が、臨床的に実用化されている。我が国においても数施設で本法による検討が施行され<sup>1,2)</sup>、各種心疾患の病態を把握する上で、その有用性が報告されている。我々の施設では、全身用ポジトロン CT 装置“Headtome III”を用い、11-C, 15-O, H<sub>2</sub>15-O, 18-F-fluorodeoxyglucose (FDG) などのポジトロントレーサーを使用して、虚血性心疾患症例における心筋糖代謝を観察するとともに、心筋糖代謝率 (myocardial metabolic rate for glucose: MMRGlc) の絶対値算出を試み、さらに一部の例には心筋血流イメージングを行っている。以下はその知見の報告である。

装置ならびに方法

“HEADTOME III”の横断面を Fig. 1 に示す。本装置の詳細に関しては、菅野<sup>3)</sup>、飯田<sup>4)</sup>らの報告に譲るが、全身用ポジトロン装置として使用し得、全身諸臓器の各種検索に応用し得る性能を有する。本研究では、この装置を心臓に応用し、以下の臨床的検討を試みた。

被験者を朝食摂取後約 5~6 時間絶食とし、心臓を含むように胸部をガントリー内に位置させ、大きな体動を禁じた。足背動脈にカニューレを挿



**Fig. 1. Cross-section of Headtome III gantry.**  
The gantry comprises three 160 BGO detector rings, removable shadow mask and septum collimator units and scan drive machinery. The gantry is suspended on the tilting mechanism.

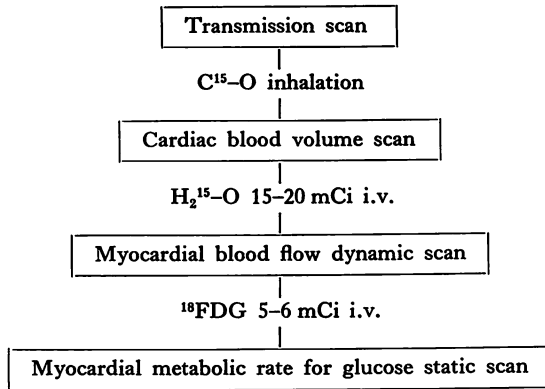


Fig. 2. Flow chart of PET study.

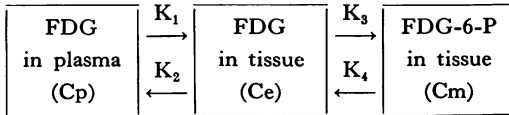


Fig. 3. FDG kinetic model.

K=diffusion constant; C=concentration.

入し、これを遊離脂肪酸、インスリン、血糖値測定等の採血用、および動脈血中内トレーサーの時間放射能曲線検出用に供した。Fig. 2 は以後の検査の概要を示した flow chart である。10 分間の transmission scan で photon の吸収補正を行なった後、C15-O を吸入し、約 2, 3 分後、平衡状態に達した時点で心プールイメージを得る。その後、肘静脈より 15~20 mCi の H<sub>2</sub>15-O を bolus injection し、約 40 秒後より dynamic scan を行なう。さらにその 30 分後、5~6 mCi の 18-FDG を静注、経時的に動脈採血を行ない、トレーサーの時間放射能曲線を得た。また 18-FDG 静注約 60 分後より static scan を行ない、心筋糖代謝イメージを得た。

Fig. 3 に FDG の kinetic model を示す。FDG の代謝に関しては three compartment model が想定される。この model につき、まず血液中の FDG 濃度を Cp、組織中の FDG を Ce で示す。さらに FDG が hexokinase によって代謝された FDG-6-リン酸の濃度を Cm とすると、この 3

Table 1. Subjects undergoing imaging of myocardial glucose metabolism (<sup>18</sup>FDG)

Angina pectoris	4
Myocardial infarction	7
Normal	2
Total	13

つの compartment の Cp, Ce, Cm は、Fig. 3 に示した K1-K4 の拡散係数にしたがって平衡状態に達する。このさい、FDG-6-リン酸はそれ以上代謝されず組織中に留り、この濃度 Cm は外来ブドウ糖消費量に比例するとされている<sup>5)</sup>。これに基づき、Sokoloff モデルを発展させた Phelps ら<sup>5)</sup>の式を用いて心筋糖代謝率を算出し、mg/100 ml/min 単位で表わした。

得られた FDG イメージについて、テレビモニター上で、左心室壁上、主として左冠状動脈灌流域に 6 ヶ所の関心領域を設定し (Fig. 4)、同部位での心筋糖代謝率を算出した。虚血性心疾患患者においては、心電図、心エコー法、あるいは左室造影法にて、虚血ないしは梗塞心筋部位と考えられる病変部位を含む上記 6 ヶ所の関心領域において、糖代謝率をおのおの比較検討した。

また、Sobel ら<sup>6)</sup>の方法により、H<sub>2</sub>15-O のイメージから C15-O によって得られた心プールイメージを subtraction し、心筋血流イメージの描

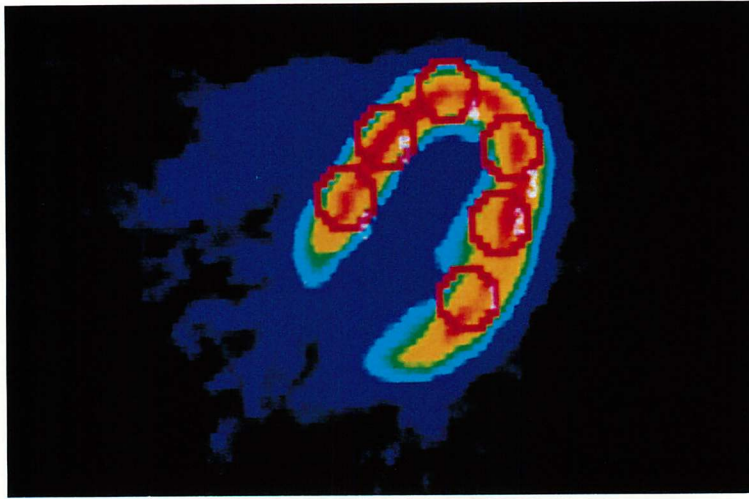


Fig. 4. Six regions of interest in the left ventricular wall.

出を試みた.

対象は43歳から69歳までの虚血性心疾患患者11例と, 正常者2例の計13例である (Table 1). 虚血性心疾患患者の内訳は, 労作性狭心症4例と発症後約4週以上を経過した心筋梗塞7例で, このうち3例は冠状動脈バイパス手術前後における検討を行なった.

## 結 果

正常青年男子のFDGによる心筋糖代謝イメージを Fig. 5 に示す. 左端が心筋血流イメージ, 中が心筋糖代謝イメージ, 右端が心プールイメージである. 各症例について, このような心筋糖代謝イメージより心筋糖代謝率を算出した. Table 2 に各症例の冠状動脈造影所見と心筋糖代謝率を示す. 心筋梗塞および, 狭心症全11例中, 左冠状動脈前下行枝 (LAD) 起始部に90%以上の狭窄を認めた9例のうち, LAD 支配域に一致した関心領域における心筋糖代謝率が低値を示した例は5例であり, それらはいずれも心筋梗塞の例で, その値は0~7.5 mg/100 ml/min の値であった. 一方, LAD 支配域に一致する関心領域において高値を示した3例は, 2例が狭心症, 1例が心内膜下梗塞症例であり, その心筋糖代謝率は

8.9~17 mg/100 ml/min と, 前記5例に比し高値を示した.

冠状動脈バイパス手術前後に局所心筋糖代謝率の変化を検討した3例中, 心筋糖代謝率が著明に変化した例は, 労作性狭心症例と心内膜下梗塞症例であった.

## 症例の呈示

症例 6: 60歳, 男, 広範囲前壁中隔梗塞

発症1ヵ月後の心筋糖代謝イメージを Fig. 6 に示す. 断層心エコー図法および左室造影法にて心尖部に心室瘤を認め, 冠動脈造影では3枝病変であった. LAD 領域の心尖部では, 心筋糖代謝率は1~2.9 mg/100 ml/min と低値を示したが, 側壁, 下壁では10~12 mg/100 ml/min と高値を示していた.

症例 8: 54歳, 男, 広範囲前壁梗塞

冠状動脈造影では, LAD 起始部に99%の狭窄病変を認めた. 心筋糖代謝率は6ヵ所の各関心領域で低下しており, 1.1~1.9 mg/100 ml/min という低値を示した (Fig. 7).

症例 13: 62歳, 男, 心内膜下梗塞

発症時の心電図および心原性酵素の推移より, 心内膜下梗塞と診断した. 発症1ヵ月後の冠状動

Table 2. Regional myocardial metabolic rate (mg/100 ml/min) for glucose in each patients

No.	Name	Age	Sex	Region of interest						Coronary angiography				FFA mg/ml	IRI IU/ml	BS mg/dl	
				1	2	3	4	5	6	LMT	LAD	LCX	RCA				
1	A.T.	30	M	1.1	1.3	0.9	0.4	0.6	0.9			Normal			0.95	11.0	101
2	K.A.	26	M	7.1	7.3	7.3	6.4	6.5	6.4			Normal			0.13	11.3	89
3	K.S.	51	M	5.0	4.4	3.6	2.7	3.4	3.5	0%	0%	0%	0%				
4	S.W.	52	M	16.4	17.0	16.7	14.7	15.4	14.7	0%	0%	100%	50%	0%	0.21	50.9	92
5	H.H.	56	F	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0%	0%	0%	0%	100%	1.06	11.6	104
6	S.S.	60	M	10.3	12.4	2.1	1.0	2.9	7.0	0%	0%	99%	75%	75%	0.23	10.0	103
7	T.O.	69	M	7.5	6.7	6.3	6.2	5.7	7.4	0%	0%	99%	90%	0%	0.57	12.0	88
8	K.H.	54	M	1.5	1.4	1.9	1.5	1.8	1.1	0%	0%	99%	0%	0%	0.70	12.3	106
9	K.N.	44	M	1.8	4.1	4.3	3.7	3.0	3.3	0%	0%	99%	0%	0%	0.68	11.0	118
10	K.F.	43	M	8.1	7.2	6.6	5.9	4.9	6.5	0%	0%	0%	75%	0%	0.26	12.5	84
11	H.O.	50	M	10.8	11.5	10.7	11.1	11.1	10.5	0%	0%	90%	0%	0%			
	H.O.	50	M	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			Good graft patency			1.54	10.0	102
12	K.S.	62	M	2.0	2.9	2.9	3.9	3.0	2.3	0%	0%	99%	90%	75%	0.86	5.3	92
	K.S.	62	M	1.0	1.4	1.7	1.7	1.6	1.7			Good graft patency			1.26	7.6	99
13	S.S.	62	M	0.0	0.3	8.9	9.5	0.1	0.1	90%	90%	90%	90%	75%	1.38	20.2	119
	S.S.	62	M	1.6	1.7	2.2	1.4	0.8	2.5			Good graft patency			1.36	18.3	117

LMT=left main truncus; LAD=left anterior descending artery; LCX=left circumflex artery; RCA=right coronary artery; FFA=free fatty acid; IRI=immunoreactive insulin; BS=blood sugar.

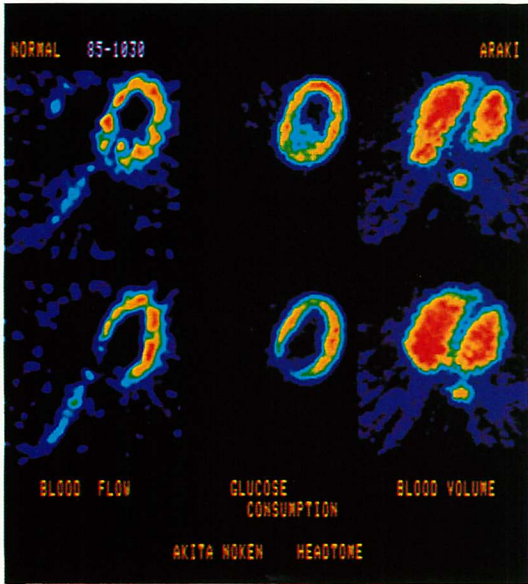


Fig. 5. Blood flow images (left), glucose metabolic images (middle), and blood pool images (right) in a normal subject.

脈造影では、左冠状動脈主幹部の 90% 狭窄と右冠状動脈の 75% 狭窄を認めた。Fig. 8 上段に示した術前のポジトロン CT では、心尖部から側壁にかけての関心領域における心筋糖代謝率は 8.9~9.5 mg/100 ml/min と高く、他の部位ではほとんど 0 であった。術後 1 ヶ月では (Fig. 8 下段)、心筋糖代謝率は各関心領域で 1~2 mg/100 ml/min という値を示した。

#### 考 察

今回我々は C15-O, 18-FDG を用い、心プールイメージ、心筋糖代謝イメージの描出を試み、さらに局所心筋糖代謝率の絶対値を算出した。また H<sub>2</sub>15-O による心筋血流イメージの描出も試みた。Ratib ら<sup>7)</sup>は、ポジトロン CT を用いたイヌ実験で局所心筋糖代謝率を求めた。そのさいの計測値は 1.7~21 mg/100 ml/min であり、かなりの変動が認められた。その原因として、イヌの食餌を一定にしなかったことがあげられている。す

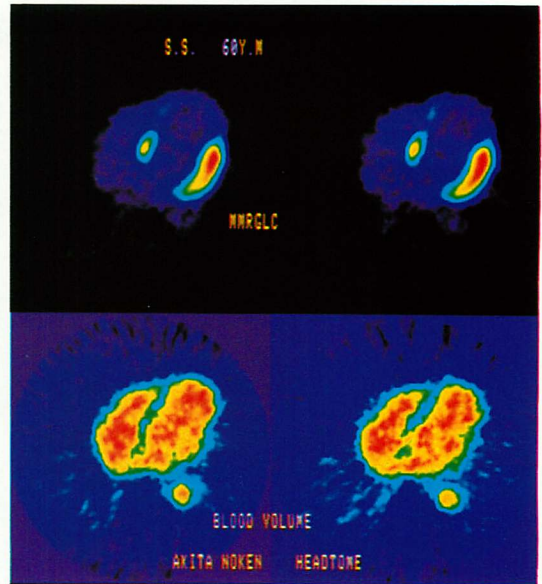


Fig. 6. Myocardial metabolic rate for glucose (MMRGlc) in a case of extensive anteroseptal infarction (Case 6).

MMRGlc is 1-2.9 mg/100 ml/min in the anterior and apical lesions.

なわち、正常心筋細胞では、空腹時には、主として脂肪酸を代謝基質として利用しており、ブドウ糖の利用は減少すると考えられている<sup>8)</sup>。このため、食餌を一定にしなければ、血中のブドウ糖や脂肪酸値の変動があり、前述の如き計測値のばらつきが生ずると解釈される。

我々の検討した正常人 2 例の心筋糖代謝率では、1 例は 1~2 mg/100 ml/min、他の 1 例は 6~7 mg/100 ml/min であった。これは前者で同時に測定した FFA が高値であったことより、空腹状態にあったことが考えられ、その状態の差が計測値の差異に関連すると解された。Schelbert ら<sup>9)</sup>は、イヌ実験モデルで 11-C palmitate の心筋への uptake をみ、空腹時に心筋に多く取り込まれていた 11-C palmitate が、ブドウ糖投与後にはその摂取が減少したと報告している。我々の検討における心筋糖代謝率の値の違いは、この結



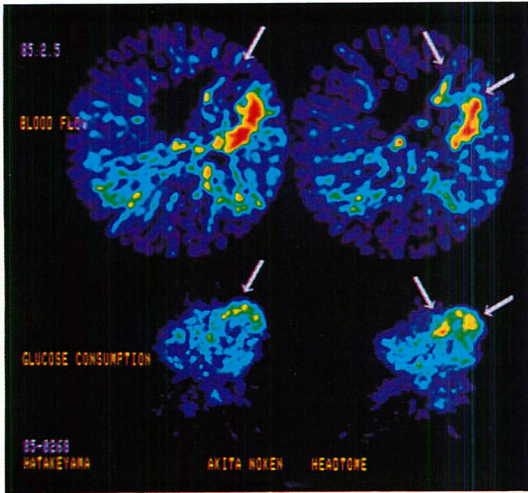


Fig. 7. MMRglc in a case of extensive anterior infarction (Case 8).

Blood flow images (upper) show decreased flow in the anterior lesion (arrow). MMRGlC is 1.1–1.9 mg/100 ml/min in the same region.

果からも説明できる。

虚血心筋における代謝基質としては、脂肪酸の利用は減少し、ブドウ糖の嫌氣的解糖系によって ATP が産生され、エネルギー源となるため、ブドウ糖の利用が増加すると報告されている<sup>10)</sup>。Marshall ら<sup>11)</sup>は、虚血心筋における心筋血流と糖代謝との関係につき、臨床例について 13-N アンモニアと 18-FDG を用いて検討したが、血流の低下している虚血心筋部位で FDG の取り込みが亢進している例のあることを指摘し、彼らはこれを “mismatch” と呼んだ。すなわち心筋細胞の虚血による変化がまだ不可逆的な傷害には達しておらず、局所における心筋血流の改善によって正常心筋に復する可能性がある」と解釈され、したがって、ポジトロン CT による心筋代謝および心筋血流の検討が、心筋蘇生能 (viability) の評価に有用であると報告した。また Tillsch ら<sup>12)</sup>は、こうした “mismatch” を呈した症例 8 例に冠状動脈バイパス手術を施行し、

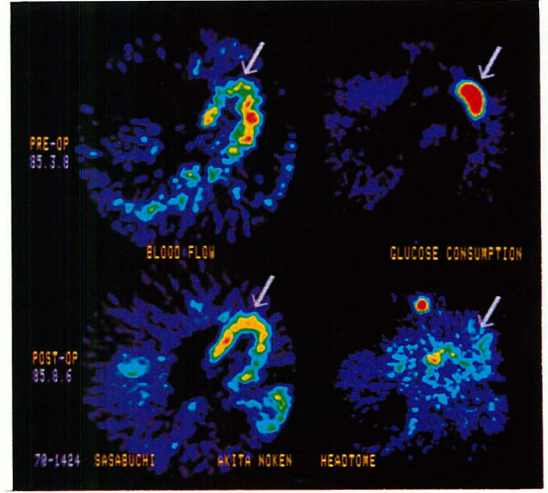


Fig. 8. MMRglc in a case of subendocardial infarction (Case 3).

Myocardial blood flow images (left) and glucose metabolism images (right) before (upper) and after (lower) A-C bypass operation are shown. High uptake lesion (arrow) disappears after A-C bypass surgery.

“mismatch” を呈した心筋局所の壁運動が術前に比し改善されたと報告し、ポジトロン CT は、手術による壁運動の改善を予測する上に有用であったと考察している。

今回の我々の臨床例では、心内膜下梗塞を呈した 65 歳の症例 13 にこの “mismatch” がみられている。本症例では心筋血流トレーサーとして  $H_2^{15}O$  を用い、冠状動脈バイパス術前後で、FDG による糖代謝イメージの対比を行なった。その結果、術前における心尖部から側壁にかけての心筋糖代謝率の局所的高値と心筋血流量低下は、冠状動脈バイパス術による冠血流量の改善、およびポジトロン CT による  $H_2^{15}O$  での心筋血流量の増加をみるとともに、その代謝率が低下した。このことは、術前には心筋虚血部での嫌氣的糖代謝の亢進があり、心筋血流の改善とともに正常の糖代謝に復したことによると推定される。さらに心エコー図法、左室造影法による心室壁運

動の検討でも, 術前 hypokinesis を呈していた心尖部および側壁は術後正常な壁運動に復した. これらの点より, 本例は Marshall らの報告したいわゆる “mismatch” に相応する症例と考えられ, 冠状動脈バイパス術のよい適応例であったとみなされる. さらに症例 6 のように, 心尖部が心室瘤を形成し, 同部位での心筋糖代謝率がほとんど零に近い値を示した例や, 症例 8 のように, 前壁から側壁の壁運動異常を示し, 同部位での心筋糖代謝率が 1~1.9 mg/100 ml/min という低値を示した例では, 心筋の蘇生能は低下していたと考えられる. 今回の検討では, 心筋糖代謝率を絶対値として求めたが, 前記の症例 6 と 8 の 2 例の FFA はいずれも高値であり, 測定時の患者の状態が同一であったとすると, 心筋糖代謝率の絶対値を測定することは, 心筋血流が測定されていなくとも, ある程度, 心筋蘇生能を評価することが可能であることを示唆するものといえる.

一方,  $H_2^{15}O$  を用いての心筋血流の測定には, いまだ解決しなければならない点が多々あり, その定量化に関しては, さらにいくつかの問題点があるのが現状である. しかし以下のような利点があることも事実である. すなわち, 1) 反復検査が可能であること, 2) 被曝線量が少ないこと, 3) 他の生理学的過程の影響を無視できること, などの点である<sup>13)</sup>. 一方, 現在本邦で行なわれている  $^{13}N$  アンモニアによる心筋血流測定の問題点は, 1) single pass extraction が不十分であること, 2)  $^{13}NH$  が組織中に代謝物として取り込まれること, 3)  $^{13}NH$  アミノ酸が血中に遊離してくることなどがあり<sup>14)</sup>, その定量化に関して難しいとする報告がある<sup>15)</sup>. 我々は, 現在  $H_2^{15}O$  を用いて, Sobel らの方法に準じ心筋血流イメージを得ているが, 心筋血流の定量化についてはなお検討中である. また  $^{11}C$ ,  $^{123}I$  を用いた心筋の脂肪酸代謝についても, 今後検討を加え, 糖代謝, 脂肪酸代謝, 心筋血流の対比により, 心筋のエネルギー代謝について, より詳細な検討を計画中である.

## 要 約

$^{18}F$ -fluorodeoxyglucose ( $^{18}F$ -FDG) を用いて心筋ポジトロン CT を施行し, 虚血部および梗塞部における心筋糖代謝率を求め, 虚血心筋のエネルギー代謝について検討した. また  $H_2^{15}O$  を用いて心筋血流イメージの描出を試み, 心筋糖代謝イメージと比較検討した.

正常者 2 例, 心筋梗塞 7 例, 狭心症 4 例を対象とし, 朝食摂取後 5 ないし 6 時間の絶食状態後, 足背動脈に血管を確保, 血中遊離脂肪酸, 血糖, インスリンを測定した後, transmission scan で photon の吸収補正を行なった.  $C^{15}O$  吸入による心プールイメージを得た後, 15 ないし 20 mCi の  $H_2^{15}O$  静注し, dynamic scan を行ない, これらより心筋血流イメージを得た. 約 30 分を経て  $^{18}F$ -FDG 5-6 mCi を静注し, その 60 分後より static scan を行ない, 心筋糖代謝イメージを得た.  $H_2^{15}O$ ,  $^{18}F$ -FDG いずれの場合も, 動脈血中の tracer の time activity curve を得, これらより, 今回は Phelps らの式を用いて心筋糖代謝率を算出した. テレビモニター上で, 主として, 左冠動脈灌流域に 6 ヶ所の関心領域を設定し, 各局所での心筋糖代謝率を求めた. 心筋ポジトロン CT 施行前後 2 週間以内に冠動脈造影を施行し, それにより推定される虚血ないしは梗塞心筋部位と, 今回算出した心筋糖代謝率を比較検討した.

心筋壁各所より得られた心筋糖代謝率は 0~17 mg/100 ml/min の間を変動した. 正常例では 0.4~7.3 mg/100 ml/min であった. 心筋梗塞例では梗塞と考えられる部位では 3~5 mg/100 ml/min を示し, 狭心症症例と心内膜下梗塞例では 7~17 mg/100 ml/min と高値を示す例もあった. これらの例では心筋血流は低下していた. この心筋糖代謝率の値は虚血心筋における嫌氣的糖代謝の亢進を示すものと考えられ, 当該部位の心筋の虚血による傷害は未だ可逆性であろうと推定された. したがって FDG による心筋ポジトロン CT



は、虚血心筋の蘇生能 (viability) の評価に有用であることが示唆された。

#### 文 献

- 1) Tamaki N, Yonekura Y, Senda M, Saji H, Kodama S; Murata K, Tanada S, Torizuka K: N-13 ammonia myocardial positron CT for evaluation of coronary heart disease: Comparison with thallium-201 SPECT. *Heart* **17**: 91-98, 1985 (in Japanese)
- 2) Yoshida K, Imai H, Shukuya M, Matsuda Y, Inagaki Y, Shishido F, Tamachi S, Ikehara H, Yamasaki T, Tateno Y: A dynamic study of intravenously administered 13-NH<sub>3</sub> in man with positron computed tomography: Investigation in the normal subjects and patients with myocardial infarction. *Respiration and Circulation* **32**: 741-746, 1984 (in Japanese)
- 3) 菅野 巖, 三浦修一, 村上松太郎, 上村和夫, 広瀬佳治, 高橋和重: 高性能ポジトロンエミッショントモグラフィ: “HEADTOME III”. *核医学* **21**: 921-932, 1984
- 4) 飯田秀博, 菅野 巖, 三浦修一, 高橋和弘, 上村和夫: HEADTOME III の全身用ポジトロンエミッショントモグラフィとしての性能評価. *核医学* **22**: 521-525, 1985
- 5) Krivoapich J, Hung SC, Phelps ME, Barrio JR, Watanabe CR, Selin CE, Shine KI: Estimation of rabbit myocardial metabolic rate for glucose using fluorodeoxyglucose. *Am J Physiol* **243**: H884-895, 1982
- 6) Bergmann SR, Fox KA, Rand AL, Mcelvany KD, Welch MJ, Markham J, Sobel BE: Quantification of regional myocardial blood flow in vivo with HO. *Circulation* **70**: 724-733, 1984
- 7) Ratib O, Phelps ME, Huang SC, Henze E, Selin CE, Schelbert HR: Positron tomography with deoxyglucose for estimating local myocardial glucose metabolism. *J Nucl Med* **23**: 577-586, 1982
- 8) Neely JR, Rovetto MJ, Oram JF: Myocardial utilization of carbohydrate and lipids. *Prog Cardiovasc Dis* **15**: 289-329, 1972
- 9) Schelbert HR, Henze E, Schon HR, Keen R, Hansen H, Selin CE, Huang SC, Barrio JR, Phelps ME: C-11 palmitate for the noninvasive evaluation of regional myocardial fatty acid metabolism with positron computed tomography: III. In vivo demonstration of effects of substrate availability on myocardial metabolism. *Am Heart J* **105**: 492-504, 1983
- 10) Liedtke AJ: Alterations of carbohydrate and lipid metabolism in the acutely ischemic heart. *Prog Cardiovasc Dis* **23**: 321-336, 1981
- 11) Marshall RC, Tillisch JH, Phelps ME, Huang SC, Carson R, Henze E, Schelbert HR: Identification and differentiation of resting myocardial ischemia and infarction in man with positron computed tomography, 18F-labeled fluorodeoxyglucose and N-13 ammonia. *Circulation* **67**: 766-778, 1983
- 12) Tillisch J, Marshall R, Schelbert HR, Huang SC, Phelps ME: Reversibility of wall motion abnormalities; Preoperative determination using positron tomography, 18-fluorodeoxyglucose and 13NH<sub>3</sub>. *Circulation* **68** (Suppl III): 386, 1983
- 13) Huang SC, Schwaiger M, Carson RE, Hansen H, Selin C, Hoffman EJ, MacDonald N, Schelbert HR, Phelps ME: Quantitative measurement of myocardial blood flow with oxygen-15 water and positron computed tomography: An assessment of potential and problems. *J Nucl Med* **26**: 616-625, 1985
- 14) Shah A, Schelbert HR, Schwaiger M, Henze E, Hansen H, Selin C, Huang SC: Noninvasive measurement of regional myocardial blood flow with N-13 ammonia and positron computed tomography in intact dogs. *J Am Coll Cardiol* **5**: 92-100, 1985
- 15) Bergmann SR, Hack S, Tewson T, Welch MJ, Sobel BE: The dependence of accumulation of 13-NH<sub>3</sub> by myocardium on metabolic factors and its implications for the quantitative assessment of perfusion. *Circulation* **61**: 34, 1980