

Quantitative Evaluation of Three-Dimensional Myocardial Perfusion in Thallium-201 SPECT Imaging

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/7942

Tl-201 心筋断層イメージングにおける局所血流分布の 三次元的定量評価法に関する研究

金沢大学医学部核医学講座 (主任：久田欣一教授)

南 部 一 郎

(昭和62年2月23日受付)

心筋の局所血流分布を3次元的に定量的評価することを目的にTl-201心筋 single photon emission computed tomography (SPECT)の短軸断層像より3次元極座標表示を作成し、その有用性について基礎的および臨床的検討を行った。Tl-201心筋 SPECTは多段階運動負荷を施行し、最大運動負荷時にTl-201を静注して行った。負荷時および3時間後のSPECTを撮像し、短軸断層像を再構成した。3次元極座標表示は短軸断層像の心基部から心尖部にかけての約10スライスでcircumferential profile解析を行い、心尖部が中心に心基部が外側縁になるように同心円状に配列して作成した。これより負荷時および3時間後のTl-201撮収率および洗い出し率を算出した。極座標表示の標準パターンを正常者より男女別に作成し、その平均±標準偏差を正常下限として求めた。標準パターンにおいて相対的血流分布や洗い出し率の検討を行ったところ、正常者の心筋局所ごとの比較および男女間において有意差がみられ、男女別のマップ作成の必要性が示唆された。極座標表示および定量的評価の指標の再現性の検討を行った。その結果、同一検者内、検者間ともに変異係数は低く、その再現性は良好であった。52例の虚血性心疾患患者において視覚的評価やextent score, severity score, 洗い出し率などの定量的評価により異常の判定を行ったところ、冠動脈造影所見と極座標表示の視覚的評価では、負荷時マップに洗い出しマップを併用することにより検出率は96%と良好であった。また責任血管の判定を行ったところ負荷時マップでは正診し、洗い出しマップでは過大評価する傾向がみられた。極座標表示より算出された指標と冠動脈造影所見との比較では多枝病変群ほど広範囲で高度の異常と評価された。虚血性心疾患患者のaorto-coronary bypass graft (ACBG)術前後に極座標表示を用いて評価したところ、全体では負荷時のextent scoreは有意に改善した($p < 0.025$)が、各枝病変群ごとでは有意差はみられなかった。洗い出しのextent score, severity scoreおよび洗い出し率は術後有意な改善を示した($p < 0.001$)。局所的に検討した結果も洗い出しのスコアは有意な改善または有意ではないが改善傾向を示した($p < 0.001 \sim NS$)。また有意狭窄枝支配領域は術後洗い出し率は有意な改善がみられ、正常部においても改善は有意であった。以上、著者の開発したSPECTによる極座標表示は局所心筋血流分布およびTl-201の動態を3次元的に定量的評価する方法として極めて有用であると結論された。

Key words Tl-201, SPECT, polar display, washout, coronary artery disease.

Tl-201はLebowitzら¹⁾により心筋イメージング用剤として報告された。その後Tl-201を用いた心筋シンチグラフィは、従来planar像として心筋血流の視覚評価が行われており、とりわけ虚血性心疾患においては負荷の導入などにより、虚血の存在診断、部位診断

に有用であった²⁾⁻¹⁰⁾。近年横断断層イメージング装置(single photon emission computed tomography, SPECT)が心筋にも応用され、その後体長軸、短軸断層像も開発されて¹²⁾3次元的な評価が可能となり、SPECTが普及することにより心筋病変の診断能は、

Abbreviations: ACBG, aorto-coronary bypass graft; CFP, circumferential profile; LAD, left anterior descending artery; LCX, left circumflex artery; RCA, right coronary artery; ROI, region of interest; SPECT, single photon emission computed tomography.

格段に進歩してきている¹³⁾⁻²⁰⁾。しかし定性的な視覚判定では熟練した読影者による判定の再現性は良好であるが、日常の診療においてはその判定に迷うことが少なくない。そこで視覚的定性判定に対して、定量評価法として circumferential profile (CFP) による空間的分布の解析や²¹⁾²²⁾、経時的な Tl-201 の洗い出し (washout)²³⁾⁻²⁶⁾などが用いられてきている。CFP 解析は、中心点より 6~10° ほどの放射状の線上における心筋内最高カウントをプロットする解析法であり、診断能の向上が知られている¹⁴⁾²⁷⁾²⁸⁾。また負荷時 Tl-201 は、心筋細胞へ摂取された後血中へ洗い出しされる。この洗い出しは、負荷時の心筋血流イメージを撮像しその後再分布像を撮像することにより定量的に洗い出し率 (washout rate) を算出して表すことができるが、心筋全体の分布を画像化することは困難であった。これらの定量解析法を断層像に応用し、心筋全体を評価する場合には、個々のスライスについて処理を行う必要があり、それにより CFP 曲線の数が増加するためその判定に煩雑さが伴う。

そこで著者はより汎用され得る方法として、Tl-201 心筋短軸断層像において、心全体を表す心基部から心尖部の各スライスを 1 つの画像に圧縮統合し、心筋の局所血流を定量的に評価する 3 次元極座標表示 (機能マップ) を作製し、その臨床例における有用性を検討することを目的として本研究を行った。

対象および方法

I. 対 象

対象は、金沢大学医学部付属病院第 1 内科、第 1 外科、核医学診療科の入院および外来の患者 68 名であ

Table 1. Patients with coronary artery disease.

No. of stenotic artery	No. of patient
3VD	16
2VD	15
RCA+LAD	6
LAD+LCX	7
LCX+RCA	2
1VD	21
RCA	4
LAD	16
LCX	1
Total	52

3VD, three vessel disease; 2VD, two vessel disease;
1VD, one vessel disease; RCA, right coronary artery;
LAD, left anterior descending artery;
LCX, left circumflex artery.

る。そのうち 52 名は虚血性心疾患患者 (男性 49 名、平均年齢 55 ± 8 歳、女性 3 名、平均年齢 58 ± 7 歳) であり、冠動脈造影により少なくとも冠動脈の 1 枝に、75% 以上の有意狭窄を有する (表 1)。上記のうち 27 名は、第 1 外科にて大動脈冠動脈バイパス (aortocoronary bypass graft, ACBG) 術が施行されている (表 2)。このうち男性は 26 名、平均年齢は 54 ± 7 歳であり、女性は 1 名、年齢は 57 歳である。これらの症例においてバイパスされた冠血管の総数は、右冠動脈 (right coronary artery, RCA) が計 7 本、左冠動脈前下降枝 (left anterior descending artery, LAD) が 26 本、左冠動脈回旋枝 (left circumflex artery, LCX) が 13 本であった。

また 16 名を標準パターン作成のための対照とした。男性は 7 名、平均年齢は 59 ± 15 歳であり、女性は 9 名、平均年齢は 51 ± 12 歳である。これら対照例は、臨床的に虚血性心疾患、心筋症、弁膜症、糖尿病などによる代謝性心疾患等を否定された症例であり、冠動脈造影は施行されていない。

II. 方 法

1. 運動負荷および撮像

運動負荷は、建部清州堂社製 EM405 型自転車エルゴメーターを用い、仰臥位にて原則として 25 Watt から開始し、2 分ごと 25 Watt ずつ漸増の多段階負荷を施行した。同時に 1~2 分ごとの血圧測定、心電図モニターまたは 12 誘導心電図の記録を行った。胸痛や胸部圧迫感、息切れ、全身および足の疲労などの自覚症状、有意な心電図変化や血圧低下、ダブル・プロダクト (収縮期血圧 × 心拍数) の増加などを中止基準として、最大負荷時に Tl-201 を 3 mCi 右肘静脈より注入し、その後 1 分間同量の負荷を継続させた。静注 10 分後に single photon emission computed tomography (SPECT) による断層イメージングを行った。装置は、島津社製のガンマカメラ対向型 SPECT 装置 ZLC 75 と核医学データ処理装置 Scintipac 2400 を用いた。

Table 2. Patients with coronary artery disease undergone ACBG surgery.

No. of stenotic artery	No. of patients
3VD	8
2VD	10
RCA+LAD	4
LAD+LCX	6
1VD	9
LAD	8
LCX	1
Total	27

データ収集は、6°ごと60方向の360°回転で、1方向30秒で行った。静注3時間後に同一の条件で再分布像のデータ収集を行った。再構成は、Shepp & Loganのフィルターを用いた逆投影により行った。横断断層像を作成後、心長軸に一致するように画像を回転し、心長軸面および短軸面断層像を再構成した。1スライスの厚さは4.8mmである。なお吸収補正は行わなかった。

2. Tl-201 心筋断層像の視覚的評価

視覚的評価は、体軸横断断層像、心長軸、短軸断層像を用い、2名以上の核医学専従医により、虚血の範囲、再分布の有無、責任冠動脈の推定を行った。

3. 極座標表示の作成

定量的解析は極座標表示で行ったが、まず短軸断層像にて circumferential profile (CFP) 解析を施行した。左室中心より放射状に6°ごとにカウントを求めた。放射線上の1ボクセル(4.8×4.8×4.8mm)の最高値と前後2ボクセルの平均値を用いて、60点からなる circumferential profile 曲線を得た。この profile 曲線から1点ごとに、Tl-201 摂取量を負荷時および3時

間後の再分布像で求め、以下に示すように洗い出し率を算出した。

$$\text{洗い出し率(\%)} = \frac{\text{負荷時の Tl-201 摂取量} - 3 \text{ 時間後の Tl-201 摂取量}}{\text{負荷時の Tl-201 摂取量}} \times 100$$

以上の circumferential profile 解析を、心基部から心尖部の約10スライス(症例により7から13スライス)について行った。CFP 曲線から求められる各データ点の Tl-201 のカウントは、心尖部が中心に心基部が辺縁になるように同心円状に配列し、極座標型の機能マップを作成した(図1)。

標準パターンは、男7名、女9名の計16名の正常者において、男女別に作成した。マップのデータ点ごとに平均値および標準偏差(S.D.)を算出し、この平均値-2標準偏差を正常下限²⁾として、対象患者の異常の判定を行った。標準パターンの Tl-201 の集積程度および洗い出しの分布をみるために、前壁、中隔、下後壁、側壁に29×29ピクセルの矩形の関心領域(ROI)を設定し、前壁に対する相対値を計算した。また洗い出し率の絶対値は心表面全体の各データ点からの平均から求めた。

異常の範囲を示す exten score は、正常の領域を黒、異常の領域を白で表示した。また異常の程度を示す severity map は、正常の領域を黒とし、異常の程度が強くなると白に近づくように段階的に表示した(図2)。定量化のために、異常の広がりおよび程度についてのスコアを次のように定義した。

$$\text{exten score(\%)} = \frac{\text{マップの異常ポイント数}}{\text{マップの全ポイント数}} \times 100$$

$$\text{severity score} = \frac{\text{マップの異常領域におけるカウントと標準のパターンのカウントの差の総和}}{\text{マップの全ポイント数}}$$

ただし各マップの値は、その最大値が1,000になるように標準化し、スコア算出した。また洗い出し率は、マップの値を1,000倍して各ポイントの値を加算し、その平均値と標準偏差を求めた。なお症例と標準パターンのスライス数が異なる場合は、標準パターンの各スライスのデータ点を間挿し、同じスライス数になるように調整した。

4. 極座標表示の再現性の検討

- 1) 同一検者内 (intraobserver) における再現性
 - i) 極座標表示の再現性

正常者および虚血性心疾患患者より2症例を選び、検者が1~2ヶ月の期間において3回ずつ極座標表示を作成した。負荷時マップにて、前壁、中隔、側壁、下壁の4ヶ所の同一部位に21×21ピクセルの矩形の

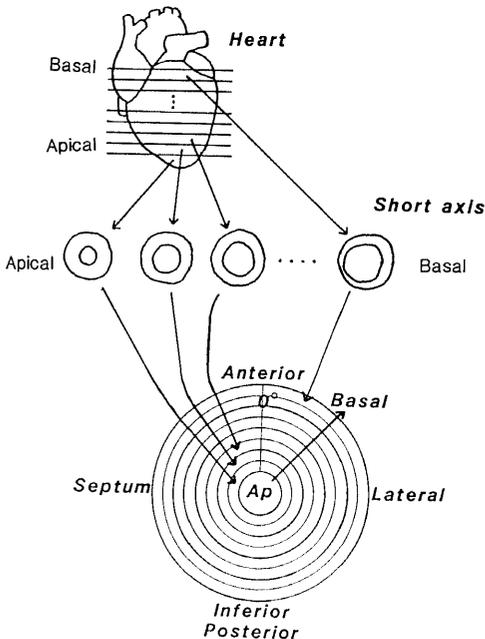


Fig. 1. Schema of polar display. Short axis slices were reconstructed for stress and redistribution Tl-201 SPECT. Seven-thirteen slices were selected from the base to the apex of left ventricle and circumferential profile analysis was done. The apex corresponds to the center of the polar display and the outermost circle corresponds to the most basal cuts.

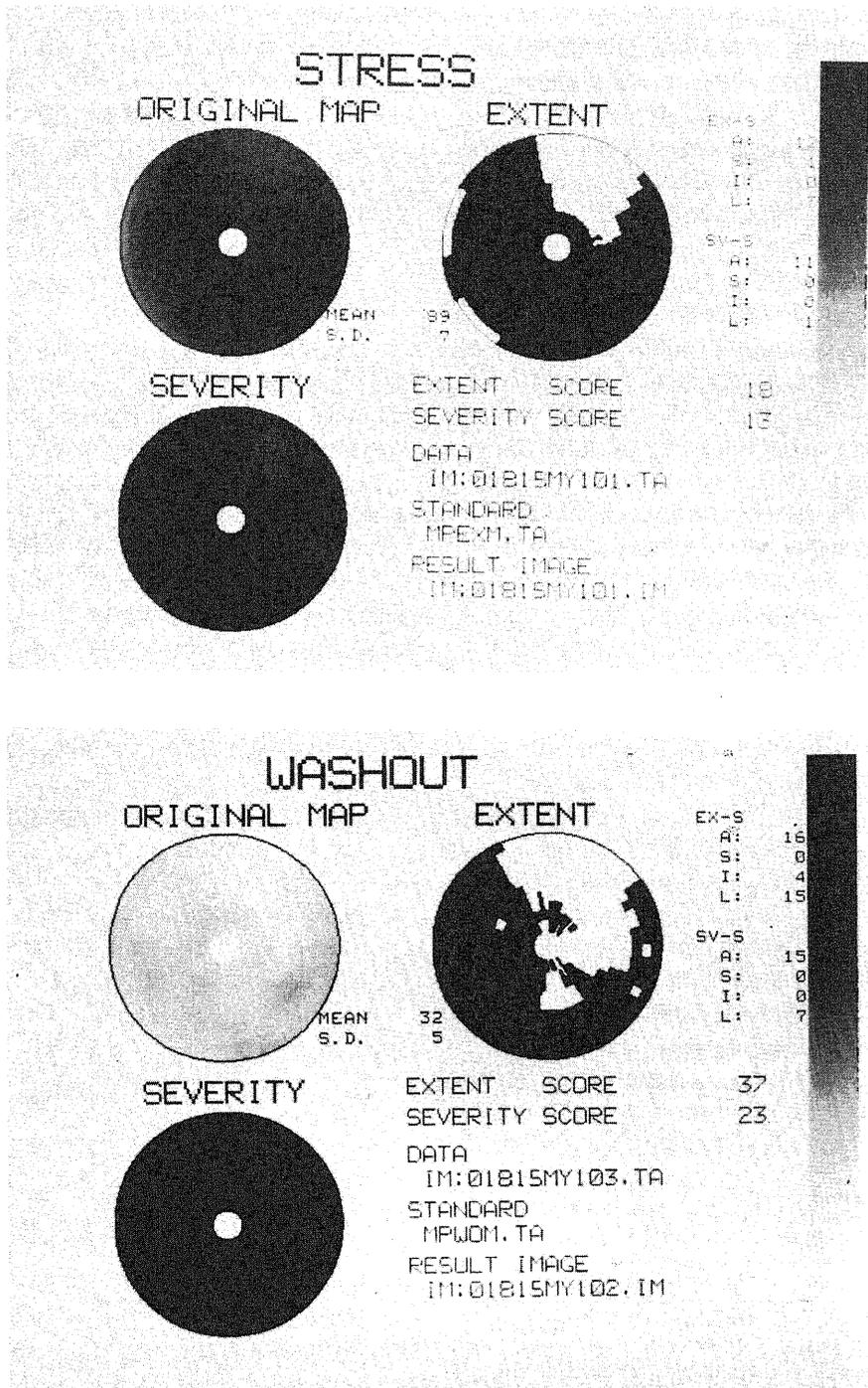


Fig. 2. Polar display of Tl-201 stress image and washout image of angina patient with LAD and LCX disease. Ischemia of anterolateral wall was shown at peak exercise (A). The washout rate was reduced in anterolateral wall (B). left upper, original counts map with mean values and SD; right upper, extent map; left lower, severity map; right middle number, extent score and severity score.

関心領域を設定した後、関心領域内の平均カウントを算出した。得られたカウントの平均値、標準偏差、変異係数 (C.V.) を算出し、再現性を検討した。

ii) 極座標表示から算出される指標の再現性

1) i) で得られた極座標表示の負荷時および洗い出しの異常スコアと、洗い出し率の平均値、標準偏差、変異係数を算出し、再現性を検討した。

2) 検者間 (interobserver) における再現性

i) 極座標表示の再現性

核医学診断医 3 名および放射線技師 1 名が、1) と同じ症例の極座標表示を作成し、負荷時マップにて前壁、中隔、側壁、下壁の 4 ケ所の同一部位に 21×21 ピクセルの矩形の関心領域を設定した後、関心領域内の平均カウントを算出した。得られたカウントの平均値、標準偏差、変異係数を算出し、再現性を検討した。

ii) 極座標表示から算出される指標の再現性

2) i) で得られた極座標表示の負荷時および洗い出しの異常スコアと、洗い出し率の平均値、標準偏差、変異係数を算出し、再現性を検討した。

5. 冠動脈造影の視覚的および定量的比較

虚血性心疾患患者 52 名において、冠動脈造影所見と SPECT の断層像の視覚評価、極座標表示の負荷時および洗い出しのマップとを比較し、視覚的判定および検出率の検討を行った。極座標表示上の各冠動脈支配領域は図 3 のごとく考えるのが妥当と思われる、視覚的に虚血領域の判定を行った。検出率の検討においては厳密な基準と緩い基準を用いた。厳密な基準では、冠動脈異常所見と虚血領域とが完全に一致した場合を正診とした。緩い基準では、冠動脈 3 枝病変は 2 枝以上と判定された場合に、冠動脈 1 枝および 2 枝病変は罹

患動脈支配領域が、視覚的判定上異常の領域に含まれた場合に陽性と判定した。

また負荷時および洗い出しのマップから異常スコアおよび洗い出し率を冠動脈各枝病変群ごとに算出した。

6. 大動脈冠動脈バイパス術前後における心筋血流分布の定量評価

ACBG 術を予定された虚血性心疾患患者 27 名において、ACBG 術前 1 ヶ月以内および手術施行約 1 ヶ月後に、Tl-201 負荷心筋 SPECT を施行し、極座標表示を作成した。術前後の負荷時マップと洗い出しのマップから、異常スコアおよび洗い出し率をマップ全体で求めた。また極座標表示で表される前壁、中隔を LAD、下後壁を RCA、側壁を LCX の支配領域と対応させて、冠動脈 1 枝、2 枝病変患者において冠動脈有意狭窄部位とバイパス部位の一致した 17 症例を選んだ。この 17 例において負荷時および洗い出しのマップから異常スコアを求め、術前後間および異常と正常の部位間の値を比較した。また洗い出し率の絶対値は、異常部と正常部に 21×21 ピクセルの矩形の関心領域を設定して求め、術前後間および異常と正常の部位間の値を比較した。

6. 統計処理

本稿に示す数値は、平均値±標準偏差および変異係数で表示を行った。平均値の差の分析は Student または Welch の t-test を用いて行い、 $p < 0.05$ を有意とした。

成 績

I. 極座標表示の標準パターン

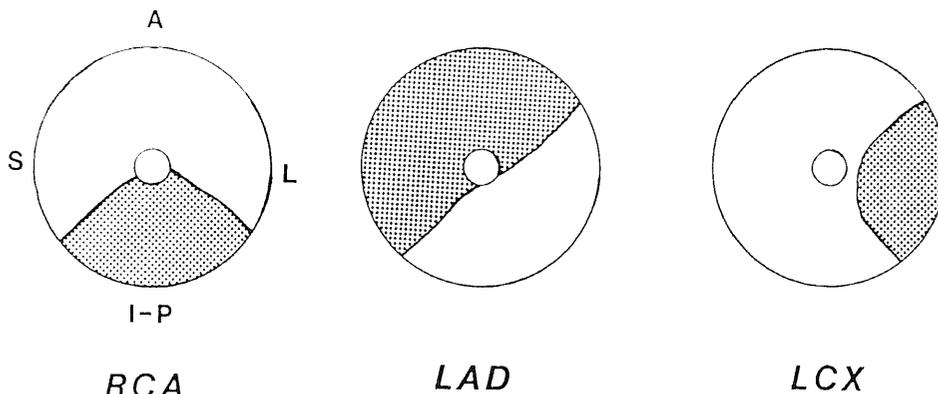


Fig. 3. Patterns of coronary artery for polar display. Shaded area corresponds to the perfusion area of each coronary artery; RCA, right coronary artery; LAD, left anterior descending artery; LCX, left circumflex artery; A, anterior wall; S, septal wall; L, lateral wall; I-P, inferoposterior wall.

正常者より作成した極座標表示の標準パターンにおいて、負荷時マップおよび洗い出しマップでの前壁に対する相対値を算出した。負荷時マップの心筋カウント(図4)は、男性では中隔が0.91, 下壁が0.83, 側壁が0.98, 女性では各々0.92, 0.89, 1.02であり、男女ともに中隔, 下壁は前壁より低値で男性ではより低かった。側壁は前壁と同程度であった。洗い出しマップから求めた洗い出し率(図5)は、男性では中隔が0.93, 下壁が0.91, 側壁が0.99, 女性では各々1.00, 0.94, 1.05であり、男性では下壁, 中隔が低値, 女性では下壁が低値であった。有意差検定の結果, 負荷時マップにおいて男性では, 前壁に対する相対値でみると, 側壁と下壁, 側壁と中隔, 下壁と中隔とどの領域を比較してみても有意及び有意ではないが差($p < 0.005 \sim 0.1$)がみられた。女性では前壁に対する相対値でみると, 側壁と中隔および側壁と下壁の間に有意差($p < 0.001$)を認めた。また男女間の比較では, 下壁では男性において有意に($p < 0.05$)低値であった。洗い出しマップでは, 同様に男性の側壁と中隔($p < 0.01$), 側壁と下壁($p < 0.005$)間の値に有意差を認めた。

心筋全体での洗い出し率の平均値は, 男性で $43 \pm 5\%$, 女性では $44 \pm 7\%$ であり有意差はみられなかった。

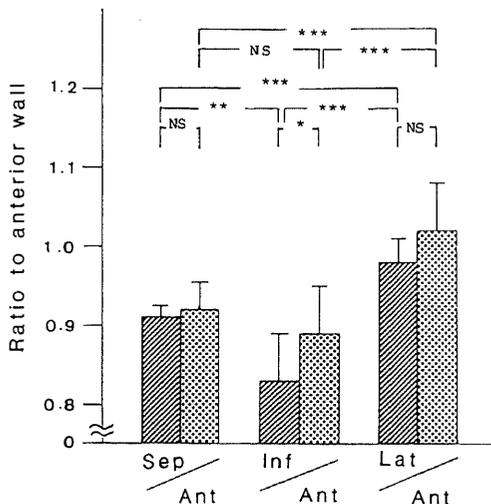


Fig. 4. Relative Tl-201 counts in control men and women. Each column indicates mean and SD. Sep/Ant, ratio of septal wall to anterior wall; Inf/Ant, ratio of inferior wall to anterior wall; Lat/Ant, ratio of lateral wall to anterior wall; men (n=7); women (n=9), NS, not significant; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.025$; ***, $p < 0.01$.

II. 極座標表示の再現性の検討

1. 同一検者内における再現性

1) 極座標表示の再現性

再現性を評価する指標としての変異係数(C.V.)は, 症例1で0.08から0.6%, 症例2で0から0.07%と低値であり, よい再現性が得られた(表3)。

2) 極座標表示から算出される指標の再現性

変異係数は, 症例1の異常スコアで0から6.7%, 洗い出し率では2.2%, 症例2では異常スコア, 洗い出し率ともに0%と低値であり, よい再現性が得られた(表4)。

2. 検者間における再現性

1) 極座標表示の再現性

変異係数は, 症例1で0.7から2.8%, 症例2で0.4から1.0%と低値であり, よい再現性が得られた(表3)。

2) 極座標表示から算出される指標の再現性

変異係数は, 症例1の異常スコアで5.4から17.2%, 洗い出し率では3.4%, 症例2の異常スコアで0から20.3%, 洗い出し率では2.6%と低値であり, よい再現性が得られた(表4)。

III. 冠動脈造影との視覚的および定量的比較

虚血性心疾患患者に極座標表示を応用し, 冠動脈造

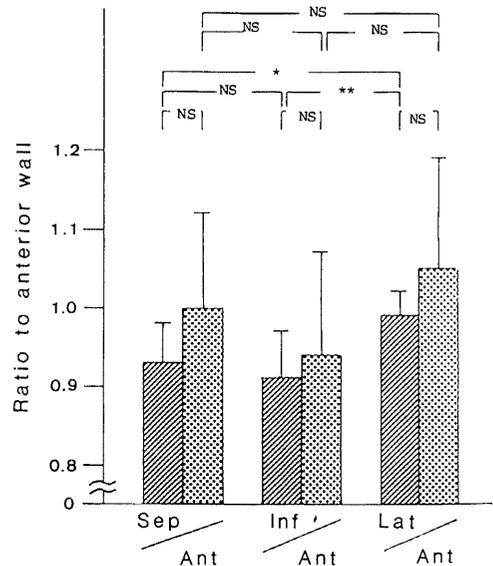


Fig. 5. Relative washout rate in control men and women. Each column indicates mean and SD. Sep/Ant, ratio of septal wall to anterior wall; Inf/Ant, ratio of inferior wall to anterior wall; Lat/Ant, ratio of lateral wall to anterior wall; men (n=7); women (n=9), NS, not significant; *, $p < 0.01$; **, $p < 0.005$.

Table 3. Intraobserver, interobserver reproducibility of myocardial count on polar display.

ROI		intraobserver		interobserver	
		Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
anterior wall	mean	621.0	880.0	612.4	880.6
	SD	3.5	0	17.3	4.9
	CV(%)	0.6	0	2.8	0.6
septal wall	mean	740.7	840.3	732.6	841.8
	SD	0.6	0.6	10.6	3.0
	CV(%)	0.08	0.07	1.4	0.4
lateral wall	mean	972.0	948.0	972.8	942.8
	SD	4.4	0	6.5	9.1
	CV(%)	0.5	0	0.7	1.0
inferior wall	mean	822.0	809.7	818.8	810.6
	SD	4.4	0.6	7.6	7.2
	CV(%)	0.5	0.07	0.9	0.9

Table 4. Intraobserver, interobserver reproducibility of extent score, severity score and washout rate on polar display.

			intraobserver		interobserver	
			Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
stress image	extent score(%)	mean	48.0	3.0	50.2	2.2
		SD	0	0	2.7	0.5
		CV(%)	0	0	5.4	20.3
	severity score	mean	58.0	0	62.6	0
		SD	0	0	4.2	0
		CV(%)	0	0	6.7	0
washout image	extent score(%)	mean	41.0	0	43.4	0
		SD	1.0	0	4.6	0
		CV(%)	2.4	0	10.6	0
	severity score	mean	26.0	0	31.4	0
		SD	1.7	0	5.4	0
		CV(%)	6.7	0	17.2	0
washout rate(%)	mean	26.3	48.0	26.4	48.0	
	SD	0.6	0	0.9	1.2	
	CV(%)	2.2	0	3.4	2.6	

Table 5. Sensitivity for detecting myocardial ischemia by visual evaluation and polar display.

		sensitivity(%)	
		strict criteria	loose criteria
visual evaluation		48.0	96.2
polar display	exercise(EX)	50.0	94.2
	washout (WO)	36.5	76.9
	EX-WO	69.2	96.2

影と SPECT の断層像を比較したところ (表 5), 検出率は厳密な基準で 48.0%, 緩い基準では 96.2%であった。同様に極座標表示の負荷時マップでは, 各々 50.0%, 94.2%であったが, これに洗い出しのマップを加えると各々 69.2%, 96.2%になり, 検出率の改善がみられた。

また冠動脈各枝病変ごとに SPECT の断層像, 極座標表示による視覚的検討を行った (表 6)。冠動脈 3 枝病変の 16 例では, 断層像の視覚評価で 7 例, 負荷時マップで 9 例, 洗い出しマップで 8 例が 3 枝病変の異常を認め, 極座標表示が異常を呈する例が多かった。冠動脈 2 枝病変の 15 例において検討した結果では, 断層像の視覚評価で, 11 例 (73%) が 1 枝病変と判定さ

れ, 一般に枝病変数群を過少に評価する傾向を示したのに対し, 負荷時マップでは, 8 例 (53%) が 2 枝病変と判定され, 枝病変数群を正しく評価する傾向を示した。また洗い出しのマップでは, 7 例 (47%) が 3 枝病変と判定され, 枝病変数群を過大に評価する傾向を示した。冠動脈 1 枝病変の 21 例において検討した結果, LAD 病変は判定が容易であり, 断層像の視覚評価で 13 例, 負荷時マップで 12 例が正診されたのに対し, 洗い出しマップでは, 8 例が多枝病変 (3 枝病変が 6 例, 2 枝病変が 2 例) と判定され, 枝病変数群を過大に評価する傾向を示した。

負荷時マップおよび洗い出しマップから異常スコアと洗い出し率を, 症例全体および各枝病変例ごとに算

Table 6. Comparison between coronary arteriography and SPECT study, assessed by visual evaluation, and polar display.

		CAG (No. of Cases)								
		3VD (16)	2VD (15)			Total	1VD (21)			Total
			RCA+LAD	LAD+LCX	LCX+RCA		RCA	LAD	LCX	
visual evaluation	3VD	7				0				0
	RCA+LAD	4	1	1		} 4	1			} 2
	2VD LAD+LCX	1		1			1			
	LCX+RCA	1		1						
	RCA	3	4		2	} 11	3			} 17
1VD LAD	1		4		13					
LCX					1					
ND					0	1	1		2	
stress image of polar display	3VD	9	1	1		2				0
	RCA+LAD	3	1			} 8	2			} 7
	2VD LAD+LCX	2	1	3	2		1	1		
	LCX+RCA	1					3			
	RCA	2	1			} 5	1	1		} 14
1VD LAD	1		3		12					
LCX										
ND					0				0	
washout image of polar display	3VD	8	3	2	2	7	5	1		6
	RCA+LAD	4	1			} 3	1			} 2
	2VD LAD+LCX			2						
	LCX+RCA	1					1			
	RCA	1		1		} 3	1			} 8
1VD LAD	1		1		7					
LCX	1									
ND		1	1		2	2	3		5	

ND, not detected.

Table 7. Extent and severity scores, and washout rate calculated from polar display.

	total	3VD	2VD	1VD
extent scores(%)				
stress image	47.8±20.5	58.8±18.7	43.5±19.5	42.6±20.2
washout image	45.3±33.8	52.9±31.3	48.3±36.9	37.2±33.2
severity scores				
stress image	65.3±62.6	95.8±66.4	45.1±35.8	56.4±68.3
washout image	45.2±52.3	63.3±66.8	41.1±44.1	34.3±43.1
washout rate(%)	31.9± 9.7	28.8± 9.4	33.1±11.9	33.4± 7.9

Values are mean ± SD.

Statistical significance :

 stress image extent score, 3VD vs 2VD, 1VD, p<0.01 ;
 severity score, 3VD vs 2VD, p<0.01 ;
 3VD vs 1VD, p<0.05.

Table 8. Extent and severity scores, and washout rate in polar display before and after ACBG surgery.

		preoperation	postoperation	t-test		
stress image	extent score(%)	total	42.7±17.8	31.2±19.2	p<0.025	
		3VD	47.1±11.5	43.1±19.0	NS	
		2VD	44.2±20.8	30.7±12.7	NS	
		1VD	37.0±19.1	21.0±21.0	NS	
	severity score	total	46.8±45.8	31.7±46.7	NS	
		3VD	54.6±35.5	39.1±25.3	NS	
		2VD	47.7±41.6	26.5±24.6	NS	
		1VD	38.9±60.3	30.8±75.9	NS	
	washout image	extent score(%)	total	58.7±33.9	18.4±25.0	p<0.001
			3VD	68.3±30.5	23.9±31.9	p<0.01
2VD			52.8±37.9	11.4±15.5	p<0.005	
1VD			56.7±34.0	21.2±27.7	p<0.025	
severity score		total	65.5±61.2	9.6±16.2	p<0.001	
		3VD	95.8±76.8	14.0±22.0	p<0.025	
		2VD	50.1±49.1	4.3± 7.2	p<0.01	
		1VD	55.8±54.5	11.7±17.6	p<0.025	
washout rate(%)		total	28.9±11.6	39.3± 7.2	p<0.001	
		3VD	24.0± 9.8	38.0± 7.9	p<0.005	
	2VD	32.9±14.1	42.5± 7.5	p<0.05		
	1VD	28.9± 9.4	36.9± 5.3	p<0.025		

Values are mean ± SD. NS, not significant.

出した(表7)。その結果、負荷時マップのextent score, 洗い出しマップの極座標表示, 洗い出しマップの extent および severity score, 心筋全体の洗い出し率において、多枝病変群ほど異常の領域が広くかつ高

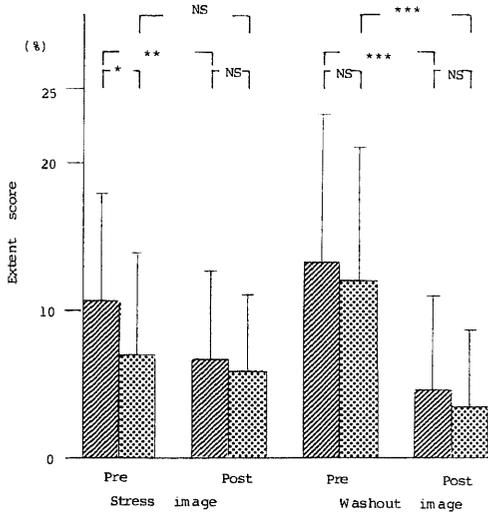


Fig. 6. Regional extent score in polar display before and after ACBG surgery. Each column indicates mean and SD. Pre, preoperation; Post, postoperation; bypassed area; non-bypassed area. NS, not significant; *, $p < 0.025$; **, $p < 0.005$; ***, $p < 0.001$.

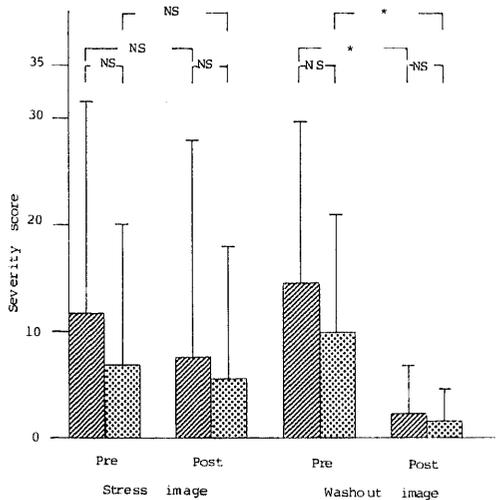


Fig. 7. Regional severity score in polar display before and after ACBG surgery. Each column indicates mean and SD. Pre, preoperation; Post, postoperation; bypassed area; non-bypassed area. NS, not significant; *, $p < 0.001$.

度に判定された。また負荷時マップにおいて、冠動脈3枝病変群と1枝, 2枝病変群間の値に有意差 ($p < 0.01 \sim 0.05$) を認めた。

IV. 大動脈冠動脈バイパス術前後における心筋血流分布の定量評価

ACBG 術前後に Tl-201 負荷心筋 SPECT の施行してある虚血性心疾患患者に極座標表示を応用し、術前後の負荷時マップ, 洗い出しマップから算出される異常スコアおよび洗い出し率を検討した(表8)。マップ全体でみた場合、負荷時マップでは extent score の症例全体の平均値は、術前 $42.7 \pm 17.8\%$ から術後 $31.2 \pm 19.2\%$ に有意 ($p < 0.025$) に改善したが、他は有意差を認めなかった。洗い出しマップでは症例全体の extent および severity score の値は、術後有意 ($p < 0.001$) な改善を認め、冠動脈各枝病変群においても術後の値の改善は有意 ($p < 0.005 \sim 0.025$) であった。洗い出し率も全症例 ($p < 0.001$) および冠動脈各枝病変群 ($p < 0.005 \sim 0.05$) で術後有意な値の改善を認めた。

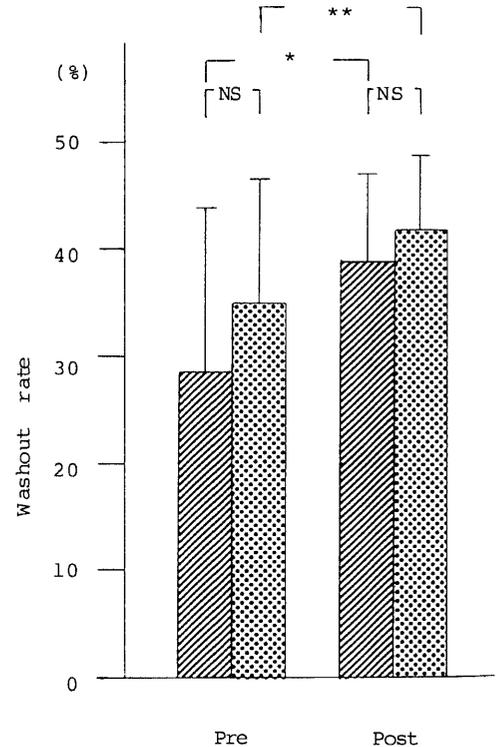


Fig. 8. Regional washout rate in polar display before and after ACBG surgery. Each column indicates mean and SD. Pre, preoperation; Post, postoperation; bypassed area; non-bypassed area. NS, not significant; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

極座標表示上に冠動脈支配領域を設定し、冠動脈有意狭窄部位とバイパス部位の一致した冠動脈1枝、2枝病変症例において、術前後の負荷時および洗い出しのマップから算出される異常スコアを検討したところ、負荷時の extent score (図6) および severity score (図7) ($p < 0.005 \sim \text{NS}$)、洗い出しの extent score (図6) および severity score (図7) ($p < 0.001 \sim 0.01$) とともに、殆んど例で術後の値の改善は有意であった。しかし異常部と正常部間のスコアの値は、有意ではないが術後改善傾向がみられた (図6, 7)。

また冠動脈1枝、2枝病変の同様の症例において、異常部と正常部に同じ範囲の関心領域を設定し、その領域ごとに洗い出し率の絶対値を求めた (図8)。その結果、洗い出し率は、異常部、正常部ともに術前の値に比較して術後の値の有意な改善 ($p < 0.025 \sim 0.05$) を認めた。異常部と正常部間の洗い出し率にも差は認められ、有意ではないが異常部の値は低い傾向にあった。

考 察

現在心臓核医学検査において、心筋血流イメージに広く用いられている薬剤である Tl-201 は、Lebowitz ら¹⁾によって開発され、心臓への応用が報告された。その後 Tl-201 は、特に虚血性心疾患において虚血部、梗塞部の視覚的な評価に用いられてきた²⁾。また負荷導入により虚血の診断能は、さらに増加した⁴⁾⁵⁾⁹⁾。そのうえ従来用いられてきた planar 像にかわり、横断層イメージング装置 (SPECT) が心筋に応用され¹⁾、さらに体軸横断層像に加えて心筋長軸・短軸断層像の再構成が可能となった¹²⁾。また SPECT は planar 像と比較して、病変部と健常部間のコントラストが増すことにより、病変検出に高い感度を持つなど、数多くの有用性が報告がされている^{13)~20)}。

SPECT 像においては、再構成されたイメージに再現性のあることが前提条件である。これに関して以前著者らは²⁹⁾、欠損部を作成した心筋ファントムを用い、検者間、同一検者内において SPECT 斜断層再構成の再現性が良好であることを示した。断層像再構成における検者間の変異係数は、カウント比で最大でも 10%、欠損部においても平均 6.7% と低値であった。同一検者内においては、平均 3.3% とさらに低値であった。再構成されたスライスの欠損部位置の変動は、検者間では circumferential profile の 1 サンプル点 (6°) 以内であった。同一検者内においては変動はみられなかった。位置の変動は、0.6 スライス以下と僅かであった。また欠損部のカウントの変動は、カウント比

で標準偏差にて最大 3.7%、絶対値では最大 2.4% と良好であった。特に同一検者内では全く変動がみられなかった。

視覚的定性的判定を行う場合に、熟練した読影者では、その再現性は良好である²⁶⁾³⁰⁾³¹⁾。しかし日常の実際の診療においては、読影者間の視覚的診断は必ずしも一致しない場合がある。またごく軽度の集積変化は、視覚的に判定困難であり、冠動脈3枝病変では planar 法にかわり SPECT を用いても、診断率の向上はみられないとの報告³²⁾³³⁾もある。今回著者が SPECT で行った虚血性心疾患の視覚的評価においては、緩い診断基準の検出率は 96.2% と高値であるが、冠動脈有意狭窄部位を正診する厳密な基準では、検出率は 48% になり半減した。そこで一定した高い検出率を維持するために、心筋血流の客観的、定量的な評価の必要性が高いと思われる。

運動負荷による心筋シンチグラフィにおいては、心筋内 Tl-201 の経時変化がみられる。すなわち正常心筋においては負荷後経時的にカウントの減少がみられる、いわゆる洗い出し (washout)²⁴⁾の現象がある。これに対し一過性虚血部においては、負荷後比較的長時間 Tl-201 の集積がみられ、負荷 3~4 時間後の像では画像上、正常部と虚血部の差が減少あるいは消失する、いわゆる再分布 (redistribution) 現象⁶⁾³⁴⁾が報告されている。以上の負荷後における心筋内 Tl-201 の経時変化を定量評価する方法として、Watson ら³⁵⁾は washout 曲線を直線近似し、それにより fractional washout coefficient (K) および Tl/2 (Tl-201 減少の半減時間) を算出した。中居ら³⁶⁾も同様に washout index を算出した。Narita ら³⁷⁾は、区域関心領域設定法による心筋 Tl-201 摂取率測定で、安静時の washout の Tl/2 を算出した。Knapp ら³⁸⁾は、負荷後 30 分と 4 時間後の左室全体のカウント比を算出した。また Garcia ら³⁸⁾は、心筋内最高カウント値をプロットした circumferential profile を用いて、% washout profile を算出した。今回著者は、これと同じく circumferential profile 法を用いて、洗い出し率を算出した。Tl-201 の生物学的半減期は、3~4 時間との報告がある。患者の待時間は少ない方がよく、著者はそれを考慮して delayed 像の撮像を 3 時間としているが、3 時間では Tl-201 の 50% 弱は洗いだされるため、解析上も誤差を生じない。従来より行われてきた planar 法は、定量評価の際に縦隔、肺野、肝臓、腎臓などのバックグラウンドに影響されるため、このバックグラウンド除去の必要性があった。しかし SPECT は、理論上はこれらバックグラウンドに影響されないため、著者は画像処理においてバックグラウンド除去

を行っていない。

以上の定量評価法を用いることにより診断能の増加が計られるが、心筋全体を評価する場合には、SPECTの多くのスライス処理する必要があり、またそれを判定する場合複雑さが要求される。これを解決するため今回著者は、SPECTの短軸断層像の各スライスを1つの画像に統合する3次元極座標表示を作成し、心筋局所血流分布を定量評価し、その有用性を検討した。

極座標表示で定量評価を行うために、まず基準となる標準パターンを作成した。標準パターン作成を用いる正常者の心筋血流には、男女差が認められ、男女のパターンを作成する必要がある^{39)~41)}。著者の検討でも男女間に有意差を認めた。Eisnerら⁴⁰⁾は、全例で側壁に対する中隔、心尖部の比率は1以下であり、下壁に対する前壁の比率は、男性で1以上、女性でほぼ1であると報告し、この差が女性の乳腺組織による減弱のためと考えている。Linksら³⁹⁾も負荷心筋にて男女差の検討を行っているが、男女差は負荷の程度の差によるよりは、乳腺組織による減弱のためと推測している。著者の検討では、前壁に対する比率は、女性でも下壁がより低い値になった。このことは我国では、女性の乳腺組織の厚さや男女間の体格の差が欧米ほど顕著でないためと思われる。また洗い出しによる検討では、前壁に対する比率は、男性の中隔と男女の下壁で低値であった。以上のことより Tl-201 の心筋内の分布や洗い出しは、ともに血流分布に比例し、負荷時に血流増加の大きいと思われる前壁および側壁は、洗い出しも速やかに行われるものと考えられる。また Tl-201 の心筋内の分布と洗い出しの分布パターンの差は、相対的指標の Tl-201 分布と絶対値として表される洗い出しとの違いによると思われる。

極座標表示作成および算出される数値の再現性は良好であった。再現性評価に用いた症例は虚血性心疾患患者および正常者であったが、両者とも検者内、検者間にて良好な再現性が得られた。このことにより極座標表示は、症例間の画像を比較したり定量評価をする場合に、充分応用できることが示された。なお極座標表示から算出される指標の検者間の再現性を検討したところ、症例2の extent score は変異係数が 20.3% と高いが、平均が 2.2 と低値のためであり再現性は良好と判断された。

視覚的に判定を行った場合、SPECTの断層像の視覚的評価では、虚血の検出率 96.2% と良好であったが、罹患動脈部位との一致は、48% と半減している。著者の検討では検出率はやや低かったが、竹田ら³²⁾、Tamakiら⁴²⁾の報告では、罹患動脈部位の検出率は 33~83% であった。これに対して極座標表示の負荷時

の血流マップでは、罹患動脈部位の検出率は 50% であったが、洗い出しマップを加えることにより罹患動脈部位の検出率は、69.2% と増加した。マップにおいて検出率の増加が著しくなかった理由として、マップの判定にはおよそのパターンを設定し、それにより一律に判定したために、冠動脈灌流パターンの個人差を考慮できなかったことによると思われる。洗い出しマップ単独では、罹患動脈部位の検出率は 36.5% と低値であった。また冠動脈 1、2 枝病変 36 例中 13 例において、領域を過大に評価した。大獄ら⁴³⁾は洗い出しを用いても、冠動脈 3 枝病変の最も軽い病変枝と冠動脈 1、2 枝病変の非病変枝との鑑別は、容易でなかったと報告している。この洗い出しが、心筋の局所的な状態を表すだけでなく、心筋全体の機能を表すことも原因となっている。また運動負荷においては、有意な胸部症状の生じた時点で Tl-201 を注入してしまうため、負荷が一定量に達していない場合があり、このことが心筋全体の洗い出し率に影響する可能性もある⁴⁴⁾。

冠動脈各枝病変群ごとに異常の領域を検討すると、冠動脈 3 枝病変群において、極座標表示のマップが全体に異常を呈する例が多かった。冠動脈 2 枝病変群では SPECT 像の視覚判定においてやや過少に評価する傾向を示したが、冠動脈障害の重症な領域がイメージ上目立ち、他の異常の領域を判定できなかったためかもしれない。これに対して負荷時マップでは 53% が 2 枝病変と判定されたが、視覚判定より良好であった。洗い出しマップでは、47% が 3 枝病変と過大に評価されたが、これは洗い出しが心筋全体の機能を反映することによる。冠動脈 1 枝病変群では、SPECT 像の視覚評価と負荷時マップの判定は容易であった。洗い出しマップでは 38% の症例で異常領域を過大に評価した。

極座標表示より算出される指標の各枝病変群ごとの検討では、負荷時マップの extent score、洗い出しマップの extent および severity score、心筋全体の洗い出し率において多枝病変群ほど異常の領域が広くかつ高度に判定された。統計的検定上はその値に必ずしも有意差はみられなかったが、この理由として LAD 単独病変でも障害部位が大きな場合もあれば、3 枝病変であっても必ずしも障害の範囲が広いわけではなく、狭窄動脈数と虚血、梗塞部位が必ずしも平行しないためと思われる。洗い出し率においては、多枝病変群ほど低値になる傾向がみられた。このことは以前に津田ら⁴⁵⁾、西村ら⁴⁶⁾及び著者ら⁴⁷⁾も報告したが、虚血性心疾患において、Tl-201 の心筋取込みが減少すると同時に、心筋からのクリアランスも低下することに関係している。

ACBG 術の術前後における心筋血流を評価するた

めに、RIを応用し有用性を示した報告^{(40)~(52)}は以前よりなされている。今回著者は、極座標表示より算出される指標を用いて、ACBGの術前後の心筋血流の定量評価を行った。極座標表示全体でみた場合、負荷時マップでは症例全体のextent scoreの値の改善は有意であった。しかし症例全体のseverity scoreおよび各枝病変ごとの異常スコアは値の改善はみられるものの、統計上有意ではなかった。これは患者間のスコアの差が大きく標準偏差が高くなったためと思われる。これに対し洗い出しマップでは、症例全体、各枝病変群ともに異常スコアは術後有意に改善した。また洗い出し率の術後の改善も、有意であった。洗い出し率の定量評価は、負荷時の心筋血流の評価に比べて変動が少なく、他の症例との比較により有用であると考えられた。

ACBG術前後間で局所的に極座標表示のスコアを検討した場合には、負荷時のスコア、洗い出しのスコアともに術後の値の改善は有意であった。また異常部と正常部に分けてスコアを比較すると、異常部が負荷時マップ、洗い出しマップともに改善したのに対し、正常部でも負荷時異常スコアはやや改善し、洗い出しの異常スコアは明らかに改善をみた。術後の正常部での洗い出しの改善は、心機能全体の改善を反映している所見であり、ACBG術の有効性を示す所見といえる。

結 論

Tl-201心筋SPECTの短軸断層像の各スライスを、1つの画像に圧縮統合する3次元極座標表示を作成し、心筋の局所血流分布を新しい指標である異常の領域や程度を表すextent score, severity scoreおよび洗い出し率で定量評価し、その有用性につき検討したところ、以下のような結論を得た。

1. 正常心筋における血流パターンは、全体に一律でなく、Tl-201の集積程度を表す負荷時マップをみると、前壁に対する相対値は、男性で中隔が0.91、下壁が0.83、側壁が0.98、女性では各々0.92, 0.89, 0.99であり、男女ともに下壁は前壁より低値で、男性ではより低かった。また中隔も男女ともに低値であった。洗い出しマップにおいては、前壁に対する相対値は中隔が0.93、下壁が0.91、側壁が0.99、女性では各々1.00, 0.94, 1.05であり、男性では下壁、中隔が低値、女性では下壁が低値であった。このことから男女別のパターン作成の必要性が示唆された。洗い出し率の平均値では男性で43%女性で44%と差を認めなかった。

2. 極座標表示の再現性は、同一検者内、検者間ともに良好であった。同一検者内で変異係数(C.V.)は0から0.6%、検者間で変異係数0.4から2.8%と低値

であった。また極座標表示から算出される指標の再現性は、同一検者内の異常スコアで変異係数0から6.7%、検者間で変異係数0から20.3%、洗い出し率は同一検者内で変異係数0%、検者間で変異係数2.6から3.4%と低値であった。

3. 虚血性心疾患患者に極座標表示を応用し、冠動脈造影との視覚評価を行ったところ、負荷時マップで厳密な基準では50%、緩い基準では94%の検出率であった。これに洗い出しのマップを加えると、各々69%、96%になり検出率の増加がみられた。また算出された指標と有意冠動脈狭窄数との比較では、負荷時のextent score, 洗い出しのextentおよびseverity score, 心筋全体の洗い出し率で多枝病変群ほど広範囲で高度の異常と評価された。

4. 虚血性心疾患患者のACBG術前後に極座標表示を応用したところ、マップ全体でみると、症例全体の洗い出しのextent scoreは58.7から18.4%、severity scoreでは65.5から9.6、洗い出し率では28.9から39.3%と有意な改善($p < 0.001$)を認めた。局所的にも洗い出しのスコアは有意な改善及び有意ではないが値の改善($p < 0.001 \sim NS$)を呈し、術前後の局所心筋血流の評価に、洗い出しの指標は極めて有用であった。また局所的に評価すると、有意狭窄を有する冠動脈支配領域では、術後異常スコアの改善がみられた。一方、正常部でも術後に洗い出し率の有意な改善がみられた。

以上より本研究で開発したSPECTによる極座標表示は、局所心筋血流分布および心筋内のTl-201の動態を、3次元的に定量評価する方法として、極めて有用であると結論された。

謝 辞

稿を終えるに臨み、御指導と御校閲を賜りました恩師久田欣一教授に心から深謝致します。また本研究の遂行にあたり直接御指導、御援助を賜りました核医学科分枝久志講師に深く感謝します。さらに多大な御協力をいただきました第一内科循環器班、第一外科心臓班、核医学の諸先生に感謝致します。

文 献

- 1) Lebowitz, E., Greene, M. W., Fairchild, R., Bradley-Moore, P. R., Atkins, H. L., Ansari, A. N., Richards, P. & Belgrave, E.: Thallium-201 for medical use. 1. J. Nucl. Med., 16, 151-155 (1975).
- 2) Wackers, F. J. Th., Sokole, E. B., Samson, G., V. D. Schoot, J. B., Lie, K. I., Liem, K. L. & Wellens, H. J. J.: Value and limitations of

- Thallium-201 scintigraphy in the acute phase of myocardial infarction. *N. Engl. J. Med.*, **295**, 1-5 (1976).
- 3) **Strauss, H. W., Harrison, K., Langan, J. K., Lebowitz, E. & Pitt, B.**: Thallium-201 for myocardial imaging. Relation of Thallium-201 to regional myocardial perfusion. *Circulation*, **51**, 641-645 (1975).
- 4) 米倉義晴, 石井 靖, 門田和紀, 神原啓文, 藤田 透, 鳥塚莞爾, 河合忠一: ^{201}Tl 心筋シンチグラフィによる虚血性心疾患の診断—とくに運動負荷シンチグラフィの意義について—. *Radioisotopes*, **26**, 14-19 (1977).
- 5) **Bailey, L. K., Griffith, L. S. C., Rouleau, J., Strauss, W. & Pitt, B.**: Thallium-201 myocardial perfusion imaging at rest and during exercises. Comparative sensitivity to electrocardiography in coronary artery disease. *Circulation*, **55**, 79-87 (1977).
- 6) **Pohost, G. M., Zir, L. M. Moore, R. H., McKusick, K. A., Guiney, T. E. & Beller, G. A.**: Differentiation of transiently ischemic from infarcted myocardium by serial imaging after a single dose of Thallium-201. *Circulation*, **55**, 294-302 (1977).
- 7) **Hamilton, G. W., Trobaugh, G. B., Ritchie, J. L., Williams, D. L., Weaver, W. D. & Gould, K. L.**: Myocardial imaging with intravenously injected Thallium-201 in patients with suspected coronary artery disease. Analysis of technique and correlation with electrocardiographic, coronary anatomic and ventriculographic findings. *Am. J. Cardiol.*, **39**, 347-354 (1977).
- 8) **McLaughlin, P. R., Martin, R. P., Doherty, P., Daspit, S., Goris, M., Haskell, W., Lewis, S., Kriss, J. P. & Harisson, D. C.**: Reproducibility of Thallium-201 myocardial imaging. *Circulation*, **55**, 497-503 (1977).
- 9) **Ritchie, J. L., Trobaugh, G. B., Hamilton, G. W., Gould, K. L., Narahara, K. A., Murray, J. A. & William, D. L.**: Myocardial imaging with Thallium-201 at rest and during exercise. Comparison with coronary arteriography and resting and stress electrocardiography. *Circulation* **56**, 66-7 (1977).
- 10) **Berger, B. C., Watson, D. D., Taylor, G. J., Craddock G. B., Martin R. P., Teates, C. D. & Beller, G. A.**: Quantitative Thallium-201 exercise scintigraphy for detection of coronary artery disease. *J. Nucl. Med.*, **22**, 585-593 (1981).
- 11) **Maublant, J., Jourde, M., Veyre, A. & Meyniel, G.**: Transverse CAT of the myocardium with 201 Tl. *Eur J. Nucl. Med.*, **4**, 457-459 (1979).
- 12) **Borrello, J. A., Clinthorne, N. H., Rogers, W. L. Thrall, J. H. & Keyes, Jr. J. W.**: Oblique-angle tomography: A restructuring algorithm for transaxial tomographic data. *J. Nucl. Med.*, **22**, 471-473 (1981).
- 13) **Treves, S., Hill, T. C., VanPraagh, R. & Holman, B. L.**: Computed tomography of the heart using Thallium-201 in children. *Radiology*, **133**, 707-710 (1979).
- 14) **Holman, B. L., Hill, T. C., Wynne, J., Lovett, R. D., Zimmerman, R. E. & Smith, E. M.**: Single-photon transaxial emission computed tomography of the heart in normal subjects and in patients with infarction. *J. Nucl. Med.*, **20**, 736-740 (1979).
- 15) 多田 明, 前田敏男, 松田博史, 分校久志, 利波紀久, 久田欣一: ^{201}Tl 塩化タリウムによる心筋断層像. *核医学*, **17**, 1241-1247 (1980).
- 16) **Maublant, J., Cassagnes, J., Jourde, M., Veyre, A. & Meyniel, G.**: Myocardial emission tomography with Thallium-201. Value of multiple and orthogonal sections in the study of the myocardial infarction. *Eur. J. Nucl. Med.*, **6**, 289-294 (1981).
- 17) **Tamaki, N., Mukai, T., Ishii, Y., Yonekura, Y., Kambara, H., Kawai, C. & Torizuka, K.**: Clinical evaluation of Thallium-201 emission myocardial tomography using a rotating gamma camera: Comparison with seven-pinhole tomography. *J. Nucl. Med.*, **22**, 849-855 (1981).
- 18) **Maublant, J., Cassagnes, J., LeJeune, J. J., Mestas, D., Veyre, A., Jallut, H. & Meyniel, G.**: A comparison between conventional scintigraphy and emission tomography with Thallium-201 in the detection of myocardial infarction: Concise communication. *J. Nucl. Med.*, **23**, 204-208 (1982).
- 19) 分校久志, 多田 明, 中嶋憲一, 久田欣一: 心筋多方向像と断層像の対比評価. *臨放*, **27**, 497-505 (1982).
- 20) 二神康夫, 浜田正行, 市川毅彦, 小西得司, 中野 起, 竹沢英郎, 竹田 寛, 前田寿登, 中川 毅: 心筋シンチグラムの Emission CT 法. 虚血性心疾患における検討. *心臓*, **15**, 856-864 (1983).
- 21) **Meade, R. C., Bamrah, V. S., Horgan, J. D.,**

- Ruetz, P. P., Kronenwetter, C. & Yeh, E.-L.: Quantitative methods in the evaluation of Thallium-201 myocardial perfusion images. *J. Nucl. Med.*, **19**, 1175-1178 (1978).
- 22) Burow, R. D., Pond, M., Schafer, A. W. & Becker, : "Circumferential profiles" a new method for computer analysis of Thallium-201 myocardial perfusion images: *J. Nucl. Med.*, **20**, 771-777 (1979).
- 23) Garcia, E., Maddahi, J., Berman, D. & Waxman, A.: Space/time quantitation of Thallium-201 myocardial scintigraphy. *J. Nucl. Med.*, **22**, 309-317 (1981).
- 24) Pohost, G. M., Alpert, N. M., Ingwall, J. S. & Strauss, H. W.: Thallium redistribution: Mechanisms and clinical utility. *Sem. Nucl. Med.*, **10**, 70-93 (1980).
- 25) Maddahi, J., Garcia, E. V., Berman, D. S., Waxman, A., Swan, H. J. C. & Forrester, J.: Improved noninvasive assessment of coronary artery disease by quantitative analysis of regional stress myocardial distribution and washout of Thallium-201. *Circulation*, **64**, 924-935 (1981).
- 26) 多田 明, 分校久志, 中嶋憲一, 滝 淳一, 久田欣一, 山田正人, 松下重人, 村上哲夫, 池田孝之: 負荷心筋スキャンにおける局所 wash out ratio の完全自動測定の有用性. *核医学*, **20**, 1329-1337 (1983).
- 27) 西村恒彦, 植原敏男, 林田孝平, 小塚隆弘: Circumferential profile analysis法を用いた²⁰¹Tl心筋シンチグラムによる梗塞, 虚血部位の判定. 呼と循, **30**, 895(39)-901(45) (1982).
- 28) 宮永 一, 足立晴彦, 渡辺都美, 古川啓酸, 松久保晴生, 勝目 紘, 伊地知浜夫, 鳥居幸雄, 細羽 実: Tl-201心筋シンチグラムの定量的評価への試み—circumferential profile法による評価—. *核医学*, **17**, 1279-1284 (1980).
- 29) 分校久志, 南部一郎, 関 宏恭, 渡辺直人, 隅屋寿, 山田正人, 松平正道, 飯田稔治, 多田 明, 中嶋憲一, 滝 淳一, 利波紀久, 久田欣一: Tl-201心筋ファントムにおけるSPECT斜断層再構成の再現性と定量性の検討. *核医学*, **21**, 723-730 (1984).
- 30) 分校久志, 多田 明, 中嶋憲一, 久田欣一: ²⁰¹Tl心筋スキャンの視覚的判定に関する検討. 5方向像および経時的撮像における部位判定とスコア化について. *心臓*, **13**, 251-258 (1981).
- 31) 分校久志, 多田 明, 中嶋憲一, 松田博史, 大口学, 石田博子, 関 宏恭, 滝 淳一, 横山邦彦, 利波紀久, 久田欣一: ²⁰¹Tl心筋イメージングの判定における読影者間の変動. 7ピンホール断層像と多方向像について. *心臓*, **11**, 1439-1448 (1982).
- 32) 竹田 寛, 前田寿登, 中川 毅, 山口信夫, 田口光雄, 浜田正行, 二神康夫, 小西得司, 竹沢英郎: ガンマカメラ回転型 emission computed tomographyによる²⁰¹Tl負荷心筋断層像. —Segmental analysisによる冠状動脈狭窄性病変の検出率—. *核医学*, **20**, 53-62 (1983).
- 33) 伊藤綱朗, 竹田 寛, 前田寿登, 中川 毅, 山口信夫, 田口光雄, 牧野克俊, 二神康夫, 小西得司: ²⁰¹Tl心筋ECTによる冠状動脈狭窄性病変の定量的評価. —washout rateを併用したcircumferential profile法による評価—. *核医学*, **23**, 43-53 (1986).
- 34) Schwartz, J. S., Ponto, R., Carlyle, P., Forstrom, L. & Cohn, J. N.: Early redistribution of Thallium-201 after temporary ischemia. *Circulation*, **57**, 332-335 (1978).
- 35) Watson, D. D., Campbell, N. P., Read, E. K., Gibson, R. S., Teates, C. D. & Beller, G. A.: Spatial and temporal quantitation of plane Thallium myocardial images. *J. Nucl. Med.*, **22**, 577-584 (1981).
- 36) 中居賢司, 松下一夫, 吉永司郎, 川村明義, 加藤政孝, 桂川茂彦, 高橋恒男, 柳沢 融: 運動負荷に対するTl-201の空間的, 時間的動態よりみた虚血性心疾患の重症度の評価. *核医学*, **19**, 1189-1197 (1982).
- 37) Narita, M., Kurihara, T., Usami, M., Honda, M., Ogawa, T. & Kanao, K.: Quantitation of Thallium-201 myocardial washout by serial rest myocardial imaging. *核医学*, **18**, 899-906 (1981).
- 38) Knapp, W. H., Zimmermann, R., Tillmanns, H. & Joseph, D.: Processing of ²⁰¹Tl serial image for assessment of myocardial clearance and redistribution. *Eur. J. Nucl. Med.*, **7**, 248-253 (1982).
- 39) Links, J. M., Fintel, D. F., Becker, L. C. & Wagner, Jr. H. N.: Comparison of planar and SPECT Thallium imaging in men and women. *J. Nucl. Med.*, **26**, 49 (1985) (abstr).
- 40) Eisner, R. L., Gober, A., Cerqueira, M., Pettigrew, R., Malko, J. A., Plankey, M., Patterson, R., McClees, E., DePuey, E. G. & Berger, H. J.: Quantitative analysis of normal Thallium-201 tomographic studies. *J. Nucl. Med.*, **26**, 49 (1985) (abstr).
- 41) Van Train, K., Maddahi, J., Wong, C., Prigent, F., Friedman, J., Waxman, A. & Berman, D. S.: Definition of normal limits in

- stress Tl-201 myocardial rotational tomography. *J. Nucl. Med.*, 27, 899 (1986) (abstr).
- 42) Tamaki, N., Yonekura, Y., Mukai, T., Fujita, T., Nohara, R., Kadota, K., Kambara, H. Kawai, C., Torizuka, K. & Ishii, Y.: Segmental analysis of stress thallium myocardial emission tomography for localization of coronary artery disease. *Eur. J. Nucl. Med.*, 9, 99-105 (1984).
- 43) 大獄 達, 西川潤一, 町田喜久雄, 南 学, 岡田吉隆, 牧田幸三, 小坂 昇, 伊藤正光, 百瀬敏光, 飯尾正宏, 川原 貴, 戸田為久, 吉本信雄, 松尾博司, 杉本恒明: Single photon emission CT による負荷タリウム心筋スキャンにおける wash out rate の測定。一特に coronary spasm による虚血領域, 梗塞領域について。核医学, 22, 873-883 (1985).
- 44) Massie, B. M., Wisneski, J., Kramer, B., Hollenberg, M., Gertz, E. & Stern, D.: Comparison of myocardial Thallium-201 clearance after maximal and submaximal exercise.: Implications for diagnosis of coronary disease. *J. Nucl. Med.*, 23, 381-385 (1982).
- 45) 津田隆志, 小島研司, 閻間美智子, 古寺邦夫, 林千治, 渡辺賢一, 相沢義房, 荒井 裕, 柴田 昭, 浜 斎, 三谷 亨: 運動負荷シンチグラムより求めた washout rate (WR) による冠動脈病変の重症度判定。核医学, 22, 383-388 (1985).
- 46) 西村恒彦, 植原敏男, 林田孝平, 小塚隆弘, 住吉徹哉, 斉藤宗靖, 平盛勝彦: 運動負荷心筋スキャンによる虚血の検出およびその重症度評価。一肺野の²⁰¹TlCl 集積, washout rate の併用による。核医学, 22, 467-475 (1985).
- 47) 中嶋憲一, 分校久志, 谷口 充, 滝 淳一, 南部一郎, 四位例靖, 利波紀久, 久田欣一, 杉本尚樹, 池田孝之: Tl-201 心筋血流の機能マップによる冠動脈疾患の評価。核医学, 23, 473-479 (1986).
- 48) Ritchie, J. L., Narahara, K. A., Trobaugh, G. B., Williams, D. L. & Hamilton, G. W.: Thallium-201 myocardial imaging before and after coronary revascularization. Assessment of regional myocardial blood flow and graft. *Circulation*, 56, 830-836 (1977).
- 49) Verani, M. S., Marcus, M. L., Spoto, G., Rossi, N. P., Ehrhardt, J. C. & Razzak, M. A.: Thallium-201 myocardial perfusion scintigrams in the evaluation of aorto-coronary saphenous bypass surgery. *J. Nucl. Med.*, 19, 765-772 (1978).
- 50) Berger, B. C., Watson, D. D., Burwell, L. R., Crosby, I. K., Wellons, H. A., Teates, C. D. & Beller, G. A.: Redistribution of Thallium at rest with stable and unstable angina and effect of coronary artery bypass surgery. *Circulation*, 60, 1114-1125 (1979).
- 51) Pfisterer, M., Emmenegger, H., Schmitt, H. E., Muller-Brand, J., Hasse, J., Gradel, E., Laver, M. B., Bureckhardt, D. & Burkart, F.: Accuracy of serial myocardial perfusion scintigraphy with Thallium-201 for prediction of graft patency early and late after coronary bypass surgery. A controlled prospective study. *Circulation*, 66, 1017-1024 (1982).
- 52) 河合直樹, 松島英夫, 山本秀平, 岡田充弘, 志貴一仁, 外畑 巖, 小幡康範, 佐久間貞行, 都田裕之, 鈴木晃夫: 冠動脈病変の重症度評価における運動負荷 Thallium-201 心筋像の定量解析の臨床的意義。核医学, 21, 1621-1626 (1984).

Quantitative Evaluation of Three-Dimensional Myocardial Perfusion in Thallium-201 SPECT Imaging Ichiro Nanbu, Department of Nuclear Medicine, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920—J. Jusen Med. Soc., **96**, 409—425 (1987)

Key words: Thallium-201, single photon emission computed tomography, polar display, washout, coronary artery disease

Abstract

Three-dimensional polar display of Tl-201 myocardial uptake and washout was developed using single photon emission computed tomography (SPECT) in order to evaluate the distribution of the regional myocardial perfusion quantitatively. Symptom-limited multi-stage exercise was performed using a bicycle ergometer. Three mCi of Tl-201 was intravenously injected at peak exercise. SPECT data were obtained 10 minutes after termination of the exercise and three hours later. Short-axis slices from cardiac base to apex were reconstructed. Polar display was derived from circumferential profile analysis of approximately 10 short-axis slices. The concentric circle in the polar display showed the apex in the center and the base in the outermost circle. Tl-201 myocardial uptake and washout rates were calculated in polar display. Standard patterns of the polar display were calculated from 16 patients, 7 males and 9 females, without any cardiac diseases. Mean minus 2 standard deviations was used as a lower limit of the normal range. A significant difference of regional Tl-201 uptake and washout rate was shown between male and female. Intra- and inter-observer reproducibility of polar display and parameters was good. Visual and quantitative evaluation including extent score, severity score and washout rate of polar display were compared with coronary angiography in 52 patients with coronary artery disease. In visual evaluation of polar display, stress image combined with washout image showed a good sensitivity for coronary artery disease (96%). Stress image identified the region of coronary artery stenosis more correctly than washout image. Washout image generally overestimated the area of coronary artery stenosis. The extent and severity scores derived from polar display showed greater abnormality in multiple vessel disease. Patients with aorto-coronary bypass graft (ACBG) surgery were evaluated by polar display. After ACBG surgery, extent score of stress image, and both extent and severity scores of washout image showed significant improvement in all patients. The Tl-201 washout rate also increased after ACBG surgery. By regional analysis of scores and washout rate, improvement of myocardial ischemia were clearly demonstrated. The regional washout rate was improved both in bypassed and non-bypassed areas. In conclusion, the polar display using Tl-201 SPECT study was considered to be an effective method for quantitative evaluation of regional myocardial perfusion.