

《原 著》

²⁰¹Tl 心電図同期心筋 SPECT による左室機能評価の精度の検討

馬場 章* 羽野 卓三* 大森 久司* 井畑 匡世*
川辺 哲也* 久保 隆史* 木村 桂三* 西尾 一郎*

要旨〔目的〕心電図同期心筋 SPECT から心機能指標を算出する QGS ソフトウエアは ^{99m}Tc 血流製剤に主に応用されている。本研究では、²⁰¹Tl を用いて QGS により心機能の評価が可能であるか否か、また、その解析に適した前処理フィルターの条件について検討した。〔方法〕心臓ファントムと臨床例は同時期に左室造影を施行した虚血性心疾患 20 例を対象とした。左室容積は QGS により算出したが、前処理フィルターである Butterworth フィルターのカットオフ周波数を変化させて、計測値に及ぼす影響を検討した。〔結果〕ファントムでは Butterworth フィルターのカットオフ周波数が、0.39 cycles/cm 以上では算出される容積はほぼ一定となったが、実測値に比べ約 14% 過小評価した。臨床例では、左室拡張末期容積、収縮末期容積ともに約 10% 過小評価したが、カットオフ周波数が 0.43 cycles/cm の時に最も高い相関が得られた（拡張末期容積： $r = 0.80$ ，収縮末期容積： $r = 0.86$ ，駆出率： $r = 0.80$ ）。〔結論〕²⁰¹Tl でも QGS により容積は多少過小評価するものの、前処理フィルターの条件を適切に設定することにより、虚血の評価と同時に、心機能の定量評価が可能であると考えられた。

(核医学 39: 21-27, 2002)

I. はじめに

近年，quantitative gated SPECT (QGS) ソフトウエア¹⁾が普及し，主に ^{99m}Tc 血流製剤を用いて，臨床応用がなされている。しかし，現在でも，血流トレーサとしては ²⁰¹Tl が最も広く使用されているので，これにより，虚血や心筋 viability の評価と同時に心機能も評価することができれば，非常に有用と考えられる。^{99m}Tc 血流製剤については，QGS のための撮像条件，解析条件や他の検査方法との精度の比較などがなされている。²⁰¹Tl は ^{99m}Tc に比べ，エネルギーが低いので，^{99m}Tc

とは異なる条件での解析が必要と考えられる。そこで，²⁰¹Tl を用いて，QGS により心機能の評価が可能であるか否か，また，その解析に最も適した条件，特に前処理フィルターの至適条件を求めることを目的とした。

II. 対 象

ファントム実験のためには，京都科学の RH-2 型のファントムを用いた。

臨床例は，心電図同期 SPECT と左室造影の両方を 1 か月以内に実施した 20 例を対象とした。年齢は， 64 ± 3 歳で，男性 16 例，女性 4 例であった。疾患別では，陳旧性心筋梗塞 13 例（前壁中隔梗塞 5 例，下壁梗塞 8 例），狭心症 6 例，正常例 1 例であった。

* 和歌山県立医科大学循環器内科
受付：13 年 5 月 18 日
最終稿受付：13 年 9 月 26 日
別刷請求先：和歌山市紀三井寺 811-1 (☎ 641-8510)
和歌山県立医科大学循環器内科
馬 場 章
E-mail: babakira@wakayama-med.ac.jp

III. 方法

1. ファントム実験

ファントムの前壁には直径約 2 cm の円形の欠損部位を作成し、心筋への抽出率を 3% と考え、 ^{201}Tl をファントムの心筋部分に入れた。心内腔の容積は実測で 170 ml であった。撮像時には、心電図模擬波形の発生装置を用い、心電図同期信号として毎分 45 ~ 120 の信号を入力した。

2. 臨床例での検討

臨床例では、運動負荷または、dipyridamole 負荷を行い、 ^{201}Tl 111 MBq を静注し、約 5 分後より初期像の撮像を行い、3 時間後に後期像の撮像

を行った。いずれも心電図同期をかけて撮像したが、今回の研究では、この初期像について QGS 解析を行った。撮像装置は、低エネルギー高分解能コリメータを装着した 90 度対向二検出器型ガンマカメラ (General Electric 社製 Millennium VG) を用いた。6 度毎 30 方向、合計 180 度から撮像し、1 方向 50 秒間、1 心拍を 8 分割して収集した。画像の解析は、General Electric 社製 GenIE を用い、前処理フィルターとして、Butterworth filter を用い、カットオフ周波数を 0.31 ~ 0.47 cycles/cm の範囲で変化させた。Power factor は 20 に固定した。通常の断層像は、1 心拍を 8 分割して撮像したデータを加算し、前処理フィルターとして、Butterworth filter を用い、再構成フィルターには Ramp filter を用いた。初期像のためには、Butterworth filter のカットオフ周波数は 0.39 cycles/cm、power factor 10、後期像では、カットオフ周波数は 0.35 cycles/cm、power factor 20 で画像の再構成を行った。

3. 統計学的解析

左室造影と QGS による計測値の比較は単回帰分析を用い、相関係数の検定は $p < 0.05$ を有意とした。

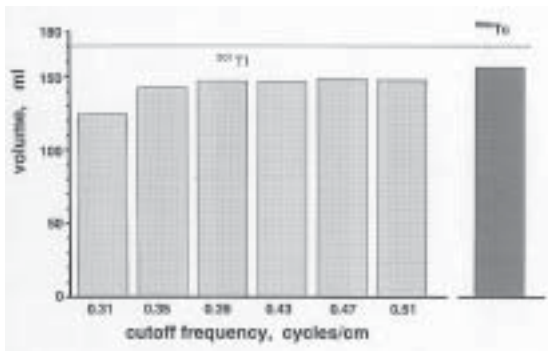


Fig. 1 Left ventricular volume of the cardiac phantom measured by QGS using various cutoff frequency of Butterworth filter.

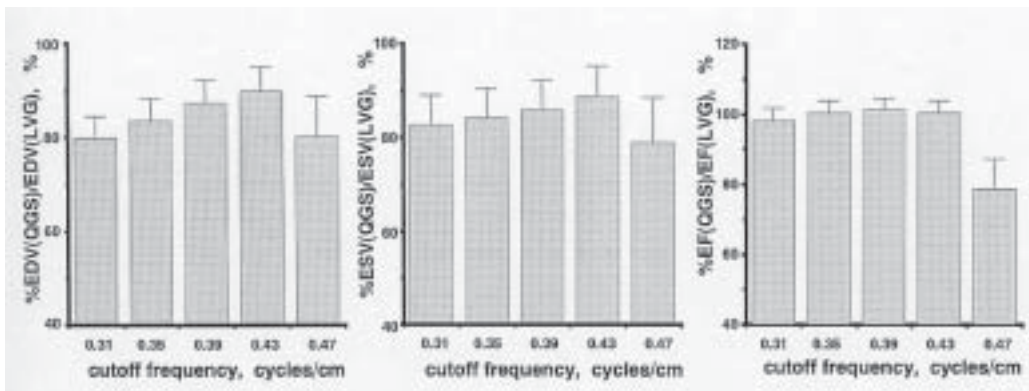


Fig. 2 End-diastolic volume (EDV), end-systolic volume (ESV) and ejection fraction (EF) measured by QGS using various cutoff frequency of Butterworth filter were divided by those obtained from left ventriculography (LVG). Values are expressed as means \pm SEM. $n = 20$

IV. 結 果

1. ファントムのカウント

心電図同期をかける方法とかけない方法でファントムを撮像し、画像再構成した短軸像の同一スライスを選び、RI の集積量を定量した。最大カウントは、それぞれ 311, 234, 平均カウントでは、156, 116 と心電図同期の方が心電図非同期に比べ、約 25% 低値であった。心電図同期信号を毎分 45 から 120 の範囲で変化させて、同様の計測を行ったところ、いずれの条件でも心電図非同期に比べ、カウントは約 25% 低値であった。

8 分割して収集したデータを加算して再構成した断層像は、ファントムおよび今回、対象とした

臨床例 20 例すべてについて、良好な画像が得られた。

2. ファントムの容積

ファントムの容積を QGS ソフトウェアにより定量したところ、前処理フィルターである Butterworth filter のカットオフ周波数を変化させると、周波数が高くなるにつれ、計測された容積も大きくなったが、0.39 cycles/cm 以上では、ほぼ一定となり、最大で 148 ml と実測値の 170 ml に比べ、約 14% 小さく算出された。^{99m}Tc で同様の検討を行うと 156 ml と算出された (Fig. 1)。

3. 臨床例での検討

臨床例について、左室造影から Simpson 法により求めた左室容積をゴールデスタンダードとして、QGS により算出された左室容積と比較した。拡張末期容積、収縮末期容積とも、フィルターの周波数が 0.31 cycles/cm のときには、左室造影から算出した容積の約 80% であった。周波数が高くなるにつれ、QGS により算出した容積は大きくなり、0.43 cycles/cm のところにピークがあり、このときの平均値はいずれも約 90% であった。駆出率については、フィルターの周波数が 0.31 から 0.43 cycles/cm の間ではほぼ一定であったが、0.47 cycles/cm では、大幅に小さくなった。カットオフ周波数が 0.43 cycles/cm のときの平均値は、100.5% と左室造影とよく一致していた (Fig. 2)。

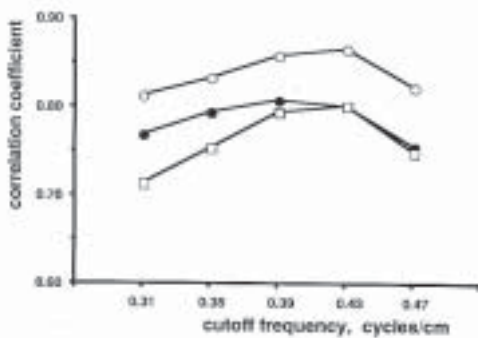


Fig. 3 Correlation coefficients between EDV, ESV and EF measured by LVG and those by QGS in various cutoff frequency of Butterworth filter. (ESV, EDV, EF)

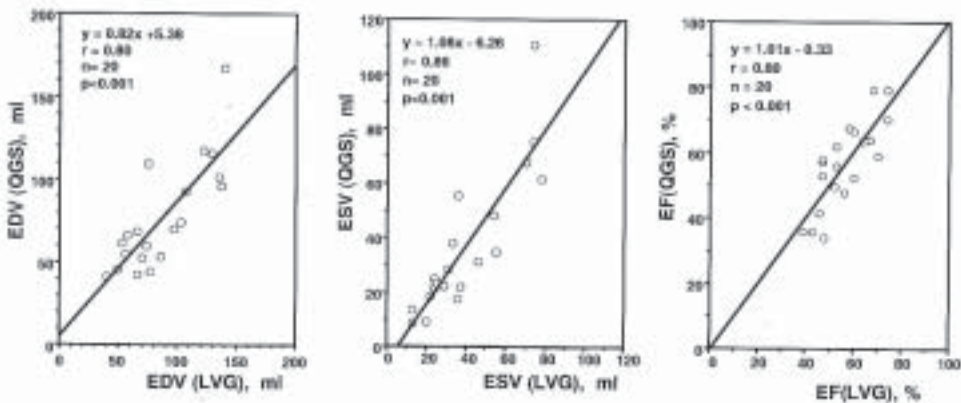


Fig. 4 Correlation between EDV, ESV and EF measured by QGS and LVG.

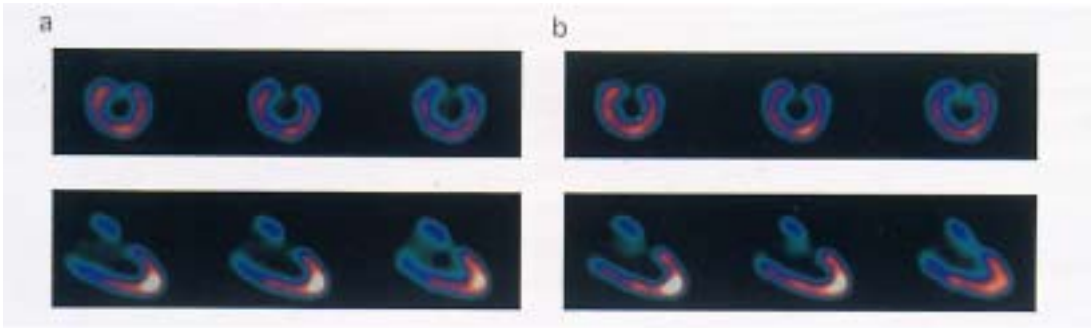


Fig. 5 Short axis and vertical long axis images of the phantom. The gated images showed the defect of anterior wall as clearly as the non-gated images.

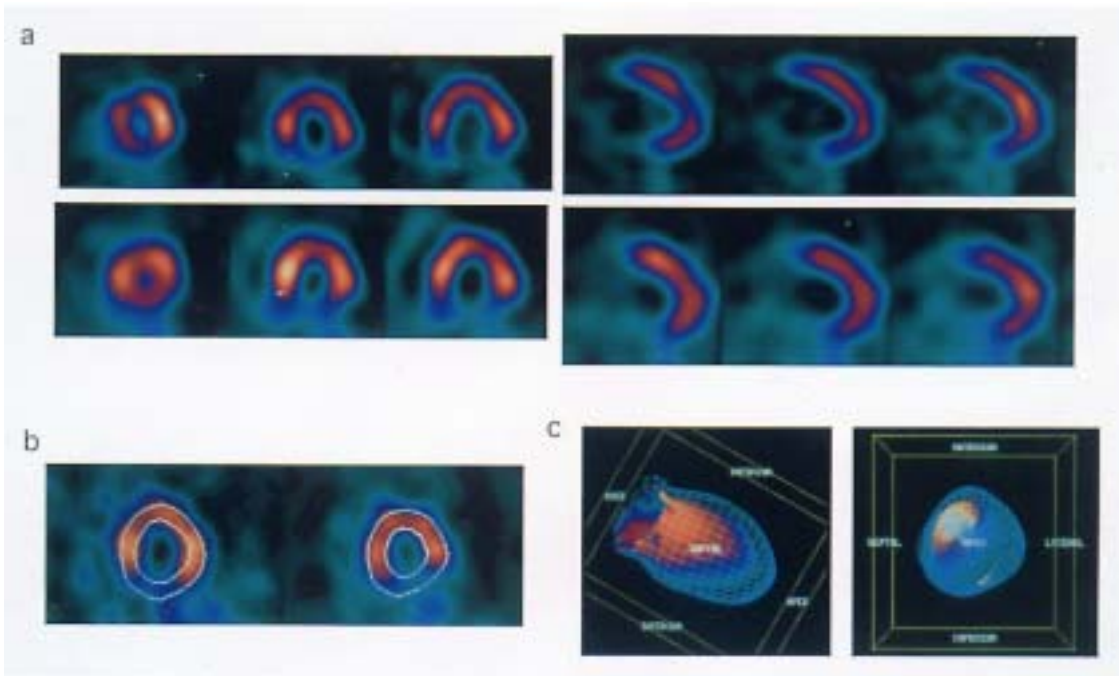


Fig. 6 A 35-year-old male with inferior myocardial infarction. a: Short axis and vertical long axis images were reconstructed from summed data. Stress images showed the defect of inferior wall (upper panel). No redistribution was observed in the delayed images (lower panel). b: Myocardial contours was overlaid onto the short axis images at end-diastole (left panel) and end-systole (right panel). c: Three-dimensional display of the endocardial (solid) and epicardial (grid) showed reduced contraction of the inferior wall. EDV, ESV and EF were calculated as 122 ml, 74 ml and 39% respectively.

左室造影から算出した容積、駆出率と、QGS により求めたものとの相関係数が前処理フィルターのカットオフ周波数によりどのように変化するかを Fig. 3 にまとめた。収縮末期容積において、最も高い相関が認められた。カットオフ周波数との関係では、いずれの計測値も 0.39 から 0.43 cycles/cm で相関係数が最も高くなった。

相関係数が最大となるカットオフ周波数が 0.43 cycles/cm のとき、拡張末期容積、収縮末期容積、駆出率の相関係数はそれぞれ $r = 0.80$, 0.86 , 0.80 と良好な相関が見られた (Fig. 4)。

V. 実例呈示

1. ファントム

ファントムの前壁に直径 2 cm の欠損を作成し、撮像したところ、前述の通り、心電図同期をかけることにより、カウントは約 25% 低下したが、8 分割して収集したデータを加算して再構成した断層像は良好で、心電図非同期の画像と同様に欠損部を良好に描出できた (Fig. 5)。

2. 症 例

35 歳、男性、下壁心筋梗塞の症例。発症時、緊急冠動脈造影で右冠動脈 #3 が完全閉塞しており、経皮的冠動脈形成術を施行。4 か月後の冠動脈造影再検査では再狭窄は見られず、同時期に実施した運動負荷 ^{201}Tl 心筋シンチを Fig. 6 に示す。8 分割して収集したデータを加算して再構成した断層像の画質は良好で、負荷直後像で下壁に ^{201}Tl の取り込みの欠損が見られたが、遅延像では再分布は認められなかった。QGS ソフトウェアによる左室輪郭の自動抽出も良好にできており、QGS により求めた左室拡張末期容積は 117 ml、収縮末期容積 75 ml、駆出率 36% で、左室造影から計測したそれぞれの値 122 ml、74 ml、39% とよく一致していた。

VI. 考 察

QGS ソフトウェア¹⁾ は主に $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 血流製剤に広く応用され、プールシンチや左室造影など他の検査方法の心機能指標との比較で、良好な相関が見

られたとの報告²⁻⁵⁾ がなされている。現在でも虚血性心疾患の虚血や viability の評価には、 ^{201}Tl が最も多く使用されており、一部の施設では ^{201}Tl で QGS が行われている⁴⁻⁷⁾。しかし、 ^{201}Tl は低エネルギーであるため、心電図同期をかけて撮像した場合に良好な画質を得ることが容易ではなく、QGS の解析に当たって、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ とは異なる条件で行う必要があると考えられる。前処理フィルターのカットオフ周波数はカウントプロフィールカーブに影響を与える因子であるので、その設定は容積の算出に重要と考えられる^{4,9)}。

心電図同期をかけて撮像した場合、断層像は、1 心拍を 8 分割して収集したデータを加算して、画像を再構成するため、理論的には、同一収集時間では、同一カウントとなるはずであるが、コンピュータでのデータ転送などのために、ある程度のデータの欠損が生じると予想される。ファントム実験から、本装置では心拍数に関わらず、約 25% のデータが欠損することが示された。しかし、今回用いた収集条件では、臨床例 20 例すべてで、再構成した断層像として良好な画像が得られ、心電図同期をかけることにより読影上問題となるような画質の劣化は認められなかった。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤による研究では、左室造影やプールシンチから求めた心機能指標とよく相関するが、QGS では容積を過小評価することが報告³⁾ されている。そこで、まず、ファントムを用いて、容積定量の精度を検討した。前処理フィルターのカットオフ周波数を高くすると容積の計算値は大きくなったが、0.39 cycles/cm 以上ではほぼ一定の 148 ml となり、実測値の 170 ml に比べ約 14% 過小評価した。また、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ では、過小評価の程度は約 9% であり、 ^{201}Tl の方がより小さく算出された。QGS では、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ を用いたファントム実験からカウントプロフィールのガウス関数近似を行い、最大カウントの 1SD すなわち標準偏差 (65%) の位置を心内膜面として認識する¹⁾ ため、 ^{201}Tl については、その 65% という設定に問題があるかもしれない。また、大きな欠損を作成したファントムでは、その欠損部位により計測値に影響する

と報告されている⁹⁾。本研究では、心電図同期による画質の劣化の有無を検討する目的で、ファントムの前壁に直径 2 cm の小さな欠損を作成して実験を行ったが、欠損の大きさや部位による容積計測への影響については検討していない。²⁰¹Tl でも、欠損の部位や大きさが QGS による容積定量に与える影響についての検討が今後必要と考えられる。

次に、臨床例で、QGS により求めた拡張末期容積、収縮末期容積はともに前処理フィルターのカットオフ周波数が 0.31 ~ 0.43 cycles/cm の範囲では、周波数が高い方で容積が大きくなり、0.43 cycles/cm のときに最大値となった。この条件では、左室造影により求めた容積を 100% とすると QGS から算出された容積は約 90% であった。左室造影では心基部の膜様部も含めて計算されるため、QGS のように左室の心筋の輪郭から容積を計算する方法に比べ、理論的にも若干大きいと考えられる。また、拡張末期容積、収縮末期容積ともにほぼ同程度に過小評価されるため、駆出率は前処理フィルターのカットオフ周波数が 0.31 から 0.43 cycles/cm の範囲では、左室造影とよく一致していた。

左室造影から得られた計測値と QGS から算出されたものとの相関は、^{99m}Tc 製剤での他の報告³⁻⁵⁾と同様、収縮末期容積で最も高い相関を示した。前処理フィルターのカットオフ周波数との関係では、0.39 から 0.43 cycles/cm でいずれの計測値も相関係数が最も高くなった。駆出率についても、カットオフ周波数 0.43 cycles/cm のときに、相関係数 $r = 0.80$ と良好な相関を示し、1 次回帰式は $y = 1.01x - 0.33$ と理想である $y = x$ に非常に近いものが得られた。したがって、²⁰¹Tl による QGS では、前処理フィルターのカットオフ周波数は 0.43 cycles/cm が最適と考えられた。

Fig. 4 において ESV, EDV で 2 点 QGS から求めた容積が、LVG から求めた容積に比べ過大評価している症例が見られたが、この 2 例はいずれも欠損が心尖部を回り込むような比較的大きな前壁中隔梗塞の例であった。欠損の大きい症例で

は、心内膜面の認識が不正確となり、容積に誤差が生じやすいと考えられるので、このような症例についてはデータの解釈に注意が必要と考えられた。また、他の検査に比べ RI 検査では、空間分解能に問題があり、本研究の対象には含まれていないが、肥大型心筋症のように左室内腔の小さい症例では、容積計測の誤差が大きいと考えられている。

以上から、²⁰¹Tl でも QGS により容積は多少過小評価するものの、前処理フィルターの条件を適切に設定することにより、虚血の評価と同時に、心機能の定量評価が可能であると考えられた。

VII. まとめ

²⁰¹Tl による QGS では前処理フィルターのカットオフ周波数は 0.43 cycles/cm が最も適切な解析条件であった。本条件では、gated SPECT を用いて、虚血の評価と同時に心機能定量が可能と考えられた。

謝辞：稿を終えるにあたり、ファントム実験、臨床例の画像処理にご協力いただいた、和歌山県立医科大学附属病院中央放射線部の山元和巳氏、熊山義孝氏、川本春彦氏、同大学ラジオアイソトープ実験施設の鳥住和民氏に深謝いたします。

文 献

- 1) Germano G, Kiat H, Kavanagh PB, Moriel M, Mazzanti M, Su H, et al: Automatic quantification of ejection fraction from gated myocardial perfusion SPECT. *J Nucl Med* 1995; 36: 2138-2147.
- 2) 汲田伸一郎, 趙 圭一, 水村 直, 木島鉄仁, 石原真木子, 鳥羽正浩, 他: ^{99m}Tc-Tetrofosmin 心拍同期心筋 SPECT データを用いた左室収縮能評価 左室辺縁自動抽出法による容量算出に基づく機能解析. *核医学* 1997; 34: 237-242.
- 3) 伴 和信, 中島 徹, 青木直人, 安部純久, 半田俊之介, 鈴木 豊: 心電図同期 ^{99m}Tc-tetrofosmin SPECT の定量的解析法より得られる左室全体および局所機能: 左室造影および心臓超音波検査との比較. *核医学* 1998; 35: 881-885.
- 4) 樋口隆弘, 滝 淳一, 中嶋憲一, 堀井純清, 山田正人, 利波紀久: 心電図同期心筋 SPECT 解析プログラムによる心機能指標のファントムおよび臨床例における検討. *核医学* 1999; 36: 357-369.

- 5) Tadamura E, Kudoh T, Motooka M, Inubushi M, Shirakawa S, Hattori N, et al: Assessment of regional and global left ventricular function by reinjection Tl-201 and rest Tc-99m sestamibi ECG-gated SPECT. *JACC* 1999; 33: 991-997.
- 6) Germano G, Erel J, Kiat H, Kavanagh PB, Berman DS: Quantitative LVEF and qualitative regional function from gated thallium-201 perfusion SPECT. *J Nucl Med* 1997; 38: 749-754.
- 7) 鳥羽正浩, 石田良雄, 福地一樹, 福島和人, 片淵哲朗, 林田孝平, 他: ²⁰¹Tl 心筋 SPECT における左室輪郭自動抽出プログラムによる心機能計測の信頼性の検討. *核医学* 1999; 36: 23-30.
- 8) Lee DS, Ahn JY, Kim SK, Oh BH, Seo JD, Chung JK, et al: Limited performance of quantitative assessment of myocardial function by thallium-201 gated myocardial single-photon emission tomography. *Eur J Nucl Med* 2000; 27: 185-191.
- 9) 木下佳美, 南部一郎, 遠山淳子, 大場 覚: 心電図同期 ^{99m}Tc 心筋血流 SPECT における左室容積値, 駆出率自動算出の検討. ファントムを用いた基礎的評価. *核医学* 1998; 35: 77-83.

Summary

Assessment of Left Ventricular Function by Thallium-201 Quantitative Gated Cardiac SPECT

Akira BABA, Takuzo HANO, Hisashi OHMORI, Masayo IBATA, Tetsuya KAWABE,
Takashi KUBO, Keizo KIMURA and Ichiro NISHIO

Department of Cardiovascular Medicine, Wakayama Medical University

[Purpose] Present study was designed to evaluate the accuracy of the measurement of left ventricular volume by quantitative gated SPECT (QGS) software using ²⁰¹Tl and the effect of cutoff frequency of Butterworth preconstruction filter on the calculation of volume. **[Methods]** The RH-2 type cardiac phantom and 20 patients with ischemic heart disease were studied. Left ventricular end-diastolic volume (EDV), end-systolic volume (ESV) and ejection fraction (EF) were calculated by the QGS software using the various frequency of Butterworth filter. These parameters were evaluated by Simpson's method using left ventriculography (LVG). **[Results]** The volume of the phantom calculated by QGS was under-estimated by

14%. In the clinical study, EDV and ESV measured by QGS were smaller than those obtained from LVG by 10%. When the cutoff frequency of Butterworth filter was 0.43 cycles/cm, the values measured by QGS were best correlated with those by LVG (EDV: $r = 0.80$, $p < 0.001$; ESV: $r = 0.86$, $p < 0.001$; EF: $r = 0.80$, $p < 0.001$). **[Conclusion]** These data suggest that ²⁰¹Tl quantitative gated cardiac SPECT can estimate myocardial ischemia and left ventricular function simultaneously.

Key words: Gated SPECT, Quantitative gated SPECT (QGS), Thallium-201, Butterworth filter, Left ventricular function.