

《原 著》

RI 心プールイメージにおける左室輪郭完全自動抽出法による左室駆出率計測法の開発と計測精度に関する検討

金 奉賀* 木村 和文** 石田 良雄* 常岡 豊*
 松原 昇* 武田 裕* 井上 通敏* 中村 幸夫**
 久住 佳三** 小塚 隆弘** 鎌田 武信* 北川 崇二***
 丸山 隆利***

要旨 心電図同期 RI 心プール像から拡張末期および収縮末期左室輪郭を完全自動抽出し、左室駆出率 (LVEF) を計測するシステム (FAME) を開発した。本システムでは、ストロークボリューム像 (拡張末期像-収縮末期像) およびパドクス像 (収縮末期像-拡張末期像) のカウントプロフィールから左室概略範囲を決定し、そのカウント重心からのラジアルプロフィール解析により、左室エッジを決定した。本システムの特徴は、左室エッジの検出に際して、そのプロフィールパターンに応じて、微分法、カットオフ%法およびプロフィールカーブの谷をエッジとする方法を併用することにより、左室エッジの認識精度を向上させたことにある。

本システムによる左室輪郭の認識精度および LVEF の計測精度を当施設で心プール検査を施行した連続 70 例で検討した。FAME 法の左室輪郭の認識成功率は 94% (70 例中 66 例) であり、本法により計測した LVEF は、従来から当施設で採用している半自動 LVEF 計測システムにより算出した LVEF との間に $Y = 1.06X - 0.63$, $r = 0.95$ ($p < 0.001$) の良好な正相関を認めた。

以上より、FAME 法は左室輪郭の認識精度が高く、LVEF の計測精度も優れていることから十分に臨床応用が可能と考えられた。

I. はじめに

RI 心プールイメージング法 (以下、心プール法) は、心機能指標として臨床的に広く用いられている左室駆出率 (LVEF) を、非侵襲的かつ反復して計測でき、また、その計測精度も高いことから、各種心疾患の病態把握、予後の予測などに欠かせない検査法となっている¹⁾。しかし、従来の心プール法による LVEF 計測システムでは、関心領域

(Region of Interest: ROI) の設定に手動操作を要するため計測値の再現性 (個人内、および、個人間変動) に問題がある。

左室輪郭自動抽出による LVEF 計測法²⁻⁷⁾ は、計測値の再現性の問題を解決するとともに、多数例のデータを連続的に処理し得ることから、その臨床的有用性はきわめて高いと考えられる。

著者らは左室概略範囲内のカウント重心から 10 度ごとのラジアルプロフィールを作成し、そのプロフィールパターン解析による左室輪郭を完全自動抽出し、左室駆出率をはじめとする左心機能指標を計測するシステム (Full Automatic Multi-gated Evaluation: FAME) を開発した。

本報告では、FAME 法の概要を示すとともに、本システムの左室輪郭認識精度の半定量的評価、さらに、計測された LVEF の値を左室造影およ

* 大阪大学医学部第一内科

** 同 中央放射線部

*** 日立メディコ

受付: 61 年 6 月 23 日

最終稿受付: 61 年 9 月 12 日

別刷請求先: 大阪市福島区福島 1-1-50 (☎ 553)

大阪大学医学部第一内科心研センター

金 奉 賀

び従来の LVEF 計測システム (MUGA 法) により計測された LVEF 値と比較検討した成績についても述べる。

II. 左室輪郭完全自動抽出法による左室駆出率計測システム (FAME)

1. 心プールイメージング

Tc-99m-赤血球 (in-vivo 標識) をトレーサーとする平衡時心拍同期マルチゲート心プールイメージングを施行した。Tc-99m 標識用ピロリン酸 10 mg 静注 20 分後に、Tc-99mO₄⁻ 25~30 mCi を急速静注し、平衡時に高感度コリメータを装着したシンチカメラ (日立メディコ製ガンマビュー-H) を、左心室が最も明瞭に分離できるように、左前斜位 30~50 度、頭側 5~10 度方向から照準してイメージングを行った。データ収集はフレームモード (64×64 マトリックス) にて行い、安静時には、40 msec/フレーム、400 心拍、運動時には 20 または 30 msec/フレーム、300 心拍データを日立メディコ製核医学データ収集処理装置 (HARP) に入力した。

2. 画像データ処理

a. Digital Band-Pass Filter によるノイズの除去

画像のノイズ成分を除去するために、処理対象となる拡張末期像および収縮末期像に対して 6 次の digital band-pass filter (Fig. 1) による処理を行った。64×64 マトリックス画像のフィルター処理時間は約 7 秒であった。

b. 心室概略範囲の設定

拡張末期像 (R 波から最初のフレーム) から仮に設定した収縮末期像 (1/2 R-R 間隔に相当するフレーム) を減算したストロークボリューム像を作成し、その縦方向および横方向の加算プロフィールを求め、Fig. 2 に示したように、ピークカウン트의 5% および 15% の位置を心室概略範囲のエッジとした。心臓の近傍で高カウントを示す肝臓および下行大動脈を心室概略範囲内に含まないように、心臓の下方および左方のカットオフ値は、対側よりも高値に設定した。

c. 心室を中心とした画像拡大

左室重心からのラジアルプロフィール解析を行

う際に、プロフィールカーブのポイント数を増加させる目的で、心室概略範囲を中心に原画像を 1.5 倍ないし 2.0 倍に補間拡大した。

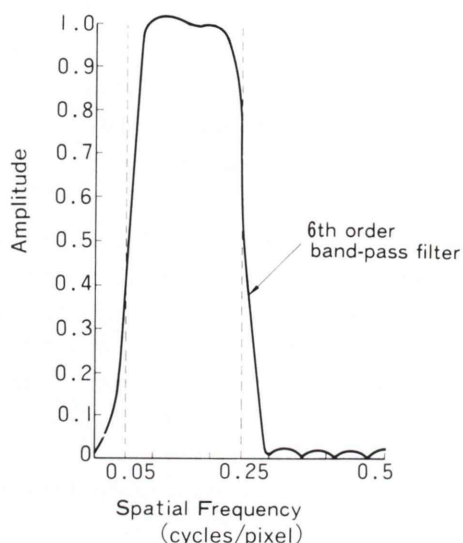


Fig. 1 Frequency response of the 6th order band-pass filter.

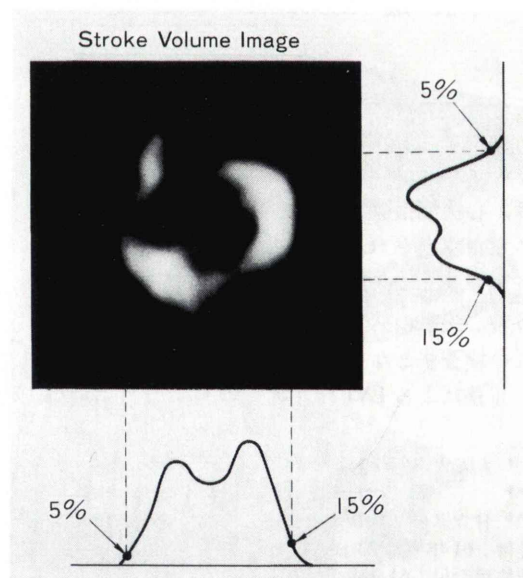


Fig. 2 Determination of approximate ventricular ROI from stroke volume image (ED image minus ES image).

d. 心室中隔ラインの決定

補間拡大した拡張末期像で、心室概略範囲内の縦方向加算プロフィールの谷を心室中隔ラインとした。以上の方法により決定された左室概略範囲内の時間放射能曲線から、真の収縮末期フレームを決定した。

e. 左房、左室の分離

収縮末期像から拡張末期像を減算したパラドクス像を作成し、その横方向加算プロフィールと左室概略範囲内のストロークボリューム像の横方向加算プロフィールとの交点を左房と左室の分離点とした。

f. 左室概略範囲下限の補正

ストロークボリューム像のプロフィール解析により左室概略範囲を決定する本法では、心尖部領域に *dyskinesis* がある例では、その部位にストロークボリューム像が得られないために、左室概略範囲を過少評価することになる。そこで、*dyskinesis* がある場合にはパラドクス像(収縮末期像から拡張末期像を減算した像)で同部に高カウント像が出現することに着目し、左室概略範囲下限より下方の一定範囲内にパラドクス像が存在する場合には、その部位に左室概略範囲下限を再設定した。すなわち、左室概略範囲下限より下方で、かつ、拡張末期像の左室領域横方向加算プロフィールのピークカウントの40%の点より上方に、パラドクス像で高カウント領域(パラドクス像の横方向加算プロフィールのピークカウントの20%以上)を認めた場合には、その部位を左室概略範囲下限とした。

g. 左室輪郭の自動抽出

左室概略範囲内のカウント重心の決定に際して、左室概略範囲内に左室以外の領域のカウントが含まれる場合には、このカウント重心が左室中心を反映しなくなる。そこで、拡張末期像では、左室概略範囲内の画像から最大カウントの40%を減算した画像からカウント重心を求めた。また、収縮末期像では、拡張末期 ROI で切り出した範囲内でカウント重心を求めた。

以上の方法により求めた左室概略範囲内のカウ

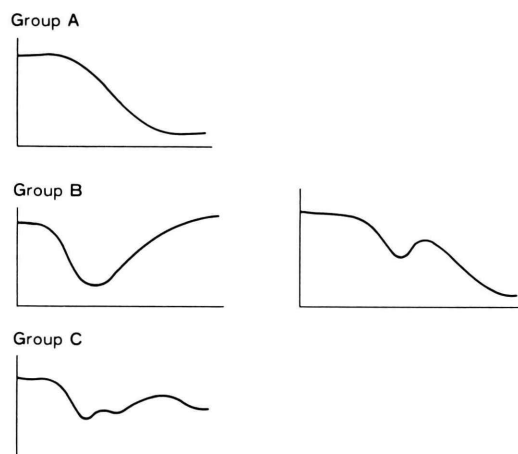


Fig. 3 Representative profile curves in 3 groups.

ント重心から、心基部を0度、心尖部を180度として時計まわりに10度ごとのラジアルプロフィールを作成し、そのプロフィールパターンの解析により左室輪郭を自動抽出した。

まず、プロフィールパターンを、3つのグループに分類した(Fig. 3)。グループAはおもに単純な下降スロープを呈するプロフィールからなり、自由壁側によく認められ、微分法、カットオフ%法ともに良好なエッジが検出可能であった。グループBはV字型あるいは大きなノッチを伴う下降スロープからなり、その谷の部分がエッジと推定でき、おもに中隔側に認められた。グループCは心基部側の左室の分離が不良な画像でよくみられ、カットオフ%法でも微分法でも不正なエッジを認識することが多く、プロフィールパターンからもエッジの推定が困難であった。

グループAに属するプロフィールの場合、微分法とカットオフ%法により求めた2つの輪郭点が一一致した場合、その点を確定エッジとし、一致しない場合には、不確定エッジとした。後者の場合には、自由壁側はカットオフ%法を、中隔、心基部側は微分法を優先させて輪郭を決定した。グループBに属するプロフィールの場合には谷の部分を確定エッジとした。グループCの場合には1つ前のプロフィールのエッジから重心までの距離と等しい位置に不確定エッジを設定した。

なお、微分法によるエッジは、後に述べる MUGA 法により決定されるエッジと一致率が最も高い、プロフィールカーブの変曲点を 7:3 に内分する点として検出した。また、カットオフ%値は 30~70 度の範囲で 6 度ごとのラジアルプロフィールを作成し、各プロフィールの 2 次微分により求めた変曲点間を 7:3 に内分する点をエッジとし、その平均カウントと左室概略範囲内最大カウントの比から求めた。

最後に輪郭の形状を平滑にするため、不確定エッジを対象とした極座標スムージング (重み 1:1:1 の 3 点スムージング) を行い、最終的に求められたエッジを直線で結び左室 ROI とした。

バックグラウンドとして左室収縮末期 ROI の下後壁部の 2 ピクセル外側に馬蹄形 ROI を自動設定した。

h. 左室駆出率の算出

自動抽出した拡張末期 ROI, 収縮末期 ROI, バックグラウンド ROI を用いて LVEF を算出した。すなわち、バックグラウンド内の一画素当たりの平均カウントを求め、これに拡張末期および収縮末期 ROI 内の画素数を乗じた値をバックグラウンドとしておのおの ROI 内カウントから減じて、拡張末期カウント (EDC), 収縮末期カウント (ESC) を求め、次式を用いて LVEF を算出した。

$$\text{LVEF} = (\text{EDC} - \text{ESC}) / \text{EDC}$$

III. 臨床評価

1. 対象および方法

FAME 法の左室輪郭の認識精度および計測された LVEF の計測精度の検討を行った。対象は大阪大学附属病院にて心プール検査を施行した連続 70 例で、健常者 10 例、冠動脈疾患 52 例、心筋症 5 例、弁膜症 3 例であり、男 66 例、女 4 例、平均年齢は 54 ± 11 歳であった。70 例中 64 例では安静時に加えて運動負荷時にも心プール検査を施行した。また、30 例では心プール検査施行 3 日以内に X 線左室造影を行い、Chapman 法⁸⁾を用いて LVEF を求めた。

a. 左室輪郭抽出精度の検討

本法により決定された左室輪郭が原画像を忠実に反映しているか否かを、医師および放射線技師が視覚的に 5 段階評価を行った。すなわち、拡張末期および収縮末期の左室輪郭とそれぞれの原画像を CRT 上に重ねて表示し、拡張末期および収縮末期ともにほぼ忠実に輪郭抽出が行われた場合には 5 ないし 4 どちらか一方の画像に対する輪郭抽出が不適切な場合には 3 ないし 2, 両方の輪郭がともに不良の場合には 1 と判定した。2 名の判定結果が一致しない場合には合議により決定した。

b. LVEF 計測精度の検討

FAME 法により計測された LVEF を、左室造影より Chapman 法⁸⁾を用いて求めた LVEF および著者らの施設で従来から用いている MUGA 法^{1,9)}より求めた LVEF と比較検討した。MUGA 法では、拡張末期および収縮末期像に対してライトペンで概略の左室 ROI を設定し、その ROI 内でカットオフ%法 (70%) により真の左室 ROI を決定し、収縮末期像の下外方に自動設定したバックグラウンドのカウント補正により LVEF を求めた。

2. 結 果

a. 左室輪郭抽出精度の検討

FAME 法による左室輪郭抽出精度の判定結果を Table 1 に示す。スコア 5 ないし 4 を認識成功とすると、安静画像に対する認識成功率は 94.3% (70 例中 66 例), 運動時の画像に対する認識成功率は 71.9% (64 例中 46 例) であった。Fig. 4 にスコア 5 と判定した例, Fig. 5 にスコア 3 と判定した例を示す。Fig. 5 の例では拡張末期像に対してはほぼ忠実に輪郭抽出が行われているが、収縮末期像では中隔下部の認識が不良であり、3 と判定された。

Table 1 Semiquantitative estimation of left ventricular ROI determined by "FAME"

	Score 1	Score 2	Score 3	Score 4	Score 5
Rest Image	0	2	2	23	43
Exercise Image	2	5	11	26	20



Fig. 4 End-diastolic and end-systolic ROIs superimposed on the respective original images. These ROIs were scored "5".

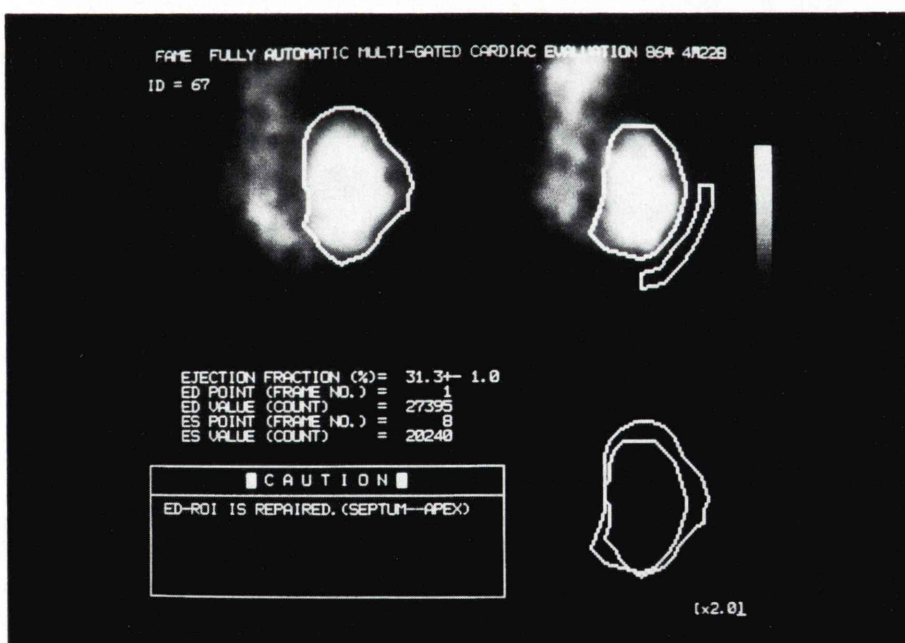


Fig. 5 End-diastolic and end-systolic ROIs superimposed on the respective original images. These ROIs were scored "3".

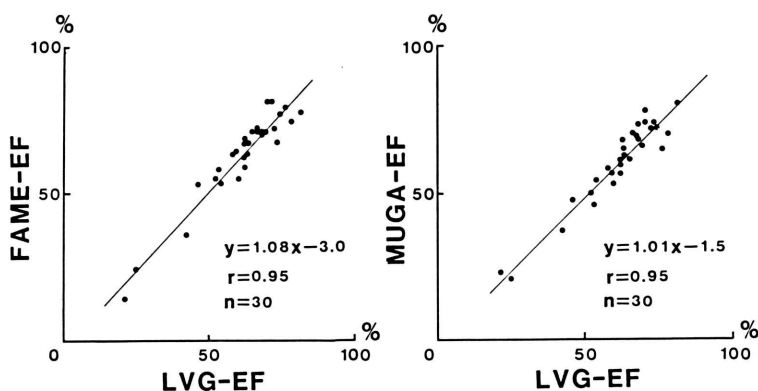


Fig. 6 Correlations between FAME-EF and LVG-EF, and MUGA-EF and LVG-EF.

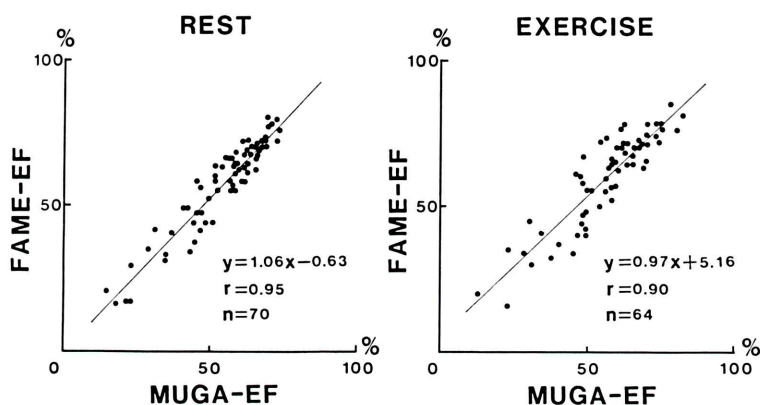


Fig. 7 Correlations between FAME-EF and MUGA-EF at rest and during exercise.

b. LVEF 計測精度の検討

左室造影と心プール検査を3日以内に施行した30例において、FAME法およびMUGA法により計測されたLVEFと左室造影法から計測されたLVEFとの間に、ともに、 $r=0.95$ の良好な正相関を認めた (Fig. 6).

安静時心プール検査を施行した70例のFAME法およびMUGA法より計測されたLVEFの間には、 $r=0.95$ の良好な正相関を認めたが、運動時の心プール像から両法を用いて計測したLVEF間の相関係数は $r=0.90$ と安静画像に比べてややバラツキを認めた (Fig. 7).

IV. 考 案

心電図同期心プール像から拡張末期ROI、収縮

末期ROIおよびバックグラウンドROIを完全自動抽出し、これらを用いてLVEFを計測するシステム (FAME) を開発した。本法は完全自動法であることから、検者間および検者内の計測値のバラツキがなく、従来の手動操作を要するLVEF計測システムにおける計測値の再現性の問題を完全に克服した。

左室輪郭の抽出法として、左室中心からのラジアルプロフィールを微分法やカットオフ%法で処理する方法がよく用いられている。しかし、一般に微分法はノイズに弱く、特に1次元のラジアルプロフィールを微分して求めた左室輪郭は、滑らかなラインとして得られないことが多い。また、カットオフ%法は認識の安定性に優れているが、心室中隔の分離が不良な場合には適用できない難

点がある。そこで、著者らはプロフィールパターンの特徴抽出を行い、微分法やカットオフ%法の適用が可能なプロフィールパターンを選択し、両法の適用が困難なプロフィールに対しては、プロフィールパターンからの輪郭抽出法を選択した。プロフィールパターンによる輪郭抽出法の併用により特に心尖部付近の左室と右室の分離が改善された。すなわち、右室心尖部が左室心尖部の下方に周りこんだように撮像された例では、プロフィールにノッチができるために、微分法、カットオフ%法のいずれを用いても両心室の分離は不良であるが、プロフィールパターンの特徴から左右心室の分離点を認識することにより、安定した分離が可能になった。

ラジアルプロフィール解析による輪郭抽出では、起点となる左室中心の位置を安定して求め得ることが必要である。本法では左室中心として、左室概略範囲内のカウント重心を用いているため、この概略範囲内に他臓器が含まれる場合や、収縮の良好な例で、高カウントの周辺臓器が左室概略範囲内に入る場合には、重心の位置がずれることがある。そこで、重心計算を実施する前に、左室概略範囲内の画像から、その最大カウントの一定割合を減算することにより、重心位置が左室の周辺臓器から受ける影響を少なくしている。また、収縮末期像の処理においては、拡張末期 ROI で切り出した範囲内で重心計算を行うことにより、周辺臓器からの影響をさらに緩和している。

本法ではストロークボリューム像から左室概略範囲を求めているため、Dyskinesis がある場合には正しく概略範囲を設定できないことがある。これに対して、パラドクス像を参考にして概略範囲を修正しているが、左室に近接した臓器の呼吸性移動により、Dyskinesis 以外の成分がパラドクス像に混入する可能性がある。しかし、通常は、この成分は、Dyskinesis に比べて下方に出現するので、パラドクス像の検出範囲に一定の制限を設けることにより、Dyskinesis によるパラドクス成分と鑑別が可能である。

本研究では、FAME 法の LVEF 計測精度のみ

ならず左室輪郭の認識精度についても視覚的、半定量的に評価した。安静画像に対する本法の左室輪郭認識成功率は94%ときわめて高く、算出された LVEF も左室造影法、MUGA 法より求めた LVEF と良好な正相関(ともに、 $r=0.95$)を認めた。これらの成績は他施設の報告^{4,6)} とほぼ同等であり、本法が十分に臨床の場で使用しうることを示している。一方、認識不成功例は、いずれも左室と左房や右室との分離が十分な例であり、データ収集時にシンチカメラの照準方向を的確に設定することにより防ぎうるものと考えられた。運動時の画像に対する、本法の左室輪郭認識成功率は72%と安静画像に比べてやや低値であった。その結果、MUGA 法により求めた LVEF との相関係数もやや低値となった。これは、運動時には検査の性格上データ収集時間が制約されること、また、体動のために両心室の分離が悪くなる、などの画像自体の劣化によるものであった。

本法で用いたラジアルプロフィール解析は1次元情報の処理であり、扱うべき情報量が少なくすむことから、自動認識の処理時間を短縮する上で有利な手法である。本法による左室輪郭の認識処理時間は約2分、心機能パラメータの算出も含めて約3分であり従来の MUGA 法(4分)よりも処理時間が短縮された。また、本法は完全自動処理法であることから多数例のデータを連続処理することも可能であり、心プール法がルチン検査として普及してきた今日では、きわめて臨床の有用性が高いと考えられる。

文 献

- 1) 金 奉賀, 石田良雄, 常岡 豊, 他: 心筋梗塞患者の運動負荷時心拍出予備能の評価. 核医学 22: 1-8, 1985
- 2) 八村広三郎, 英保 茂, 桑原道義, 他: RI 心血管造影法からの左心室輪郭描出と容積計算の自動化. 医用電子と生体工学 17: 9-15, 1979
- 3) Goris ML, McKillop JH, Briandet PA: A fully automated determination of the left ventricular region of interest in nuclear angiocardigraphy. Cardiovasc Intervent Radiol 4: 117-123, 1981
- 4) Bourguignon MH, Douglass KH, Links JM, et al:

- Fully automated data acquisition, processing, and display in equilibrium radioventriculography. *Eur J Nucl Med* 6: 343-347, 1981
- 5) 東光太郎, 香坂 誠, 小林 真, 他: 自動左心室輪郭描記プログラムの臨床的応用. *Radioisotope* 32: 289-292, 1983
 - 6) Reiber JHC, Lie SP, Simoons ML, et al: Clinical validation of fully automated computation of ejection fraction from gated equilibrium blood pool scintigrams. *J Nucl Med* 24: 1099-1107, 1983
 - 7) 細羽 実, 和辻秀信, 広江道昭, 他: 心プールゲートイメージからの左室自動輪郭抽出法—I. 方法論—. *核医学* 21: 1229-1236, 1984
 - 8) Chapman CB, Baher O, Reynolds J, et al: Use of biplane cine fluorography for measurement of ventricular volume. *Circulation* 18: 1105-1117, 1958
 - 9) 山本浩二, 石田良雄, 松本正幸, 他: Multiple gated cardiac pool imaging 法による左室駆出分画測定精度に関する検討: Variable ROI 法の有用性. *J Cardiology* 12: 461-470, 1982

Summary

Fully Automated Determination of the Left Ventricular Contour in Multigated Radionuclide Ventriculography

Bong-Ha KIM*, Kazufumi KIMURA**, Yoshio ISHIDA*, Yutaka TSUNEOKA*, Noboru MATSUBARA*, Hiroshi TAKEDA*, Michitoshi INOUE*, Yukio NAKAMURA**, Yoshimi KUSUMI**, Takahiro KOZUKA**, Takenobu KAMADA*, Shuji KITAGAWA*** and Takatoshi MARUYAMA***

*The First Department of Medicine, **Division of Nuclear Medicine, Osaka University Medical School
***Hitachi Medical Corporation

A new procedure of a fully automated determination of the left ventricular region of interest (ROI) was developed for multigated radionuclide ventriculography. In this procedure, approximate left ventricular ROI was determined by an analysis of count profile of stroke volume image (ED image minus ES image) and paradox image (ES image minus ED image). Then, 36 radial count profile curves from the center of the approximate left ventricular ROI were produced and searched to determine the left ventricular edges by recognizing the pattern of a radial profile curve and comparing an edge defined by second derivative technique with that by thresholding technique.

This procedure gave the success rate of 96%

(66 of 70 studies) in determining end-diastolic and end-systolic ROIs. Left ventricular ejection fraction obtained by this new procedure was compared with that by conventional semiautomated method. The correlation coefficient was 0.95 and regression equation was $Y = 1.06X - 0.63$ ($n = 70$, $p < 0.001$).

Thus, we conclude that this fully automated procedure provides the accurate and reproducible left ventricular ejection fraction and is applicable for clinical use.

Key words: Multigated radionuclide ventriculography, Automatic left ventricular edge detection, Radial profile analysis, Left ventricular ejection fraction.