

《原 著》

R波前後方向同期心プールイメージングによる
虚血性心疾患の検討

——左室機能および左室局所機能の解析——

玉木 長良*	児玉 秋生*	米倉 義晴*	千田 道雄*
藤田 透*	鳥塚 莞爾*	野原 隆司**	鈴木 幸園**
神原 啓文**	河合 忠一**	大家 康秀***	中村 隆***

要旨 R波前後方向同期心プールイメージングを42例に施行し、左室および局所心容量曲線から種々の指標を算出した。虚血性心疾患(CAD)の検出能は最大充満速度(PFR)(71%)および充満率(FF)(65%)が高く、左室拡張機能の障害が高率に認められた。心房収縮能(AC/SV, PFR-AC)はCADで高い傾向にあったが、心機能の低下した群ではむしろ低値を示し、左室機能障害の程度により左房収縮の代償機能に差が認められた。局所容量曲線は左室を8分割しフーリエ3次近似を行った。局所駆出率(rEF)は22例(65%)に異常を認めたが、rPFR(68%)やrPFRに至るまでの時間(rTPF)(65%)も高率に異常を示した。とりわけrEFで正常であった9例でもrPFR, rTPFなどに異常がみられ、曲線全体の近似が有用と考えられた。本法はリストモード計測のため容量曲線を正確に解析でき、左室収縮充満や左房収縮の評価が可能である。また局所容量曲線解析による asynergy や asynchrony の評価もでき、CADの詳細な検討に有用と考えられた。

I. はじめに

近年虚血性心疾患の左室拡張期流入の障害が指摘され¹⁾、RIマルチゲート法を用いた多くの報告がなされるようになった²⁻⁵⁾。RI法は左室形態異常の影響を受けずに容量変化を解析できる利点をもつ。しかし、マルチゲート法では数百心拍のデータを加算して容量曲線を算出するため1心拍の長さの変動が大きいと、拡張期指標の精度に問題が生じうる⁶⁾。とりわけ拡張後期の容量曲線の解析は、通常のマルチゲート法では困難である。この問題を解決するため、R波から前方および後方に同期収集する心プールイメージングも検討さ

れるようになった^{6,7)}。

一方左室局所壁運動の解析も、位相解析の導入⁸⁾以来盛んに行われるようになった⁹⁻¹¹⁾。著者らは局所の拡張障害を評価する目的で、フーリエ高次項近似による評価も行ってきたが^{12,13)}、通常のマルチゲート法では拡張期指標の算出には問題が残されていた。そこで今回はR波から前方・後方に収集する心拍同期心プール法を用いて、左室機能の評価するとともに、そこから得られる局所容量曲線をフーリエ高次項近似して、左室局所機能も同時に評価し、虚血性心疾患の診断能について検討した。

II. 対象および方法

対象は健常人8例と虚血性心疾患34例の計42例である。健常人は血管造影、心電図、心エコー図、運動負荷心筋シンチグラフィ等で正常と判定された例を選んだ。虚血性心疾患例は、冠動脈造影にて75%以上の狭窄をもつ症例で、そのうち25例に心筋梗塞の既往を認めた。虚血性心疾患例をマ

* 京都大学医学部放射線核医学科

** 同 第三内科

*** 日立メディコ

受付: 59年9月17日

最終稿受付: 59年9月17日

別刷請求先: 京都市左京区聖護院川原町54 (☎ 606)

京都大学医学部放射線核医学科

玉 木 長 良

ルチゲート法より求めた左室駆出率より、次の3群に分類した。CAD-1群(60%以上), CAD-2群(40~59%), CAD-3群(39%以下)。

被験者に ^{99m}Tc インビボ標識赤血球を約20mCi静注し、平衡に達した10分後より、両心室のよく分離できる左前斜位35-45°, 頭側に10度傾けた位置よりシンチカメラ(日立社製 Gamma View H)を照準し、平衡時心プールのイメージングを施行した。イメージ収集はリストモード方式を用い、データ処理装置(日立社製 HARP)に収納した。まず収集心拍のR-R間隔ヒストグラムを作成し、中央値から ± 100 msec以上のデータを不整脈心拍として除去した。得られたデータよりR波をトリガーとし、R波から前方および後方にデータを加算し、30 msecごとのマルチゲートイメージを編集した。

加算編集されたイメージより、左室拡張末期像に関心領域を設定し、収縮末期像の左室輪郭の右下方に馬蹄形のバックグラウンドの関心領域を設定した。これらより左室の時間容量曲線を作成した。左室機能の指標として次の6つを算出した(Fig. 1a)^{6,12)}。

- (i) 駆出率(EF)
- (ii) 最大駆出速度(PER)
- (iii) 拡張早期最大充滿速度(PFR)
- (iv) 充滿率(FF)³⁾
- (v) 心房収縮量(AC/SV)
- (vi) 心房収縮期最大充滿速度(PFR-AC)

次に左室局所の容量曲線を得るため、左室拡張末期像の面積重心を中心とし、重心から心尖部に至る左室長軸を中心に45°ずつ左室を8分画した(Fig. 2)。各関心領域でバックグラウンド補正後に得られた局所容量曲線と、フーリエ3次項を用いて曲線近似した(Fig. 3)。なお心基部の2つの区域は評価の対象から除去した。左室局所心機能の指標として、各近似曲線より次の指標を算出した(Fig. 1b)。

- (vii) 局所駆出率(rEF)
- (viii) 局所最大駆出速度(rPER)
- (ix) R波から局所最大駆出までの時間(rTPE)

- (x) 局所最大充滿速度(rPFR)
- (xi) 収縮末期から局所最大充滿までの時間(rTPF)
- (xii) 収縮末期までの時間(rTES)

左室心機能指標については、健常人8例の値より $\text{mean} \pm 2\text{SD}$ を正常範囲と定めた。左室局所心機能の指標のうちrEF, rPER, rPFRについては、各区域ごとに健常人の $\text{mean} \pm 2\text{SD}$ 以内を正常範囲と定めた。またrTES, rTPE, rTPFについては、おのこの症例の左室容量曲線より各位相TES, TPE, TPFを算出し、それらの値の ± 90 msec以内を協調(synchrony)とし、左室全体の位相の

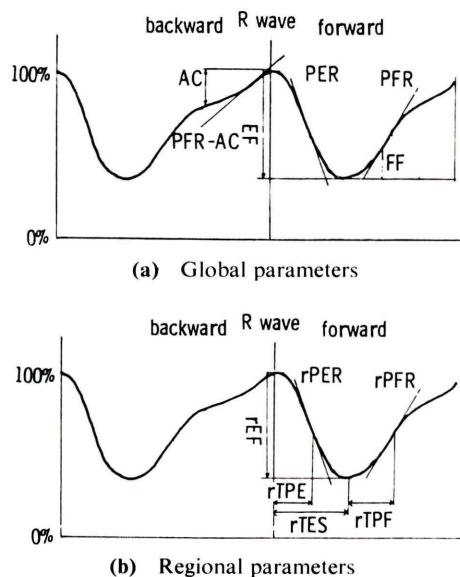


Fig. 1 Global (a) and regional (b) left ventricular volume curves from the multigated forward and backward data collection. Various indices are obtained.

EF: ejection fraction
 PER: peak ejection rate
 PFR: peak filling rate
 AC/SV: atrial contraction by stroke volume
 PFR-AC: peak filling rate during atrial contraction
 rEF: regional ejection fraction
 rPER: regional peak ejection rate
 rPFR: regional peak filling rate
 rTES: regional time to end systole
 rTPE: regional time to PER
 rTPF: regional time to PER

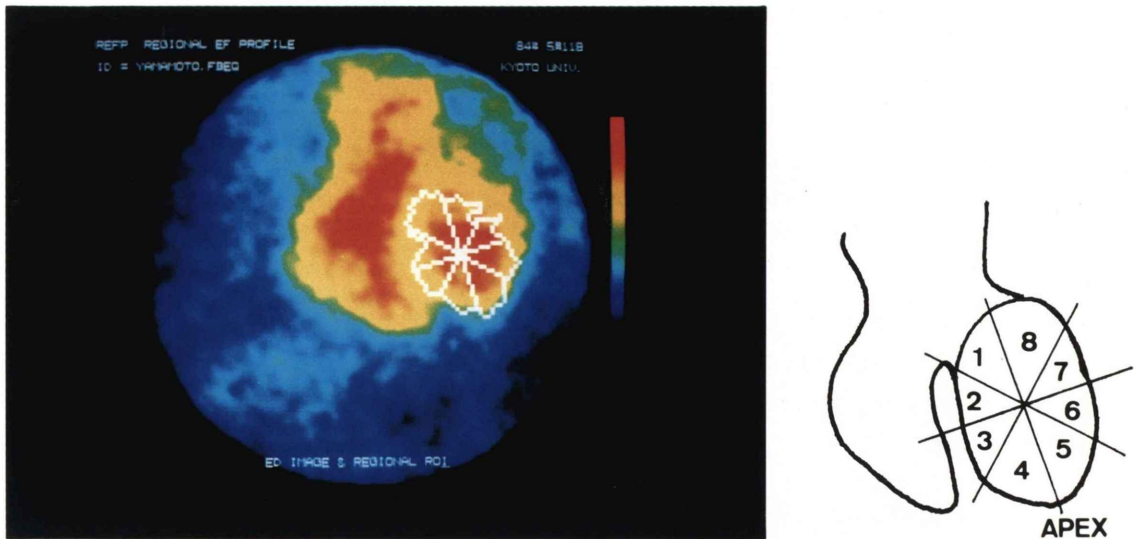


Fig. 2 Subdivision of the left ventricle into 8 sectors with equi-angular spacing. Regional volume curves of the 6 sectors excluding those in cardiac base were analyzed.

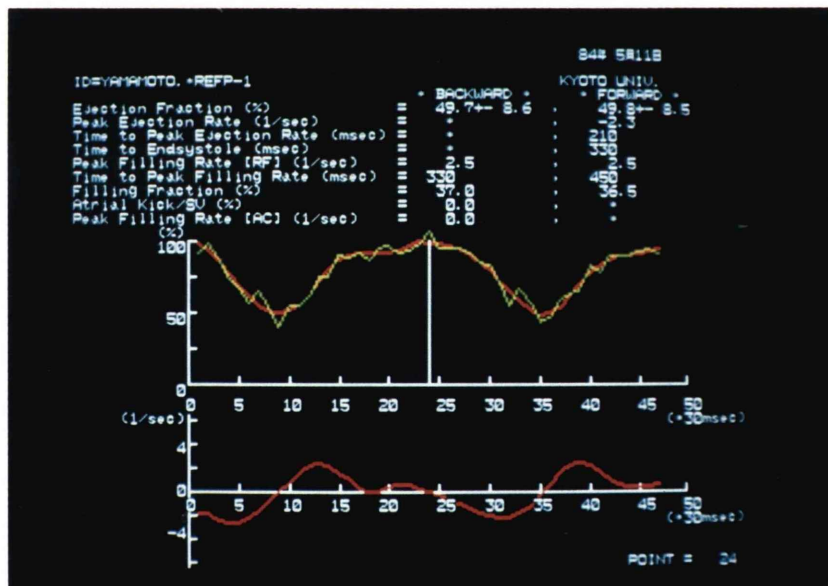


Fig. 3 Curve fitting of the regional volume curves using the 3rd order harmonics of Fourier series. Optimum curve fitting can be done with eliminating statistical noise.

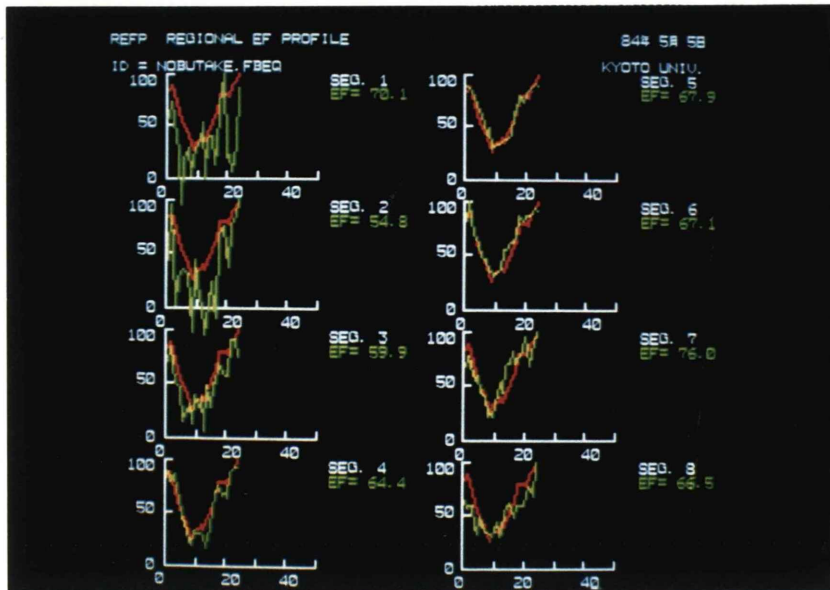


Fig. 6 Regional curves (green) and left ventricular volume curve (red) in each sector segment in the part of forward formatting in a normal case.

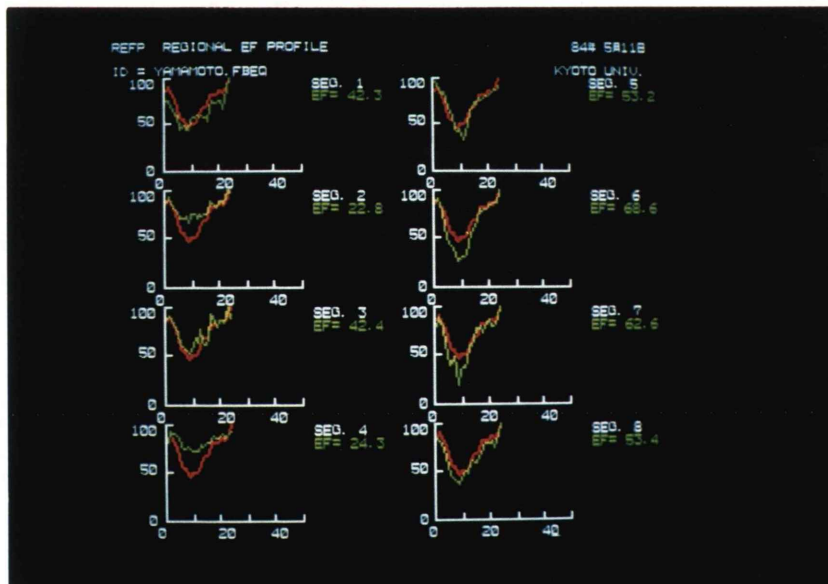


Fig. 8 Regional curves (green) and left ventricular volume curve (red) in each sector segment in a case with anterior myocardial infarction. Note mild delayed emptying and filling in septal and apical regions (seg 3-5).

±90 msec 以上を示す区域をもつ症例を非協調 (asynchrony) ありとした。

以上の心機能の指標の診断基準に基づいて、虚血性心疾患34例を評価した。

III. 結 果

1) 左室心機能評価

Figure 4 に左室心機能の6つの指標の結果を示す。CAD 1~3 群は前述のとおり、左室駆出率 (EF) について分離している。健常人では全例 EF は60%以上であった。収縮期指標の PER は CAD 2 群の約半数、CAD 3 群の全例で異常低値を示した。一方拡張期指標の PFR は、CAD 2, 3 群の88%が異常低値を示し、CAD 1 群の1例でも低値であった。FF も CAD 2, 3 群の77%が異常

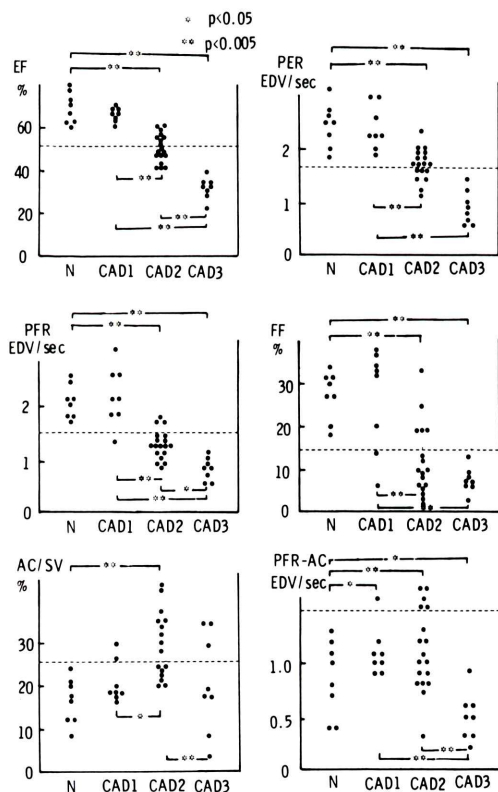


Fig. 4 Results of global indices in 42 cases. Coronary artery disease (CAD) was subdivided into CAD1 ($EF \geq 60\%$), CAD2 ($40\% \leq EF < 60\%$), and CAD3 ($EF < 40\%$).

示しており、虚血性心疾患ではこれら拡張期指標の異常が高率に認められた (Table 1). 他方心房収縮の指標の AC/SV および PFR-AC は CAD 1, 2 群で有意に高値を示すものの、CAD 3 群ではむしろ低値を示し、心房収縮の関与は、軽症では大きく重症ではむしろ小さくなることが示唆された。

2) 左室局所機能評価

左室局所心機能の各指標について、虚血性心疾患の有病正診率 (sensitivity) を Table 1 にまとめた。rEF で異常を示したのが22例であったのに対し、rPER では18例、rPFR では23例に異常がみられた。asynchrony の指標では rTES で19例、rTPE で18例の異常を認めたのに対し、rTPF では22例に異常がみられた。このように局所機能の指標においても拡張期障害がより高頻度に見られる傾向にあった。

これらの指標を ①rEF, ②rPER と rPFR, およ

Table 1 Sensitivity of each indices for diagnosing coronary artery disease

global indices:	
ejection fraction (EF)	18/34 (53%)
peak ejection rate (PER)	18/34 (53%)
peak filling rate (PFR)	24/34 (71%)
filling fraction (FF)	22/34 (65%)
atrial contraction (AC/SV)	14/34 (41%)
PFR in AC (PFR-AC)	5/34 (15%)
regional indices:	
regional EF (rEF)	22/34 (65%)
regional PER (rPER)	18/34 (53%)
regional PFR (rPFR)	23/34 (68%)
regional TES (rTES)	19/34 (56%)
regional TPE (rTPE)	18/34 (53%)
regional TPF (rTPF)	22/34 (65%)

Table 2 Results of the regional indices in 34 cases with coronary artery disease

regional indices								
rEF	Ab	Ab	Ab	Ab	N	N	N	N
rPER or rPFR	Ab	Ab	N	N	Ab	Ab	N	N
rTES, rTPE or rTPF	Ab	N	Ab	N	Ab	N	Ab	N
No. of cases	15	2	3	1	4	0	5	4

Ab: abnormal; N: normal

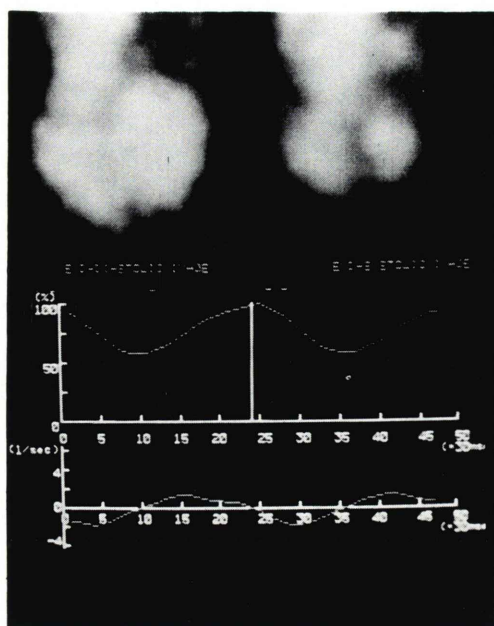


Fig. 5 End-diastolic and end-systolic image (top) and left ventricular volume curve (bottom) in a normal case.

Table 3 Values of regional indices in a normal case

sector No.	rEF	rPER	rPFR	rTES	rTPE	rTPF
2	31	-2.5	2.1	330	120	150
3	39	-2.7	2.1	330	150	180
4	51	-2.8	2.3	330	180	180
5	56	-2.6	2.4	330	180	180
6	61	-3.0	2.5	330	180	120
7	53	-2.7	2.1	330	180	120

び③位相の指標の3つに分類し、異常の頻度について検討を加えた (Table 2). 3群とも異常を示したのが15例(44%)で、いずれも正常であったのが4例(12%)であった。また rEF が正常で rPER, rPFR または位相の異常がみられたのが9例(26%)にのぼり、rEF に加えてこれらの指標による評価の必要性が示唆された。

3) 症例呈示

健康人の心拍同期心プール像と左室容量曲線を Fig. 5 に示した。左室の収縮は良好であり、EF 67%, PER-2.0 EDV/sec, PFR-1.7 EDV/sec と左室心機能は正常範囲内であった。左室を8分割

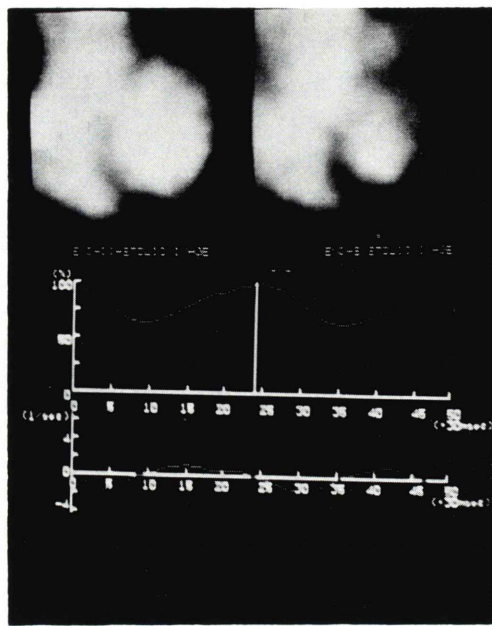


Fig. 7 End-diastolic and end-systolic images (top) and left ventricular volume curve (bottom) in a case with anterior myocardial infarction.

Table 4 Values of regional indices in a case with anterior myocardial infarction

sector No.	rEF	rPER	rPFR	rTES	rTPE	rTPF
2	30	-2.5	1.1	330	150	180
3	30	-2.5	1.4	330	180	210*
4	29	-1.5**	0.9**	330	240*	120
5	43	-2.7	2.4	330	270*	120
6	52	-2.5	2.3	330	180	150
7	50	-2.3	2.5	330	210	120

*asynergy: below the lower limit (mean-2 SD) of the normal values

**asynchrony: 90 msec longer or shorter than the global values

して得られた局所容量曲線(黄色)は、左室容量曲線(赤色)より統計雑音が多いが、左室収縮位相にほぼ一致しており asynchrony はみられなかった (Fig. 6). 局所容量曲線をフーリエ近似して算出された値を Table 3 に示した。rEF, rPER, rPFR は正常範囲にあり、各位相の指標にもばらつきは少なく、asynchrony は認められなかった。

前壁心筋梗塞例の心拍同期心プール像、および左室容量曲線を Fig. 7 に示した。心尖部に軽度

の hypokinesis がみられ、EF 45%, PER -1.6 EDV/sec, PFR 1.2 EDV/sec と左室機能は軽度低下していると考えられた。局所容量曲線 (Fig. 8) では心室中隔 (seg 2, 3) の収縮の低下と心尖部のわずかな位相の遅延 (seg 3, 4, 5) が示唆された。近似曲線より算出された局所心機能の指標 (Table 4) では rEF は正常範囲内であったが, seg 4 の rPER, rPFR の低下と rTPE の延長があり, seg 3 の rTPF の延長も伴っており, asynergy と asynchrony が示唆された。

IV. 考 察

心臓の局所容量曲線の特徴描出を行う試みは以前よりなされていたが^{14,15)}, 近年の位相解析法の開発⁹⁾とともに急激に普及するようになった⁹⁻¹²⁾。とりわけ拡張期の検討は虚血性心疾患の評価に重要な意味をもち, RI 法においても局所拡張期機能の評価の試みも行われるようになった^{12,13,16)}。しかしながら局所容量曲線の解析には, 統計雑音, R-R 間隔変動による雑音, トリガーからの時間のずれの問題などがある¹⁷⁾。

今回の検討では, これらの問題をできるだけ解決し局所容量曲線をより正確に解析することに努めた。すなわちデータ収集はリストモードで行い, R-R 間隔ヒストグラムより不整脈を十分除去した。また統計誤差の影響を少なくするため左室分割も 8 分画にとどめて曲線近似を行い, 心房や大動脈等の影響の生じやすい心基部の解析は削除した。

本法を用いた局所容量曲線の解析では, 虚血性心疾患の多くに収縮や拡張の低下 (asynergy) を認めたのみでなく, 位相の遅れ (asynchrony) も高頻度にみられた。とりわけ, rEF が正常範囲内であった 9 例にも異常がみられ, このような局所容量曲線の特徴描出は有用と考えられた。本来心臓の収縮は連続しており, 拡張末期と収縮末期の 2 点のみで算出される rEF の指標よりは, 曲線全体の近似から種々の収縮, 拡張特性を描出する方が情報量も多く, かつ精度も高いと考えられる。また本法により壁運動異常の部位診断も可能であり, 異常の程度を収縮期・拡張期にわけて定量的

に評価できる利点は大きいと考えられる。

一方本法により, 左室機能評価も比較的高い精度で行える。とりわけ心房収縮の評価は通常のマルチゲート法では困難であり, R 波から逆方向の収集が必要である。今回の検討では虚血性心疾患の多くに PFR, FF の異常が認められ, 拡張障害が示唆された。一方心房収縮の指標は, CAD 1 群, CAD 2 群で高値を示し, 左房収縮の増強が左室充満障害の代償として働く^{18,19)}ことが示唆された。ただ左室機能の著明に低下した CAD 3 群では, 心房収縮の指標は低値を示す例が多く, 左房収縮の代償的役割がみられなくなると考えられた。これらの成績は同様の方法で検討した石田ら⁶⁾の報告と一致するものである。

左室拡張早期の評価には, R 波からのトリガーでは正確さに欠けるため, II 音同期法を用いた詳細な検討もみられる^{6,20)}。ただ一般に R 波から拡張早期までは R-R 間隔変動の影響を受けにくい。ため, 収集後の R-R 間隔のヒストグラムより不整脈データを除去すれば, R 波からの同期で十分と思われる。ただ心房収縮を含む拡張後期の指標は, R-R 間隔変動の影響を強く受けるため, R 波からの逆同期による算出が不可欠であろう。今回評価の対象にはしなかったが, 本法により左室局所における心房収縮の関与の程度も評価でき, 今後この方面での検討が期待できる。

一般にリストモード収集の欠点は編集・解析に時間を要することである。本法ではデータ収集後すべての解析を行うのに約 1 時間必要であった。種々の重要な指標が算出されるため決して煩雑さは感じないものの, ルチン検査に加えるにはさらに改良が必要と考えられる。

V. ま と め

1) R 波前後方向心拍同期心プーレイメージングより, 左室および局所の収縮充満および心房収縮機能の評価を行った。

2) 虚血性心疾患 34 例では EF, PER で 18 例 (53%) に異常を認めたのに対し, PFR で 24 例 (71%), FF で 22 例 (65%) と高率に異常がみられた。

3) 心房収縮能 (AC/SV, PER-AC) は, EF の高い虚血性心疾患では高値を示し, EF の40%未満の例では逆に低値を示す傾向にあり, 左心機能障害の程度により左房収縮の代償機能に差がみられた。

4) 局所心機能指標では rEF で22例(65%), rPFR で23例(68%), rTPF で22例(65%)に異常がみられ, 局所収縮低下 (asynergy) と位相の不協調 (asynchrony) が高頻度にみられた。とりわけ rEF が正常であった9例に, rPFR の低値や asynchrony がみられ, これらの指標が有用と考えられた。

文 献

- 1) Covell JW, Ross J Jr: Nature and significance of alterations in myocardial compliance. *Am J Cardiol* **32**: 449-455, 1973
- 2) Bonow RO, Bacharach SL, Green MV, et al: Impaired left ventricular diastolic filling in patients with coronary artery disease: Assessment with radionuclide angiography. *Circulation* **64**: 315-323, 1981
- 3) Reduto LA, Wickemeyer WJ, Young JB, et al: Left ventricular diastolic performance at rest and during exercise in patients with coronary artery disease. *Circulation* **63**: 1228-1237, 1981
- 4) 成田充啓, 栗原 正, 村野謙一, 他: 心プールイメージングより求めた Diastolic Phase Index の有用性——虚血性心疾患における検討——. *核医学* **19**: 1147-1157, 1982
- 5) 池園 徹, 尾崎正治, 山岸 隆, 他: 平衡時心電図同期心プール法による左室 Relaxation の評価. *核医学* **20**: 659-665, 1983
- 6) 石田良雄: 心音 II 音同期・心電図 R 波逆同期 RI 心プールイメージング法による冠動脈疾患の左室拡張期充満動態の解析——拡張早期充満異常と左房収縮の役割——. *核医学* **21**: 831-843, 1984
- 7) 近藤 武, 菱田 仁, 根岸幸男, 他: 心電図同期心プールシンチグラフィによる前収縮期における左室充満の評価. *J. Cardigraphy* **12**: 189-202, 1982
- 8) Adam WE, Tarkowska A, Bitter F, et al: Equilibrium (gated) radionuclide Ventriculography. *Cardiovasc Radiol* **2**: 161-173, 1979
- 9) Links MJ, Douglass HK, Wagner Jr NH, et al: Patterns of ventricular emptying by Fourier analysis of gated blood-pool studies. *J Nucl Med* **21**: 978-982, 1980
- 10) 向井孝夫, 玉木長良, 石井 靖, 他: 心拍同期心プール像の位相解析による局所心筋壁運動の評価. *核医学* **18**: 609-612, 1981
- 11) Tamaki N, Mukai T, Ishii Y, et al: Evaluation of asynchrony by phase analysis of resting and exercise gated blood pool studies. *J Nucl Med* **23**: P 83, 1982 (abst)
- 12) 玉木長良, 向井孝夫, 湊小太郎, 他: フーリエ高次解析法を用いたマルチゲート心血液プール像の壁運動の定量評価 ——(1) 虚血性心疾患への応用——. *核医学* **20**: 289-300, 1983
- 13) Kodama S, Tamaki N, Senda M, et al: Assessment of asynchronous relaxation in hypertrophic cardiomyopathy and ischemic heart disease. *J Nucl Med* **25**: P 45, 1984 (abst)
- 14) Maddox DE, Holman BL, Wynne J, et al: Ejection fraction image: A noninvasive index of regional left ventricular wall motion. *Am J Cardiol* **41**: 1230-1238, 1978
- 15) Holman BL, Wynne J, Idoine J, et al: Disruption in the temporal sequence of regional ventricular contraction. I. Characteristics and incidence in coronary artery disease. *Circulation* **61**: 1075-1083, 1980
- 16) Miller TR, Goldman KJ, Sampathkurmaran KS, et al: Analysis of cardiac diastolic function: application in coronary artery disease. *J Nucl Med* **24**: 2-7, 1983
- 17) 玉木長良, 向井孝夫, 湊小太郎, 他: フーリエ高次解析法を用いたマルチゲート心血液プール像の壁運動の定量評価 ——(2) シミュレーションカーブによる基礎的検討——. *核医学* **20**: 301-307, 1983
- 18) Hammermeister KE, Warbasse JR: The rate of change on left ventricular volume in man. II. Diastolic events in health and disease. *Circulation* **49**: 739-747, 1974
- 19) Rahimtoola SH, Ehsami A, Sinno MZ, et al: Left atrial transport function in myocardial infarction. *Am J Cardiol* **59**: 686-694, 1975
- 20) 渡辺美郎, 酒井 章, 稲田満夫, 他: RI angiography における 2 音同期平衡時法の左室容量曲線による拡張期の検討. *Radioisotope* **31**: 515-520, 1982

Summary

Analysis of Left Ventricular Global and Regional Functions in Coronary Artery Disease by Multigated Forward and Backward Data Collection

Nagara TAMAKI*, Shusei KODAMA*, Yoshiharu YONEKURA*, Michio SENDA*,
Toru FUJITA*, Kanji TORIZUKA*, Ryuji NOHARA**, Yukisono SUZUKI*,
Hirofumi KAMBARA**, Chuichi KAWAI**, Yasuhide OOIE***
and Takashi NAKAMURA***

**Department of Radiology and Nuclear Medicine, **Department of Internal Medicine,
Kyoto University Medical School
***Hitachi Medico*

To analyze left ventricular global and regional volume curves, multigated forward and backward data collection was performed in 42 cases, including 8 normals and 34 cases with coronary artery disease (CAD). The data was acquired in a list mode with R wave time marker and multigated images were reformatted forward and backward from the time marker. The systolic indices: EF (ejection fraction) and PER (peak ejection rate), and the early diastolic indices: PFR (peak filling rate) and FF (filling fraction) were calculated from the forward formatting left ventricular volume curves. The late diastolic indices: AC/SV (atrial contraction) and PFR-AC (peak filling rate during atrial contraction) were obtained from the backward left ventricular volume curve.

EF and PER were lower in 18 cases (53%) with CAD, whereas PFR and FF showed abnormal in 24 cases (71%) and 22 cases (65%), respectively, suggesting that early diastolic indices were more often impaired in CAD. AC/SV and PFR-AC were significantly higher in CAD-1 ($EF \geq 60\%$) and CAD-2 ($40\% \leq EF < 60\%$), but they were rather low in CAD-3 ($EF < 40\%$), indicating different compensatory mechanism of atrial con-

traction for impaired diastolic filling.

Regional volume curves were created by dividing the left ventricle into 8 sectors with equi-angular spacing, and each curve was fitted by the 3rd order harmonics of Fourier series. Regional ejection fraction (rEF), regional peak ejection rate (rPER) and regional peak filling rate (rPFR) lower than the lower limit (mean-2 SD) of the normal values were considered abnormal (asynergy). Regional time to end systole (rTES), regional time to PER (rTPE) and regional time to PFR (rTPF) more than 90 msec longer or shorter than the global values were considered abnormal (asynchrony). Regional diastolic abnormality was often seen in CAD (rPFR: 23 cases (68%) and rTPF: 22 cases (65%)). Furthermore, 9 cases with CAD with normal rEF showed abnormal value in rPFR or rTPF.

In conclusion, multigated forward and backward data collection provides global as well as regional systolic and diastolic indices accurately, which permits precise evaluation of CAD.

Key words: Gated blood pool imaging, ^{99m}Tc -red blood cells, Coronary artery disease, Diastolic index.