

《原 著》

心拍同期心プール断層法による左室容積、駆出率、 1回心拍出量算出の精度について

山岸 隆* 佐々田孝美** 前田 準也** 河野 隆任**
 吉永 憲正** 小川 宏* 松田 泰雄* 尾崎 正治*
 楠川 禮造*

要旨 各種心疾患患者23名を対象に左室容積と駆出率を心拍同期心プール断層法(MGBPT)と左室造影法で求め、MGBPT法の精度について検討した。Tc-99m-HSAを静注後、ガンマカメラを180度回転させ1方向60秒間で18方向より撮像した。左室水平長軸断層像より拡張末期像と収縮末期像を作成した。容積算出は断層像の最大カウント値に対する%カットオフ値を設定し、左室辺縁を描出した後に左室断層像内のvoxel数を全断層像において合計し、これにあらかじめ実測した1 voxelの体積を乗じ左室容積を算出した。%カットオフ値はファントム実験より42%とした。MGBPT法と左室造影法より算出した容積の比較で $r=0.82$, SEE=29 mlの良好な相関があった。同様に左室駆出率も $r=0.73$, SEE=9.6%の良好な相関があった。しかし、左室造影法とMGBPT法の間の誤差は左室容積が少ないほど大きく、特に50 ml以下になると著明に大きくなつた。

I. 緒 言

心室容積を求める方法として心臓カテーテル法^{1~3)}、心エコー図法^{4,5)}などが報告されてきた。また簡便性、非侵襲性、反復可能性等より心拍同期心プール法からの算出^{6~13)}も汎用されてきたが、末梢血液の放射能測定や減衰補正のための煩雑な操作を必要とし、また左室を周囲の臓器から十分に分離できないなどの問題点がある。最近、心拍同期心プール断層法(Multigated blood pool tomography, MGBPT)が心室容積算出に用いられてきた^{14~21,23,24)}。これは吸収補正やデータ収集、処理時間についての問題点はあるものの、末梢血液の放射能測定や減衰補正のための煩雑な操作を必要とせず、左室を周囲の臓器から十分に分

離できる利点をもつ。このたび、MGBPTを用いて各種心疾患における左室の容積、駆出率や1回心拍出容量を求め、左室造影法により求めた値と対比し、その精度について検討した。

II. 対象と方法

1. 基礎的検討

長軸外径30 cm、短軸外径20.5 cm、高さ44 cmの楕円筒形のプラスチック製容器で中央に長軸径19.5 cm、短軸径9.8 cm、高さ44 cmの楕円筒形の中空をもつ美和医療電機社製人体ファントムを用い、%カットオフ値を変化させ、真の容積と測定値の関係について検討した。周囲4 cmの厚みの水を満たした人体ファントムの中央にプラスチック製容器を置き、約0.02~0.03 mCi/mlの濃度のTechnetium-99m液を各容量(200 ml, 180 ml, 160 ml, 140 ml, 120 ml, 100 ml, 80 ml, 60 ml, 40 ml)入れた。各容量でMGBPTを行い、%カットオフ値を30%より50%まで変え、真の容積と実測値との関係について検討した。MGBPTは10度ずつ180度回転させ、18方向より1方向2秒間のデータを収集した。用いた装置、回転方向、

* 山口大学医学部第二内科

** 徳山中央病院

受付：63年6月17日

最終稿受付：63年10月7日

別刷請求先：山口県宇部市小串1144 (番号755)

山口大学医学部第二内科

山 岸 隆

データ処理方法は後に述べる臨床的検討に用いた方法と同じである。

2. 臨床的検討

ファントム実験より得られた最適%カットオフ値42%を用いて、各種心疾患患者23名を対象にMGBPTと心臓カテーテル検査を20日以内の間隔で行い、左室の容積、1回心拍出容量や駆出率を両者において比較し、その精度について検討した。対象患者の平均年齢は 60 ± 7 歳(平均 \pm SD)(49-74歳)で心筋梗塞症14名、狭心症6名、特発性肥大型心筋症1名、特発性拡張型心筋症1名、弁膜症1名である。全例において投薬中止後2日目にMGBPTおよび心臓カテーテル検査を臨床的に安定した状態の時に行った。MGBPTはtechnetium-99m-human serum albumin(HSA), 20-25 mCiを静注後に、低エネルギー汎用コリメータを装着した東芝製回転型ガンマカメラGCA-601Eを用い、通常の心拍同期心プール検査が終了後に心電図同期にて右前斜位45度より左後斜位45度まで10度ずつ180度回転させ、1方向60秒間に18方向より 64×64 のマトリックス上にデータを収集した。Technetium-99mのエネルギーピーク140 KeVの $\pm 10\%$ のガンマ線のみカウント

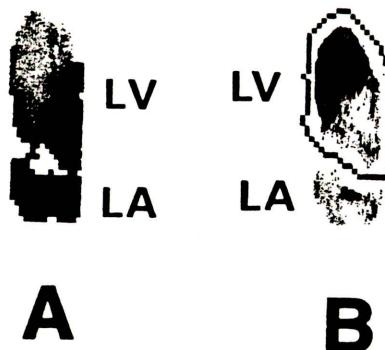


Fig. 1 Horizontal long axis section at end-diastole in a patient with posterolateral myocardial infarction. Left ventricular contour was defined manually on the phase (A) and amplitude (B) images. Then, within this region of interest, left ventricular endocardium was determined automatically with the aid of a contour at 42% of maximum counts within the whole ventricle at each section. LV=left ventricle, LA=left atrium.

を収集した。検査直前に求めた平均心拍数 $\pm 10\%$ 以外の心拍数はカウント収集より除外した。平均R-R間隔を16等分した間隔を1フレームの間隔とした。収集原画像に5点空間スムージングを行った後、Shepp and Loganのフィルターを用いfiltered back projection法によりスライス厚が1ピクセル3.73 mmごとの体軸横断断層像を作成し、これをもとに心水平長軸断層像を再構成した。画像再構成には吸収補正を行わなかった。心電図のR波に同期した時相において左室前壁より左室後壁にいたる連続した左室水平長軸断層像で左室の面積が最も大きい断層面を選択し、その断層面での各ピクセルごとに1心拍中のR波より次のR波直前のフレームまでの16個よりなる連続したカウントの変化をフーリエ関数で近似した後に位相と振幅画像を作成した。それらの画像を参考に左室と左房および左室と右室の分離を行いつつ、左室の辺縁を手動で描き関心領域を設定した(Fig. 1)。次に、上下に連続する全左室水平長軸断層像において、上記の方法で求めた左室の関心領域を適応し、そのうちの1ピクセルでの最大カウントを求めた。各断層像ごとに最大カウントの42%以上を呈するvoxel数を求め、全断層内のvoxel数を合計し、前もって算出していた1voxelあたりの容積0.052 mlを乗じて実際の左室拡張末期容積を求めた。この方法を各フレームごとに適応し、心電図R波より次のR波直前までの16フレームにおいて各フレームでの左室容積を求めた。ただし、拡張末期像での最大カウントの42%以上を呈するvoxelのみ数えた。左室拡張末期は心電図R波の時点、左室収縮末期は左室容積が最も少ない時点とした。

3. 心臓カテーテル検査と左室造影

心臓カテーテル検査はソーンズ法で行い、左室造影は右前斜位30度および左前斜位60度の2方向より行った。左室容積の計測は右前斜位30度方向より撮像した左室拡張末期と収縮末期像を使いArea length法にて求めた。左室拡張末期は心電図R波の時点、左室収縮末期は左室容積が最も少ない時点とした。

III. 結 果

1. 基礎的検討

人体ファントムを用い MGBPT で % カットオフ値を 30, 32, 35, 37, 40, 42, 45, 47, 50% と段階的に変えて求めた計測値と真の容積の関係は Fig. 2 のごとくである。いずれの % カットオフ値の場合も計測値と真の容積の間に相関係数 $r=0.98$ 以上の良い相関があったが、低い % カットオフ値ほど計測値は真の値より高めになった (Fig. 2)。% カットオフ値 42% の時が最も相関係数が高く、推定値の標準誤差 (SEE) も少なく、真の容積に近い値が得られた。両者の間には計測値 = $0.75 \times \text{真の値} + 30.4 \text{ ml}$ 、相関係数 $r=0.99$ 、 $\text{SEE}=4.7 \text{ ml}$ の関係があった。また、いずれの % カットオフ値の場合も容積が少ないほど、真の値と計測値の差を真の値で除して % 表示した誤差率は大きくなり、誤差率と真の容積の間に双曲線状に

近似可能な関係がみられた (Fig. 3)。% カットオフ値 42% の時には誤差率 (%) = $31 - 3,706 / \text{真の容積}$ ($r=-0.98$, $p<0.001$) の関係がみられた。

2. 臨床的検討

ファントム実験より得られた最適 % カットオフ値 42% を用いて、MGBPT により算出した左室拡張末期容積、左室収縮末期容積、1回拍出容積、駆出率を求め、左室造影法で求めた値と比べた。心容積に関して MGBPT (Y) と左室造影法 (X) との比較で、 $Y=0.75X+33$, $r=0.82$ ($p<0.01$), $\text{SEE}=29 \text{ ml}$ の相関があり (Fig. 4)、左室拡張末期容積のみを検討しても $Y=0.67X+41$, $r=0.68$ ($p<0.01$), $\text{SEE}=33 \text{ ml}$ (Fig. 5)、また左室収縮末期容積のみを検討しても $Y=0.95X+22$, $r=0.83$ ($p<0.01$), $\text{SEE}=25 \text{ ml}$ の良い相関を認めた (Fig. 6)。しかし、左室造影法で求めた値と MGBPT で求めた計測値の差を造影法での値で除して % 表示した誤差率と、容積の間に誤差率 (%) = $38 - 3,996 / \text{容積}$

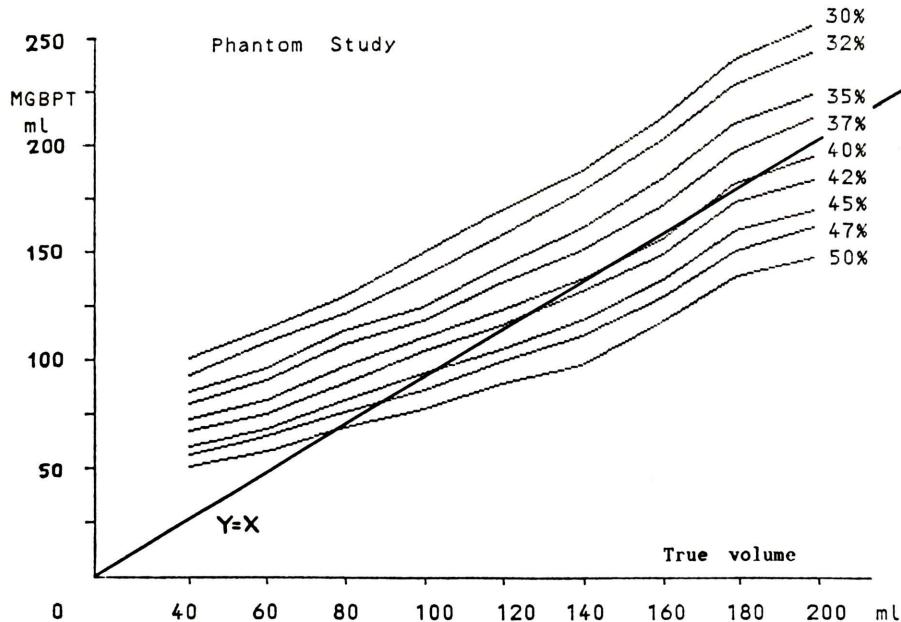


Fig. 2 Phantom volumes calculated tomographically correlated well with true volume. Contours at 30 to 50% of maximum counts were used, and 42% contours gave volumes closest to the line of identity ($Y=X$), and the correlation coefficient between the calculated and true volumes was the highest ($r=0.99$) and the standard error of the estimate was the smallest ($\text{SEE}=4.7 \text{ ml}$).

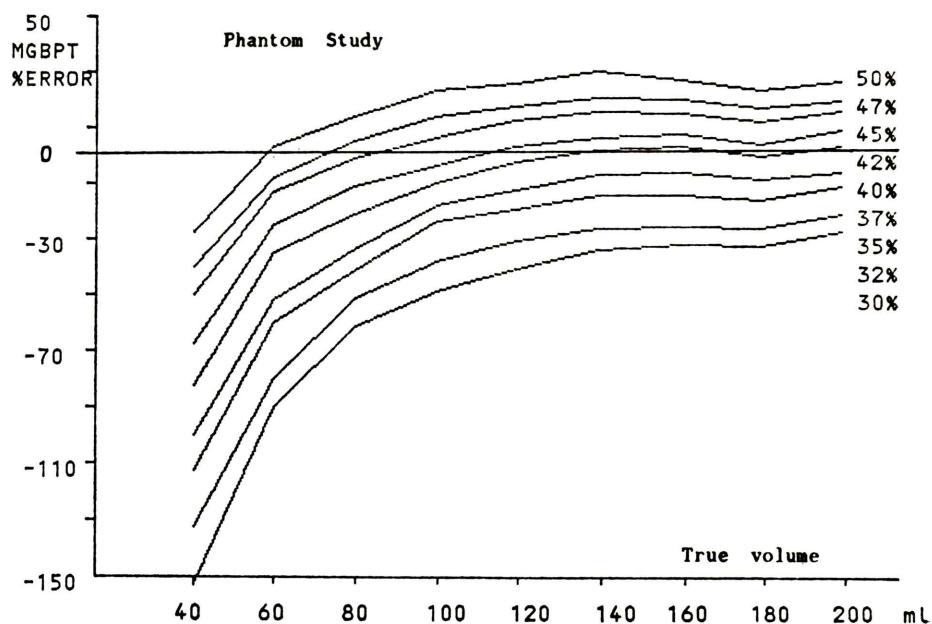


Fig. 3 %Error: The ratios of the difference of phantom volume determined tomographically from true volume to the true volume. These ratios were decreased as the true volumes were smaller, which indicates that the phantom volumes determined tomographically would lead to more errors with the smaller true volumes.

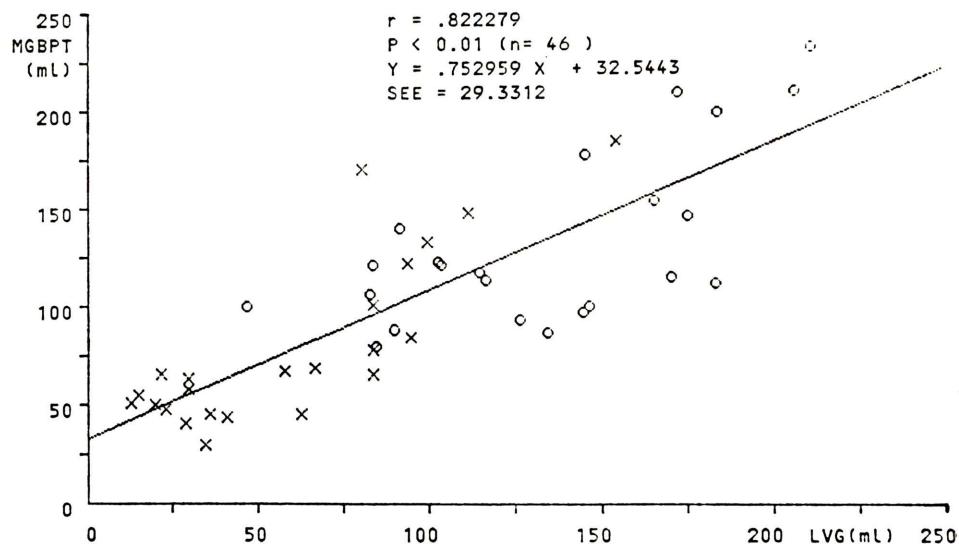


Fig. 4 Left ventricular volumes calculated tomographically correlated well with volumes obtained from cineventriculography. (○)=end-diastolic volumes, (×)=end-systolic volumes.

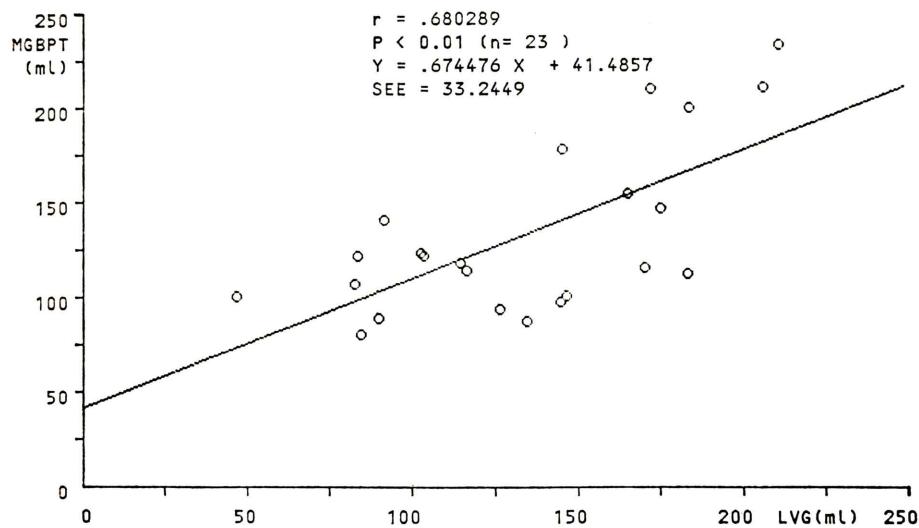


Fig. 5 Left ventricular volumes at end-diastole calculated tomographically correlated well with those determined by cineventriculography.

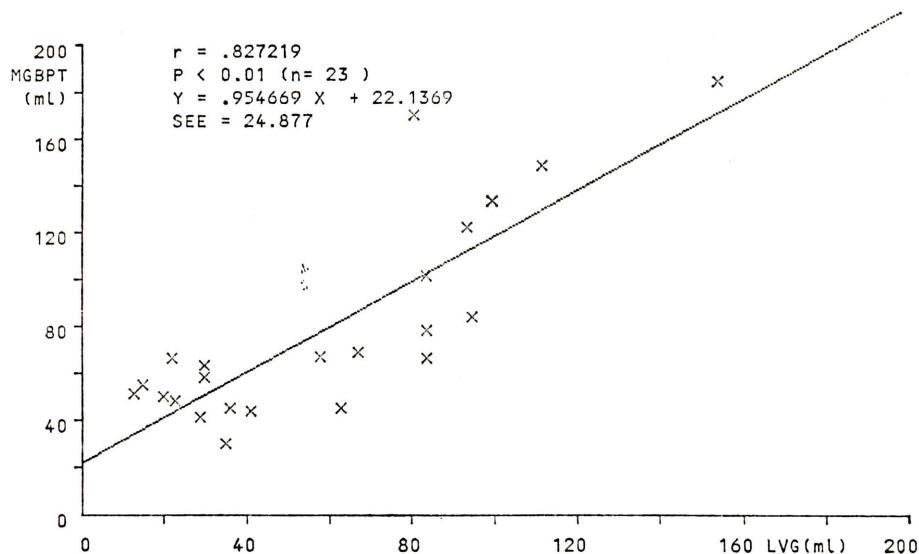


Fig. 6 Left ventricular volumes at end-systole calculated tomographically correlated well with those determined by cineventriculography.

左室造影法で求めた容積の双曲線状に近似可能な関係がみられ、容積が少ないほど、誤差率は大きくなり、特に 50 mL 以下の左室容積では誤差率は著明になった (Fig. 7)。左室駆出率 (Fig. 8) は $Y = 0.68X + 2.7$, $r = 0.73$ ($p < 0.01$), $SEE = 9.6\%$ の良い

相関を認めたが、1回拍出容積は両者の間に有意な相関はなかった ($r = 0.19$) (Fig. 9)。

IV. 考 案

従来の心拍同期心プール法により求めた左室容

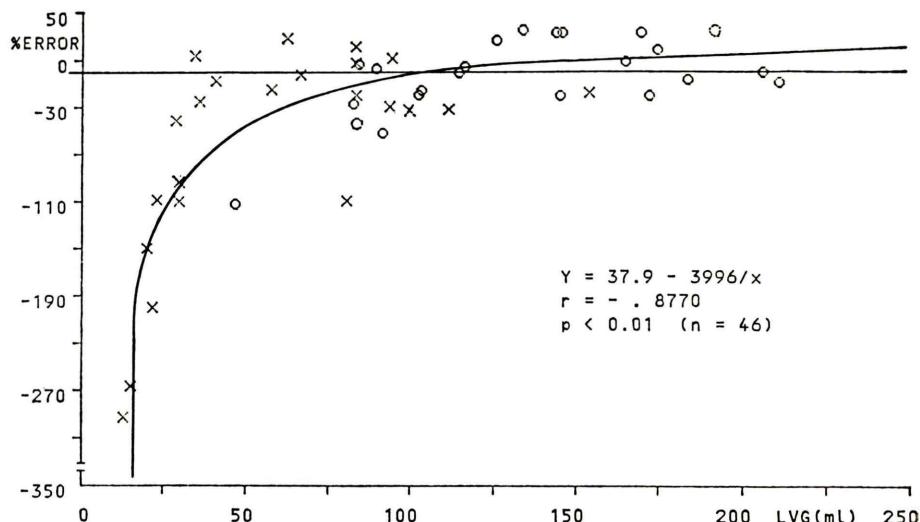


Fig. 7 %Error: The ratios of the difference of volume determined tomographically from the volume obtained from cineventriculography (CINE-volume) to the CINE-volume. These ratios were decreased as the CINE-volumes were smaller, indicating that the volumes determined tomographically would lead to more errors with the smaller volumes.

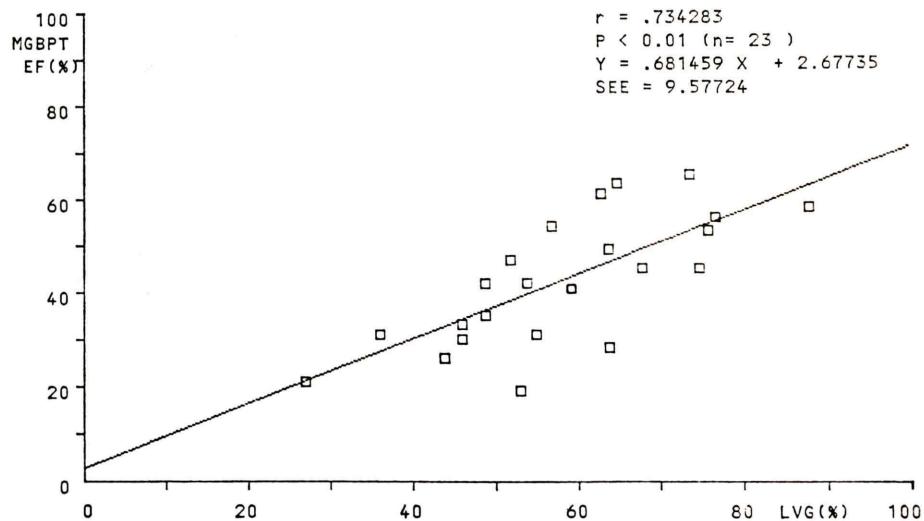


Fig. 8 Left ventricular ejection fractions determined tomographically correlated well with those from cineventriculography.

積や駆出率の値は、左室造影法で求めた値に比べ良く相関すると報告されている^{6~13)}。しかし、この方法は左室のバックグラウンド除去、周囲の心房や大血管からの分離、末梢血液の放射能測定や減衰補正などの煩雑な操作を必要とする。

MGBPTによる左室容積の算出は吸収補正やデータ収集、処理時間についての問題点はあるが、これらの煩雑な操作を必要とせず直接に、また左室の形態にかかわらず絶対容積の算出が可能である^{14~21)}。これは左室の断層内の1ピクセル当た

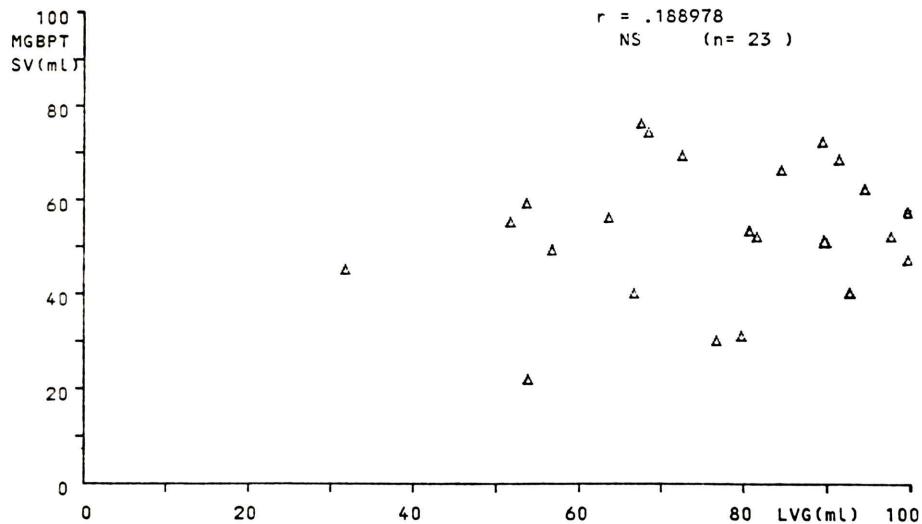


Fig. 9 There was no significant correlation between the stroke volumes determined tomographically and those from cineventriculography.

りの最大カウントに対する % カットオフ値を設け、それ以上のカウントを有する voxel 数を全断層において合計し、前もって測定していた 1 voxel当たりの容積を乗算することで求められる。この場合に問題となることは、1) 最適 % カットオフ値の決め方、2) 左室を周囲の右室、右房や大血管から分離する方法、3) 容積を算出する断层面の選択である。従来より最適 % カットオフ値は諸家の報告^{14~17,19~21)}では 35~45% であった。しかし、この値はデータ収集や処理方法、対象となる容積の量およびバックグラウンドカウント値^{23,24)}によって変わるものがある。MGBPTによる左室容積算出はバックグラウンドカウント値が高いほど、% カットオフ値を高める必要がある^{23,24)}。実際の臨床例においてはバックグラウンドカウント値が 20% 前後の症例が多いため、% カットオフ値を一定にしても臨床上には問題ないと思われる²³⁾。われわれはファントム実験より最適 % カットオフ値は 42% としたが、この一定の値を用いた場合、容積が少ない時の計測値は実際の容積より高めに測定された(Figs. 2, 3)。臨床検討でも 42% の最適 % カットオフ値を採用した場合、左室造影法と MGBPT で求めた容積の直線回帰式

の傾きは 0.75、Y 切片は 32.5 となった (Fig. 4)。これはすなわち、容積が少ない時は MGBPT で求めた計測値は左室造影法で求めた値に比べ高めに、逆に容積が多い時は MGBPT で求めた計測値は低めになることを意味する。また両検査法の間の誤差率は容積が少ないほど大きくなっている (Fig. 7)。特に 50 mL 以下では著明となり、左室造影法で求めた値の 3 倍近くになる症例もあった (Fig. 7)。この容積が少ないほど誤差率が大きくなる理由として、まず第一に、この検査で使用したガンマカメラとコリメータの総合分解能が点線源からの距離 15 cm の場合は半値全幅 (FWHM) で 12.7 mm であるが、実際のガンマカメラの回転半径は 22 cm なので、FWHM は、より増加していると思われる。この収縮末期径に比べ、比較的低い分解能や隣接臓器よりの散乱線が容積の少ない場合に、より重大に影響を及ぼすため Partial volume effect 等により像は不鮮明になり、実際の容積より大きめに測定される可能性がある^{21,22,25)}。第二に、左室造影法での容積算出は左室が回転橈円体であると仮定して求めるため、心内膜形態の複雑な収縮末期容積の算出は不正確となりやすく誤差も大きくなると考えられる。さらに、注入される造影剤

の左室容積への影響も考えられる³⁾。第三に、左室造影法とMGBPTでの1フレームの間隔の違いがある。左室造影法では1フレーム間隔16.7msecであるがMGBPTでは方法やデータ収集、処理時間の問題もあり、1フレームの間隔はおよそ45–80msecである。この場合に容積変化の少ない左室拡張末期には問題は少ないが、比較的に容積変化の大きい収縮末期には実際の容積より大きく測定される可能性がある。Hamiltonら²²⁾は、心拍同期心ピール検査にて1フレームの間隔が100msecの時に拡張末期容積は実際の容積より少なめになり、収縮末期容積は多めに測定されると報告している。最後に、心房と心室の境界の心周期による移動もある。傾向としては収縮期に心房が心室側に移動するが多く、収縮末期に心房の一部を心室として計算する結果、実際の容積より大きく測定される可能性がある。左室造影法とMGBPTで求めた1回拍出容量の間に全く有意な相関がなかった(Fig. 9)。これは、心機能の良い症例も悪い症例も、1回拍出容量は50–100mlの比較的に狭い領域に保たれ対象が一塊となっていることや、上記で述べた容積が少ない時の誤差の増大が関係するのかもしれない。また左房と左室の境界の決め方によって容積算出に誤差が生じる可能性がある。われわれは、左房と左室の心周期中の収縮および拡張様式の違いを利用して、左室の断面に位相と振幅画像を作成し、これを参考に両者の境界を明瞭にした(Fig. 1)。断層面の選択については、従来より体軸断層像¹⁸⁾、水平長軸断層像^{16,17)}、垂直長軸断層像¹⁴⁾、短軸断層像^{15,19)}を用いているが、いずれも左室造影法や心拍同期心ピール法から算出した左室容積との比較で良い相関をみている。

以上より、MGBPTにより求めた左室容積は、左室造影法での値に比べ、容積が少ない時には大きく算出され誤差率も大きくなつた。特に容積が50ml以下の時には著明に大きくなつた。また、100ml以下の比較的に少ない容量に保たれるMGBPTにより求めた1回拍出容量は、誤差も大きく信頼のできないものであった。しかし、今後

の装置の分解能の向上やデータ収集時の1フレーム間隔の短縮等により精度の改善が十分に期待される方法である。

文 献

- Dodge HT, Sandler H, Ballew DW, et al: The use of biplane angiocardiology for the measurement of left ventricular volume in man. Am Heart J 60: 762–776, 1960
- Sandler H, Dodge HT: The use of single plane angiograms for the calculation of left ventricular volume in man. Am Heart J 75: 325–334, 1968
- Dodge HT, Sandler H, Baxley WA, et al: Usefulness and limitations of radiographic methods for determining left ventricular volume. Am J Cardiol 18: 10–24, 1966
- Sawada H, Fujii J, Kato K, et al: Three dimensional reconstruction of the left ventricle from multiple cross sectional echocardiograms. Value for measuring left ventricular volume. Br Heart J 50: 438–442, 1983
- Nixon JV, Saffer SI, Lipscomb K, et al: Three-dimensional echoventriculography. Am Heart J 106: 435–443, 1983
- Massie BM, Kramer BL, Gertz EW, et al: Radionuclide measurement of left ventricular volume: Comparison of geometric and counts-based methods. Circulation 65: 725–730, 1982
- Starling MR, Dell'Italia LJ, Nusynowitz ML, et al: Estimates of left ventricular volumes by equilibrium radionuclide angiography: Importance of attenuation correction. J Nucl Med 25: 14–20, 1984
- Rabinovitch MA, Kalff V, Korel K, et al: Count-based LV volume determination utilizing a left posterior oblique view for attenuation correction. Radiology 150: 813–818, 1984
- Dehmer GJ, Lewis SE, Hillis LD, et al: Non-geometric determination of left ventricular volumes from equilibrium blood pool scans. Am J Cardiol 45: 293–300, 1980
- Links JM, Becker LC, Shindledecker JG, et al: Measurement of absolute left ventricular volume from gated blood pool studies. Circulation 65: 82–91, 1982
- Thomsen JH, Patel AK, Rowe BR, et al: Estimation of absolute left ventricular volume from gated radionuclide ventriculograms. Chest 84: 6–13, 1983
- Maurer AH, Siegel JA, Denenberg BS, et al: Absolute left ventricular volume from gated blood pool imaging with use of esophageal transmission measurement. Am J Cardiol 51: 853–858, 1983

- 13) Nichols K, Adatepe MH, Isaacs GH, et al: A new scintigraphic method for determining left ventricular volumes. *Circulation* **70**: 672-680, 1984
- 14) 上遠野栄一, 小野和男, 大和田憲司, 他: 心拍同期心プール法による心室容積算出の試み. *Journal of Cardiology* **17**: 329-339, 1987
- 15) Gill JB, Moore RH, Tamaki N, et al: Multigated blood-pool tomography: New method for the assessment of left ventricular function. *J Nucl Med* **27**: 1916-1924, 1986
- 16) Underwood SR, Walton S, Laming PJ, et al: Left ventricular volume and ejection fraction determined by gated blood pool emission tomography. *Br Heart J* **53**: 216-222, 1985
- 17) Ziada G, Mohamed MM, Hayat N, et al: Quantitative analysis of cardiac function: Comparison of electro-cardiogram dual gated single photon emission tomography, planar radionuclide ventriculogram and contrast ventriculography in the determination of LV volume and ejection fraction. *Eur J Nucl Med* **12**: 592-597, 1987
- 18) Bunker SR, Hartshorne MF, Schmidt WP, et al: Left ventricular volume determination from single-photon emission computed tomography. *Am J Roentgenol* **144**: 295-298, 1985
- 19) Stadius ML, Williams DL, Harp G, et al: Left ventricular volume determination using single-photon emission computed tomography. *Am J Cardiol* **55**: 1185-1191, 1985
- 20) Tauxe WN, Soussaline F, Todd-Pokropek A, et al: Determination of organ volume by single-photon emission tomography. *J Nucl Med* **23**: 984-987, 1982
- 21) Tauxe WN, Todd-Pokropek A: Determination of organ volume by single photon emission tomography (Letters). *J Nucl Med* **24**: 1197-1199, 1983
- 22) Hamilton GW, Williams DL, Caldwell JH: Frame rate requirements for recording time-activity curves by radionuclide angiography, In: Sorenson JA, ed, *Nuclear cardiology: selected computer aspects*. New York, Society of Nuclear Medicine, 1978, pp. 75-83
- 23) 木村元政: 心拍同期・非同期心プール Single Photon Emission Computed Tomography による左室拡張末期容積算出に関する基礎的ならびに臨床的検討. *核医学* **25**: 493-503, 1988
- 24) 津田隆俊, 久保田昌宏, 高橋貞一郎, 森田和夫: 心拍同期心プール断層法における位相解析——心ファントームによる基礎的検討ならびに臨床応用——. *核医学* **25**: 543-555, 1988
- 25) Henze E, Huang SC, Ratib O, et al: Measurement of regional tissue and blood radiotracer concentrations from serial tomographic images of the heart. *J Nucl Med* **24**: 987-996, 1983

Summary

Accuracy of the Measurements of Left Ventricular Volume and Ejection Fraction Determined from Multigated Blood Pool Tomography

Takashi YAMAGISHI*, Takami SASADA**, Junya MAEDA**, Takato KOHNO**,
Kensei YOSHINAGA**, Hiroshi OGAWA*, Yasuo MATSUDA*,
Masaharu OZAKI* and Reizo KUSUKAWA*

**Yamaguchi University Hospital, Ube, Japan
**Tokuyama Central Hospital, Tokuyama*

Accuracy of the measurements of LV volumes and ejection fraction determined from multigated blood pool tomography (MGBPT) was tested in 23 patients with various heart diseases who underwent cineventriculography (CV). Preliminary phantom studies showed that a 42% threshold value was found to provide the best relationship between measured and actual volumes ($r=0.99$, standard error of the estimate (SEE)=4.7 ml). The patients studies were performed at 16 frames/cardiac cycle at 18 angles over a 180° rotation for one minute per angle. Long-axis horizontal views were reconstructed. The numbers of LV voxel with counts above the threshold value were summed and multiplied by the known volume of a voxel.

Measurements of LV volume ($r=0.82$, SEE=29 ml), end-systolic LV volume ($r=0.83$, SEE=25 ml), end-diastolic LV volume ($r=0.68$, SEE=33 ml), and ejection fraction ($r=0.73$, SEE=10%) determined from MGBPT correlated well with those determined by CV. However, the ratios (Y) of the difference of the MGBPT-volume from the CV-volume to the CV-volume were decreased progressively and negatively as the CV-volumes (X) were smaller ($Y=38-3,996/X$). Thus, we conclude that the determinations of volume by MGBPT would lead to more errors with the smaller volumes.

Key words: Multigated blood pool tomography, Volume measurements.