

**Average Rotation 法による左室容量
の三次元経食道心エコー図計測：
臨床例でのDisk Summation 法との
比較検討**

**Three-Dimensional Transesophageal
Echocardiographic Measurement
of Left Ventricular Volumes Using
the Average Rotation Method：
Comparison With the Disk Sum-
mation Method**

川井 順一
吉田 清
穂積 健之
大川 真理
赤阪 隆史
田辺 一明
高木 力
山室 淳
八木登志員
盛岡 茂文
吉川 純一*

Junichi KAWAI, RDCS
Kiyoshi YOSHIDA, MD, FJCC
Takeshi HOZUMI, MD, FJCC
Makoto OOKAWA, MD
Takashi AKASAKA, MD, FJCC
Kazuaki TANABE, MD
Tsutomu TAKAGI, MD
Atsushi YAMAMURO, MD
Toshikazu YAGI, RDCS
Shigefumi MORIOKA, MD, FJCC
Junichi YOSHIKAWA, MD, FJCC

Abstract

Objectives. Three-dimensional (3-D) echocardiography accurately calculates left ventricular volumes without geometric assumptions. Conventional 3-D echocardiography using the disk summation method is limited in practical use because of the long analysis time. This study validated the average rotation method for rapid and accurate left ventricular volume measurement compared with the conventional disk summation method.

Methods. 3-D data acquisition using multiplane transesophageal echocardiography was performed in 13 patients. Left ventricular volumes and ejection fraction were calculated by the disk summation method with 20 parallel short-axis tomograms and by the average rotation method with 3, 6, 9 and 12 apical long-axis tomograms.

Results. 3-D left ventricular volumes and ejection fraction by the average rotation method in each subgroup of slice resolution had excellent correlation and close limits of agreement with those by the disk summation method. Intraobserver variability and interobserver variability were $\leq 11\%$. With the use of three component tomograms, analysis time required for left ventricular volume measurement by the average rotation method was ≤ 2 min.

Conclusions. Transesophageal 3-D echocardiography using the average rotation method is a clinically useful tool for accurate and rapid measurement of left ventricular volume and function.

J Cardiol 2001; 38(3): 153 - 161

神戸市立中央市民病院循環器センター 内科：〒650-0046 神戸市中央区港島中町4-6；*大阪市立大学大学院医学研究科 循環器病態内科学，大阪

Division of Cardiology, Kobe General Hospital, Kobe；* Department of Cardiovascular Medicine, Osaka City University Graduate School of Medicine, Osaka

Address for correspondence: KAWAI J, RDCS, Division of Cardiology, Kobe General Hospital, Minatojima Naka-machi 4 - 6, Chuo-ku, Kobe 650 - 0046

Manuscript received February 14, 2001；revised May 18, 2001；accepted May 21, 2001

RDCS = registered diagnostic cardiac sonographer

Key Words

Echocardiography, transesophageal(three-dimensional)
Ejection fraction Cardiac volume(measurement)

Diastole Systole

はじめに

三次元心エコー図法は、従来の断層心エコー図法と比較して、左室の形態仮定を必要とせず、正確な左室容量計測が可能である¹⁻¹⁰⁾。とくに経食道心エコー図法は、心内膜が良好に描出されるため、左室容量の三次元計測には有用である⁵⁾。三次元心エコー図法による左室容量計測に際しては、三次元データから再構築された多断面短軸画像の左室心内膜をトレースする disk summation 法(Fig. 1)が用いられてきた。しかし、disk summation 法は多断面の心内膜のトレースを必要とし、計測に時間を要する。一方、average rotation 法(Fig. 2)は、指定した断面数ごとに得られた多断面心尖部長軸画像の左室心内膜をトレースし、それらを回転軸(長軸)で一定角度ごとに回転させることによって左室容量計測を行う方法であり、従来の disk summation 法と比べて、計測に要する断面数の減少によって、

より簡便に左室容量計測が可能になることが予想される。

本研究の目的は、臨床例において、三次元経食道心エコー図法で average rotation 法を用いて計測された左室容量を、従来の disk summation 法から得られた左室容量と比較検討し、average rotation 法の臨床的有用性を検討することである。

対象と方法

1. 対 象

心電図上洞調律で心拍数が正常範囲内(52 - 94/min)である症例で、患者の同意のもとに診断を目的とした経食道心エコー図法を施行した僧帽弁逆流9例、陳旧性心筋梗塞2例、心筋疾患2例の計13例であった。

2. 使用装置

経食道心エコー図法は東芝製 SSA-380A で発信周波

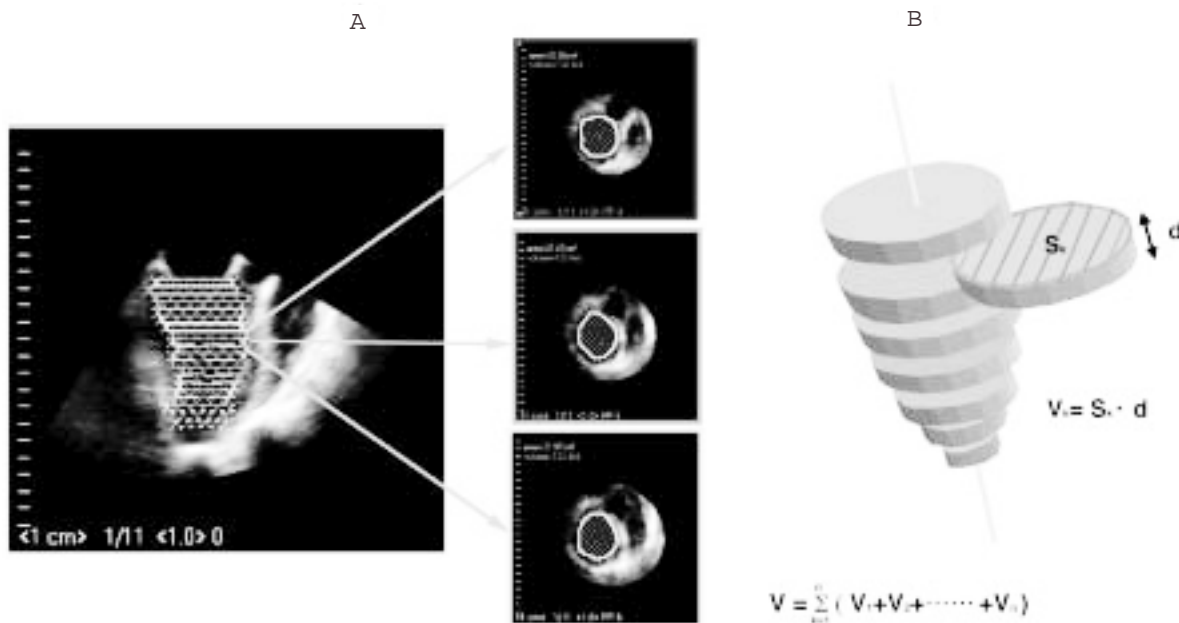


Fig. 1 Calculation of left ventricular volumes by the disk summation method

A: Endocardial borders were manually traced in each reconstructed short-axis cross-sectional image at end-diastole and endsystole.

B: Left ventricular volumes at enddiastole and endsystole were finally calculated by the disk summation method.

数5 MHzの経食道探触子を用いて行い、三次元画像構築システムはTomtec製Echo Scan装置で画像の取り込みを行い、同製Echo View装置で解析を行った。

3. 方法

20% リドカインビスカスおよび8% リドカインスプレーで咽頭の局所麻酔を行い、被検者を左側臥位にして経食道心エコー図法を施行した。経食道探触子を挿入し、心電図と呼吸の同期のもとで0 から180 まで、2 ごとに探触子の素子面を回転させ、計90断面の断面(二次元)画像を描出した¹⁾。Echo Scan装置を用いて各断面の二次元画像の取り込みを行った後、Echo View装置を用いて解析し、つぎに2つの方法により左室容量計測を行った。

1) 左室容量計測法

Disk summation法: 20短軸断面を描出し、各断面で左室心内膜をトレースし、拡張末期および収縮末期の左室容量を計測して駆出率を求めた。今回の検討ではスライス数を20として計測した。

Average rotation法: 心尖部長軸断面を基準断面とし、そこから指定した断面数(3, 6, 9および12)で長軸方向に分割して得られた各断面の左室心内膜をトレースし、それらを回転軸(長軸)で一定角度ごとに回転させることによって、拡張末期容量、収縮末期容量を計測し駆出率を求めた。

2) 解析法

以下に示す から の基準で解析を行った。

収縮末期と拡張末期の各フレームの決め方: 収縮末期は僧帽弁が開く直前のフレームを、拡張末期は僧帽弁が閉まる直前のフレームを用いた。

乳頭筋のトレースの仕方: 基本的には、乳頭筋を左室腔内に含めてトレースした。しかし、乳頭筋でも突出が小さく心筋と明瞭に区別しにくい場合には、それらを除外してトレースした。

僧帽弁輪部や左室流出路のトレースの仕方: 僧帽弁輪部は、弁輪間を直線でトレースした。また、左室流出路も心内腔に含めてトレースした。

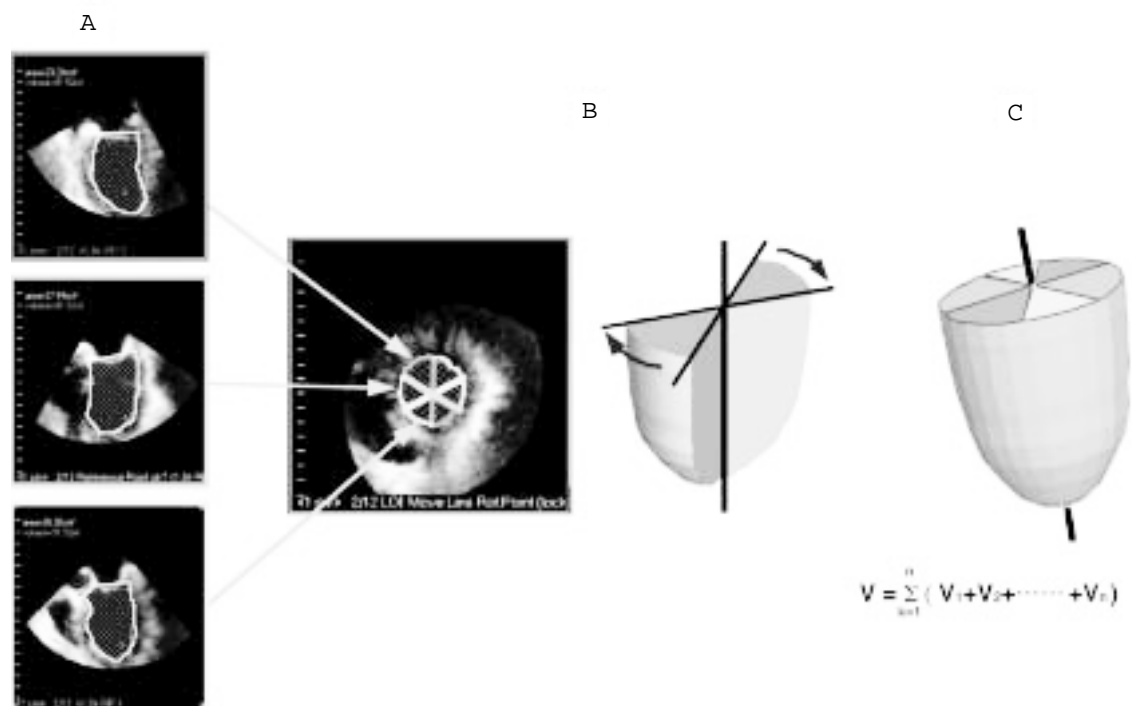


Fig. 2 Calculation of left ventricular volumes by the average rotation method
 A: Endocardial borders were manually traced in each reconstructed equispaced long-axis cross-sectional image at enddiastole and endsystole.
 B, C: Using equispaced long-axis cross-sectional images (ex. 3 slices) left ventricular cavity casts were reconstructed and left ventricular volumes at enddiastole and endsystole were calculated.

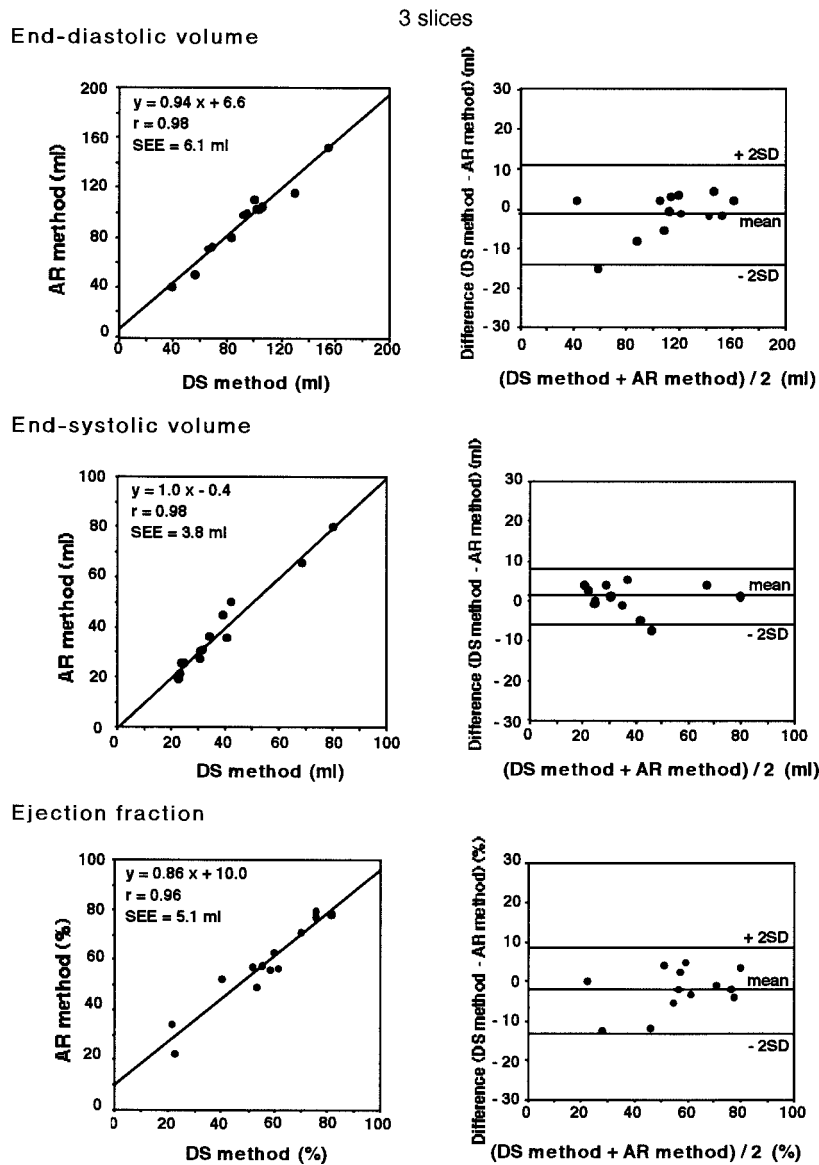


Fig. 3 Correlations between the disk summation method and average rotation method with 3 slices (left column) and limits of agreement analysis (right column). Differences between the disk summation method and average rotation method with 3 slices are plotted against the average value. AR = average rotation; DS = disk summation; SEE = standard error of estimate.

3) 検討項目

得られたデータから、以下の各項目について検討を行った。

Disk summation法と各断面での average rotation法との相関関係と一致度の検討: Disk summation法で計測された拡張末期容量, 収縮末期容量および駆出率をもとに, average rotation法で計測された3, 6, 9および12の各断面数についての拡張末期容量, 収縮末期容量および駆出率とをそれぞれ比較し, 相関関係と一致度を検討した。

Average rotation法での検者変動の検討: 熟練者で

ある検者が同一症例にて1週間後に, average rotation法で3, 6, 9および12の各断面数について再び容量計測を行い, 検者内変動を求めた。検者間変動については, 熟練者である検者が容量計測した後, 同一症例にて他の検者がaverage rotation法で3, 6, 9および12の各断面数についての容量計測を行った。

Average rotation法による各断面での計測時間の計測: Average rotation法による断面の設定から容量計測までの時間を求めるため13例の中から無作為に選んだ5例について計測時間を測定し, 3, 6, 9および12の各断面数について計測した。

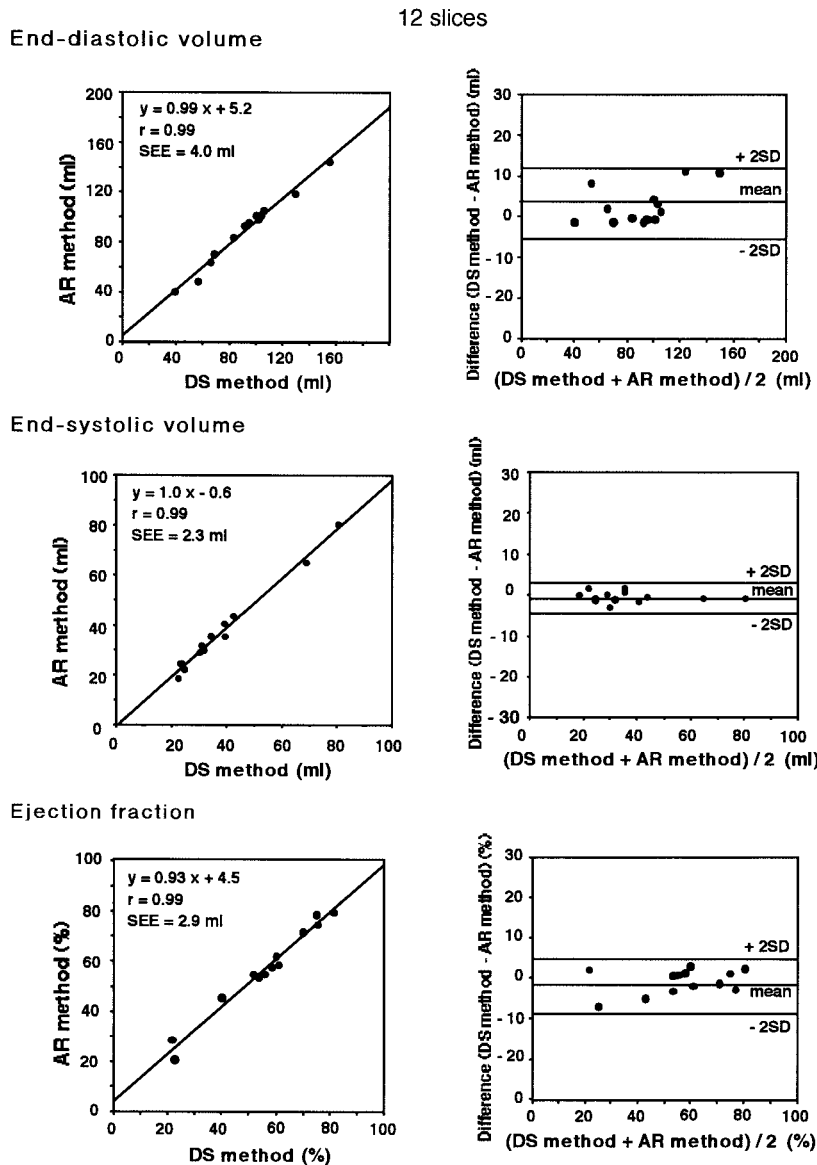


Fig. 4 Correlations between the disk summation method and average rotation method with 12 slices (left column) and limits of agreement analysis (right column). Differences between the disk summation method and average rotation method with 12 slices are plotted against the average value. Abbreviations as in Fig. 3.

4. 統計処理

数値は平均 ± 標準偏差で示した。相関は単回帰解析を、一貫性はBland-Altman法を用いて検討し、 $p < 0.05$ を有意差の判定とした。

結 果

1. Disk summation法と各断面でのaverage rotation法との相関関係と一貫性の検討(Figs. 3, 4)

Average rotation法による左室容量は、3、6、9および12の各断面数いずれから計測しても、disk summation法で求めた拡張末期容量、収縮末期容量および駆

出率と、極めて良好な相関($r \geq 0.96$)が認められた (Table 1)。Bland-Altman解析では、拡張末期容量、収縮末期容量について各断面数ともに良好な一貫性を示した (Table 2)。

2. Average rotation法での検者変動の検討

Average rotation法で計測された拡張末期容量、収縮末期容量および駆出率について3、6、9および12の各断面数とも検者内変動および検者間変動は、10%以下および11%以下とそれぞれ低値を示していた (Table 3)。

Table 1 Regression analysis of the disk summation method versus average rotation method

	Slice number	r value	Regression equation	SEE(ml)
EDV	3	0.98	$y = 0.94x + 6.6$	6.1
	6	0.98	$y = 0.92x + 5.8$	5.6
	9	0.98	$y = 0.93x + 4.7$	5.6
	12	0.99	$y = 0.99x + 5.2$	4.0
ESV	3	0.98	$y = 1.0x - 0.4$	3.8
	6	0.98	$y = 1.0x - 0.2$	3.4
	9	0.99	$y = 1.0x - 1.6$	3.1
	12	0.98	$y = 1.0x - 0.6$	2.3
EF	3	0.96	$y = 0.86x + 10.0$	5.1
	6	0.96	$y = 0.84x + 10.1$	4.6
	9	0.97	$y = 0.87x + 8.3$	4.2
	12	0.99	$y = 0.93x + 4.5$	2.9

EDV = end-diastolic volume ; ESV = end-systolic volume ; EF = ejection fraction. Other abbreviation as in Fig. 3.

Table 2 Limits of agreement analysis between the disk summation method and average rotation method

	Slice number	Mean difference(ml)	SD	Limits of agreement
EDV	3	- 0.9	± 6.1	± 12.2
	6	1.2	± 5.8	± 11.6
	9	1.7	± 5.8	± 11.6
	12	2.7	± 4.7	± 9.4
ESV	3	0.4	± 3.6	± 7.2
	6	0.3	± 3.3	± 6.6
	9	0.5	± 3.0	± 6.0
	12	0.1	± 2.2	± 4.4
EF	3	- 2.0	± 5.5	± 11.0
	6	- 1.3	± 5.3	± 10.6
	9	- 1.0	± 4.7	± 9.4
	12	- 0.8	± 3.0	± 6.0

Difference : Disk summation method - average rotation method. Abbreviations as in Table 1.

Table 3 Comparison of interobserver and intraobserver variability

	Slice number	Intraobserver variability(%)	Interobserver variability(%)
EDV	3	5	7
	6	5	7
	9	4	8
	12	2	7
ESV	3	10	11
	6	4	10
	9	4	8
	12	3	8
EF	3	6	4
	6	4	6
	9	4	6
	12	2	7

Abbreviations as in Table 1.

Table 4 Time for measuring left ventricular volumes

Slice number	Disk summation method	Average rotation method			
	20	3	6	9	12
EDV(sec)	287 ± 55	77 ± 11	118 ± 14	167 ± 28	216 ± 18
ESV(sec)	297 ± 31	68 ± 14	120 ± 29	160 ± 26	201 ± 46

Disk summation method vs average rotation method (slice number : 3, 6, 9, 12)
Abbreviations as in Table 1.

3. Average rotation法による各断面数での計測時間の計測

Average rotation法による各断面数ごとの断面設定から左室容量計測(拡張末期容量および収縮末期容量)までに要した時間は, 3断面で2分以内と短時間での計測が可能であった(Table 4).

考 察

三次元経食道心エコー図法において, average rotation法により3, 6, 9, 12断面から計測された拡張末期容量, 収縮末期容量および駆出率は, disk summation法による20断面からの計測値と良好な一致が示された. さらに, average rotation法による計測時間は, 3断面で2分以内と短時間での計測が可能であった.

三次元心エコー図法による左室容量計測は, 二次元心エコー図法と比べて, より良好な相関を示すことが報告されてきた^{1, 10)}. 経食道心エコー図法では心内膜が良好に描出されるため, 左室容量の三次元計測にはとくに有用である. 三次元データから再構築された多断面短軸画像の左室心内膜をトレースし, disk summation法により計測した左室容量が左室造影法による計測値に近似した値をとることは, すでに報告されている⁵⁾. しかし, disk summation法では多断面の心内膜トレースが時間を要するプロセスであった.

今回の検討で用いたaverage rotation法は, 指定した断面数ごとに得られた多断面心尖部長軸断面の左室心内膜をトレースし, それらを回転軸(長軸)で一定角度ごとに回転させることによって左室容量計測を行う方法である. 本法では, 左室心尖部から心基部まで回転軸に対して同じ分解能を持って三次元画像が構築できることから, 少ない断面数でもより簡便かつ正確に左室容量計測が可能であったと考えられる. すなわち, 20断面でのdisk summation法と3, 6, 9および12の各

断面でのaverage rotation法との相関関係は, 拡張末期容量, 収縮末期容量および駆出率のそれぞれで, 極めて良好であった($r \geq 0.96$). さらに, Bland-Altman解析によれば, 各断面ともに拡張末期容量, 収縮末期容量について, 両方法の間で良好な一致度が示された. Average rotation法での断面設定から容量計測までに要した時間では, 3断面による場合, 2分以内と短時間での左室容量計測が可能であった.

本研究の問題点

第1に, 対象が左室局所壁運動異常や左室形態の変形(左室瘤, S字状中隔など)を有する症例が少なかった点が挙げられる. このような症例でも正確な容量計測ができるかどうかについては, さらなる検討が必要である. ただし, イヌの心筋梗塞モデルでは, 正確な容量評価を行うにあたっては4-6断面の心尖部断層画像が必要であるという報告があり⁸⁾, 左室局所壁運動異常を伴うような症例では6断面, 9断面のトレースにより精度は高まると考えられる. その場合, average rotation法を用いれば2-3分での計測が可能である.

第2に, 左室容量計測に際しての問題点として, 用手的な心内膜トレースなどによって生じる誤差の問題²⁾, 経食道探触子を固定し回転させる装置であるステップモーターなどのメカニカルな問題⁶⁾, 経食道の挿入時の心拍数変化⁹⁾があるが, その中でも心内膜のトレースの仕方の違いによる誤差の影響が大きいとされている⁶⁾. 今回の検討では, 心内膜をトレースするために, 一定の基準を決めて行ったところ, average rotation法による拡張末期容量, 収縮末期容量および駆出率計測では, 3-12の各断面数とも, 検者間変動は11%以下, 検者内変動は10%以下と, それぞれ低値であり, 従来のdisk summation法による検者変動の

結果とほぼ同様¹⁰⁾であった。

今回の研究では経食道心エコー図法を用いた三次元画像データを用いたが、研究目的は三次元左室容量計測において、average rotation法をすでに確立した方法であるdisc summation法⁵⁾と比較検討することであった。今回の検討結果は、今後胸壁アプローチにより得られた三次元画像データからの左室容量三次元計測に

際して、average rotation法の適用における有益な基礎データとなるものと考えられる。

結 論

三次元経食道心エコー図法におけるaverage rotation法は、臨床例において左室容量計測および機能評価に有用な方法と考えられた。

要 約

目的: 三次元心エコー図法では、従来の断層心エコー図法と比較して、左室の形態仮定を必要とせず、正確な左室容量計測が可能である。しかし、三次元心エコー図法による左室容量計測に用いられてきたdisc summation法は、計測に時間を要するという問題がある。本研究の目的は、臨床例を用いて、三次元心エコー図法でaverage rotation法を用いて計測された左室容量を、従来のdisc summation法から得られた左室容量と比較検討し、average rotation法の臨床的有用性を検討することである。

方法: 経食道三次元心エコー図法を施行した13例において、三次元解析用装置により、average rotation法およびdisc summation法により左室容量計測を行った。Average rotation法では長軸断面を3, 6, 9および12断面でそれぞれ描出し、各断面で左室内膜をトレースすることによって、拡張末期容量、収縮末期容量および駆出率を求めた。Disk summation法では20短軸断面を描出し、各断面で左室内膜をトレースし、拡張末期容量、収縮末期容量および駆出率を求めた。また、検者内変動、検者間変動、average rotation法の計測時間についても検討した。

結果: Average rotation法による左室容量は、3, 6, 9および12断面いずれで計測しても、disc summation法での拡張末期容量、収縮末期容量および駆出率と、極めて良好な相関が認められた。検者内変動および検者間変動は、各断面とも11%以下であった。3断面を用いたaverage rotation法では、左室容量計測に要した時間は2分以内であった。

結論: 経食道三次元心エコー図法でのaverage rotation法は、臨床例において左室容量計測および機能評価に有用な方法と考えられる。

J Cardiol 2001; 38(3): 153 - 161

文 献

- 1) Gopal AS, Keller AM, Rigling R, King DL Jr, King DL: Left ventricular volume and endocardial surface area by three-dimensional echocardiography: Comparison with two-dimensional echocardiography and nuclear magnetic resonance imaging in normal subjects. *J Am Coll Cardiol* 1993; **22**: 258 - 270
- 2) Sapin PM, Schröder KD, Smith MD, DeMaria AN, King DL: Three-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular volume in vitro: Comparison with two-dimensional echocardiography and cineventriculography. *J Am Coll Cardiol* 1993; **22**: 1530 - 1537
- 3) Sapin PM, Schröder KD, Gopal AS, Smith MD, DeMaria AN, King DL: Comparison of two- and three-dimensional echocardiography with cineventriculography for measurement of left ventricular volume in patients. *J Am Coll Cardiol* 1994; **24**: 1054 - 1063
- 4) Nosir YFM, Fioretti PM, Vletter WB, Boersma E, Salustri A, Postma JT, Reijns AEM, Ten Cate FJ, Roelandt JRTC: Accurate measurement of left ventricular ejection fraction by three-dimensional echocardiography: A comparison with radionuclide angiography. *Circulation* 1996; **94**: 460 - 466
- 5) Hozumi T, Yoshikawa J, Yoshida K, Akasaka T, Takagi T, Yamamuro A: Three-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular volumes and ejection fraction using a multiplane transesophageal probe in patients. *Am J Cardiol* 1996; **78**: 1077 - 1080
- 6) Kupferwasser I, Mohr-Kahaly S, Stär P, Rupprecht HJ, Nixdorff U, Fenster M, Voigtländer T, Erbel R, Meyer J: Transthoracic three-dimensional echocardiographic volumetry of distorted left ventricles using rotational scanning. *J Am Soc Echocardiogr* 1997; **10**: 840 - 852
- 7) Buck T, Hunold P, Wentz KU, Tkalec W, Nesser HJ, Erbel R: Tomographic three-dimensional echocardiographic

J Cardiol 2001; 38: 153-161

- determination of chamber size and systolic function in patients with left ventricular aneurysm: Comparison to magnetic resonance imaging, cineventriculography, and two-dimensional echocardiography. *Circulation* 1997; **96**: 4286 - 4297
- 8) Tanabe K, Belohlavek M, Jakrapanichakul D, Bae RY, Greenleaf JF, Seward JB: Three-dimensional echocardiography: Precision and accuracy of left ventricular volume measurement using rotational geometry with variable numbers of slice resolution. *Echocardiography* 1998; **15**: 575 - 580
- 9) Kül HP, Franke A, Janssens U, Merx M, Graf J, Krebs W, Reul H, Rau G, Hoffmann R, Klues HG, Hanrath P: Three-dimensional echocardiographic determination of left ventricular volumes and function by multiplane transesophageal transducer: Dynamic in vitro validation and in vivo comparison with angiography and thermodilution. *J Am Soc Echocardiogr* 1998; **11**: 1113 - 1124
- 10) Nosir YFM, Lequin MH, Kasprzak JD, van Domburg RT, Vletter WB, Yao J, Stoker J, Ten Cate FJ, Roelandt JRTC: Measurements and day-to-day variabilities of left ventricular volumes and ejection fraction by three-dimensional echocardiography and comparison with magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 1998; **82**: 209 - 214