

2次元スペックルトラッキング法を用いた左室拡張機能評価の試み

— 僧帽弁輪変位から算出する僧帽弁輪速度 —

Trial of the left Ventricular Diastolic Function Using the Two Dimensional Speckle Tracking Method

福西 雅俊^{1,*} 佐藤 麻美¹ 高田 裕美子¹ 田村 悦哉¹ 後藤 浩実¹ 小野寺 利之²

Masatoshi FUKUNISHI^{1,*}, Asami SATOU¹, Yumiko Takada¹, Etsuya TAMURA¹, Hiromi GOTOU¹, Toshiyuki ONODERA²

¹ 社会福祉法人北海道社会事業協会帯広病院 (帯広協会病院) 臨床検査科, ² フィリップスエレクトロニクスジャパン株式会社

要 約

目的 2次元 (2D) スペックルトラッキング法 (2D-ST法) による組織運動弁輪変位 (TMAD) が測定できるようになり僧帽弁輪評価が可能となった。この僧帽弁輪変位から僧帽弁輪速度 (平均速度) を求め、TDI法による僧帽弁輪拡張期速度と比較し、角度依存性の有無についても検討した。

方法 心エコー検査が予定された洞調律患者 86 例を対象として 2D-ST法を施行し、角度依存性については 86 例中 37 例について行った。TMAD の値より Excel を用いて平均速度 TMAD e', TMAD a' を算出し、TDI法による e', a' および、これらより求めた E/e' について比較した。角度依存性は、心尖部四腔像と傍胸骨左縁四腔像より求めた TMAD e' および E/e' を比較検討した。

結果 TMAD e', TMAD a' の平均値は、TDI法による僧帽弁輪速度 e', a' の平均値より、中隔側、側壁側ともに低値だった ($p < 0.01$)。TMAD e' を用いた E/e' は、TDI法による E/e' より高値であった ($p < 0.01$)。また、側壁側の TMAD e' は中隔側の TMAD e' より高かった ($p < 0.01$) が、TMAD a' では、側壁と中隔の間に有意差を認めなかった。中隔側において、TDI法により求めた e', a' と TMAD e', TMAD a' は良好な相関を示し、特に e' において強い相関が得られた。側壁側では、e' において良好な相関を示したが、a' では相関が弱かった。TMAD e' を用いた E/e' と TDI法による E/e' の比較についても、中隔側および側壁側はともに良好な相関が得られ、角度依存性の検討では影響がない結果となった。

結論 2D-ST法による僧帽弁輪変位から算出した僧帽弁輪速度は、組織ドプラ法と同様の評価が可能であることが示され、今後、新たな左室拡張機能評価の一つとして有用である。

<Keywords> 組織運動弁輪変位 (TMAD) 2次元スペックルトラッキング法
僧帽弁輪速度

J Cardiol Jpn Ed 2013; 8: 118 – 126

はじめに

左心不全症例の約 40% の割合で、左室収縮機能障害を認めないか、あるいは認めてもごく軽度にとどまる症例が存在することが明らかとなり、その後左室拡張機能を正確に評価することが重要視されてから約 20 年あまりが経過する¹⁻³⁾。このような拡張機能障害が主病態の心不全は、diastolic heart

failure (DHF) あるいは heart failure with preserved ejection fraction (HFPEF) と呼ばれている⁴⁾。左室拡張機能評価方法には、組織ドプラ法 (TDI法) により求められた僧帽弁輪拡張早期速度 e', および左室流入血流との比である E/e' が用いられているが、ドプラ法を用いるため、心尖部画像が描出できない症例では評価できないという欠点がある。近年、2次元 (2D) スペックルトラッキング法 (2D-ST法) による組織運動弁輪変位 (tissue motion annular displacement: TMAD) が測定できるようになり、僧帽弁輪評価が可能と

*社会福祉法人北海道社会事業協会帯広病院 (帯広協会病院) 臨床検査科
080-0805 帯広市東 5 条南 9 丁目 2

2012 年 4 月 16 日受付, 2012 年 12 月 8 日改訂, 2012 年 12 月 12 日受理

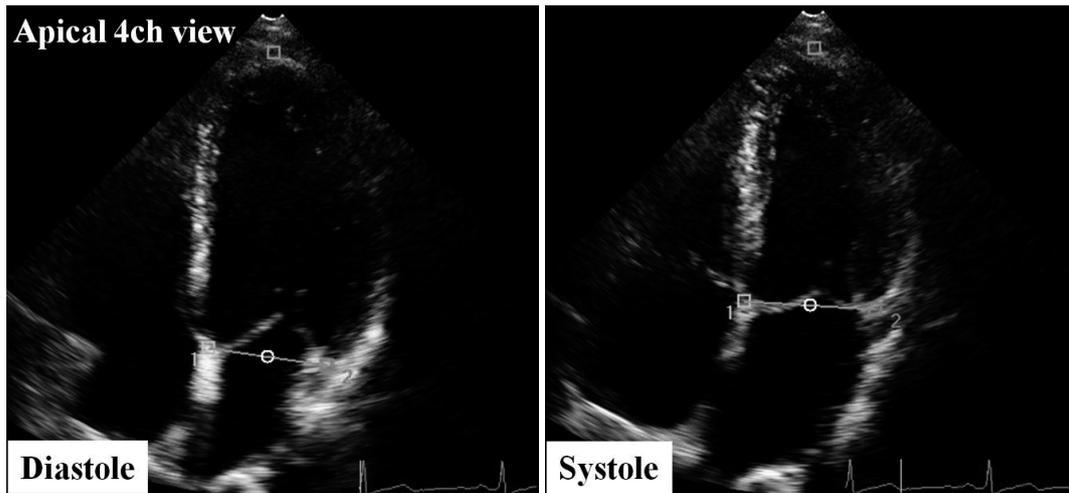


図1 組織運動弁輪変位 (TMAD) による僧帽弁輪変位.

なった⁵⁾. 今回われわれは、この僧帽弁輪変位から僧帽弁輪速度 (平均速度) を求め、TDI法による僧帽弁輪拡張期速度との比較検討を行い、また角度依存性の有無についても検討した。

方法

1. 対象

2011年2月から同年6月までに、本研究に同意され経胸壁心エコー検査が予定された洞調律患者86例を対象として、2D-ST法を施行した。角度依存性の検討については86例中37例について行った。これらの検討において、非洞調律例、開胸心臓手術の既往例、心嚢液貯留例、画質不良例は対象から除外した。また、本研究は施設内の臨床研究の倫理委員会によって承認された。

2. 組織運動弁輪変位 (TMAD)

使用超音波診断装置はPhilips Electronics Japan社製iE33、探触子はS5-1を使用した。描出した心尖部四腔像の動画を保存し、オフライン解析した。

TMAD解析ソフトには、Philips Electronics Japan社製QLABを使用した。保存した心尖部四腔像より2D-ST法を用いて心尖部外膜側に支点を置き、心室中隔側および側壁側の僧帽弁輪部をトラッキングすることで僧帽弁輪変位であるTMADを求めた (図1)。縦軸を僧帽弁輪の変位した距離

(displacement)、横軸を時間としTMADの時間変化をグラフ表示化した。これにより得られた結果はExcelに保存した。

TMADで求められた僧帽弁輪変位の値よりExcelにてDを僧帽弁輪変位、Tを時間として、式 $dD/dT = (D_i - D_{i-1}) / (T_i - T_{i-1})$ より平均速度を求めた。グラフ点線はTMADの時間変化、実線はTMADから算出した平均速度とし、同一グラフ上に波形表示した。TMADによる拡張早期波をTMAD e'、心房収縮期波をTMAD a'とし、心室中隔側、側壁側でそれぞれ求めた。心室中隔側、側壁側におけるTMAD e'とTMAD a'およびこれらを用いて左室流入血流拡張早期波E波との比であるE/e'を求めた。

3. その他の心エコー指標

心尖部左室長軸像でパルスドプラ法から左室流入血流を記録し、左室流入血流拡張早期波E波を求めた。さらに、心尖部四腔像を描出しTDI法を用いて心室中隔側と側壁側の僧帽弁輪拡張早期速度e'、僧帽弁輪心房収縮期速度a'を求め、E/e'を算出し、TMADにより得られた結果と比較した (図2)。

4. 角度依存性の検討

心尖部から描出した四腔断面像および胸骨左縁から描出した四腔断面像を描出し、両断面像についてそれぞれTMADから平均速度を求めた (図3)。

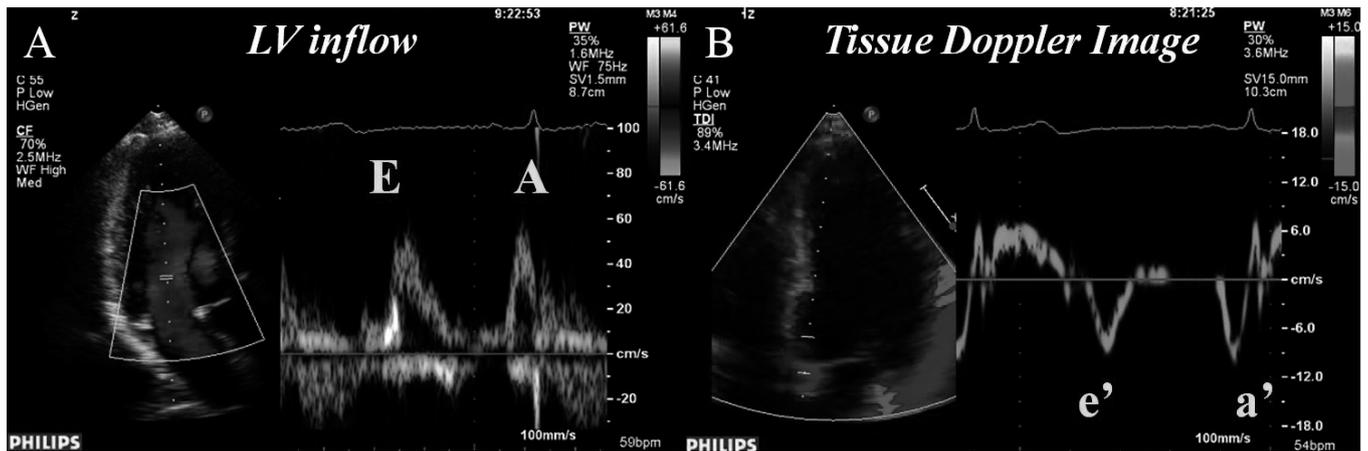


図2 左室流入血流波形とTDI法による僧帽弁輪速度波形の記録。
A：左室流入血流波形，B：僧帽弁輪速度波形。

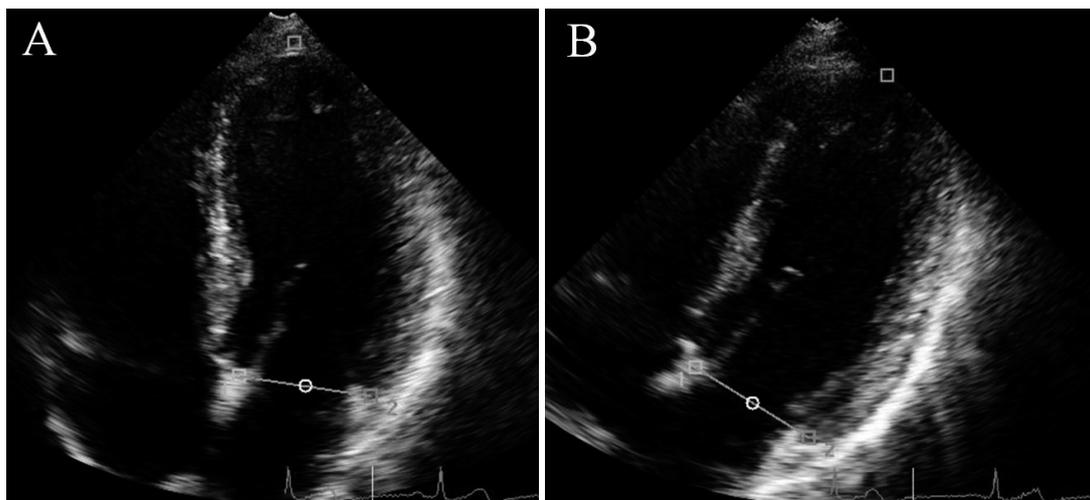


図3 角度依存性の評価。
A：心尖部四腔像，B：傍胸骨左縁四腔像。

5. 統計学的解析

数値は平均値±SDである。解析ソフトはStat View-J5.0を使用した。TDI法とTMAD法により求めた心室中隔、側壁の e' 、 a' 、 E/e' の値を比較することで、TMAD法によって得られる指標が左室拡張機能を反映するか否かを検討した。2群間の比較にはunpaired t-testと単回帰直線を用いた。また、心尖部から描出した四腔断面像の結果と胸骨左縁から描出した四腔断面像から得られる結果を比較し、TMAD法の角度依存性の有無について検討した。両群間の比較は、un-

paired t-testと単回帰直線を用い、いずれも $p < 0.05$ を有意とした。

結果

1. 対象

平均年齢は 64.4 ± 17.6 歳（男性43例，女性43例）であり、対象内訳は、虚血性心疾患16例，弁膜疾患13例，心筋症9例，高血圧心疾患13例，先天性心疾患1例，健常者34例で

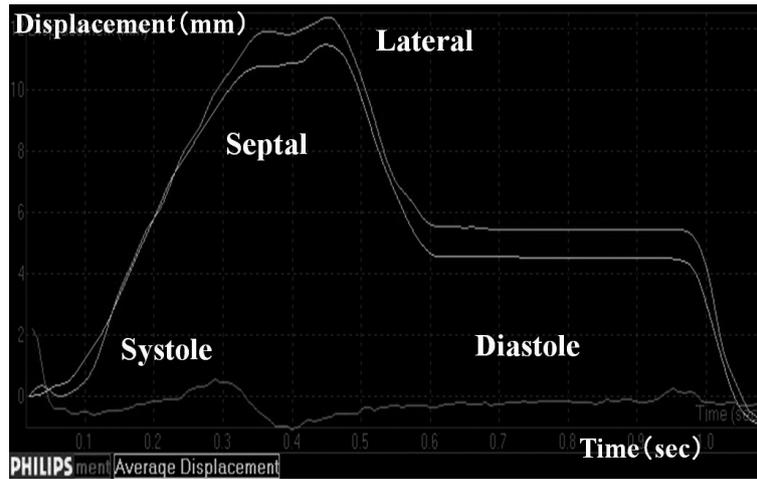


図4 TMADの時間変化。
縦軸：僧帽弁輪の変位した距離（displacement），横軸：時間。

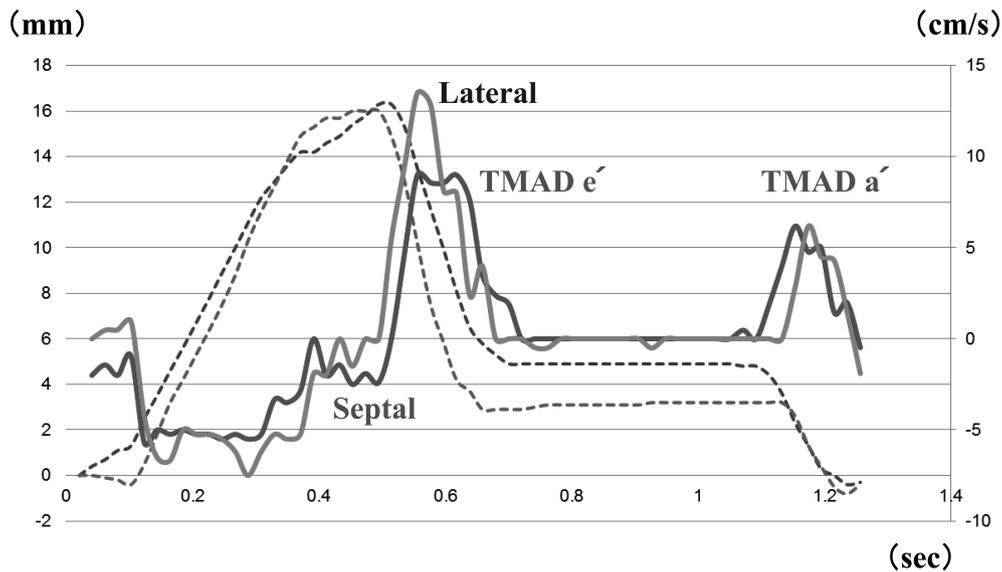


図5 僧帽弁輪変位を用いた平均速度の算出。
点線：僧帽弁輪変位，実線：僧帽弁輪変位から算出した平均速度波形。

あった(平均左室駆出率 $62.0 \pm 10.1\%$)。グラフ表示化した僧帽弁輪変位から平均速度を算出することで、組織ドプラ法と同様の波形が得られた(図4, 5)。TDI法とTMADより算出された平均速度を求める方法の両方法の結果が得られたのは、心室中隔側で全例であり、側壁側では46例であった。また、角度依存性の評価では、心室中隔側で37例、側壁側で27例において記録できた。

2. 組織運動弁輪変位 (TMAD)

左室流入血流波形の平均値は、E波 78.7 ± 19.8 cm/s、A波 79.1 ± 24.5 cm/sであった。

TMADより算出した僧帽弁輪速度 e' 、 a' の平均値は、TDI法による僧帽弁輪速度 e' 、 a' の平均値より、中隔側、側壁側ともに低値だった ($p < 0.01$)。TMAD e' を用いた E/e' は、TDI法による E/e' より高値であった ($p < 0.01$) (表1)。また、側壁側のTMAD e' は中隔側のTMAD e' より高かった ($p <$

0.01)が、TMAD a'では、側壁と中隔の間に有意差を認めなかった (p = 0.64).

3. その他の心エコー指標

中隔側において、TDI法により求めたe', a'とTMADより算出した平均速度e', a'は良好な相関を示し、特にe'において両方法に強い相関が得られた (図6). また、側壁側では、e'において良好な相関を示したが、a'では相関が弱かった (図

表1 中隔側、側壁側におけるTMADの平均速度とTDI法による僧帽弁輪速度および両方法を用いたE/e'の比較.

	TMAD	TDI	p value
Septal			
e' (cm/s)	5.0 ± 2.3	6.1 ± 2.4	<0.01
a' (cm/s)	6.7 ± 2.3	7.6 ± 2.0	<0.01
E/e'	18.8 ± 8.8	14.3 ± 5.6	<0.01
Lateral			
e' (cm/s)	7.1 ± 3.0	8.7 ± 3.1	<0.01
a' (cm/s)	6.9 ± 2.1	8.1 ± 2.1	<0.01
E/e'	14.1 ± 7.7	10.4 ± 4.7	<0.01

7). TMAD e'を用いたE/e'とTDI法によるE/e'の比較検討についても、中隔側および側壁側はともに良好な相関が得られたが、E/e'が10以上の症例においてややばらつきを認め、TMAD e'を用いたE/e'が高めとなる傾向を示した (図8).

4. 角度依存性の検討

角度依存性についての検討では、心尖部アプローチ、胸骨左縁アプローチで求めたTMAD e'およびTMAD a'を用いたE/e'の間に中隔側、側壁側ともに良好な相関が得られ、両断面像でのTMADから算出した平均速度は、角度依存性が少ない結果となった (図9A, B).

考 察

日常臨床では、簡便で非侵襲的に左室拡張機能を評価することができる心エコー検査は、非常に重要であり必要不可欠な手法である。しかしながら、現在行われている左室拡張機能評価は、TDI法を用いた僧帽弁輪拡張早期速度e'および左室流入血流との比であるE/e'が用いられているが、ドプラ法を原理としているためドプラ入射角度依存性の問題が挙げられる。

2D-ST法の普及に伴い多くの研究が行われ、主に局所心筋

— Septal —

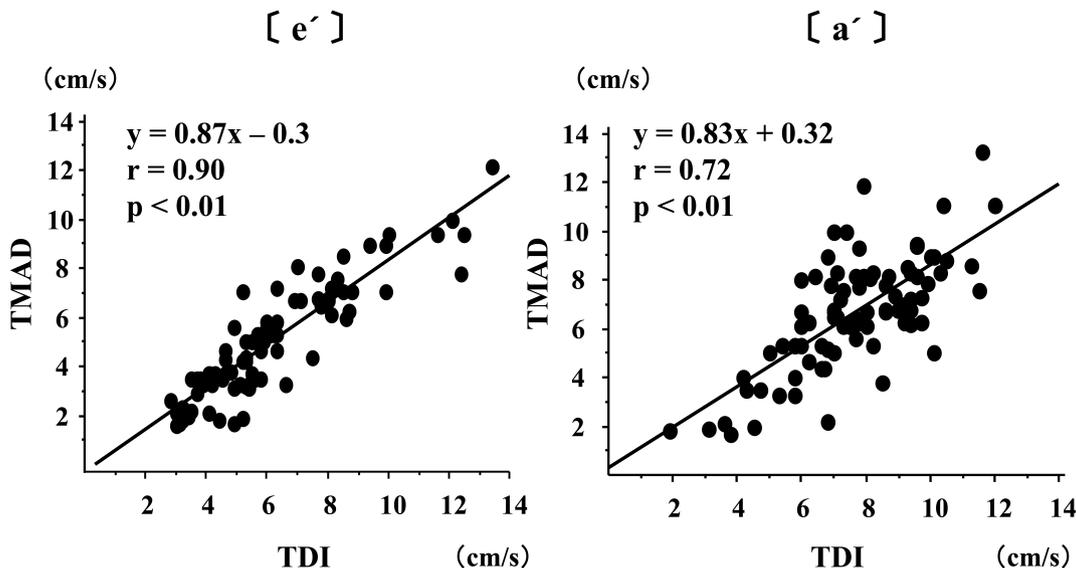


図6 TMADとTDI法による僧帽弁輪速度の比較 (中隔側). 中隔側において、TMADを用いた平均速度e', a'は、TDI法のe', a'と良好な相関を示した.

— Lateral —

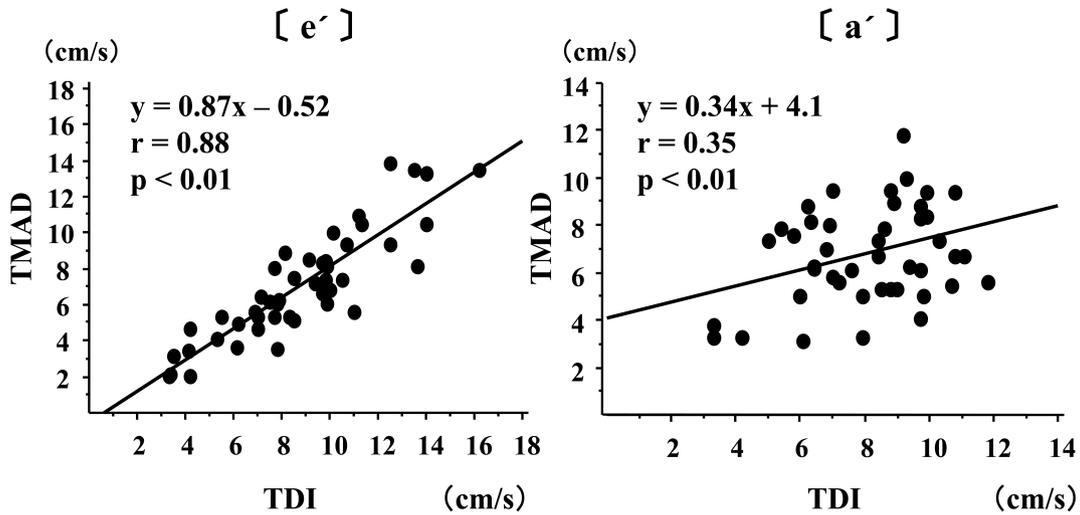


図7 TMADとTDI法による僧帽弁輪速度の比較（側壁側）。側壁側では、TMADの平均速度により求めた e' とTDI法の e' は良好な相関を示したが、 a' では相関が弱かった。

— E/e' —

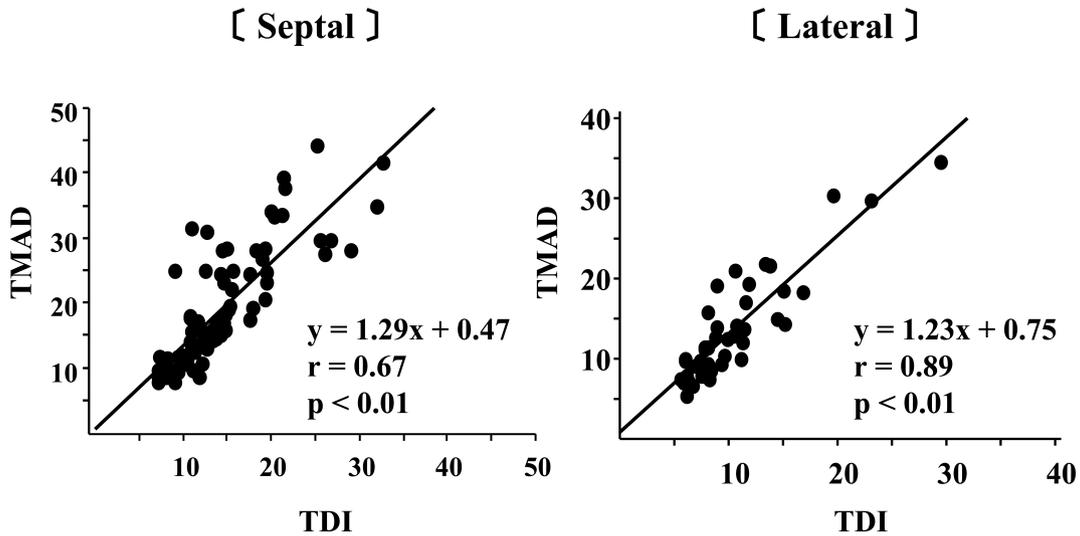
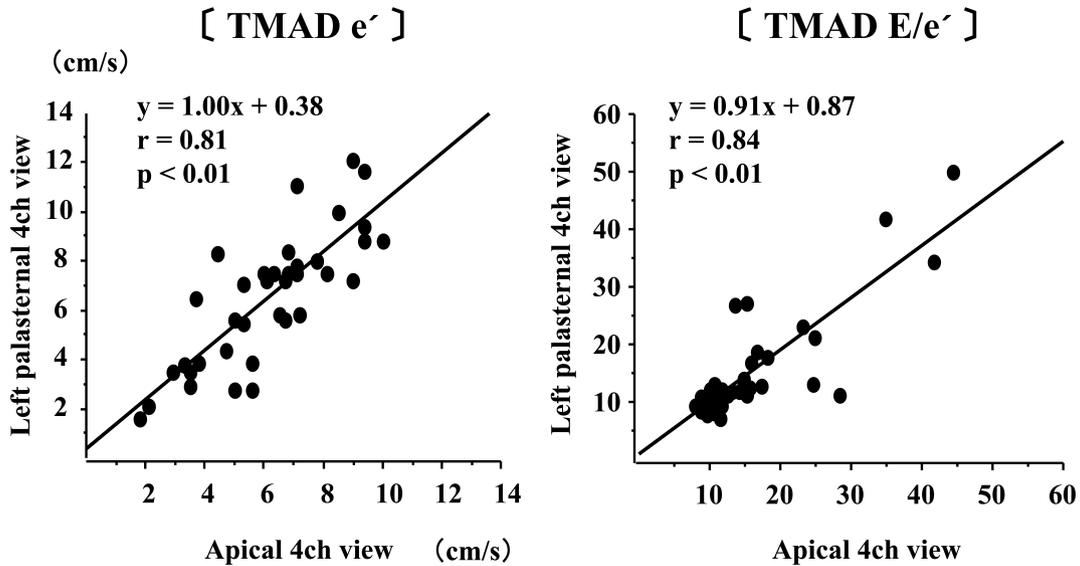


図8 TMADとTDI法による E/e' の比較。中隔側、側壁側の E/e' についても両方法は良好な相関を示したが、 $E/e' > 10$ でややばらつきを認めた。

評価についての報告がなされている⁶⁷⁾。近年、この2D-ST法の原理を用いることで僧帽弁輪変位を測定することが可能となった⁵⁾。今回新たな試みとして、2D-ST法を用いた僧帽

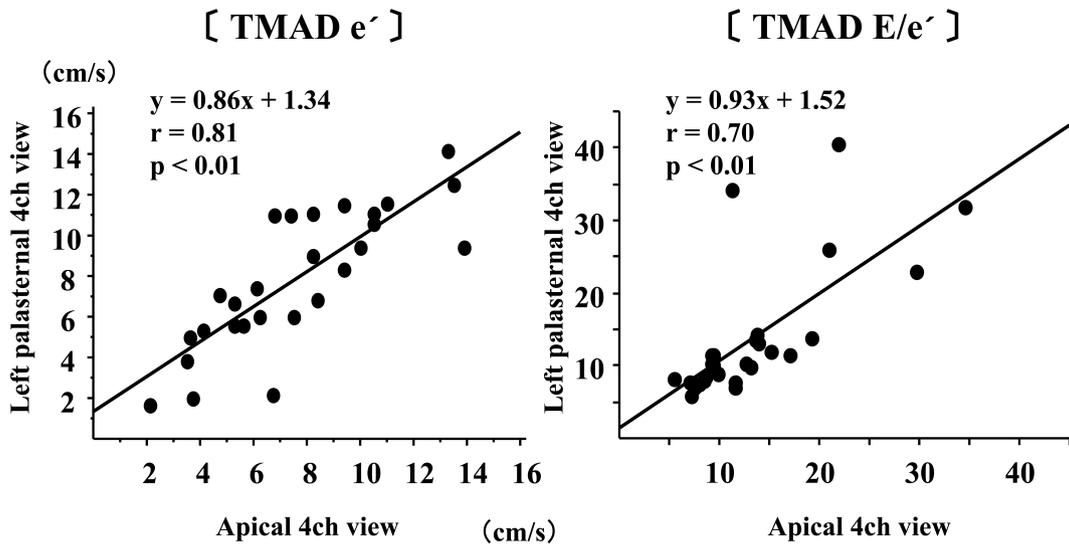
弁輪変位から演算を行い、速度を求めることで僧帽弁輪速度を算出することが可能であった。本来、移動距離から瞬時速度を求める際には微分処理を行うべきだが、心エコー検査に

— Septal —



A：中隔側。傍胸骨左縁四腔像を用いたTMADによるe'およびE/e'は、心尖部四腔像を用いたe'、E/e'と良好な相関を示した。

— Lateral —



B：側壁側。中隔側同様に、傍胸骨左縁四腔像を用いたTMADによるe'およびE/e'は、心尖部四腔像を用いたe'、E/e'と良好な相関を示した。

図9 心尖部四腔像と傍胸骨左縁四腔像からのe'、E/e'の比較。

はフレームレートの問題がある⁸⁾。しかし、超音波検査において心エコー検査におけるフレームレートは高く、そのフレーム間の差は小さいと考えられ、僧帽弁輪変位から僧帽弁

輪速度を算出できることは、同じ速度成分を評価しているTDI法と同様の評価をすることができると思われる。今回の検討では、従来から左室拡張機能評価に用いられているTDI

法とTMADより算出された平均速度を求める方法の比較を行った。両方法の間に、特に e' において良好な相関が得られたため、TMADの平均速度は左室拡張機能評価に用いることが可能と考えられた。しかし、TMADの平均速度は、TDI法に比べやや低値となる傾向を示し、 a' においては e' に比べやや相関が低下する傾向となった。この原因として、両方法の測定原理の違いが挙げられる。TDI法は、血流速度を測定する方法であったドプラ法を組織運動速度の計測に応用した手法であるのに対し、2D-ST法は断層像上の組織スペckルをパターンマッチング法によりフレームごとに追跡する手法である^{9,10}。僧帽弁輪の心周期による動態の変化は、症例により複雑な動きを呈する症例もあるため、両方法による僧帽弁輪速度の値に違いが生じたものと考え¹¹。今回、特に側壁側の a' において相関がやや低下する結果となった。通常、中隔側に比べ側壁側の方が心周期における僧帽弁輪速度、移動距離はともに大きい。TDI法は、その測定方法からサンプルボリュームの位置は固定となり、サンプルボリュームの幅は血流の測定時よりも広く設定することが推奨されている。このため、側壁側では心周期により僧帽弁輪の動きのドプラ信号のみならず、心周期における左室や左房の動きのドプラ信号も含まれた波形として表示されることが、両方法の測定原理に加え、原因と考えられた。

左室拡張機能評価には、左室流入血流波形、肺静脈血流波形、組織ドプラ法、左房容積の評価などがあるが、現在では、ヨーロッパ心臓病学会が提唱しているHFPEFの診断フローチャートの心エコー検査による第一評価項目として E/e' が挙げられている¹²。

今回の E/e' についての検討においても両方法に良好な相関が得られたため、TDI法による E/e' と同様にTMADを用いた E/e' を計測することで、TDI法と同様の左室拡張機能評価を行うことができると考える。また、今回の検討では E/e' について良好な相関が得られたが、 $E/e' > 10$ である左室拡張機能低下例については、ややばらつきを認めた。この理由として、僧帽弁輪速度の問題が挙げられる。左室拡張機能低下例では僧帽弁輪速度が低下しているため、左室流入血流拡張早期波であるE波との比率で評価している E/e' では、両方法の e' の測定値による誤差が E/e' の誤差を大きくする可能性が示唆された。

従来、僧帽弁輪速度の評価にはTDI法が用いられるが、ドプラ法の原理のためドプラ入射角度依存性の問題があり、心

尖部が描出できない症例ではTDI法を用いた左室拡張機能評価ができないという欠点がある。しかしながら、本手法は2D-ST法を用いた僧帽弁輪の変位を評価し平均速度を算出しているため、角度依存性の影響が少ない。今回の検討においても、心尖部四腔像から求めたTMAD e' 値と、傍胸骨四腔像から求めたTMAD e' 値は良好な相関が得られたため、心尖部四腔像の描出が困難な症例においても僧帽弁輪速度の評価をすることが可能であることが示された。この手法は心室中隔側の僧帽弁輪のみならず、側壁側の僧帽弁輪においても同心拍で評価することが可能であり、また経食道心エコー検査を行う際にも評価できると思われる。

本手法による僧帽弁輪速度の評価は簡便であり、角度依存性が少なく、心尖部四腔像の描出が難しい症例に対しても左室拡張機能評価を行うことが可能であり、今後の新しい手法の一つとして有用であると考え。

結 論

2Dスペckルトラッキング法による僧帽弁輪変位から算出した僧帽弁輪速度は、組織ドプラ法と同様の評価が可能であることが示された。今後、新たな左室拡張機能評価の一つとして有用である。

文 献

- 1) Nishimura RA, Appleton CP. "Diastology": beyond E and A. *J Am Coll Cardiol* 1996; 27: 372-374.
- 2) Zile MR, Baicu CF, Gaasch WH. Diastolic heart failure—abnormalities in active relaxation and passive stiffness of left ventricle. *N Engl J Med* 2004; 350: 1953-1959.
- 3) Senni M, Tribouilloy CM, Rodeheffer RJ, Jacobsen SJ, Evans JM, Bailey KR, Redfield MM. Congestive heart failure in the community: a study of incident cases in Olmsted County, Minnesota, in 1991. *Circulation* 1998; 98: 2282-2289.
- 4) Owan TE, Hodge DO, Herges RM, Jacobsen SJ, Roger VL, Redfield MM. Trends in prevalence and outcome of heart failure with preserved ejection fraction. *N Engl J Med* 2006; 355: 251-259.
- 5) DeCara JM, Toledo E, Salgo IS, Lammertin G, Weinert L, Lang RM. Evaluation of left ventricular systolic function using automated angle-independent motion tracking of mitral annular displacement. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; 18: 1266-1269.
- 6) Amundsen BH, Helle-Valle T, Edvardsen T, Torp H, Crosby J, Lyseggen E, Støylen A, Ihlen H, Lima JA, Smiseth OA, Slørdahl SA. Noninvasive myocardial strain measurement by speckle tracking echocardiography; validation

-
- against sonomicrometry and tagged magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 789-793.
- 7) Reant P, Labrousse L, Lafitte S, Bordachar P, Pillois X, Tariosse L, Bonoron-Adele S, Padois P, Deville C, Roudaut R, Dos Santos P. Experimental validation of circumferential, longitudinal, and radial 2-dimensional strain during dobutamine stress echocardiography in ischemic conditions. *J Am Coll Cardiol* 2008; 51: 149-157.
 - 8) 馬田俊雄. 「エクセル」による実験データの微分, 積分計算. 九州大学応用力学研究所所報 1999; 85: 55-62.
 - 9) Donovan CL, Armstrong WF, Bach DS. Quantitative Doppler tissue imaging of the left ventricular myocardium: Validation in normal subjects. *Am Heart J* 1995; 130: 100-104.
 - 10) Leitman M, Lysyansky P, Sidenko S, Shir V, Peleg E, Binenbaum M, Kaluski E, Krakover R, Vered Z. Two-dimensional strain: a novel software for real-time quantitative echocardiographic assessment of myocardial function. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; 17: 1021-1029.
 - 11) Daimon M, Saracino G, Gillinov AM, Koyama Y, Fukuda S, Kwan J, Song JM, Kongsarepong V, Agler DA, Thomas JD, Shiota T. Local dysfunction and asymmetrical deformation of mitral annular geometry in ischemic mitral regurgitation: a novel computerized 3D echocardiographic analysis. *Echocardiography* 2008; 25: 414-423.
 - 12) Paulus WJ, Tschöpe C, Sanderson JE, Rusconi C, Flachskampf FA, Rademakers FE, Marino P, Smiseth OA, De Keulenaer G, Leite-Moreira AF, Borbély A, Edes I, Handoko ML, Heymans S, Pezzali N, Pieske B, Dickstein K, Fraser AG, Brutsaert DL. How to diagnose diastolic heart failure: a consensus statement on the diagnosis of heart failure with normal left ventricular ejection fraction by the Heart Failure and Echocardiography Association of the European Society of Cardiology. *Eur Heart J* 2007; 28: 2539-2550.