

2D ティッシュトラッキングの臨床応用

Clinical Application of the Two-Dimensional Tissue Tracking Technique

田畑 智継¹⁾ Tomotsugu Tabata
長野 智章²⁾ Tomoaki Chouno

山田 博胤¹⁾ Hirotsugu Yamada
森 修³⁾ Osamu Mori

¹⁾徳島大学大学院医学研究科 臓器病態治療医学

²⁾株式会社日立メディコ 技術研究所

³⁾株式会社日立メディコ US 戦略本部

局所心筋収縮能を評価する方法である従来の組織ドプラ法は、心臓全体の運動、牽引、ドプラ角度依存性などの問題を有していた。近年用いられているストレインイメージング法ではそれらの問題が解決されつつあるが、ドプラ速度情報を基本にしているため、角度補正に限界があった。近年開発された断層組織トラッキング(2DTT)法は、パターンマッチングという手法を用いて組織追跡をする方法であり、角度依存性にとらわれることなく心筋長の変化を解析できる。左室壁厚変化、左房容積の計測、心臓の回転運動などにおいて臨床応用できる可能性がある。

Conventional tissue Doppler imaging could evaluate regional myocardial contractility, whereas there have been problems such as cardiac translation, tethering and Doppler angle dependency. The tissue strain imaging has overcome those problems, however, there was a limitation in the Doppler angle correction because it was based on calculating Doppler velocities. The newly developed Two-Dimensional Tissue Tracking (2DTT) technique can trace regional myocardial tissue using pattern matching method regardless of Doppler velocity information. The 2DTT has a capability to clinically evaluate left ventricular % wall thickening, left atrial volume, cardiac torsions and so on.

Key Words: Two-Dimensional Tissue Tracking, Strain, LV Wall Thickening, LA Volume, Cardiac Torsion

1. 従来の左室収縮能評価法

心エコー・ドプラ法を用いた左室収縮能の評価には、左室内径短縮率(FS: fractional shortening)および左室駆出率(EF: ejection fraction)が古典的に用いられてきた(表1)。これらの方法は、臨床で簡便に行える方法として現在でも有用である。しかし、FSは左室の一断面における内径の変化を見たもので、左室全体を評価したものではない。またEFは左室全体のポンプ機能を見るものであるが、局所心筋自体の収縮力を評価しているのではない。一方、左室収縮能を自動的かつ客観的に評価する方法として、CK(Color kinesis、図1)

表1: 従来の左室収縮能評価法の利点と限界

方法	特徴
FSおよびEF	心内膜面の運動が基本
組織ドプラ法	局所心筋収縮能 心臓全体の運動の影響 牽引の影響 目標のサンプルボリュームからの逸脱 角度依存性の問題
Strain Imaging法	組織追跡機能 速度をもとにした計算 角度補正に限界

法やAQ(Automatic quantification、図2A)法が考案されたが、心内膜面の同定に問題があり、一般に普及するに至らなかった。いずれにしても、左室の心内膜面の運動を観察しているのであって、壁厚の変化は評価の対象ではない。

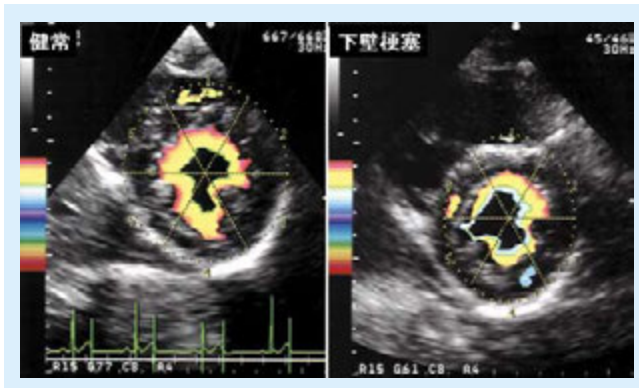


図1：Color kinesis法を用いた左室収縮能の評価
健常では収縮期の心内膜が良好に運動していることがわかるが、下壁梗塞例では下壁領域の色付けが不良で、心内膜運動が低下していることが示されている。

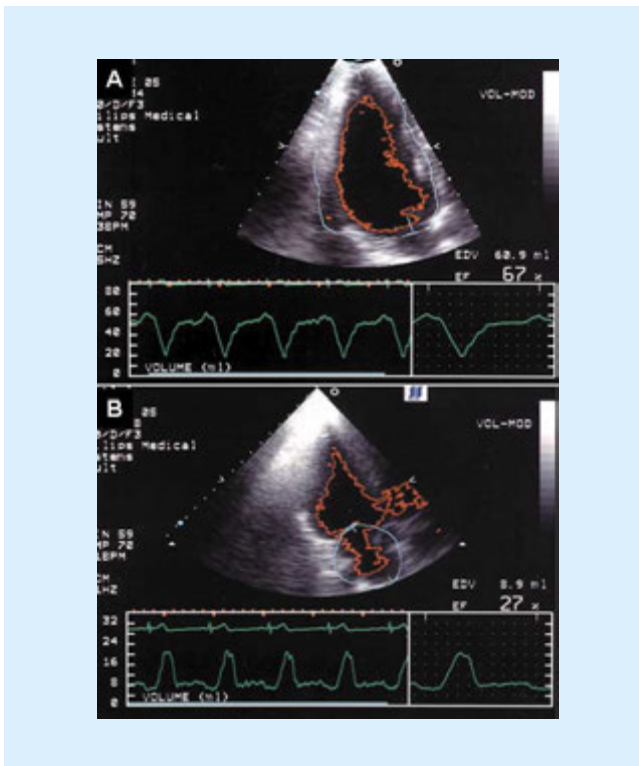


図2：Automatic quantification法を用いた左室(A)および左房(B)容積の評価
心内膜面の自動トレースによる容積変化曲線の構築を行っているが、内膜面の同定に問題がある。

2. 組織ドブラ法の限界

組織ドブラ法は局所心筋の運動速度を評価する目的で開発され、速度情報に色付けしてカラードブラ表示した壁運動の視覚的評価(図3左)やスペクトラム表示によるパルス組織ドブラ法を用いた心筋速度の定量的評価が試みられた。しか

しながら、この方法は、心臓全体の前後方向への運動(translation)や他の部位による牽引(tethering)の影響を受けること、そして組織追跡機能が無いため目標がサンプルボリュームから逸脱するという問題を有していた。またドブラ角度依存性のために、計測可能な部位が限定されていた。そこで開発されたのがストレインイメージング(TSI：Tissue Strain Imaging)法である。

3. TSI法の利点と限界

TSI法では速度情報をもとにした組織追跡機能とドブラ角度補正機能(図3右)を有し、心筋組織の変形(ストレイン)および変形率(ストレインレート)を解析することが可能である。ストレインレートは心筋のある二点間の速度勾配に等しいことから、心臓のtranslationやtetheringの影響を除外して、心筋壁厚や心筋長の評価が可能である。このため、ドプタミン負荷心エコー法では虚血¹⁾やバイアビリティ²⁾の評価に活用されている。TSI法によって、従来の組織ドブラ法が抱えていた種々の問題点が解決され、かつ心内膜面の評価ではなく、壁厚変化の評価ができることは、虚血性心疾患の診断においてFSやEFに比べるとアドバンテージを有すると考えられる。ただ、本法によって得られる指標があくまで速度をもとにした計算によって導かれることから、ドブラ角度補正にも限界があり、2時および10時の方向は評価に適さない。また心筋の回転運動の問題や短軸あるいは長軸方向の一次元的評価であることなどから、結果の解釈に異論が生じ、臨床応用の可否について盛んに討議されているところである。

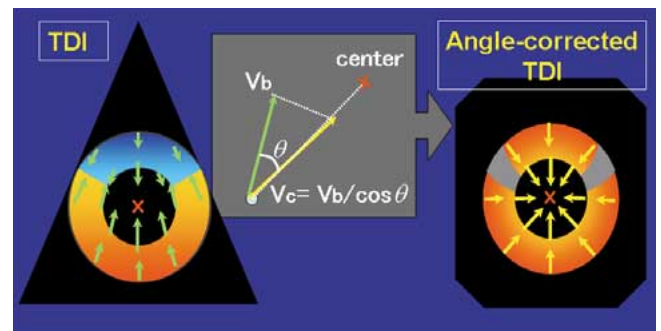


図3：ドブラ角度補正をしない従来の組織ドブラ法(TDI：左)および角度補正を行ったTSI法(右)によるカラー組織ドブラ断層図のシエマ

従来のTDI法ではプローブに対する速度情報(V_b)がカラー表示されていたが、TSI法では収縮中心(center)に対する角度 θ で速度情報を補正している(V_c)。しかし、2時および10時方向の角度補正には限界がある。

4. 断層組織トラッキング法の登場

(1) 断層組織トラッキング法による組織追跡の理論

最近、日立メディコから超音波断層上の画像情報(speckle)をもとに組織を追跡する断層組織トラッキング(2DTT：2 Dimensional Tissue Tracking)法が開発され、注目を集めている。本技術の自動追跡処理は、パターンマッチングという

手法を用いて組織を追跡する(図4)。これは最初のフレームで指定した点を含む小さな領域に最も近いパターンを次のフレームから探し出す方法である。まず、追跡したい部位を指定し、次に指定した心筋部位を含む小さな領域を切り出す。そして、切り出した領域に最も近い心筋輝度の分布パターンを持つ領域を次のフレームから探し出す。探索処理は相関演算を用いて行われ(図5)、追跡処理を繰り返す行うことで画像上の点が移動する座標がわかる。追跡によって判明した画像上の2点の時系列座標から2点間距離が求まる。さらに、この距離の変化から各組織間のストレインやストレインレートを求めることができる。



図4：パターンマッチング法

パターンマッチング法では、追跡点を含む画像の一部を切り出し、最も近いパターンを次のフレームから探し出して、追跡点がどこに移動したかを計算する。

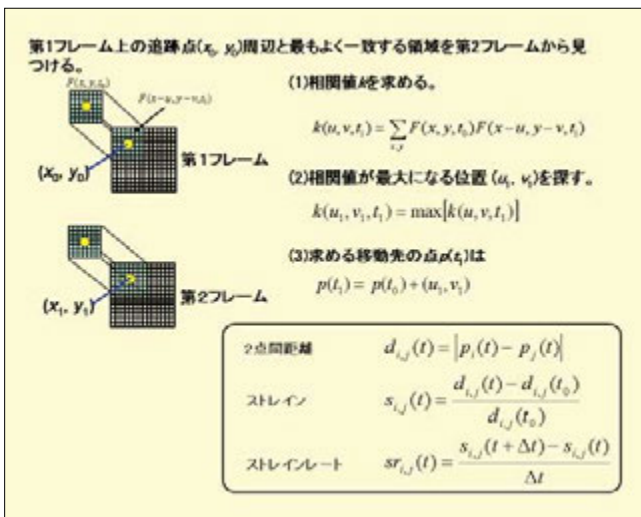


図5：パターンマッチング法における相関演算

追跡処理を繰り返す行うことによって判明した画像上の2点の時系列座標から2点間距離が求まる。さらに、この距離の変化から各組織間のストレインやストレインレートを求めることができる。

(2) 2DTT法の検証

2DTT法で、心内膜と心外膜に2点を設定して追跡させれば、半径方向の心筋ストレインやストレインレートの評価が可能であると考えられる。われわれは、まず計算機を用いたセクタスキャンBモード像のシミュレーションによって作成したドーナツ形の数値ファントムを用いて検証を行った(図6左)。ファントムの内面に複数組の追跡点を設定し、新開発の日立メディコ製解析ソフトウェアe-Tool[®] viewによる組織追跡を行い、内径の変化を理論上の数値と比較した。図6右上段に内径の変化を、中段に内径の初期値に対する変化率(ストレイン)を示している。その結果、いずれの内径もストレインも収縮期に一樣に減少、拡張期には増加を示し、理論上の値とほぼ一致した。また犬を用いた動物実験³⁾では、2DTT法を用いて計算したストレイン値は、Sonomicrometryで計測したストレイン値とよく一致した(図7)。これらの結果から、パターンマッチング法による組織追跡の精度が信頼するものであることが示された。

この方法は、角度やドプラ情報に依存することなく簡便に行いうる方法として期待されているが、いくつかの注意点がある。まず、一定数以上のハイフレームレートが得られる範囲内で適切な画角を設定し、断層像を鮮明に記録することが第一条件である。そして、適正なゲイン設定が必要で、計測時には追跡点を不要な心内構造物をさけて設定する必要がある。

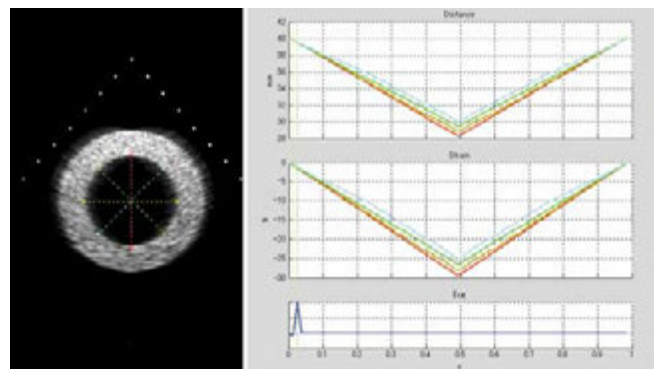


図6：数値ファントムを用いた2DTT法の検証

ファントムの内面に複数組の追跡点を設定し、内径の変化を理論上の数値と比較した。上段に内径の変化(Distance)を、中段に内径の初期値に対する変化率(Strain)を示している。いずれの内径もストレインも収縮期に一樣に減少、拡張期には増加を示し、理論上の値とほぼ一致した。

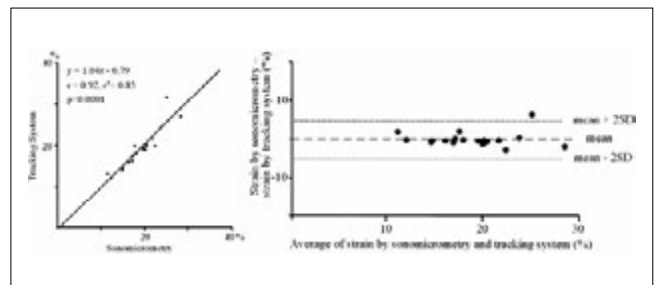


図7：Sonomicrometryおよび2DTT法(Tracking System)で求めたストレインの関係

犬を用いた実験では両者の間に有意な正相関を認め、両者はよく一致した³⁾。

(3) 2DTT法による左室収縮能の評価

2DTT法の特徴として、長軸断面でも半径方向の心筋長の変化を解析できること(図8)と角度を心配する必要が無いので、2時や10時の方向でも計測が可能であることである。正常例の短軸断面における評価(図9、上段)では、AからDの4ヶ所の壁厚が、いずれも収縮期に増加する正のストレインプロファイルが描かれている。注目すべきはTSI法で評価不能であったBおよびDにおいても同様の結果が得られていることである。一方、前壁中隔梗塞(図9、下段)では、前壁中隔に相当するAおよびBの壁厚は収縮期にむしろ減少する負のストレインとして描かれている。

図10は大動脈弁狭窄症により、著しい左室肥大をきたした症例である。左室後壁において拡張末期に心外膜(A)、心内膜(C)およびそれらの中点付近(B)に追跡点を設定してストレインプロファイルを描かせた。その結果、左室後壁をトータルで見た場合、AC間の収縮期壁厚増加(wall thickening)

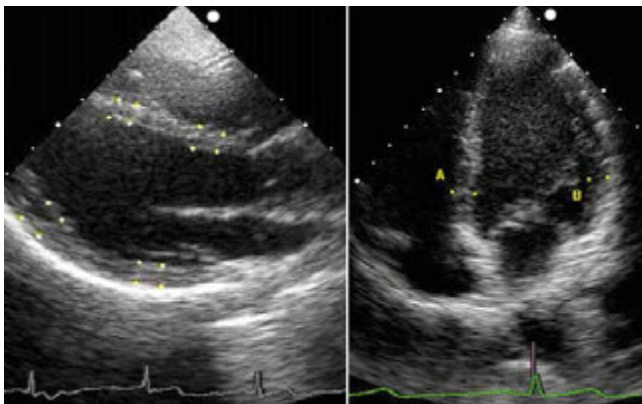


図8：2DTT法の解析例

2DTT法では左室長軸断面でも半径方向の心筋長の変化を解析できる。

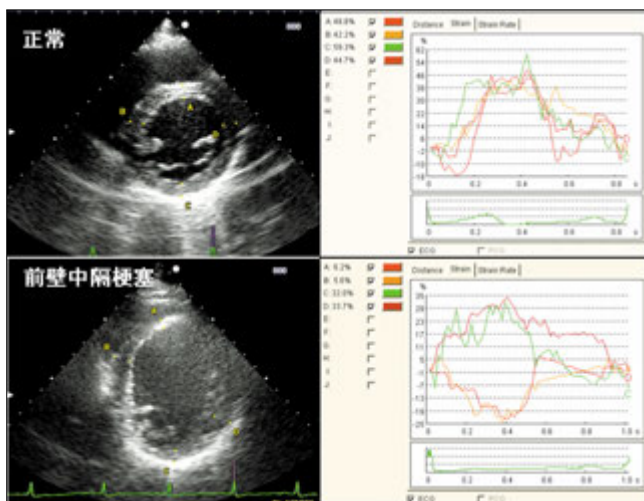


図9：正常および前壁中隔梗塞例における左室短軸断面を用いたストレインの評価

正常例(上段)では、AからDの4ヶ所の壁厚が、いずれも収縮期に増加する正のストレインプロファイルが描かれている。前壁中隔梗塞例(下段)では、AおよびBの壁厚は収縮期にむしろ減少する負のストレインとして描かれている。角度を心配する必要が無いので、2時や10時の方向でも計測が可能である。

を示すストレイン値は42.6%と計算された。これに対し心内膜側(BC間)と心外膜側(AB間)のwall thickeningを分けて評価すると、心内膜側のストレイン値が113.4%と非常によくthickeningしているが、心外膜側のストレイン値は18.5%でほとんどthickeningを示しておらず、肥全心の収縮において心内膜側が大きく寄与していることがわかる。パターンマッチング法では、僧帽弁輪や心内膜、心外膜を追跡することは比較的容易であるが、心筋中部のspeckleを追跡するにはやや問題がある。心内膜側と心外膜側を分けて評価することは、肥全心や虚血心のwall thickeningを詳しく評価するうえで重要であるが、この場合、TSI法との併用もひとつの選択肢である。

(4) 2DTT法による左室回転運動の評価

心臓は複雑な心筋線維の複合体で可動性の臓器であるため、短軸方向あるいは長軸方向への一次元の評価で十分であるとは言い難い。正常な心臓は、収縮期には心尖部付近で時計方向、心基部付近で反時計方向の回転運動(rotation)を行っている(図11)。このため、心臓全体ではそれらの差に相当する捩れ(torsion)を生じている。2DTT法で追跡点の運動を

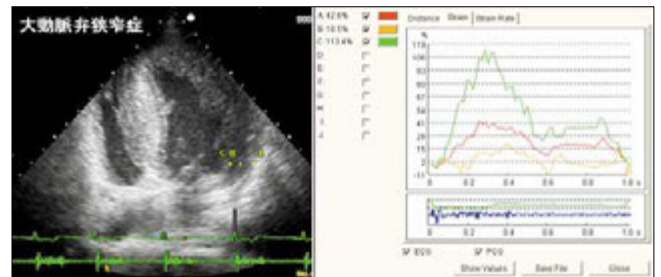


図10：大動脈弁狭窄症例のストレイン

左室後壁において拡張末期に心外膜(A)、心内膜(C)およびそれらの中点付近(B)に追跡点を設定してストレインプロファイルを描かせた。その結果、心内膜側(BC間)のストレイン値が113.4%と非常に良好であるのに対して、心外膜側(AB間)のストレイン値は18.5%で、肥全心の収縮において心内膜側が大きく寄与していることがわかる。

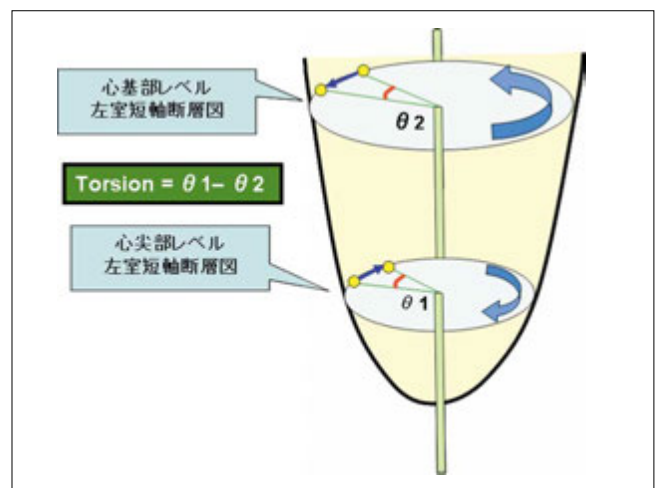


図11：心臓の回転運動

正常な心臓は、収縮期には心尖部付近で時計方向、心基部付近で反時計方向の回転運動(rotation)を行っている。このため、心臓全体ではそれらの差に相当する捩れ(torsion)を生じている。

軌跡表示させるとよくわかるが(図12左)、一心周期を通じてのrotationとtorsionをプロファイル表示すると図12右のようになる。本法を用いることにより、心臓のtorsionの詳細な検討が進められることと思われるが、左室の壁厚変化を解析する際に、このtorsion自体がTSI法でも2DTT法でもlimitationになりうることを念頭に置かなければならない。

(5) 2DTT法を用いた左房容積の評価

左房機能を論ずるにあたっては、左房圧・容積曲線を解析することが望ましい⁹⁾(図13)。しかし、肺静脈が開口して左房の境界が不明瞭であることなどの形態的な問題から、左房容積曲線の構築は困難であった。Yabekら⁹⁾は、経胸壁Mモード法で計測した左房径から左房容積を算出する近似式を導き、Tomaら¹⁰⁾は経食道心エコー法による左房・右房を含む断面でMモード画像を記録し、左房径から左房容積を計算して圧容積曲線を構築している(図14)。しかしながら、Mモード法では左房の全容の描出が困難で、前後方向のみの評価では不十分であった。AQ法を用いてシンプソン法による左房容積の計算が試みられたが(図2B)、適切な設定断面が得られ

ず、境界の同定が不十分であったことから、臨床応用に至らなかった。

そこでわれわれは、ドーナツ型の数値ファントム上で2DTT法を用いて、内膜面に設定した複数の点を追跡しシンプソン法によって計算した容積を、理論上の球の容積値と比較した(図15)。その結果、図15右に示すように実測した球の容積が理論値とよく一致したことから、臨床の実例でも応用できると考えられた。正常例で左房容積を一心周期にわたって計測すると、図16の左房容積曲線が得られる。心房収縮期容積変化は左房のプースターポンプ機能を、心室収縮期容積変化はリザーバー機能を反映しているが、心臓カテーテル検査中に本法を用いて左房圧曲線と同時記録すれば、左房圧・容積曲線の構築ができることから、さらに詳細な検討が可能になると考えられる。図17は下半身陽圧負荷による左房容積変化を記録したものである。安静時に比較し、下半身陽圧負荷中には前負荷の増大を反映して、左房容積が増加していることがわかる。この手法を病的心に応用することで、病態による左房機能の差異を詳細に検討できる。

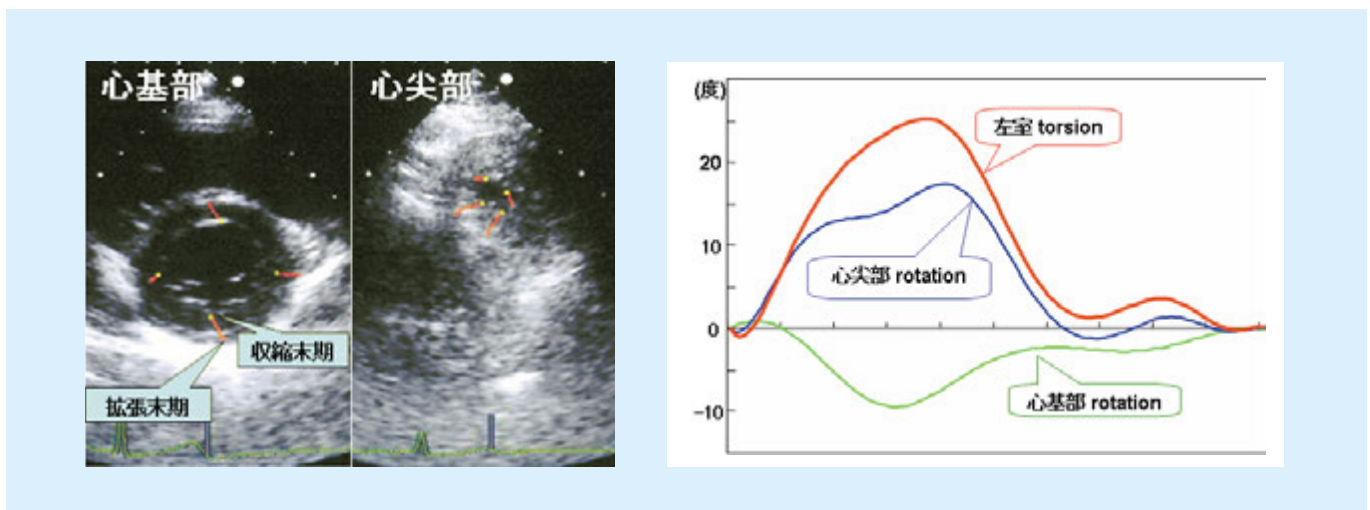


図12：2DTT法による追跡点の軌跡表示と、一心周期を通じての回転運動(rotation)と捩れ(torsion)の関係

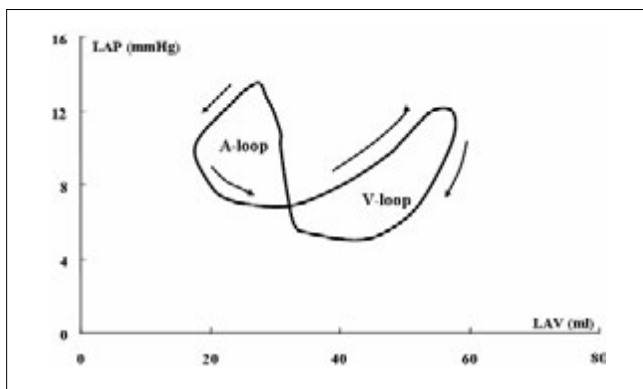


図13：正常洞調律の左房圧・容積曲線

心房収縮期のプースターポンプ機能を表すA-loopと、リザーバー期の心房流入によるV-loopから構成される。A-loopの面積は心房の仕事量を表わし、V-loopはリザーバー機能を反映している。また、A-loopからV-loopにかけての上行脚の傾きは心房のコンプライアンスを表わす。

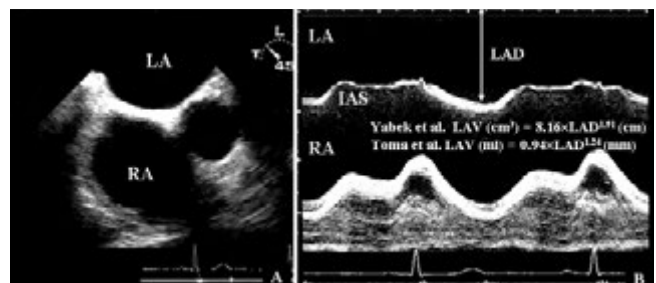


図14：Mモード法を用いた左房容積算出の近似式

左房の全容の描出が困難で、前後方向のみの評価では不十分である。

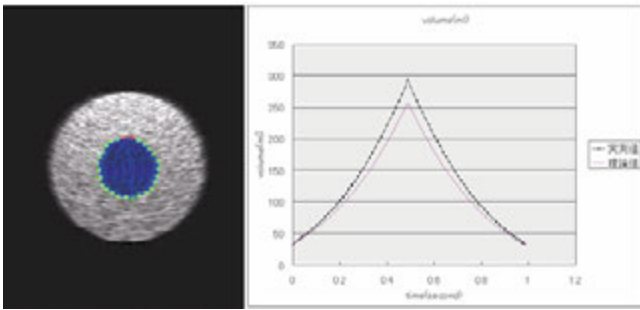


図 15 : 数値ファントムを用いた容積変化の検証
 内膜面に設定した複数の点を追跡してシンプソン法によって計算した容積を、理論上の球の容積値と比較すると、実測した球の容積が理論値とよく一致した。

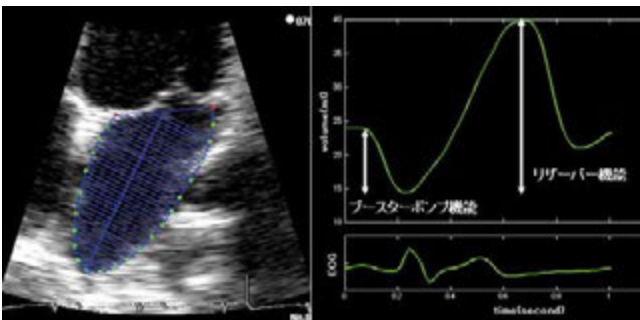


図 16 : 2DTT 法で求めた正常例における左房容積変化曲線
 心房収縮期容積変化は左房のブースターポンプ機能を、心室収縮期容積変化はリザーブ機能を反映している。

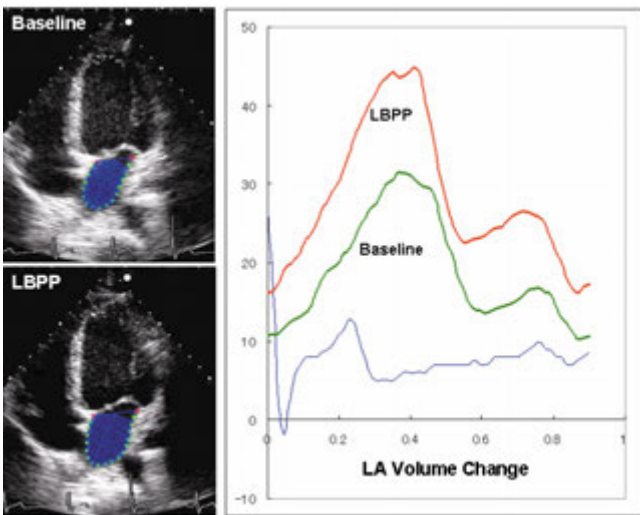


図 17 : 正常例における下半身陽圧負荷(LBPP)による左房容積曲線の変化
 安静時(Baseline)に比較し、LBPP中には前負荷の増大を反映して、左房容積が増加している。

5. おわりに

2DTT法はパターンマッチングの手法を用いていることから、ドプラ速度や角度依存性にとらわれることなく、ストレインやストレインレートを解析することができる。心筋虚血やバイアビリティーの評価、左室の回転運動、左房および左室の容積評価などに応用が可能である。さらには、僧帽弁輪

運動や乳頭筋運動の評価にも利用できると考えられ、今後の普及が期待される。

※ e-Toolは株式会社日立メディコの登録商標です。

参考文献

- 1) Hoffmann R, et al : Strain rate measurement by Doppler echocardiography allows improved assessment of myocardial viability in patients with depressed left ventricular function. J Am Coll Cardiol, 39 : 443-449, 2002.
- 2) Voigt JU, et al : Strain-rate imaging during dobutamine stress echocardiography provides objective evidence of inducible ischemia. Circulation, 107 : 2120-2126, 2003.
- 3) Toyoda T, et al : Assessment of regional myocardial strain by a novel automated tracking system from digital image files. J Am Soc Echocardiogr, 17 : 1234-1238, 2004.
- 4) 田畑智継 : 心機能を識る. 心房機能はどのように評価されるか. (松崎益徳, 本郷 実編)(p280-p290) 新・心臓病診療プラクティス3, 文光堂, 東京, 2004.
- 5) Yabek, SM et al : Echocardiographic determination of left atrial volumes in children with congenital heart disease. Circulation 1976;53:268-272.
- 6) Toma, Y et al : Determination of atrial size by esophageal echocardiography. Am J Cardiol, 52 : 878-880, 1983.