

# 虚血心の心機能評価：ストレインイメージング法

田畑 智継, 野村 雅則

Tabata T, Nomura M: Evaluation of the cardiac function using strain imaging technique in the ischemic heart. J Jpn Coron Assoc 2007; 13: 134-138

## I. はじめに

断層法や M モード法を用いた心臓の壁運動異常の評価は、現在でもベッドサイドで行われる心エコー検査の主流であり、有用であることに変わりはない。この際に、心内膜の動きのみにとらわれることなく、線維化や壁厚増加の有無も同時に評価することが重要であるが、壁厚変化の視覚的評価は定性的で、判断に迷うことがある。組織ストレインイメージング (tissue strain imaging; TSI) 法は、心筋長や壁厚の変化を、視覚に頼らず定量的に評価できる方法として期待されている。

## II. TSI 法とは

TSI 法は組織ドプラ (TDI: tissue Doppler imaging) 法が発展したものであり、TDI 法の一つである。TDI 法は局所心筋の運動速度を計測する方法であり、壁運動異常の有無を評価するために開発されたが、心臓全体の運動や牽引の影響を受けることから、得られた速度が真の局所壁運動速度を表現していないという問題点があった。そこで、それらの影響を除外するために新たに考案されたのが TSI 法である。カラー TDI 法で記録される動画像には速度情報が重畳されている。TSI 法ではこの速度情報をもとに心筋の移動距離 (displacement)、ストレイン (strain) およびストレインレート (strain rate) を心臓全体の運動や牽引の影響を受けることなく計算することができる。

### 1. ストレインおよびストレインレート

ストレインとは、組織の変形あるいは歪みを意味し、ストレインレートはその変形率を意味する。それらが陰性であることは、単位心筋がより短くなることを、また、陽性であることは、単位心筋がより長くなることを意味する。このため、心臓の短軸方向では収縮期に正、拡張期に負の値を示すが、長軸方向では収縮期に負、拡張期に正の値を示す。

### 2. ストレインの求め方

TSI 法でストレインを求めるには 2 つの方法がある (図 1)。ひとつは速度を空間微分して得られたストレインレートを時間積分することによって求められるナチュラルストレインである。この際、最初に得られるストレインレートはある 2 点間の速度勾配に等しいことから、心臓全体の運動の影響を除外できたことになる。一方、速度を時間積分して組織の移動距離を算出し、これを空間微分して求められるのがラグランジアンストレインであるが、両者によって得られるストレインは理論的には同じものである。

ストレインイメージング法では、最初に速度のドプラ角度補正が行われる (図 2)。通常のカラー TDI 法では、血流と同様にプローブに対して近づく運動を暖色系、遠ざかる運動を寒色系で表示していたが、TSI 法ではプローブに対する速度成分を収縮中心とのなす角で補正し、すべての部位で収縮期には暖色系、拡張期には寒色系で表示するように工夫されている。

さらに、角度補正した速度情報をもとに組織を追跡し、正確な移動距離を算出するために組織トラッキングという処理がなされている。組織トラッキングで、ある 2 点の速度成分を追跡することによって時間  $t_0$  における心筋長  $L(t_0)$  から時間  $t$  における心筋長  $L(t)$  に変化した場合のストレインは、 $\epsilon(t)=[L(t)-L(t_0)]/L(t_0)$  と計算される (図 3)。このようにして描かれるのが、移動距離 (図 4a)、ストレイン (図 4b) およびストレインレート (図 4c) プロファイルである。ストレインレートはノイズが多く、空間分解能に問題があるため、あまり利用されておらず、移動距離やストレインを用いることが多い。

### 3. ストレインの正常値

最も多い臨床応用は最大ストレイン値を計測することであるが、そのためには最大ストレインの正常値を知ることが必要である。われわれが計測した短軸方向における健常者のストレインは平均 0.63 (0.5~1.7) で<sup>1)</sup>、正常心筋は収縮期に半径方向に約 1.5~2 倍に厚みを増す。また、心基部、中部および心尖部のいずれにおいても後壁側が前壁側よりも高値を示す傾向がある。

藤田保健衛生大学坂文種徳会病院循環器内科 (〒454-8509 名古屋市中川区尾頭橋 3-6-10)

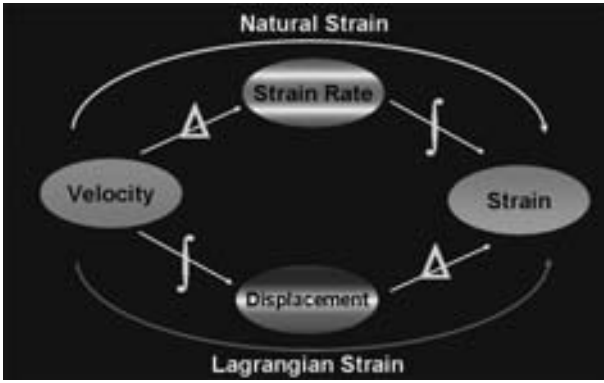


図1 TSI法でストレインを計算する2つのカスケード

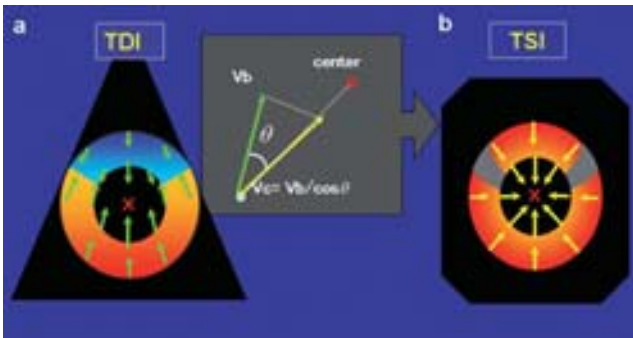


図2 カラー組織ドプラ断層図  
TDI:従来のカラー組織ドプラ表示, TSI:速度成分を収縮中心とのなす角度θで補正したカラー組織ドプラ表示, center:収縮中心, Vb:プローブに対する速度, Vc:収縮中心に対して角度補正した速度

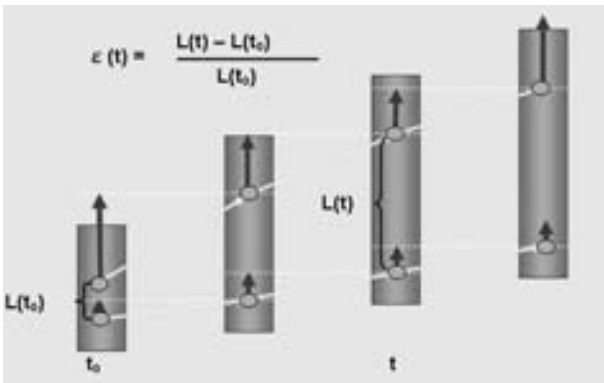


図3 組織トラッキングを行って得られるストレイン

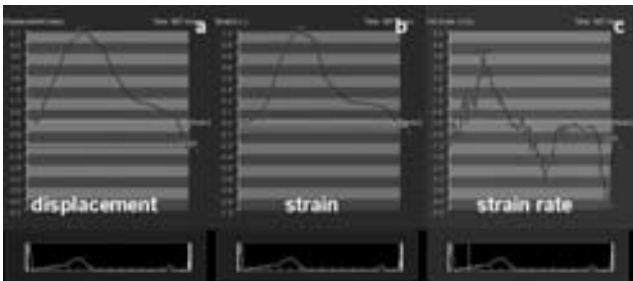


図4 TSI法を用いて得られる正常の移動距離(a), ストレイン(b)およびストレインレート(c)プロファイル

### III. ドブタミン負荷心エコー法への応用

ドブタミン負荷心エコー法は、心筋の viability をみるための低用量ドブタミン負荷と、心筋虚血を誘発するための高用量ドブタミン負荷がある。通常は、ASE(American Society of Echocardiography)の提唱する左室壁16分画の運動が、負荷前後にいかに変化するか視覚的に判断し、スコア化して判定する。当然術者の経験と主観に依存することになり、結果にばらつきを生じる。

そこで、ドブタミン負荷心エコー法に TDI 法を併用することで、数値を用いて客観的に評価することが試みられた。図5は低用量ドブタミン負荷に TDI 法を併用して、心筋の viability をみたものであるが<sup>2)</sup>, viability のある部位の収縮期僧帽弁輪運動速度( $S_w$ )はドブタミンの用量依存的に増大したが, viability のない部位では変化を認めなかった。このように、TDI 法を併用することで客観的評価が可能であるが、TDI 法では viability のない部位が健常部位に牽引されて、一見 viability があるように判定される危険性がある。一方、低用量ドブタミン負荷に TSI 法を併用したところ、viability のある部位では最大ストレインおよび収縮期ストレインレート (SR) のいずれも用量依存的に増加した<sup>3)</sup> (図6)。TSI 法では理論的に牽引の影響を受けないことから、この部位は viability があると判定してよいことになる。

次に高用量ドブタミン負荷であるが、虚血部位では高用量ドブタミンにより虚血が誘発されると、最大ストレイン (図7b)および収縮期ストレインレート (図7c)は低下する<sup>4)</sup>。ところが、これを速度でみると同じ部位で壁運動速度が増加したように見える (図7a)。これは、TSI 法でも速度を用いた場合には、健常部位から牽引の影響を受けているということに注意を要する。

高用量ドブタミン負荷で、用量ごとにストレインの変化を細かくみてみると興味深い結果が得られた<sup>5)</sup>。すなわ

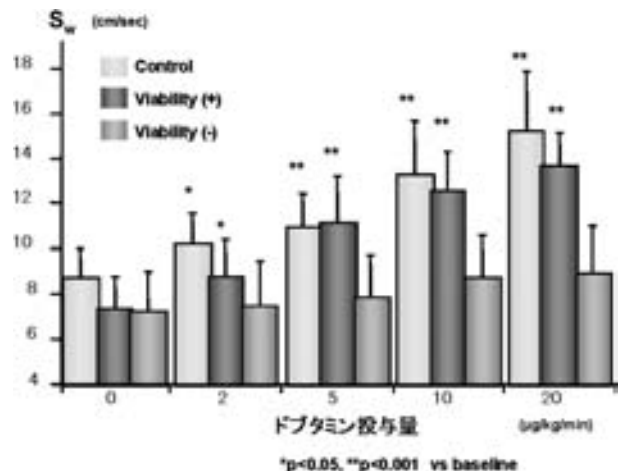


図5 TDI法を用いた低用量ドブタミン負荷による心筋 viability の評価

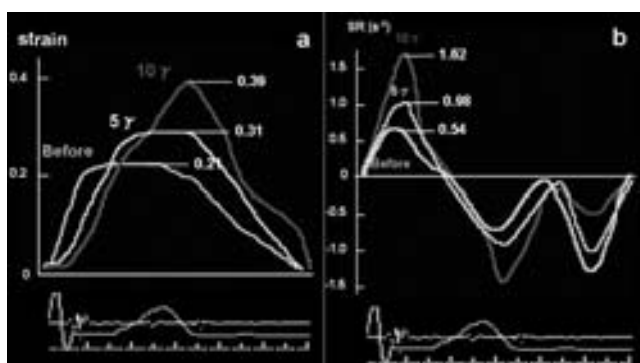


図6 TSI法を用いた低用量ドブタミン負荷による心筋viabilityの評価

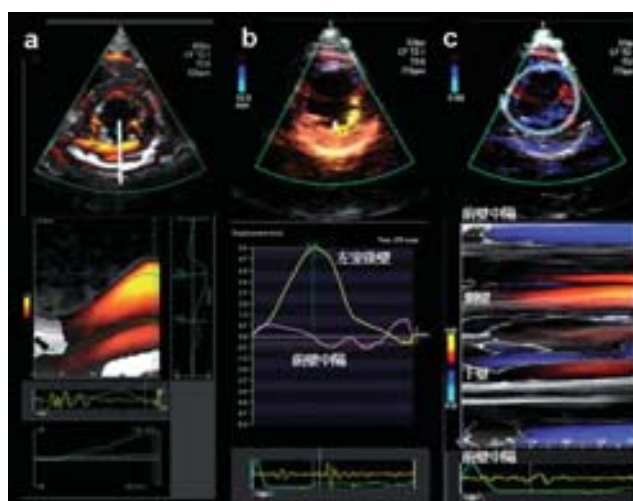


図9 TSI法の応用例

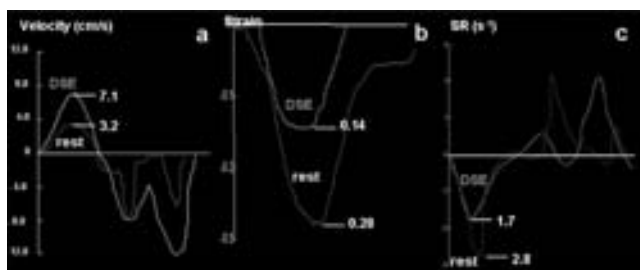


図7 TSI法を用いた高用量ドブタミン負荷による心筋虚血の評価

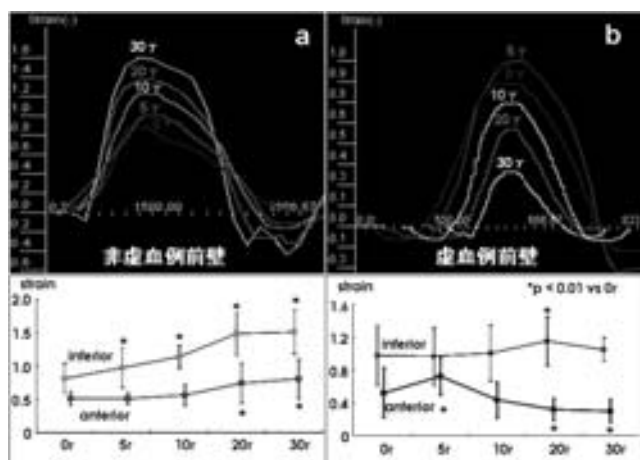


図8 TSI法を用いた高用量ドブタミン負荷時のストレインの用量による変化

ち、虚血のない例の前壁のストレインは用量依存的に増加した(図8a)。一方、負荷心筋シンチグラフィーで前壁の虚血が疑われた例では、コントロール時のストレインは約0.9であるから正常値であるが、低用量の5  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ で一時的に増加し、高用量の20  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ で著明に減少した(図8b)。つまり、虚血部位でも低用量であれば壁運動は一時的に改善するということである。このように、視覚的判定に依存していたドブタミン負荷心エコー法にTSI法を併用することにより、心筋虚血やviabilityを客観的、定

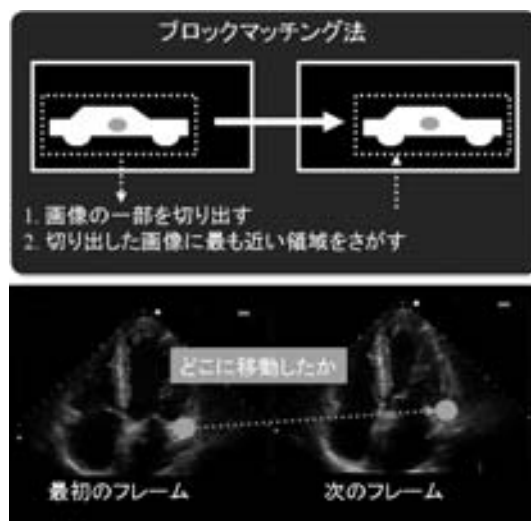


図10 ブロックマッチング法概念図

量的に評価することが可能である。

#### IV. TSI法のその他の利用法

心筋を横断するように直線を引くことで(図9a上段)、心内膜から心外膜までのストレインプロファイルを得ることができ、Mモード表示することで、収縮期最大ストレインの時相(図9a下段横軸)およびその心内膜面からの距離(図9a下段縦軸)を知ることができる。この解析を行うことで、心内膜下の虚血を詳細に検討できる。前壁中隔梗塞例の移動距離プロファイル(図9b)からは、左室後壁は収縮中心に向かって正常に変位しているが、前壁中隔の変位が消失していることがわかる。心臓全体の運動の影響を除外できているため、移動距離でも壁運動を評価することは可能である。同じ症例で、curved Mモード法を用いて前壁中隔から左室壁を一周するように線を引くことで(図9c上段)、収縮期のカラーストレインイメージを展開する

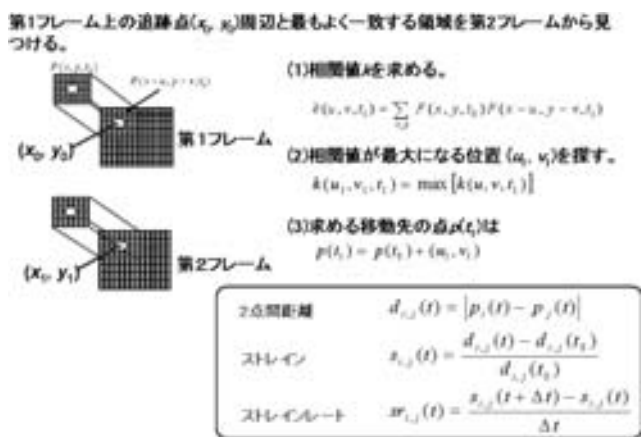


図11 ブロックマッチング法のアルゴリズム

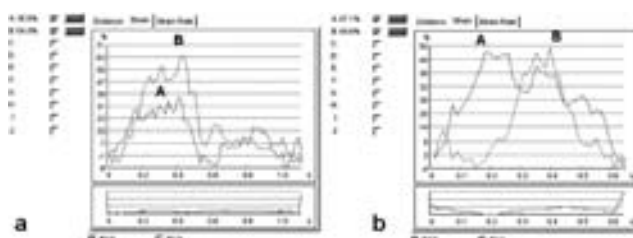


図13 2DTT法を用いた高用量ドブタミン負荷

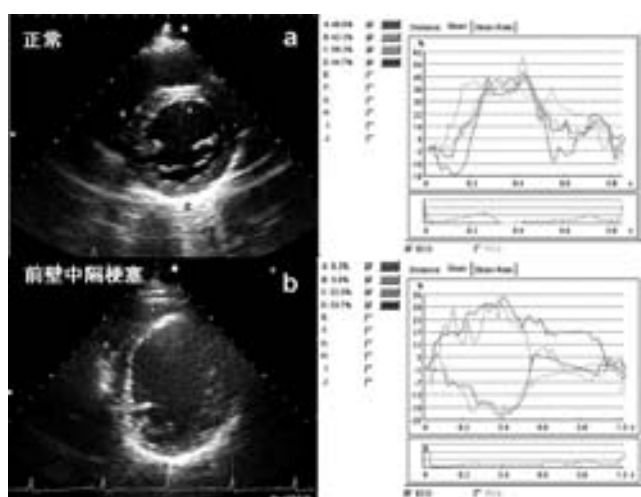


図12 2DTT法を用いた左室短軸像における半径方向のストレインプロフィール

ことができる(図9c下段)。前壁中隔に相当する部位は収縮期に青色を呈し、壁厚が増加していないことがわかる。

V. 断層組織トラッキング法を用いたストレインの評価

TSI法で得られるストレインは、心筋長の変化を速度成分を基本に計算して求める方法である。このため、ドプラ法の限界である角度依存性を完全に解決することはできなかった。そこで、最近日立メディコ社から超音波断層上の画像情報をもとに組織追跡する断層組織トラッキング(2D tissue tracking; 2DTT)法が開発され、注目を集めている<sup>6)</sup>。この方法は、ブロックマッチングという手法を用いて組織を追跡する方法である。最初のフレームで追跡点を含む画像の一部を切り出し、次のフレームで切り出した画像に最も近い領域を探し出す(図10)。相関演算法を用いてこれを繰り返す、追跡点がどこに移動したかを計算する。この方法で、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11)。角度を心配する必要がないの

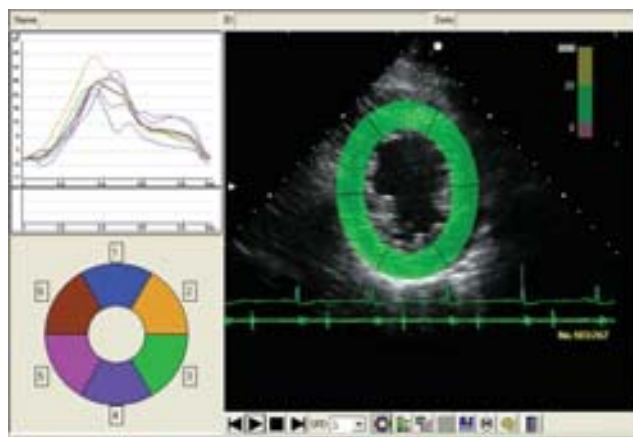


図14 2DTT法による壁運動異常可視化プログラム

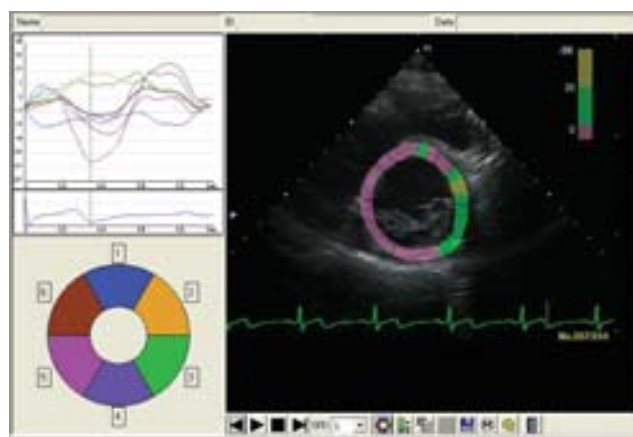


図15 2DTT法による壁運動低下

で、2時や10時の方向でも計測が可能で、長軸断層図でも半径方向の心筋長の変化を解析できる。

2DTT法では、図12aに示すように正常ではA~Dの4組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ィールが描かれる。一方、前壁中隔梗塞(図12b)では、前壁中隔に相当するAおよびBの壁厚はむしろ減少する負のストレインとして描かれている。

この方法を高用量ドブタミン負荷心エコー法に応用してみると、コントロール時(図13a)に比べて2点間Aではドブタミン40  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{min}$ (図13b)でストレインが増大したのに対して、2点間Bではストレインが64.0%から49.6%

に減少し、そのピークが後退して、いわゆる post systolic shortening が出現していることから、虚血の存在が示唆される。

ただ、図をみてもわかるように、ある2点間のストレインプロファイルではノイズが多く、設定する位置が少しずれるだけでも結果に差を生じることがある。このため、ノイズをできるだけ少なくして、より視覚的に評価ができるようにプログラムに改良を加えている。すなわち、左室短軸断面を6分割し、各分画内に10組の心内膜と心外膜のペアを自動的に設定する。それらのストレインを平均化して得られた値を、その分画の平均ストレインとしてプロファイル表示する(図14左)。さらに、平均ストレインの値を、ある一定の幅で色分けして動画像に重ね合わせるにより、視覚的に壁運動を評価できるようにしている(図14右)。健常例では、収縮期に全周性に緑色で表示される。図15に示す例では、桃色の部分のストレインが低下し、壁運動異常をきたしていることがわかる。また、心基部、中部および心尖部で同様の処理を行い、bull's eye 表示させることもできる。

#### VI. おわりに

TSI法はTDI法が発展したもので、速度情報をもとにストレインを計算することで、心臓全体の運動や牽引の影響を除外して壁運動異常を評価する方法である。また、2DTT法はブロックマッチング手法を用いるため、速度やドプラ角度と無関係にストレインを計算できる。いずれもドブタミン負荷心エコー法に併用することで、心筋虚血や viability を定量的に評価することができる有用な方法である。このように、ストレインイメージング法を用いること

により、左室造影では判断し得なかった心筋虚血や viability を動的に検出することが可能である。

#### 文 献

- 1) Tabata T, Oki T, Tanaka H, Kimura E, Wakatsuki T, Yamamoto T, Saito A, Yamada H: Quantitative analysis of the left ventricular segmental contractility in the normal subjects. *J Am Soc Echocardiogr* 2002; **15**: 490
- 2) Tabata T, Oki T, Onose Y, Matsuoka M, Tada T, Yamamoto T, Wakatsuki T, Yamada H: Novel strategy for detecting myocardial viability by evaluating improvement of early diastolic left ventricular asynchrony using dobutamine stress pulsed tissue Doppler imaging. *Circulation* 2001; **104**: II-749
- 3) Tanaka H, Tabata T, Kimura E, Harada K, Wakatsuki T, Yamamoto T, Saito A, Uehara K, Kageyama N, Yamada H, Oki T: Quantitative assessment of left ventricular myocardial viability during low dose dobutamine stress echocardiography in combination with color tissue Doppler imaging. *J Am Coll Cardiol* 2003; **41**: 455A
- 4) Kimura E, Tabata T, Tanaka H, Harada K, Yamada H, Nomura M, Oki T, Ito S: Better choice of color tissue Doppler imaging coupled with high dose dobutamine stress echocardiography for detecting coronary artery stenosis. *J Am Soc Echocardiogr* 2003; **16**: 528
- 5) Yamada H, Tabata T, Harada K, Tanaka H, Yoshioka T, Nomura M, Ito S: Quantitative assessment of biphasic response to dobutamine by tissue strain echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; **18**: 506
- 6) Toyoda T, Baba H, Akasaka T, Akiyama M, Neishi Y, Tomita J, Sukmawan R, Koyama Y, Watanabe N, Tamano S, Shinomura R, Komuro I, Yoshida K: Assessment of regional myocardial strain by a novel automated tracking system from digital image files. *J Am Soc Echocardiogr* 2004; **17**: 1234-1238