

非観血的検査法：体表心エコー図

築地美和子, 渡邊 望

Tsukiji M, Watanabe N: **Assessment of ischemic heart disease by transthoracic echocardiography.** J Jpn Coron Assoc 2007; 13: 16-20

I. はじめに

冠血流動態や冠血流プロフィールは1970年代から80年代にかけて動物実験により明らかにされてきたが、臨床の現場では冠血流を記録する方法がなかったため冠循環の評価は冠動脈造影検査による形態学的評価(狭窄診断)にとどまっていた。近年、ドブラガイドワイヤが開発され冠動脈造影検査時に冠血流記録が可能となり、臨床例における冠循環へのアプローチが現実のものとなって、虚血性心疾患の診断・治療戦略をたてる過程において、冠血流速予備能の測定による狭窄診断や冠血流速パターンによる冠動脈再開通後の予後予測などの機能的評価が加えられるようになってきた。また、心エコー図の分野においては高感度・高分解能装置が開発されたことにより、従来経カテーテル的にドブラガイドワイヤを用いてのみ可能であった機能的冠動脈評価を、体表面から非侵襲的に行うことが可能となっている。現在、左前下行枝血流は9割以上の症例で記録可能であり、狭窄部の加速血流をとらえること、あるいは冠拡張薬の投与によって冠血流速予備能を評価すること、などによる狭窄診断が可能である。閉塞冠動脈への側副血行路からの血流をとらえることで冠動脈閉塞の診断もできる。すべての冠動脈を観察することはできないが、冠血流の非侵襲的評価を可能とする体表心エコー図は日常診療へ広く応用されてきている。

II. 経胸壁心エコー図による冠動脈血流の描出

1. 冠動脈血流の描出に必要な知識

a. 解剖学的知識(冠動脈の走行)

左冠動脈は大動脈弁より遠位部(頭側)の左冠動脈洞から起始し、その近位部で左前下行枝と回旋枝に枝分かれする。左前下行枝は心臓前面の右室と左室との間の溝(前室間溝)に沿って走り、左室前面、心室中隔を養いながら心尖部へ向かう。心尖部を後方へと回り込み、心臓後面の後室間溝で終着する。右冠動脈は右冠動脈洞から始まり右房室間溝に沿って走り、右室、左室下壁から後壁へと向か

う。後下行枝は後室間溝に沿って心尖部方向へ走る。このように、断層心エコー図から冠動脈を描出する際のランドマークは、左右冠動脈洞、前後室間溝と左右房室間溝である。

b. 装置の選択と設定

高感度・高分解能を有する高周波セクタ探触子を用いる。胸壁に近い左前下行枝中間部から遠位部にかけては7~12 MHz程度の探触子を、胸壁から比較的遠い右冠動脈、回旋枝、左右冠動脈起始部から近位部にかけては2~5 MHz程度の探触子を用いるとよい。カラードプラの流速レンジは、速度が遅い冠血流が描出されるように20 cm/sec前後に設定する。カラードプラの関心領域をなるべく小さく設定することでフレームレートを上げると同時に周辺心筋から生じるクラッタノイズによる画像の見にくさを少なくする。パルスドプラのサンプルボリューム幅を1~1.5 mm程度とし、カラードプラ信号の表示をみながら適切な角度補正を行う。角度は60度以内となるように心がける。

2. カラードプラ法での冠動脈血流信号描出の実際

被検者を左側臥位とする(特に冠動脈近位部から中間部を観察する場合は肺の影響を避けるためにできるだけ側方を向いてもらう)。断層像でランドマークとなる部分を描出し、しっかりとオリエンテーションをつけてからカラードプラ法を用いる。

左冠動脈主幹部から前下行枝・回旋枝分岐部は、大動脈弁レベルの短軸像よりやや遠位側(冠動脈洞のレベル)の短軸像で描出する。カラードプラ信号に沿って探触子を動かし、肺動脈の横を進む左前下行枝近位部を観察する。いったん、体表面方向へ向かった左前下行枝は前室間溝に沿って心尖部方向へ下行する。近位部から連続して観察できる場合もあるが、肺の影響も受けやすい部位であり、観察が困難な場合もある。中間部の描出は左室短軸断面から行うとよい。左前下行枝は必ず前室間溝を心尖部に向かって走っているため、断層像にて前室間溝を描出し、その周囲に関心領域を設定、カラードプラ法を施行する。拡張期に心外膜側を心尖部方向に流れる前下行枝血流信号(赤色信号)が横断面で捉えられれば、探触子を長軸方向に動かし

て血流信号を縦方向に伸ばし，なるべく長軸方向に冠動脈が描出されるように調整する．左前下行枝遠位部はやや胸骨よりの心尖部長軸像から描出する．前室間溝部分に前下行枝血流信号(拡張期の赤色信号)を捉えたら，探触子を時計方向に回転しドプラ信号が長軸方向に描出されるように調整する．ちょうど右室が見えなくなったあたりで前室間溝は長軸方向となる．

右冠動脈後下行枝は，後室間溝を走るため，短軸像または心尖部二腔断面で後室間溝を描出し，カラードプラ法を行う．短軸像では右冠動脈が拡張期に横断面で観察され，二腔断面では後下行枝が長軸で観察される．短軸像で描出した際はカラードプラ画面を見ながら，探触子を少しずつ心尖部方向へずらし，冠血管が長軸方向へ描出されるように調整する．

回旋枝はバリエーションが多く描出困難な場合が多いが，大抵は短軸断面にて前乳頭筋付近の外膜側を走ることが多い．

3. パルスドプラ法での冠動脈血流速度波形描出の実際

カラードプラガイド下にパルスドプラのサンプルボリュームを設定し，冠血流速度波形を記録する．カラードプラ画像の血流方向に合わせて角度補正を行う．呼吸による移動があるため，息止めが可能な症例では安定して記録できるタイミングで軽く息止めを促す．呼気終末の位置が安定しているため，息止め困難症例では呼気終末で描出されるように調整し，そのタイミングで記録するとよい．正常冠動脈血流速度波形は，収縮期，拡張期の二峰性であり，拡張期

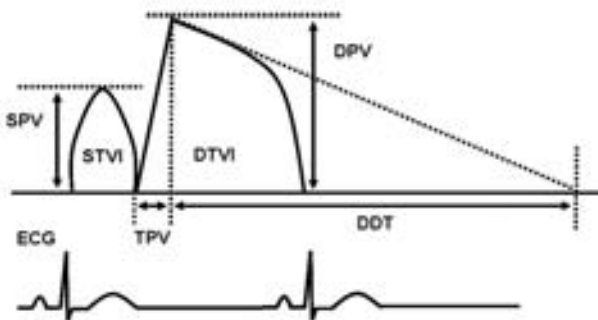
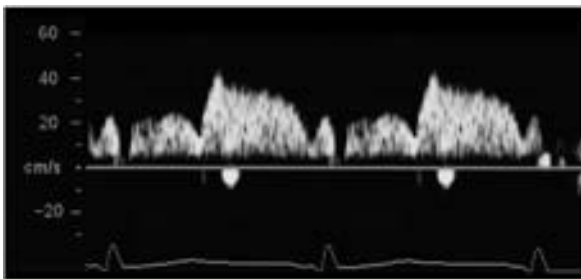


図1 正常冠動脈の冠血流速度波形と冠動脈流速プロファイル
収縮期，拡張期の二峰性であり，拡張期優位の波形を呈する．
SPV:収縮期最大血流速度，DPV:拡張期最大血流速度，STVI:
収縮期時間速度積分，DTVI:拡張期時間速度積分，TPV:拡
張期波加速時間，DDT:拡張期波減速時間，ECG:心電図．

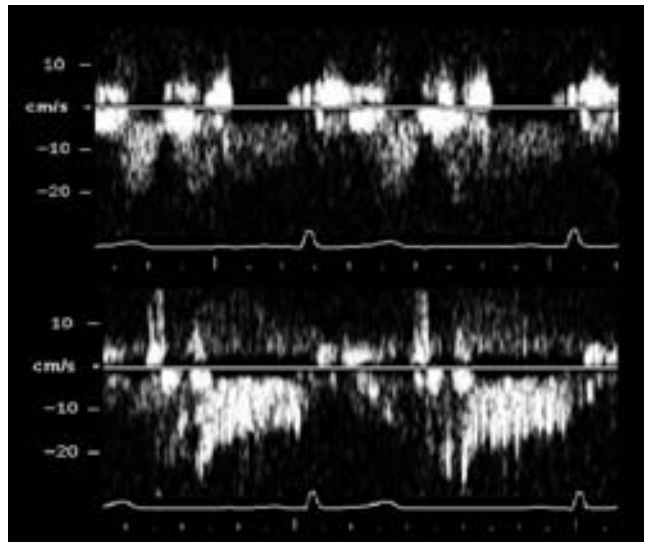


図2 超音波造影剤(レボビスト®)を使用した場合の冠血流速度波形
レボビスト®を投与することでドプラ信号が増強される．パルスドプラの冠血流速度プロファイルが明瞭に検出できるようになる．

優位の波形を示す(図1)．経胸壁パルスドプラ法にて得られた冠血流速度波形と，ドプラガイドワイヤで同時記録された冠血流速度波形の最大流速および時間速度積分値は一致し，その精度は高い¹⁾．ただし，経胸壁ドプラ法では収縮期波の記録が不完全な場合があるため，後述の冠血流速度予備能の算出は拡張期波のみで行う．

4. ドプラ信号の増強(超音波造影剤の使用)

経静脈性の超音波造影剤を用いることでカラードプラ信号およびパルスドプラ信号を増強させることが可能である²⁾．カラードプラ法における冠動脈の検出能は向上し，パルスドプラ法においても明瞭な血流プロファイル(図2)を得ることができる．本邦ではレボビスト®が臨床使用可能であり，ドプラ信号を増強する場合には，200 mg/mlもしくは300 mg/mlに溶解し1~2 ml/minの速度で持続静注する．投与量が多すぎるとかえってノイズが増し観察しにくくなるため，少ない量から開始し個々に調節するとよい．

III. 虚血性心疾患への応用

1. 冠動脈狭窄の診断

a. 安静時の収縮期・拡張期血流速度比による診断

安静時の冠動脈血流速度波形は，収縮期，拡張期の二峰性であり，拡張期優位の波形を呈する．しかし，冠動脈狭窄が進行すると拡張期優位の程度は減弱する．安静時の収縮期・拡張期の冠動脈血流速度波形の比(diastolic-to-systolic coronary flow velocity ratio: DSVR)を用いることにより，薬物負荷なしに冠動脈狭窄を検出することが可能である．冠動脈造影において85%以上の冠動脈狭窄を検出するcut-off pointは，peak DSVRでは1.6(感度79%，特異度

75.7%), mean DSVR では 1.5(感度 77%, 特異度 77.9%)と報告されている³⁾。

b. 加速血流と狭窄部・非狭窄部血流速比による診断

冠動脈狭窄部位を直接描出できた場合、狭窄部の血流速度は速いためカラードプラ画像上折返しによる加速血流(localizing aliasing)として描出される。血管が蛇行している部分でも折返しは生じ、aliasing のみでの狭窄診断は特異度が低い。このためパルスドプラ法で aliasing 部の血流速度と aliasing 部より中枢側の血流速度との比をとることで狭窄診断を行う。PTCA(percutaneous transluminal coronary angioplasty)の follow up 時に冠動脈造影と比較した結果では、狭窄部(aliasing 部)の中枢側と狭窄部(aliasing 部)との拡張期平均血流速度の比が0.45以下の例では50%以上の再狭窄を示した(感度 100%, 特異度 44%)⁴⁾。冠動脈ステント部位においても、ドプラ心エコー図による血流計測および狭窄診断は可能であり(図3)、ステント内狭窄においても本法による評価は可能である⁵⁾。

c. 冠血流速予備能による診断

有意狭窄があると冠血流速予備能は低下する(図4)⁶⁾。冠血流速予備能は冠動脈狭窄率50%までは正常時と同等に保たれるが、狭窄率がそれを超えると減少し始める。70%狭窄では冠血流速予備能はおおよそ2.0となり、冠血流速予備能が2.0を下回る場合は、心外膜側冠動脈に有意狭窄が存在するか、もしくは心筋内微小循環障害が存在することが示唆される。パルスドプラ法では血流量ではなく血流速度を記録するため、冠血流予備能の代わりに冠血流速予備能を評価することになる。通常血管拡張薬としてアデノシン三リン酸(140~150 μg/kg)の持続静注もしくはdipyridamole(0.56 μg/kg)の静注を用いる。安静時に引き続き前述の薬物負荷による最大冠充血時の血流速度波形を記録し、おのおのの拡張期平均冠血流速度を計測する。冠

血流速予備能は、最大冠充血時と安静時の拡張期平均冠血流速度との比により算出する(冠血流速予備能=最大冠充血時の拡張期平均冠血流速度/安静時の拡張期平均冠血流速度)(図5, 6)。経胸壁パルスドプラ法にて算出した冠血流速予備能と冠動脈造影による狭窄率とを比較したところ、冠血流速予備能が2.0以下の例では75%以上の有意狭窄を示した(感度92%, 特異度86%)⁷⁾。

d. 冠動脈閉塞の診断

冠動脈完全閉塞例では、閉塞部より末梢側において側副血行路による逆行性血流が観察される。ドプラ法では、血流の速度および方向の情報を得ることができ、逆行性血流の観察が可能である(図7)。超音波ドプラ法を用いた左前下行枝の逆行性血流検出による完全閉塞診断の感度は93%, 特異度は100%であった⁸⁾。

2. 急性心筋梗塞再開通後の予後予測

急性心筋梗塞症例で、再開通に成功したにもかかわらず良好な血流が得られない症例(no reflow 現象)の存在が知られている。ドプラガイドワイヤにより得られた再開通後の冠動脈血流プロファイルでは、拡張期の減速時間が短い症例ほど慢性期の心機能が悪いと報告されている⁹⁾。ま

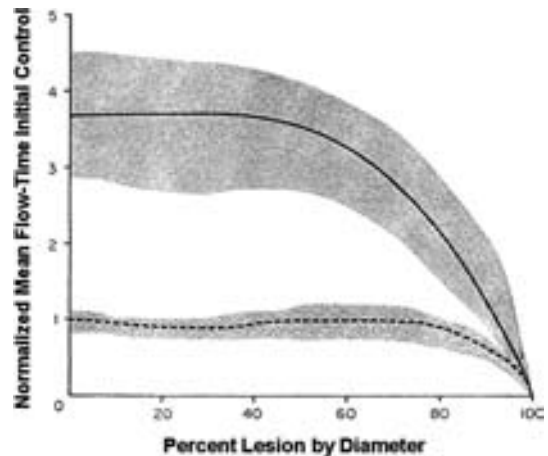


図4 冠動脈狭窄率と冠血流速予備能の関係
75%以上の有意狭窄があると冠血流速予備能は2.0以下になる。90%以上の高度狭窄になると安静時の冠動脈血流量も減少する。(文献6より転用)

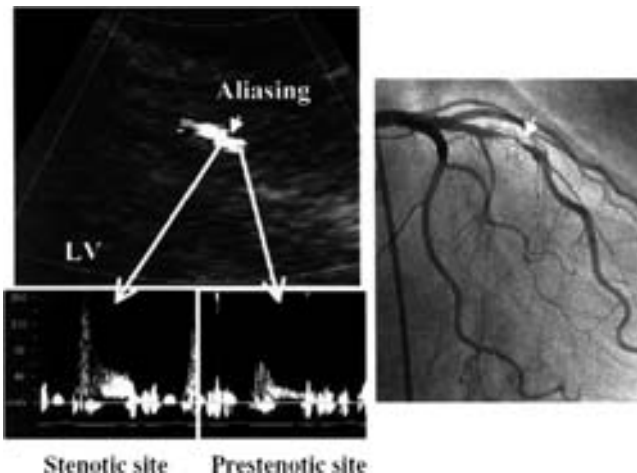


図3 ステント内狭窄の診断(左前下行枝 #7 に留置したステント内狭窄の症例)
カラードプラ法にて狭窄部位に aliasing を認める。パルスドプラ法による狭窄部の流速は速く、狭窄遠位側は遅い。(文献5より転用)

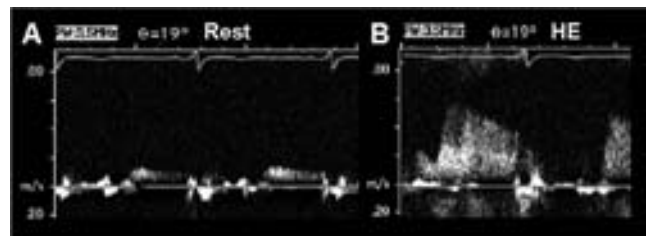


図5 冠血流速予備能(正常例)
(A)安静時の冠動脈血流。最大流速は 14 cm/sec, 平均流速は 11 cm/sec。
(B)最大冠充血時(HE)の冠動脈血流。最大流速は 58 cm/sec, 平均流速は 46 cm/sec。冠血流速予備能は 4.18 と算出される。

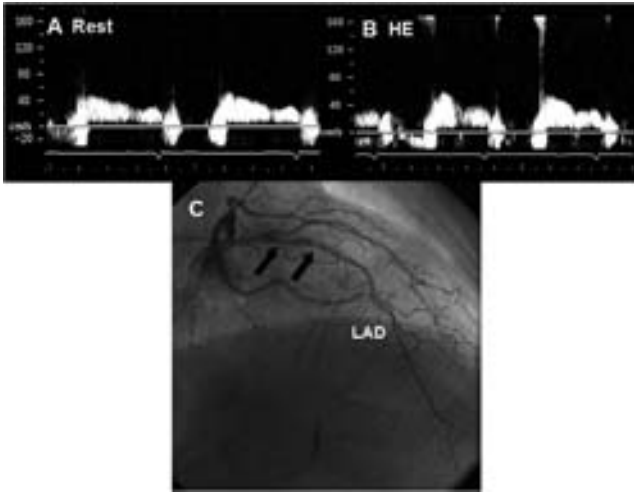


図6 冠血流速予備能(有意狭窄例)
 (A)安静時の冠動脈血流。最大流速は51.1 cm/sec, 平均流速は31.6 cm/sec.
 (B)最大冠充血時(HE)の冠動脈血流。最大流速は52.6 cm/sec, 平均流速は34.6 cm/sec。冠血流速予備能は34.6/31.6=1.09と算出される。
 (C)冠動脈造影では, 左前下行枝に再狭窄を認めた。

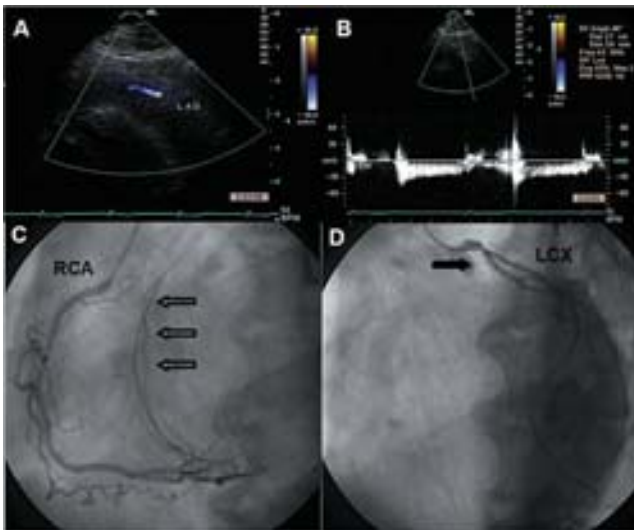


図7 冠動脈完全閉塞
 (A)カラードプラ法にて左前下行枝の血流は青色に描出され, 心尖部から心基部方向へ流れている。
 (B)パルスドプラ法にて同部位の血流は, retrograde flowとして描出された。
 (C, D)冠動脈造影では, 左冠動脈は完全閉塞しており, 右冠動脈からの側副血行を認める。

た, PTCA 後の TIMI 分類がみかけ上は同様の TIMI II であっても血流速波形の観察では slow flow の症例と to-and-fro パターンの症例とがみられ, ステンント留置後の血流改善に差が認められるなど冠血流速波形の観察により造影検査のみでは知りえなかった情報を得ることが可能である¹⁰⁾。経胸壁ドプラ法を用いて, この血流速プロファイルを記録・解析することが可能である(図8)。さらに, 本法では非侵襲的に再開通後の経過を追うことも可能であり,

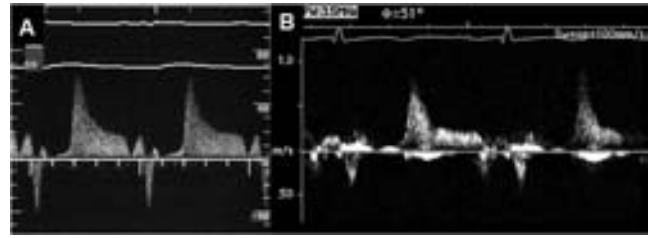


図8 No reflow 症例
 (A)ドプラガイドワイヤによる冠血流速波形: 収縮期の逆行波を認め, 拡張期波の減速時間が速い。
 (B)経胸壁心エコー図, パルスドプラ法による冠血流速波形: 同様に, 収縮期の逆行波を認め, 減速時間が速い拡張期波を描出した。

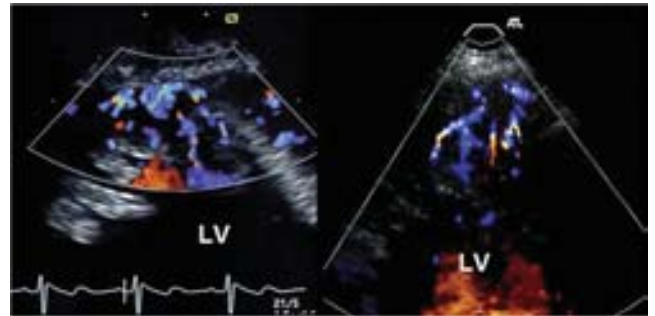


図9 カラードプラ法による心筋内冠動脈血流信号比較的流速の違い心尖部心筋内穿通枝も描出できる。

慢性期の収縮能改善度を予測することもできる^{11,12)}。

3. 心筋内冠動脈の描出

高性能装置を用いることで, 300 μm 程度の心筋内微小冠動脈血流を観察することができる(図9)¹³⁾。高度狭窄・閉塞例において心室中隔枝を介した心筋内側副血行路を直接観察することも可能であり, 超音波ドプラ法は虚血心の側副血行路を含めた非侵襲的冠循環評価に貢献するものと思われる。

文 献

- 1) Hozumi T, Yoshida K, Akasaka T, Asami Y, Ogata Y, Takagi T, Kaji S, Kawamoto T, Ueda Y, Morioka S: Noninvasive assessment of coronary flow velocity and coronary flow velocity reserve in the left anterior descending coronary artery by Doppler echocardiography: comparison with invasive technique. *J Am Coll Cardiol* 1998; **32**: 1251-1259
- 2) Lambertz H, Tries HP, Stein T, Lethen H: Noninvasive assessment of coronary flow reserve with transthoracic signal-enhanced Doppler echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 1999; **12**: 186-195
- 3) Higashiue S, Watanabe H, Yokoi Y, Takeuchi K, Yoshikawa J: Simple detection of severe coronary stenosis using transthoracic Doppler echocardiography at rest. *Am J Cardiol* 2001; **87**: 1064-1068
- 4) Hozumi T, Yoshida K, Akasaka T, Asami Y, Kanzaki Y,

- Ueda Y, Yamamuro A, Takagi T, Yoshikawa J: Value of acceleration flow and the prestenotic to stenotic coronary flow velocity ratio by transthoracic color Doppler echocardiography in noninvasive diagnosis of restenosis after percutaneous transluminal coronary angioplasty. *J Am Coll Cardiol* 2000; **35**: 164–168
- 5) Watanabe N, Akasaka T, Yamaura Y, Wada N, Akiyama M, Neishi Y, Koyama Y, Yoshida K: Transthoracic Doppler echocardiography can detect coronary flow signals through the coronary stents: noninvasive direct visualization of in-stent coronary restenosis? *J Echocardiogr* 2004; **2**: 61–67
 - 6) Gould KL, Lipscomb K, Hamilton GW: Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis: instantaneous flow response and regional distribution during coronary hyperemia as measures of coronary flow reserve. *Am J Cardiol* 1974; **33**: 87–94
 - 7) Hozumi T, Yoshida K, Ogata Y, Akasaka T, Asami Y, Takagi T, Morioka S: Noninvasive assessment of significant left anterior descending coronary artery stenosis by coronary flow velocity reserve with transthoracic color Doppler echocardiography. *Circulation* 1998; **97**: 1557–1562
 - 8) Watanabe N, Akasaka T, Yamaura Y, Akiyama M, Koyama Y, Kamiyama N, Neishi Y, Kaji S, Saito Y, Yoshida K: Noninvasive detection of total occlusion of the left anterior descending coronary artery with transthoracic Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2001; **38**: 1328–1332
 - 9) Kawamoto T, Yoshida K, Akasaka T, Hozumi T, Takagi T, Kaji S, Ueda Y: Can coronary blood flow velocity pattern after primary percutaneous transluminal coronary angioplasty [correction of angiography] predict recovery of regional left ventricular function in patients with acute myocardial infarction? *Circulation* 1999; **100**: 339–345
 - 10) Akasaka T, Yoshida K, Kawamoto T, Kaji S, Ueda Y, Yamamuro A, Takagi T, Hozumi T: Relation of phasic coronary flow velocity characteristics with TIMI perfusion grade and myocardial recovery after primary percutaneous transluminal coronary angioplasty and rescue stenting. *Circulation* 2000; **101**: 2361–2367
 - 11) Shintani Y, Ito H, Iwakura K, Kawano S, Tanaka K, Masuyama T, Hori M, Fujii K: Usefulness of impairment of coronary microcirculation in predicting left ventricular dilation after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 2004; **93**: 974–978
 - 12) Takeuchi M, Nohtomi Y, Yoshitani H, Miyazaki C, Sakamoto K, Yoshikawa J: Enhanced coronary flow velocity during intra-aortic balloon pumping assessed by transthoracic Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2004; **43**: 368–376
 - 13) 皆越眞一, 外山芳史, 新添謙一, 山口浩士, 豊寛慎一郎, 梅林雄介, 水上尚子, 宇治野幸博, 鄭 忠和: 高周波探触子を用いた経胸壁ドップラー心エコー図法によるヒト心筋内血流の描出. *J Cardiol* 1997; **30**: 149–155