

超音波法による冠血流イメージング

渡邊 望, 吉田 清

冠血流動態や冠血流プロファイルは1970年から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による形態的狭窄診断のみにとどまっていた。近年ドプラガイドワイヤーが開発されカテーテル検査時の冠血流記録が可能になったことで、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り、虚血性心疾患の診断治療過程に冠予備能測定による機能的狭窄診断や冠血流パターンによる冠動脈再開通後予後予測などの機能的評価が加えられるようになった。また心筋疾患や弁膜疾患での特徴的冠血流パターンも報告され、冠微小循環を含めた冠循環のメカニズム解明に貢献している。昨今のエコードプラ法の開発・進歩はこの冠血流を経食道的・経胸壁的に描出・記録することを可能とし、心エコー法の最後の弱点であった「冠循環への直接アプローチ」を現実のものとした。この目覚ましい発展は非侵襲的イメージングの時代のおとずれを示すに十分であり、心エコードプラ法による冠血流評価がスタンダードになる日も近い。本稿では、現時点での冠血流描出の実際と虚血性心疾患を中心とした日常診療への応用、現在の問題点と限界、そして将来像につき述べる。

①冠血流の描出に必要な知識

・冠動脈の走行を知る

心臓の表面を走る心外膜側冠動脈は最大で直径約3-4ミリ、末梢だと1ミリ程度の大きさしかない。超音波断層像の画面上でこの冠動脈を同定するためには、冠動脈がどこから起始しどこを走りそしてどこへ向かうのかという解剖学的三次元

的な理解が必須である。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の2本に枝分かれする。左前下行枝は心臓前面の右室と左室の間の溝（前心室間溝）に沿って走り、左室前壁、心室中隔を養いながら心尖部へ向かう。心尖部を後方へ回り込み、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。後下行枝は後心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。

・装置の選択と設定

探触子の選択：経食道心エコー図では通常の検査に使用する探触子でよい。経胸壁心エコー図では高感度かつ高分解能を有する高周波探触子を用いる。胸壁に近い左前下行枝中間部から遠位部にかけては4-7MHzまたは3-5MHz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3-5MHzまたは2-4MHzの探触子を用いると良い。被検者の体格によって条件が異なるため、適宜最適な探触子を用いる。

カラードプラの設定：心腔内血流に比べ冠血流は速度が遅いため、低い血流が描出されるようにカラードプラの流速レンジは20 cm/sec. 前後に設定する（図1）。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面の見にくさを少なくする。

パルスドプラの設定：サンプルボリウムの幅を1-1.5mm程度とする。心臓の動きが大きい場合や記録になれない場合は大きめに設定してもよ

*川崎医科大学循環器内科

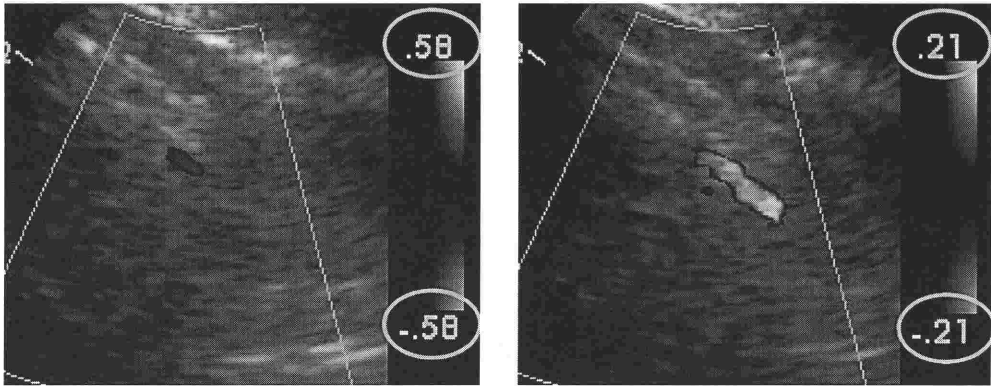


図1 カラー Doppler 流速レンジの設定

流速レンジ58 cm/sec (左) では、左前下行枝血流信号はほとんど描出されないが、21 cm/sec に下げると明瞭に描出される。

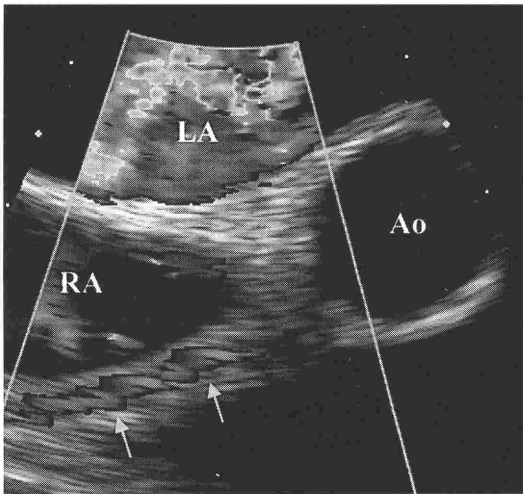


図2 経食道心エコー図で描出した右冠動脈近位部

い。カラー Doppler 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。低い流速部分も記録できるようにフィルターをなるべく低く設定する。

② 経食道心エコー図による冠血流の描出^{1,2)}

経食道心エコー図では、左右の冠動脈起始部から近位部が描出され、断層像により冠動脈内腔が確認できる (図2)。カラー Doppler 法による冠動脈内血流の検出およびパルス Doppler 法による血流速度パターンの記録も可能であるが、左冠動脈主幹部は多くの例で超音波のビーム方向と垂直方向に走るため、カラー Doppler やパルス Doppler での血

流評価が困難なことが多い。

③ 経胸壁心エコー図による冠血流の描出

被検者を左側臥位とする (とくに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できるだけ側方を向いてもらう)。まず、白黒の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 Doppler 法を行う。症例によっては冠血管が管状に判別できる場合もあるので、よく観察する。

右冠動脈入口部および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 (図3)。これは経食道アプローチで観察できる像のほぼ上下反転の像である。カラー Doppler 信号に沿って探触子を動かし、肺動脈の横を前方に進む前下行枝近位部を観察する。

一旦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、肺の影響を受けやすい部位であり、また探触子を置く肋間も下げる必要があるため、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の、断層像で前室間溝を描出し、その周囲に関心領域を設定、カラー Doppler 法を施行する。この短軸断面では描出している冠動脈のレベルが確認できるため位置の把握がしやすい。拡張期に心外膜側を心尖部方向に流れる左前下行枝血流信号 (赤い信号) が横断面で捉えられたら、探触子を長軸方向に動かして血流

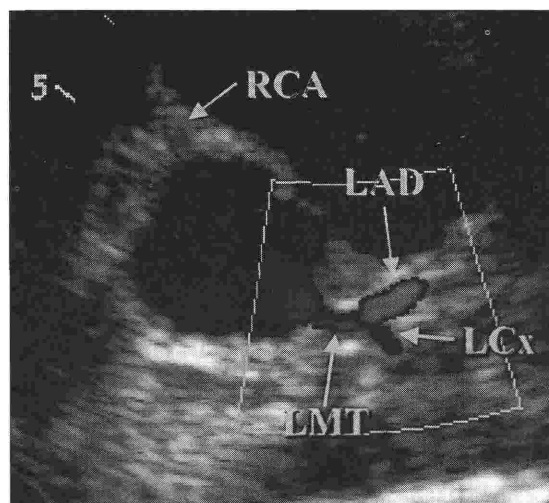


図3 経胸壁心エコー図で描出した冠血流信号

LMT:左冠動脈主幹部, LAD:前下行枝近位部, LCx:回旋枝近位部, RCA:右冠動脈入口部(断層像)

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(拡張期の赤い信号)を見つけたら,探触子を時計方向へ回転して(二腔断面の方向)ドプラ信号が長軸方向へ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,後室間溝を走るのので,短軸像または心尖部二腔断面像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,二腔断面像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,冠血管を長軸方向で描出されるよう調整する.

回旋枝はバリエーションが多く描出困難な場合も多いが,大抵は短軸断面での前乳頭筋付近の外膜側を走ることが多く,この場合やはり動脈と静脈が横断面で交互に検出される.

・ 見えないときの工夫

断層像のゲインが高い部位のカラードプラ信号はフィルターにより除かれる場合があるので,オリエンテーションがついたらまず,白黒断層像のゲインを落としてみる.クラッタノイズが気にならない程度にフィルターの設定速度を下げてもよ

い.

カラードプラの繰り返し周波数を下げることで遅い血流信号は描出されやすくなるが,同時にクラッタノイズが増えるため通常速度レンジの下限は9-10 cm/sec程度である.ノイズが多くないようであればさらにレンジを下げてよい.

ドプラ信号増強のために経静脈性の超音波造影剤を用いることができる³⁾.レボピストを300 mg/mlの濃度に溶かし,1-2 ml/hrの速度で持続静注する.簡便に行うには,安静時血流速度測定前にレボピスト(300 mg/mlに溶解)を1 ml静注し,30秒ほど待ってピークが過ぎてから即座に記録を開始,続いて薬物負荷を行う.心筋や心腔コントラスト法と比較して,ドプラ信号の増強効果は長く続くため,この方法でも十分な効果が期待できる.レボピストを投与すると冠血流信号は増強し検出は容易になるが,周辺ノイズも同時に増強するので適宜濃度を増減し,ドプラゲインや速度レンジ,MI値を調節するとよい.増強しすぎると血管外にドプラ信号が広がるためパルスドプラによる血流速度の計測が不正確になることがあるので注意する.

③ 血流速度プロファイルの記録

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.呼吸による位置のずれがあるので,息止め可能な症例では安定して描出されるタイミングで軽く息止めを促す.呼気終末の位置は動きにくいので,息止めの困難な症例では呼気終末で描出されるように調整し呼吸のリズムを待って記録するとよい.正常冠動脈血流速度波形は収縮期,拡張期の二峰性で,拡張期優位の波形を示す(図4).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ーで同時記録した冠血流速度波形の最高流速および時間速度積分値は一致し,その精度は高いことが既に報告されている⁴⁾.カラードプラの血流方向にあわせ,慎重に角度補正をする.パルスドプラのフィルターのカットオフ値はなるべく低くし,低流速の部分も十分に表示されるようにする.

④ 冠血流速度プロファイルの解析

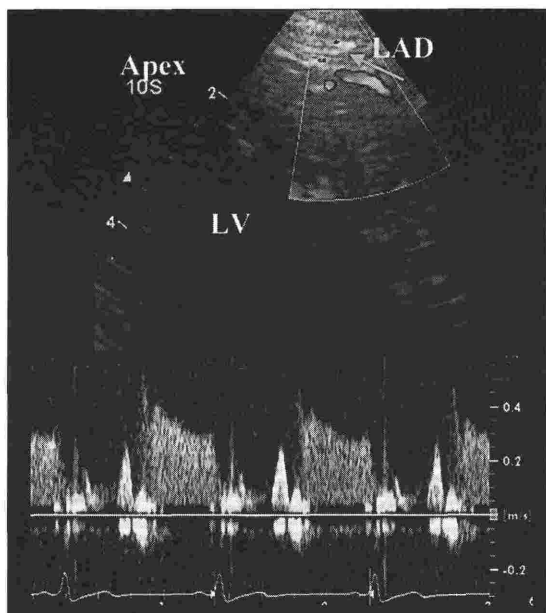


図4 前下行枝血流速度波形
パルスドプラ法にて拡張期有意の特徴的な冠血流速度波形を記録する

基本的にはドプラガイドワイヤーの指標と同じであるが、先述したように経胸壁ドプラ法では収縮期波の記録が不完全であることがあるため、予備能の計測は拡張期波のみで行う。速度プロファイルのトレースを行って、最高流速・平均流速・時間速度積分値を求める。拡張期減速時間は、拡張期最高流速部からのスロープを引き、基線と交わるまでの時間を求める。

⑤ 虚血性心疾患への応用
・ 冠動脈狭窄の診断

1. 冠予備能による診断：有意冠狭窄があると、冠血流予備能は低下する（図5⁵⁾）。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度予備能を評価することになる。冠血流速度予備能の計測は原則として病変部より末梢側で行うので、狭窄診断の場合は冠動脈遠位側で計測する。血管拡張剤としてATP (140-150 μg/kg) もしくは dipyridamole (0.56 mg/kg) の持続静注を用いる。まず安静時に引き続き薬物負荷による最大冠充血時の冠血流速度波形を記録し各々の拡張期平均流速を計測する。冠血流速度予備能は最大冠充血時と安静時の拡張期平均血

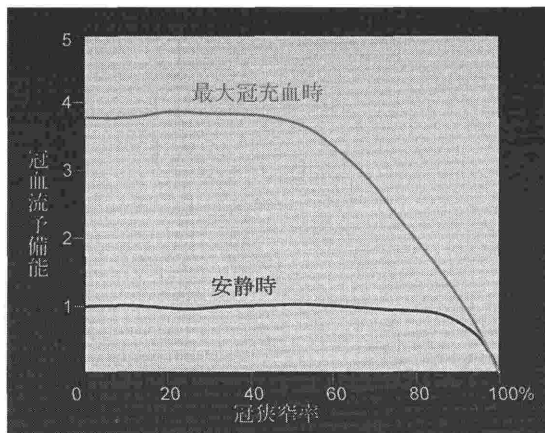


図5 冠狭窄率と冠予備能との関係(文献⁵⁾より改変引用)
75%以上の有意狭窄で冠血流予備能は2.0以下となる
90%以上の高度狭窄例では安静時の冠血流量が減少する

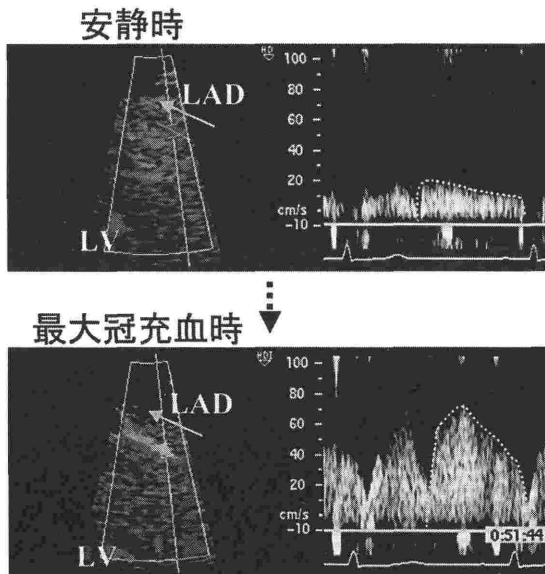


図6 冠血流速度予備能の計測
冠血流速度予備能=最大冠充血時拡張期平均流速÷安静時拡張期平均流速
拡張期平均流速は拡張期プロファイルをトレースして(破線)求める

流速の比により算出する（図6）。経胸壁パルスドプラ法により求めた冠血流予備能と冠動脈造影による狭窄率との比較研究では、冠血流予備能が2.0以下の例で75%以上の有意狭窄を示した（感度92%，特異度86%）⁶⁾。

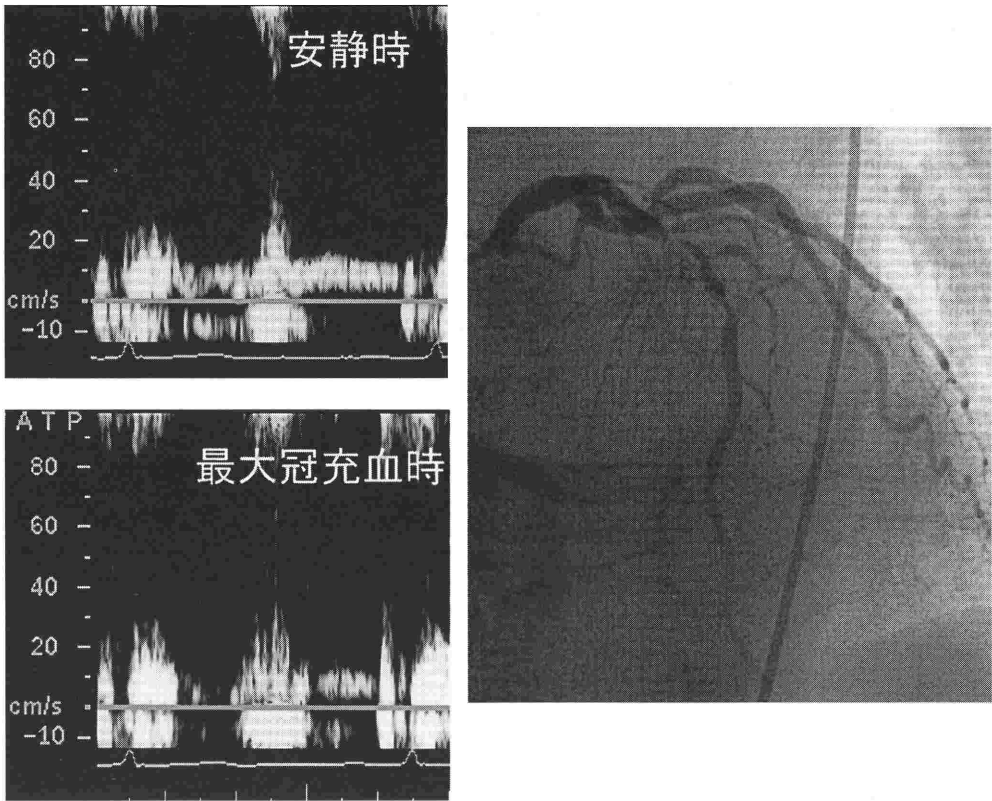


図7 冠血流予備能による狭窄診断 (本文参照)

図7は、左前下行枝ステント挿入後の症例である。インターベンション後1ヶ月の外来で経胸壁ドプラ法で計測した冠血流速予備能は正常であったが、3ヵ月後(無症状)の外来フォロー時に計測した冠血流速予備能は0.8であり高度再狭窄が疑われた。血管造影ではステント両端の高度再狭窄を認め、再インターベンションを行った。このように、経胸壁ドプラ法は外来での簡便な狭窄診断を可能とした。今後インターベンション後再狭窄診断・高齢者、腎不全患者の非侵襲的狭窄診断など、日常診療での活躍の場は大きいといえよう。冠予備能の低下は糖尿病・高血圧・高脂血症・陳旧性心筋梗塞などによる微小循環障害の存在も同時に示唆するため、このような例では冠血流予備能による狭窄診断の特異度は下がる傾向にある(必ずしも心外膜側冠動脈の狭窄のみを反映する訳ではない)という理解が必要である。

2. 加速血流と狭窄部・非狭窄部血流速比による診断：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狭窄部はカラードプラ画像上折り返しによる加速血流(localizing aliasing)として表される。カラードプラの流速レンジを下げすぎると狭窄がなくとも折り返しが生じるので、前後の冠血流シグナルがなるべく折り返しなく(赤色のみで)表示されるレンジで記録するように心がける。血管が蛇行している部分でも折り返しは生じ、aliasingのみでの狭窄診断は特異度が低い。そのため、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後follow-up時に冠動脈造影と比較検討した結果では、狭窄部前と狭窄部(aliasing部)で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%)⁷⁾。

・冠動脈閉塞診断

冠動脈完全閉塞例では、閉塞部より末梢側で側副路による逆行性血流が観察される。ドプラ法では速度情報と共に血流の方向の情報も得ることが

できるため、この逆行性血流（青い血流信号で表示）の観察が可能である。超音波ドプラ法を用いた左前下行枝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⁾。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での側副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。

・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関わらず良好な血流が得られない症例（no reflow現象）が注目されている。ドプラガイドワイヤーにより得られた再開通後の冠動脈血流プロフィールでは、拡張期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⁾。経胸壁ドプラ法を用いてもこの血流速プロフィールを記録・解析することが可能であり、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るため今後さらに心筋梗塞後冠血流動態へ迫れるものと期待される。

文 献

- 1) Yoshida K, Yoshikawa J, Hozumi T, et al : Value of transesophageal color Doppler echocardiography in the evaluation of coronary artery anatomy and blood flow. *Jpn Circ J* 54 : 298-303, 1990
- 2) Yoshida K, Yoshikawa J, Hozumi T, et al : Detection of left main coronary artery stenosis by transesophageal color Doppler and two-dimensional echocardiography. *Circulation* 81 : 1271-1276, 1990.
- 3) Iliceto S, Caiati C, Aragona P, et al : Improved Doppler signal intensity in coronary arteries after intravenous peripheral injection of a lung-crossing contrast agent (SHU 508A). *J Am Coll Cardiol* 23 : 184-190, 1994
- 4) Hozumi T, Yoshida K, Akasaka T, et al : 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* 32 : 1251-1259, 1998
- 5) 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* 33 : 87-94, 1974
- 6) Hozumi T, Yoshida K, Ogata Y, et al : Noninvasive assessment of significant left anterior descending coronary artery stenosis by coronary flow velocity reserve with transthoracic color Doppler echocardiography. *Circulation* 97 : 1557-1562, 1998
- 7) Hozumi T, Yoshida K, Akasaka T, et al : 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* 35 : 164-168, 2000
- 8) Watanabe N, Akasaka T, Yamaura Y, et al : Noninvasive detection of total occlusion of the left anterior descending coronary artery with transthoracic Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 38 : 1328-1332, 2001
- 9) Kawamoto T, Yoshida K, Akasaka T, et al : 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* 100 : 339-345, 1999