

経食道ドップラー心エコー
図法による冠動脈血流波形
と冠動脈計測に基づく左冠
動脈狭窄病変の評価

Transesophageal Doppler echocardiographic imaging and blood flow measurements for the diagnosis of stenotic left coronary arteries

山田 節子
森田 久樹
水重 克文
平林 浩一
谷本 哲子
松尾 裕英

Setsuko YAMADA
Hisaki MORITA
Katsufumi MIZUSHIGE
Koichi HIRABAYASHI
Tetsuko TANIMOTO
Hirohide MATSUO

Summary

To evaluate the usefulness of transesophageal Doppler echocardiography (TEE) in diagnosing left coronary artery (LCA) stenosis, we studied 26 patients with 33 proximal LCA lesions, including 5 with lesions of the left main trunk (LMT), 21 proximal anterior descending arteries (LAD), 7 proximal circumflex arteries (LCx), and 20 with normal coronary arteries.

We measured blood flow velocity along the LCA using the pulsed Doppler mode (PD) and obtained velocities at multiple neighboring sites in 13 normal coronary arteries and in 12 of 26 LMTs or LADs with lesions. In all 13 normals, peak velocity tended to decline towards the periphery. By contrast, in one LMT and 10 LADs with lesions, marked increase in peak velocity (1.7 to 3.9 times) was observed at the sites diagnosed as stenotic lesions by coronary angiography. Using two-dimensional echocardiography (2DE), 24 LMTs including 3 with lesions, 4 LADs including 3 with lesions and 13 LCxs including 4 with lesions were imaged. Among them, 3 LMT, one LAD and 2 LCx lesions were correctly diagnosed. The diagnostic ratio by both PD and 2DE was 60% for LMT (PD: 20%, 2DE: 60%), 48% for LAD (PD: 48%, 2DE: 5%) and 29% for LCx (PD: 0%, 2DE: 29%) lesions.

In conclusion, TEE proved to be useful in diagnosing proximal LCA stenosis. The coronary flow measurement by PD especially has the potentiality for the diagnosis of proximal LAD stenosis.

Key words

Transesophageal Doppler echocardiography Coronary flow Coronary artery stenosis

香川医科大学 第二内科
香川県木田郡三木町池戸 1750-1 (〒761-07)

The Second Department of Internal Medicine, Kagawa Medical School, Ikenobe 1750-1, Miki-cho, Kitagun, Kagawa 761-07

Received for publication December 8, 1990; accepted December 26, 1990 (Ref. No. 37-2)

はじめに

虚血性心疾患の原因は、動脈硬化に基づく冠動脈の狭窄によるものももっとも頻度が高い。この狭窄病変を直接的に診断するには、冠動脈造影法 (coronary angiography: CAG) に頼らざるを得ないのが現状である。最近、経皮的冠動脈形成術が普及してきたが、その再狭窄の出現の判定のため、侵襲的な CAG を頻繁に反復施行することを余儀なくされる症例も増えてきた。この際、かかる病変の評価が非侵襲的に可能となれば、被検者の負担を軽減することになると考えられる。また、このような方法が実現すれば、CAG 施行前に狭窄病変のある程度予知できたり、病変の経過を観察しつつ CAG 適応の決定を成し得るなど、その意義は大きいと思われる。

各種画像診断法のうち、超音波法は非侵襲的で、比較的簡便な検査方法である。近年、臨床に導入され始めた経食道ドップラー心エコー図法 (transesophageal Doppler echocardiography: TEE) は、心臓の背方からほとんど障害物を介さず心臓に近接するため、超音波の減衰がほとんど無く、良好な画像が得られるところから、冠動脈狭窄病変の評価に応用し得る可能性が高いものと思われる。

そこで今回、我々は、TEE を用いて左冠動脈形態の観察を行なうとともに、冠動脈血流速度の計測を行ない、左冠動脈狭窄病変の診断における本法の有用性と問題点について検討した。

対 象

対象は CAG 施行例中、TEE にて左冠動脈を詳しく検索した連続 65 例のうち、CAG にて左冠動脈近位部に病変を認めた 26 症例 (病変群, 31~74 歳, 平均年齢 61 歳) と、冠動脈が正常であった 20 症例 (正常冠動脈群, 22~76 歳, 平均年齢 56 歳) である。病変群は左主幹部 (LMT) 病変 (AHA 分類 segment 5): 5 例, 左前下行枝 (LAD) 近位部病変 (segment 6): 21 例, 左回旋枝 (LCx)

近位部病変 (segment 11): 7 例である。正常冠動脈群はいずれも冠動脈疾患以外の心疾患を有しており、その内訳は僧帽弁疾患 11 例, 大動脈弁疾患 2 例, 心室中隔欠損症 3 例, 心房中隔欠損症 1 例, 動脈管開存症 1 例, 心臓神経症 2 例である。

方 法

使用した装置はアロカ製 SSD-870 で、探触子には 5 MHz 食道内超音波探触子 (UST-5228S-5, セクタ弁横切り断層装置) を用いた。

被検者には 4 時間の絶食の後、lidocaine ビスカスと lidocaine スプレーにて喉頭麻酔を行ない、次いで diazepam 10 mg を静注した。被検者を左側臥位にして検査を行ない、その所要時間は 30 分程度を限度とした。

左冠動脈断層像の描出は、探触子を門歯列から約 30 cm 挿入して断層心エコー図表示 (2DE) で得られる大動脈弁直上レベルの短軸断面にて LMT の orifice, 次に LAD, LCx の分岐部, さらに可能なかぎりそれぞれの末梢まで描出するように努めた。また同時に、カラー Doppler 断層表示を併用し、冠動脈血流の観察も行なった (Fig. 1)。次いで、これらの所見から冠動脈を同定し得た症例では、パルス・ドップラー表示 (PD) を用い、サンプル部位を移動して多数点での冠血流速度計測を試みた。なお、血流速度の評価には、推定される冠動脈の走行に対する超音波ビーム入射角による補正を行なった。このようにして得られた冠動脈像と血流速度所見を、CAG 所見と対比検討した。なお、CAG 所見は別の医師により判定され、その結果は CAG 前または後に施行した TEE 検査が終了するまで検者には知らされなかった。

結 果

1. 断層心エコー図法による冠動脈の評価

2DE により、LMT は出口から分岐部までの全域が描出できたもの、LAD, LCx は分岐部から 2 cm 以上描出できたものを検出可能例とした。



Fig. 1. Imaging of the normal left coronary artery (LCA) using two-dimensional echocardiogram (2DE) (left) and two-dimensional Doppler echocardiogram (2DD) (right).

The proximal LCA was clearly depicted by 2DE, and coronary flow was visualized by 2DD.

Ao=aortic root; LA=left atrium; LAD=left anterior descending artery; LCx=left circumflex artery; LMT=left main trunk; PA=pulmonary artery.

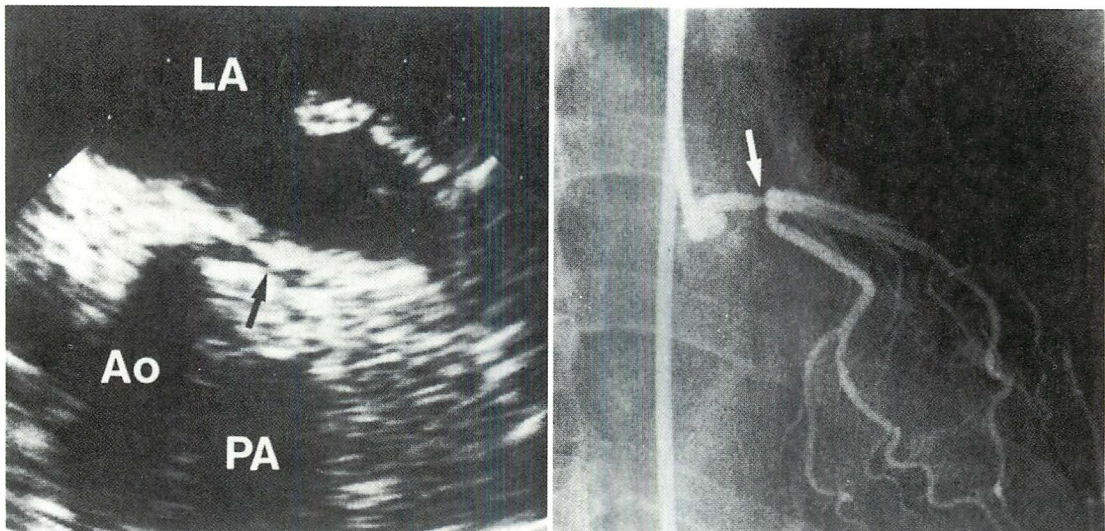


Fig. 2. 2D echocardiographic image and coronary angiogram of the left main trunk with 50% stenosis (arrow).

Abbreviations as in Fig. 1.

正常群と病変群を併せた 46 症例中、LMT 44 例 (うちこの部に病変を有する例を 3 例含む)、LAD 16 例 (病変を有する 3 例を含む)、LCx 27 例 (病変を有する 4 例を含む) でそれぞれの描出

が可能であった。

2DE による狭窄の診断基準は、冠動脈内腔が連続して観察される断面でその一部に狭小化を認め、さらに断面を若干移動させても同様の形態が

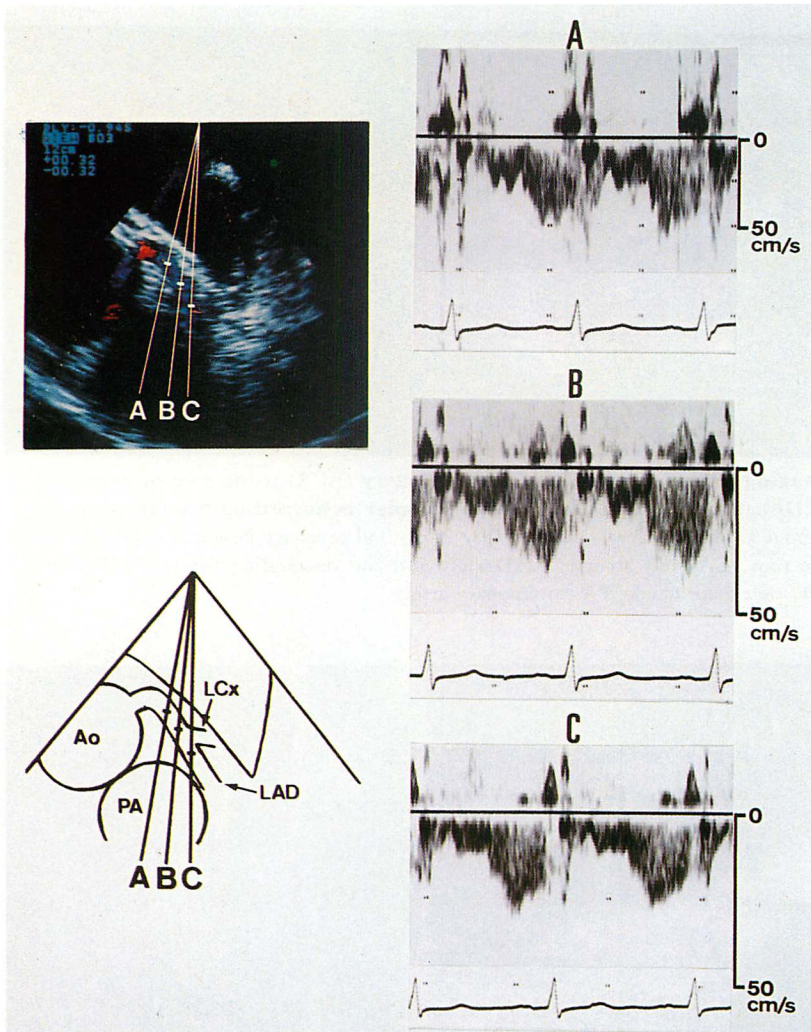


Fig. 3. Left coronary arterial flow patterns of the normal left coronary artery. Abbreviations as in Fig. 1.

みられた場合に狭窄ありとした。この基準を満たして冠動脈描出ができたのは、病変群では LMT 病変 5 例中 3 例, LAD 病変 21 例中 1 例, LCx 病変 7 例中 2 例で, LAD, LCx 病変例では低率であったが, これらはいずれも CAG での狭窄と一致した。正常群でありながらこの基準による狭窄ありと判断されたもの (false positive) は無かった。Fig. 2 に LMT の狭窄例を示す。本例で TEE により描出された狭窄部位は CAG で

のそれと一致した。

2. パルス・ドップラー法による冠動脈血流速度計測
血流速度計測は, 拡張期のほぼ全体にわたって血流パターンを記録し得たものを検出可能例とした。

正常群と病変群を併せた 46 症例中, LMT は 29 例, LAD は 37 例, LCx は 10 例において, 血流検出が可能であった。そのうち, 各血管の複数箇所での血流計測は, 正常群では LMT から

LAD において 13 例で可能であり、病変群では、LMT についてはこの部に病変を有する 1 例を含む 2 例、LAD についてはこの部に病変を有する 11 例全例で可能であった。一方、LCx で複数個所の血流計測が可能な例は無かった。

Fig. 3 に正常冠動脈例での LMT から LAD にかけての血流波形の一例を示す。収縮期と拡張期にピークを持つ二峰性であるが、拡張期ピークの高い拡張期優位のパターンを呈した。

Fig. 4 は正常群 13 例での LMT から LAD にかけての拡張期ピーク血流速度の変化を示す。LMT での拡張期ピーク血流速度は 32~100 cm/sec (平均 67 cm/sec)、分岐部では 35~62 cm/sec (平均 45 cm/sec)、LAD 起始部では 21~65 cm/sec (平均 46 cm/sec)、末梢側では 24~63 cm/sec (平均 45 cm/sec) と、LMT に比べ、分岐部と LAD では有意に減少した。なお、拡張期に対する収縮期の血流速度の比 (S/D) は、LMT に関しては 4 例で得られ、平均は 0.54 ± 0.09 、LAD 起始部では 6 例で平均 0.48 ± 0.08 、末梢側では 3 例で平均 0.48 ± 0.02 であった。

一方、病変群では、LMT に病変のある 1 例と LAD に病変のある 10 例で、病変冠動脈内のある部位で急激に血流速度が 1.7~3.9 倍に増加する現象がみられた。

Fig. 5 にその一例を示す。この症例は、2DE にては LAD の走行が推定できる程度にしか描出されなかったが、パルス・ドップラー法を用いて LAD に沿って sampling volume を移動させていくと、突如として血流速度が増大する部位を認めた。A の部位で得られた血流は、拡張期ピーク血流速度は 38 cm/sec と正常平均より低く、S/D は 0.82 と正常群に比べて高かったが、そのわずかに末梢の B の部位で得られた拡張期ピーク血流速度は、148 cm/sec と A の約 3.9 倍に増大していた。この症例の CAG 所見は、分岐部から約 2 cm 末梢の segment 6 のほぼ B に一致する部位で狭窄を認めた (Fig. 6)。このような局所的な血流速度の増加がみられた 11 例は、全例、高速

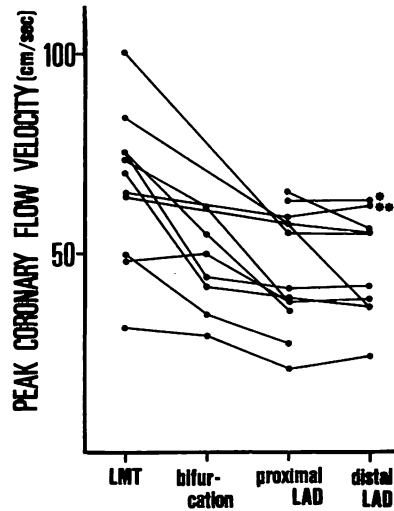


Fig. 4. Change in peak diastolic flow velocity along the normal left coronary artery.

Peak diastolic flow velocity tended to decline distally.

*: with severe aortic regurgitation, **: with severe aortic stenosis.

Abbreviations as in Fig. 1.

血流を捉えた部位と CAG の狭窄部位がほぼ一致した。Fig. 7 にこれら 11 例の狭窄部位での拡張期ピーク血流速度の変化を示したが、その増加の程度は 1.7~3.9 倍であった。なお、収縮期の血流速度が明瞭に捉えられたのは 11 例中 3 例で、狭窄前の S/D は 0.56~0.82 (平均 0.72) と、正常例よりも高値を示し、狭窄部の S/D は 0.43~0.49 (平均 0.47) であった。

冠動脈血流速度の局所的な増大所見を狭窄診断の指標とし、これに冠動脈像からの診断を加えると左冠動脈近位部狭窄病変の診断率は Table 1 のごとくであった。「Recorded」は 2DE に関してはその segment のほぼ全体が、明瞭に描出されたもの、パルス・ドップラー法に関しては同一 segment の冠動脈内で複数箇所の血流計測が可能であった症例を意味し、「Detected」はそのうち狭窄と診断できた症例を示している。LMT 病変例は 2DE により 5 例中 3 例で狭窄の診断が可

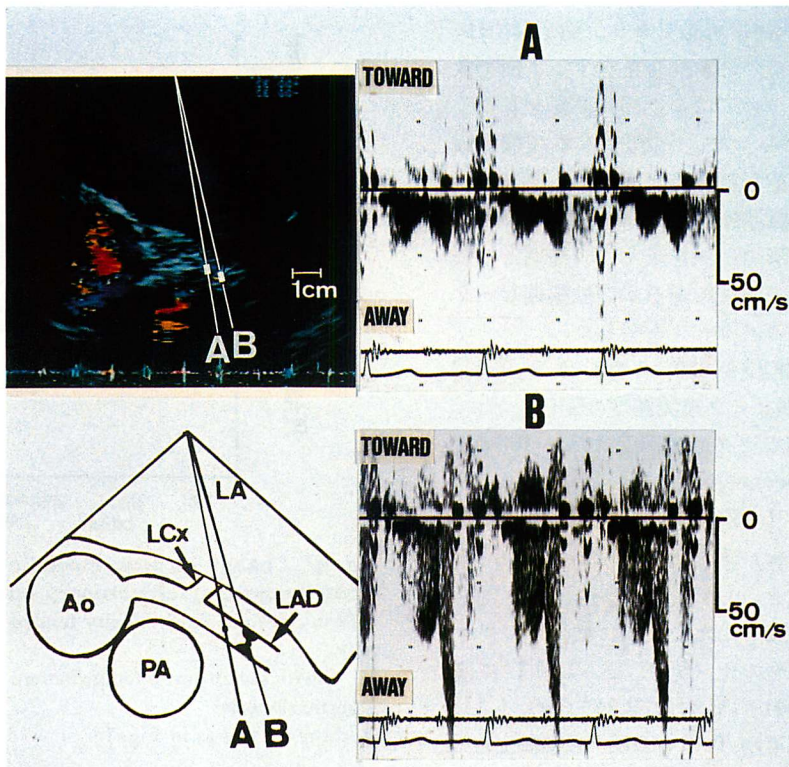


Fig. 5. Coronary arterial flow patterns in a case of the left anterior descending artery (LAD) with 99% stenosis.

Left upper panel (A): pre-stenotic flow. Peak diastolic flow velocity was lower than that in normal subjects. Left lower panel (B): stenotic flow. Peak diastolic flow velocity increased about 3.9 times of that in A.

Abbreviations as in Fig. 1.

能であり、そのうち1例はパルス・ドップラー法によっても検出し得た。LAD 病変は21例中、2DE では1例しか狭窄病変を検出できず、一方パルス・ドップラー法では10例で狭窄の診断が可能であった。LCx 病変は7例中、2DE のみにて2例の診断が可能であった。

考 按

超音波法による冠動脈断層像の描出は、Weyman ら¹⁾、松尾ら²⁾の報告を嚆矢とし、以後、経胸壁アプローチを用いた多くの報告³⁻¹²⁾がみられ、拡大病変のみならず、狭窄病変の評価もある程度可能とされている。しかし、経胸壁アプロ

チでは、その観察領域はほぼ左冠動脈主幹部に限定され、かつ満足すべき像が得られる率は必ずしも高くはない。これに対し、新しいアプローチである経食道法では、冠動脈像の描出率がより高く、かつ広範囲に良好な画像が得られるところから、本法を用いた冠動脈病変の評価が試みられている¹³⁻¹⁵⁾。しかしながら、心エコー図法では観察断面に制限があるため、狭窄が捉えられないことがあったり、あるいは管腔の全体像を追跡描出できない場合や、冠動脈エコーが血管壁の性状に強く影響される場合に、狭窄があるのではないかと判定する可能性がある、などの問題点が指摘されている。

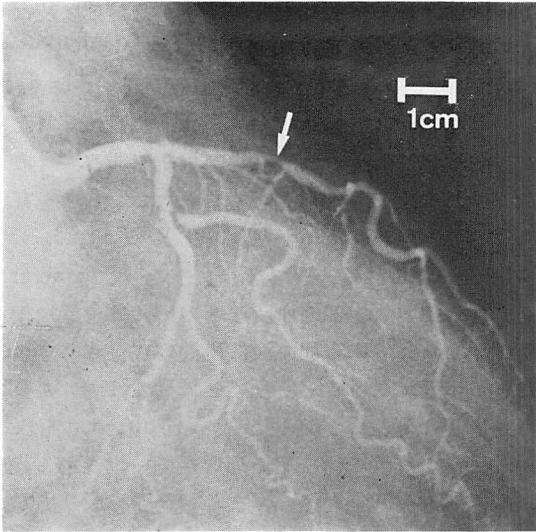


Fig. 6. Coronary angiogram in the RAO view of the same case as in Fig. 5.

Arrow indicates a stenotic lesion. The lesion was 99% stenosed in the LAO view.

一方、超音波法による冠動脈血流計測は、経胸壁アプローチでは Gramiak ら¹⁶⁾や Fusejima¹⁷⁾、経食道アプローチでは Kyo ら¹⁸⁾や Yamagishi ら¹⁹⁾、Zwicky ら²⁰⁾の報告があるが、いずれもその検出のみにとどまっておき、冠動脈血流速度波形の疾患診断への応用に関する報告はみられない。さらに、多数点での冠動脈血流速度の詳細な検討

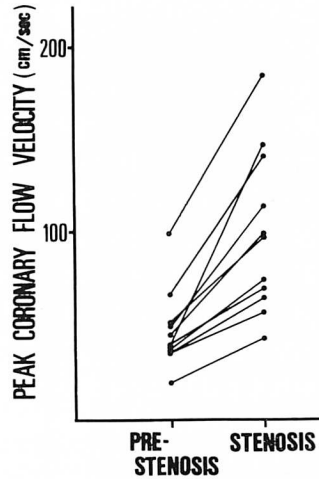


Fig. 7. Change in peak diastolic flow velocity in the left coronary artery with stenosis.

Marked increase in peak diastolic flow velocity (1.7 to 3.9 times) was observed at the sites diagnosed as stenotic lesions by coronary angiography.

もなされていない。そこで本研究では、経食道アプローチでのパルス・ドップラー法による詳細な冠動脈血流速度の計測を行なうとともに、冠動脈血流速度波形と冠動脈イメージングに基づいて、狭窄病変の診断を試みた。

正常冠動脈群で得られた血流速度波形は、収縮期と拡張期にピークを有する二峰性で、拡張期優位のパターンとして捉えられた。さらに、今回は

Table 1. Diagnosis of left coronary artery stenosis by transesophageal echocardiography

	LMT (seg. 5) (n=5)		LAD (seg. 6) (n=21)		LCx (seg. 11) (n=7)	
	PD	2DE	PD	2DE	PD	2DE
Recorded	n=1	n=3	n=11	n=3	n=0	n=4
Detected	n=1	n=3	n=10	n=1	n=0	n=2
Combined diagnosis	3/5 (60%)		10/21 (48%)		2/7 (29%)	

“Recorded” indicates that the coronary artery could be clearly depicted by 2DE, or peak diastolic flow velocity could be measured by PD at some neighboring sites along the coronary artery. “Detected” indicates that the detection of stenosis based on stenotic coronary image or local flow acceleration. “Combined diagnosis” indicates that the rate of definite diagnosis of stenosis by combination of 2DE and PD.

PD=pulsed Doppler; 2DE=two-dimensional echocardiography. Other abbreviations as in Fig. 1.

LMT から LAD にかけて 2~4 箇所 の部位で血流速度計測を行なったところ, LMT に比べ LAD で血流速度が減少する傾向が観察された。これは冠動脈の分枝により, 血流量が減少するためと考えられた。一方, 少数例の検討ではあるが, 収縮期ピーク血流速度 / 拡張期ピーク血流速度比には, 部位的に有意な変化を認めなかった。

正常冠動脈の血流動態に関しては, 従来, 電磁流量計²¹⁾やホットフィルム法²²⁾, レーザー・ドップラー法²³⁾, 冠動脈カテーテル・ドップラー法²⁴⁾, 20 MHz 術中超音波法²⁵⁾などを用いた多数の報告がみられるが, これらはいずれも動物実験あるいはヒトでは, 術中あるいはカテーテルを挿入しての非生理的な状態での計測であり, ヒトにおいて生理的な状態で部位別の血流速度を計測し, 左冠動脈の近位部でも, 中枢部に比べ, 末梢部で血流速度が変化して減少することが本研究で初めて明らかにされた。

一方, 狭窄病変例においては, 冠動脈の一部で急激に血流速度が増大する現象を観察した。その血流速度の差は, 入射角補正による血流速度計測の誤差の影響などを大きく越える範囲にあり, なおかつその部位が CAG の狭窄部位にほぼ一致しているところから, 局所的高速血流は狭窄部の血流を捕捉したものと考えられた。このような冠狭窄部の血流動態については, 最近, Johnson ら²⁶⁾がイヌの冠動脈に人工的に狭窄を作り, 冠動脈ドップラーカテーテルを用いて狭窄部の血流速度が速くなることを報告しているが, 臨床例において, ほぼ生理的な状態でこのような狭窄部の血流速度の局所的な加速現象を捉え, これが狭窄診断に有用であることを明らかにしたのは本研究が初めてである。

このようなパルス・ドップラー法による狭窄の診断は, LAD 病変において特に有効であった。これは, LAD の走行がビーム方向に平行に近いため, 血流の検出に有利に働いたためと思われる。複数箇所での血流計測が可能であったにもかかわらず狭窄を診断できなかった 1 例は, 狭窄が

segment 7 直前にあり, 計測範囲がその部に及ばなかったものと思われた。LAD 病変 21 例においては 11 例で複数箇所での血流計測が可能であり, そのうち 10 例において狭窄と診断できた。したがって複数箇所での血流計測が可能である場合には, 血流による狭窄診断は高い sensitivity を有するものと思われた。

Johnson らの報告²⁶⁾では, 狭窄の %diameter と非狭窄部と狭窄部の血流速度の比には良好な相関が認められ, 狭窄部血流に連続の式が成り立つことが示されているが, 我々の結果では両者の有意な相関は得られなかった。この理由としては, Johnson の実験では狭窄の形態が画一化され, 狭窄度も 40~70% と軽く, また冠動脈を取り出して肉眼的に狭窄を測定しているのに比べ, 本研究では狭窄の重症度を CAG により判定していることに起因するところが大いと思われる。すなわち, 臨床例では狭窄形態が複雑で, CAG では実際の面積狭窄率を正確には評価することが困難であるという問題がある。一方, TEE の計測が狭窄部の最大血流速を必ず捕捉しているかどうかという問題点も残る。例えば tapering を示す狭窄では, 最大血流速を示す最大狭窄部より前の血流速度として, 次第に加速しつつある部位の血流をとっている可能性もあり, この場合には %diameter を過小評価することになるとと思われる。

狭窄前後の冠血流動態の変化に関しては, これまで動物実験や術中に超音波法を用いた検討がなされており²⁷⁻²⁹⁾, 狭窄部上流の血流動態に関しては, 狭窄の増加とともに主に拡張期の流量が減少することが報告されている。我々の結果でも, 狭窄部上流の S/D は平均 0.72 と, 正常例の S/D の平均 0.48 に比べ高い傾向を示し, これらと同様の結果を認めており, S/D の上昇は間接的に狭窄の存在を示唆する所見と言える。

冠動脈断層像の描出については, LMT で高率であったが, LAD は正常群, 病変群併せて 29% と低く, しかもその画像は LMT や LCx に比べて不明瞭なことが多かったため, 断層像からの

LAD 病変の診断は 21 例中 1 例と極めて困難であった。この理由としては、先に述べたように LAD の走行が血流の検出には有利であるが、断層像の描出には不利に働くためと思われた。LCx 走行がビーム方向に垂直に近く、断層像の描出には有利と考えられるが、三次元的にその走行を追跡し観察することは必ずしも容易でないことが、狭窄の診断率が低かった原因と思われた。

結 語

TEE による冠動脈内多数点での血流速度計測と冠動脈像の観察は、左冠動脈近位部狭窄病変の診断に有用であった。一般に LAD 病変の診断には冠血流計測が優れ、また LMT, LCx 病変には冠動脈像が優れていたが、パルス・ドップラー法による冠血流計測と 2DE による冠動脈像の両者を併用することにより、互いに補完的に働き、より診断が容易になると考えられた。

要 約

経食道ドップラー心エコー図法 (TEE) により得られる冠動脈血流パターンならびに冠動脈像の、左冠動脈狭窄病変診断に対する有用性を検討した。対象は冠動脈造影にて狭窄度 50% 以上の左冠動脈近位部病変 (seg. 5, 6, 11) が確認された 26 例、計 33 病変 (LMT: 5, LAD: 21, LCx: 7) と正常冠動脈群 20 例で、それらについて TEE を施行し、パルス・ドップラー表示 (PD) による冠動脈内多数点での血流速度の計測、ならびに 2D エコー表示 (2DE) による冠動脈像の描出を試み、それらの成績を冠動脈造影所見と比較検討した。

冠動脈に沿った複数箇所での血流 PD 計測は、正常群では、LMT から LAD において 13 例、病変群では、LMT はこの部に病変を有する 1 例を含む 2 例、LAD はこの部に病変を有する全 11 例で可能であった。正常群では全例、LMT から LAD へいくに従って血流速度が低下するのに対し、病変群では 11 例 (LMT 1 例、LAD 10 例)

で、病変冠動脈内の近接した部位で、急激に血流速度が 1.7~3.9 倍に増加する現象がみられた。これらの 11 例では全例、高速血流を捉えた部位と CAG の狭窄部位はほぼ一致した。また、冠動脈像は、病変群では 26 症例中、LMT はこの部の病変例 3 例を含む 24 例、LAD はこの部の病変例 3 例を含む 4 例、LCx はこの部の病変例 4 例を含む 13 例で描出され、その断層像から LMT 3 例、LAD 1 例、LCx 2 例において狭窄の診断が可能であった。冠動脈像からの診断に加え、冠動脈血流速度の局所的な増大所見を狭窄診断の指標とすると、左冠動脈近位部狭窄病変の診断率は LMT 60% (PD: 20%, 2DE: 60%), LAD 48% (PD: 48%, 2DE: 5%), LCx 29% (PD: 0%, 2DE: 29%) であった。

TEE による冠動脈内多数点での血流速度計測と冠動脈像の観察は、左冠動脈近位部狭窄病変の診断に有用で、ことに LAD 病変の診断には冠血流計測が優れていた。

文 献

- 1) Weyman AE, Feigenbaum H, Dillon JC, Johnston KW, Eggleton RC: Noninvasive visualization of the left main coronary artery by cross-sectional echocardiography. *Circulation* 54: 169-174, 1976
- 2) 松尾裕英, 松本正幸, 浜中康彦, 永田正毅, 別府慎太郎, 大原龍彦, 浅井雅人, 千田彰一, 榊原博, 仁村泰治, 中村幸二, 森 護, 三嶋正芳, 鎌田振吉, 八木原俊克, 中田 健, 小林芳夫: 冠状動脈瘻の超音波所見. *日超医講演論文集* 27: 205-206, 1975
- 3) 松尾裕英, 松本正幸, 浜中康彦, 永田正毅, 別府慎太郎, 大原龍彦, 土井光徳, 千田彰一, 仁村泰治, 山田義夫, 川島康生, 森 透, 河内寛治, 播磨良一, 大国英和, 小塚隆弘, 藤野正興, 太田光重: 急性熱性皮膚粘膜リンパ節症候群 (MCLS) における冠動脈瘤の超音波像について. *日超医講演論文集* 31: 139-140, 1977
- 4) Chen CC, Morganroth J, Ogawa S, Mardelli TJ: Detecting left main coronary artery disease by apical, cross-sectional echocardiography. *Circulation* 62: 288-293, 1980
- 5) Rogers EW, Feigenbaum H, Weyman AE, Godley RW, Vakili ST: Evaluation of left coronary artery

- anatomy in vitro by cross-sectional echocardiography. *Circulation* **62**: 782-787, 1980
- 6) Rogers EW, Feigenbaum H, Weyman AE, Godley RW, Johnston KW, Eggleton RC: Possible detection of atherosclerotic coronary calcification by two-dimensional echocardiography. *Circulation* **62**: 1046-1053, 1980
 - 7) Rink LD, Feigenbaum H, Godley RW, Weyman AE, Dillon JC, Phillips JF, Marshall JE: Echocardiographic detection of left main coronary artery obstruction. *Circulation* **65**: 719-724, 1982
 - 8) Chandraratna PA, Aronow WS: Left main coronary arterial patency assessed with cross-sectional echocardiography. *Am J Cardiol* **46**: 91-94, 1980
 - 9) Block PJ, Popp RL: Detecting and excluding significant left main coronary artery narrowing by echocardiography. *Am J Cardiol* **55**: 937-940, 1985
 - 10) Ryan T, Armstrong WF, Feigenbaum H: Prospective evaluation of the left main coronary artery using digital two-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* **7**: 807-812, 1986
 - 11) Presti CF, Feigenbaum H, Armstrong WF, Ryan T, Dillon JC: Digital two-dimensional echocardiographic imaging of the proximal left anterior descending coronary artery. *Am J Cardiol* **60**: 1254-1259, 1987
 - 12) Douglas PS, Fiolkoski J, Berko B, Reichek N: Echocardiographic visualization of coronary artery anatomy in the adult. *J Am Coll Cardiol* **11**: 565-571, 1988
 - 13) Taams MA, Gussenhoven EJ, Cornel JH, The SHK, Roelandt JR TC, Lancee CT, Brand M: Detection of left coronary artery stenosis by transesophageal echocardiography. *Eur Heart J* **9**: 1162-1166, 1988
 - 14) Pearce FB, Sheikh H, de Bruijin NP, Kisslo JK: Imaging of the coronary arteries by transesophageal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* **2**: 276-283, 1989
 - 15) Yoshida K, Yoshikawa J, Hozumi T, Yamaura Y, Akasaka T, Fukaya T, Kato H: Detection of left main coronary artery stenosis by transesophageal color Doppler and two-dimensional echocardiography. *Circulation* **81**: 1271-1276, 1990
 - 16) Gramiak R, Holen J, Moss AJ, Gutierrez H, Picone AL, Roe SA: Left coronary arterial blood flow: Non-invasive detection by Doppler ultrasound. *Radiology* **159**: 657-662, 1986
 - 17) Fusejima K: Non-invasive measurement of coronary artery blood flow using combined two-dimensional and Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* **10**: 1024-1031, 1987
 - 18) Kyo S, Takamoto S, Matsumura M, Yokote Y, Omoto R: Visualization of coronary blood flow by transesophageal Doppler color flow mapping. *J Cardiogr* **16**: 831-840, 1986 (in Japanese)
 - 19) Yamagishi M, Miyatake K, Beppu S, Kumon K, Suzuki S, Tanaka N, Nimura Y: Assessment of coronary blood flow by transesophageal two-dimensional pulsed Doppler echocardiography. *Am J Cardiol* **62**: 641-644, 1988
 - 20) Zwicky P, Daniel WG, Mügge A, Lichtlen PR: Imaging of coronary arteries by color-coded transesophageal Doppler echocardiography. *Am J Cardiol* **64**: 639-640, 1988
 - 21) Gregg DE, Khouri EM, Rayford CR: Systemic and coronary energetics in the resting unanesthetized dog. *Circ Res* **16**: 102-113, 1965
 - 22) Nerem RM, Rumbreger JA, Gross DR, Muir WW, Geiger GL: Hot film coronary artery velocity measurements in horses. *Cardiovasc Res* **10**: 301-313, 1976
 - 23) Kajiya F, Tomonaga G, Tsujioka K, Ogasawara Y, Nishihara H: Evaluation of local blood flow velocity in proximal and distal coronary arteries by laser Doppler method. *J Biomech Eng* **107**: 10-15, 1985
 - 24) Benchimol A, Stegall HF, Gartlan JL: New method to measure phasic coronary blood velocity in man. *Am Heart J* **81**: 93-101, 1971
 - 25) Kajiya F, Ogasawara Y, Tsujioka K, Nakai M, Goto M, Wada Y, Tadaoka S, Matsuoka S, Mito K, Fujiwara T: Evaluation of human coronary blood flow with an 80 channel 20 MHz pulsed Doppler velocimeter and zero-cross and Fourier transform methods during cardiac surgery. *Circulation* **74** (Suppl): III-53-III-60, 1986
 - 26) Johnson EL, Yock PG, Hargrave VK, Srebro JP, Manubens SM, Seitz W, Ports TA: Assessment of severity of coronary stenoses using a Doppler catheter: Validation of a method based on the continuity equation. *Circulation* **80**: 625-635, 1989
 - 27) Gould KL, Lipscomb K, Hamilton GW: Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis. *Am J Cardiol* **33**: 87-94, 1974
 - 28) Furuse A, Kloppe EH, Brawley RK, Gott VL: Hemodynamic determinations in the assessment of distal coronary artery disease. *J Surg Res* **19**: 25-33, 1975

29) Kajiya F, Tsujioka K, Ogasawara Y, Wada Y, Matsuoka S, Kanazawa S, Hiramatsu O, Tadaoka S, Goto M, Fujiwara T: Analysis of flow charac-

teristics in poststenotic regions of the human coronary artery during bypass graft surgery. *Circulation* **76**: 1092-1100, 1987