

経食道ドップラー断層法による冠動脈血流の映像化

Visualization of coronary blood flow by transesophageal Doppler color flow mapping

許 俊鋭
高本 真一
松村 誠
横手 祐二
尾本 良三

Shunei KYO
Shinichi TAKAMOTO
Makoto MATSUMURA
Yuji YOKOTE
Ryozo OMOTO

Summary

For noninvasive evaluation of coronary blood flow, 22 patients were examined with transesophageal Doppler color flow mapping within six hours after cardiovascular surgery.

The anatomical structure of the left main coronary trunk (LMT) was observed by conventional two-dimensional echocardiography (2-DE) in 20 patients (91%), and color flow of the LMT was visualized in 18 of 21 patients (86%) (one patient had total occlusion). The blood flow in the LMT began in mid-systole, but the flow was observed mainly in diastole. The peak of the flow was observed mainly in late diastole and the range of the peak velocity was 35 to 163 cm/sec (average = 76.9 ± 31.4 cm/sec).

The proximal portion of the right coronary artery (RCA) was observed in 13 patients (59%), and its color flow was visualized in only two patients (9%).

In two patients intra-aortic balloon pumping (IABP) assist was performed postoperatively, and the direct effect of the assist on the coronary blood flow was clearly observed by transesophageal Doppler color flow mapping. The peak blood flow velocity of the LMT increased by 32% during the assist.

In conclusion, human coronary blood flow can be visualized and evaluated noninvasively using transesophageal Doppler color flow mapping. This technique can be used for future investigation of coronary circulation.

Key words

Transesophageal echocardiography
Noninvasive diagnosis

Doppler color flow mapping

Coronary blood flow

埼玉医科大学 第一外科
埼玉県入間郡毛呂山町毛呂本郷 38 (〒350-04)

Department of Surgery, Saitama Medical School, 38
Morohongo, Moroyama-machi, Iruma-gun, Saitama-
ken 350-04

Received for publication May 12, 1986; accepted June 28, 1986 (Ref. No. 32-PS15)

序 文

リアルタイム心腔内ドップラー血流映像法（ドップラー断層）は、従来の断層心エコー図に重ね合わせ、心腔内血流映像を断層像としてカラー表示する方法で、すでに先天性心疾患¹⁾、後天性弁膜症²⁾、あるいは大血管病変³⁾の診断における有用性が確認されている。本法の導入により、臨床的に虚血性心疾患の合併が否定された先天性心疾患や後天性弁膜症では、侵襲的な心血管造影を含む心臓カテーテル検査を省略し、手術適応の決定が可能となった^{4,5)}。しかしながら少くとも高齢者や冠動脈疾患の合併が疑われる症例では、冠動脈造影検査を省略して手術適応を決定することのリスクは大きい。なぜなら今日のドップラー断層装置の解像力では、体表よりの approach による冠動脈および冠動脈血流の描出には大きな困難があり、冠動静脈瘻など一部の症例を除いては成功していない。小児の川崎病における近位冠動脈瘤の診断において、断層心エコー図は極めて有力な診断手段であるが、小児例においてさえ、冠動脈内の血流はドップラー断層により描出し得ていない。ドップラー法による冠動脈血流の評価の試みは主として術中応用におかれ、冠動脈近位部の血流⁶⁾、あるいは大伏在静脈バイパスグラフト血流⁷⁾、内胸動脈バイパスグラフト血流などのカラー血流映像⁸⁾が得られている。また 20 MHz の超音波パルス・ドップラー法による詳細な術中冠動脈計測も報告されてきた⁹⁾。

我々の究極の目的は、ドップラー断層法による冠動脈血流の映像を、開胸 approach によらずに得ることである。経食道トランスデューサーによる超音波検査は、体外からのアプローチとは異なり、心臓の後面より見た視野が得られることや、肺や胸骨による解剖学的制限のないこと、あるいは皮下組織による超音波の減衰のないことなど、いくつかの利点があり、体外からは観察困難な解剖学的構造や血流などの観察が可能となり得る。特に高い空間解像力を必要とする冠動脈の描出に

は、高い能力を発揮することが期待される。

本研究の目的は経食道トランスデューサーを用いたドップラー断層により、開胸下の術中検査によらずに、冠動脈血流の映像化を試みることである。

対象ならびに方法

22 例の心大血管手術症例を対象として、経食道アプローチによる冠動脈血流の観察を行った。対象の年齢は 28 歳～72 歳（平均 49±14 歳）であり、男子 13 例、女子 9 例である。疾患は先天性心疾患 2 例、後天性弁膜症 12 例、虚血性心疾患 5 例、大血管疾患 2 例、尿毒症性心膜炎に基づく心タンポナーデ症例 1 例であった。経食道トランスデューサーによる検査は、術後 6 時間以内に集中治療室において行った。患者は軽い鎮静状態で覚醒しておらず、完全な調節呼吸下にあった。心電図および橈骨動脈圧、Swan-Ganz カテーテルによる肺動脈圧を持続モニターし、さらに熟希釈法により心拍出量を測定した。経食道トランスデューサーによるドップラー断層検査中の血行動態を **Table 1** に示すが、特に患者群における一定条件を保つための薬剤は投与しなかった。ただし、ルーチンの術後管理指針に従い、10 例の患者に dopamine (DoA: 1.5~10 r/kg/min)、7 例に nitroglycerine (NTG: 0.5~1.0 r/kg/min)、5 例に lidocaine (1 mg/kg/hr) が、持続静注法により投与されていた。Intra-aortic balloon pumping (IABP) は人工心肺より離脱困難であった 2 例に用いられたが、検査を行った時点ですでに低心拍出量症候群の状態を脱していたため、IABP 補助の冠動脈血流に及ぼす影響を見る目的で、IABP 駆動条件を 1:1, 2:1, 4:1 と変化させた。

22 名の患者中、緊急手術症例 3 例を除く 19 例に心臓カテーテル検査および冠動脈造影検査が術前に行なわれており、虚血性心疾患を除く 14 例の冠動脈は正常であった。虚血性心疾患 5 例の冠動脈狭窄病変を **Table 2** に示す。1 例（症例 2）では左主干冠動脈の遠位部が完全閉塞しており、

Table 1. Hemodynamic conditions during transesophageal color flow mapping

1. Blood pressure	
Systolic	80~150 mmHg
Diastolic	45~80 mmHg
2. Heart rate	80~120/min
Sinus rhythm	10 pts
Atrial pacing	6 pts
Ventricular pacing	6 pts
3. Pulmonary arterial pressure	
Systolic	17~37 mmHg
Diastolic	5~20 mmHg
4. Pulmonary capillary wedge pressure	7~20 mmHg
5. Mean central venous pressure	5~14 mmHg
6. Cardiac output	2.5~8.5 L/min
Cardiac index	1.7~4.7 L/min/m ²
7. Oxygen saturation	96.8~99.7%
8. Hematocrit	27.2~45.2%

冠動脈造影上も全く左冠動脈血流は観察できなかった。他の4例はいずれも左冠動脈近位部に高度冠動脈狭窄が見られたものの、冠動脈造影にて、少なくとも左主幹冠動脈の血流はスムーズであった。

ドップラー断層システムは Aloka SSD880 を用い、経食道トランスデューサーは径 13 mm の消化管内視鏡タイプの Aloka UST-SSDL 2-3.5

Table 3. Detection rate of anatomical structure (2-D echo) and blood flow (2-D Doppler) in proximal coronary arteries by the transesophageal technique

	Anatomical structure (2-D echo)	Blood flow (2-D Doppler)
LMT	91% (20/22)	86% (18/21)*
RCA	59% (13/22)	9% (2/22)

*One patient was excluded due to total LMT occlusion.

LMT=left main coronary trunk; RCA=right coronary artery.

及び 5.0 を用いた。より良い画質を得るために、経食道トランスデューサーは食道内挿入後最低 20 分間食道内に留置し、冠動脈血流の観察を開始した。検査は熟練した同一検者により行い、記録は U-matic video tape およびポラロイド写真に記録した。観察は 30~60 分間にわたって行った。

結 果

1. 左主幹冠動脈 (LMT) および右冠動脈の検出門歯列より 25~35 cm の胸部食道内にトランスデューサーを挿入し、大動脈弁輪の横断面映像を得た後、約 1 cm 引き抜き左冠尖の中央部より始まる LMT の開口部を検出した。さらにトランスデューサーの角度を 2 方向に調節し、少なくとも左前下行枝 (LAD) と左回旋枝 (LCX) の分枝

Table 2. Detection of blood flow in the left main coronary trunk (LMT) in patients with ischemic heart disease by the transesophageal technique

Case	Age, sex	Coronary stenosis	2-D Echo (LMT structure)	2-D Doppler (peak velocity)
1. OA	39 M	#5(100%)	+	—
2. FH	31 M	#5(75%)+#6(75%)	+	48 cm/sec
3. ON	66 M	#5(75%)+#6(100%)+#13(100%)	—	—
4. OY	60 F	#6(75%)+#13(99%)	+	48 cm/sec
5. KK	55 M	#6(90%)+#11(100%)	+	105 cm/sec

(+): detectable, (-): not detectable.

LMT=left main coronary trunk.

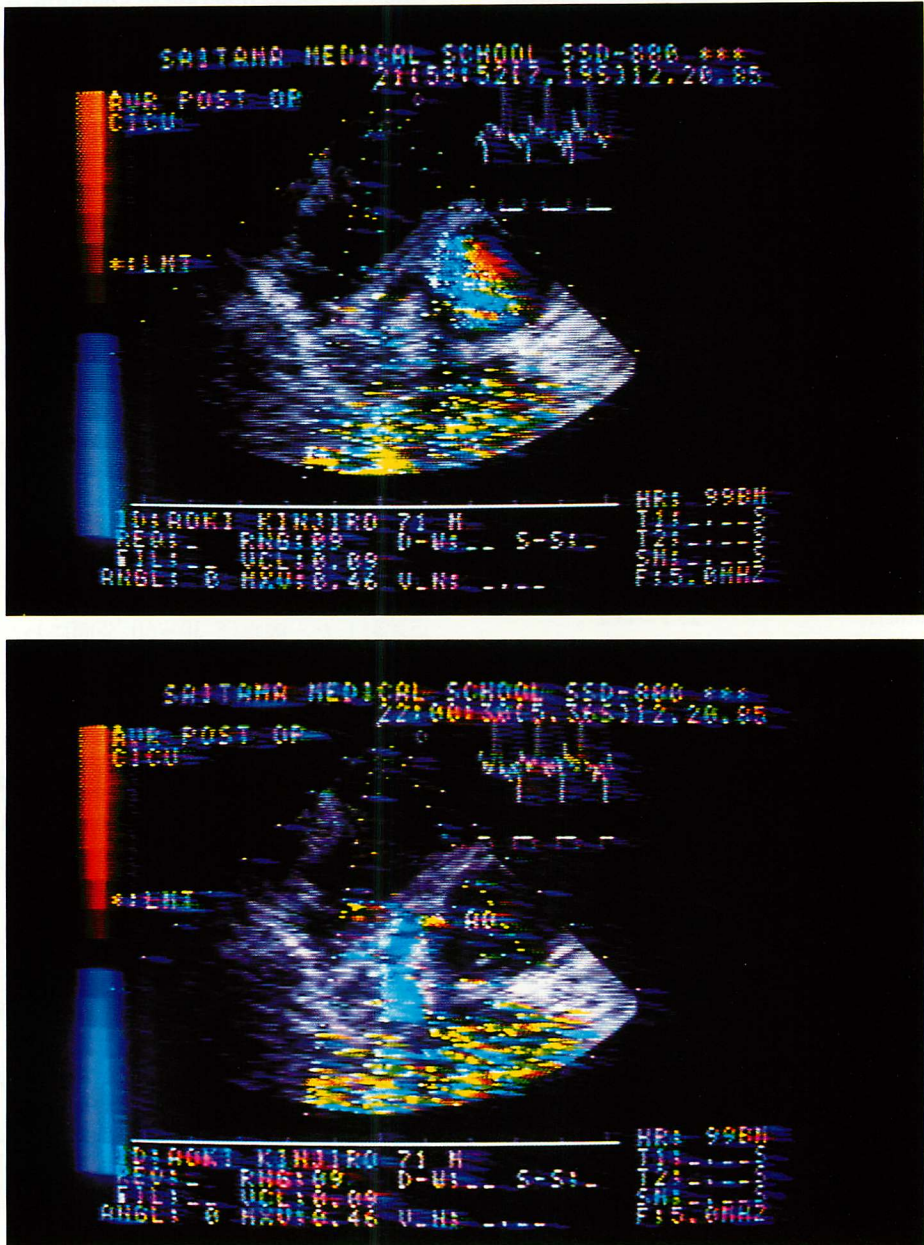


Fig. 1. Transesophageal color flow mapping imagings in the short-axis view at the aortic root level.

Systolic blood flow in the aortic root is displayed in blue and structure of the left main coronary trunk (LMT) is clearly detected (top). In diastole, coronary blood flow is displayed in red in the very proximal LMT and in blue in the distal LMT (bottom).

AO=aorta.

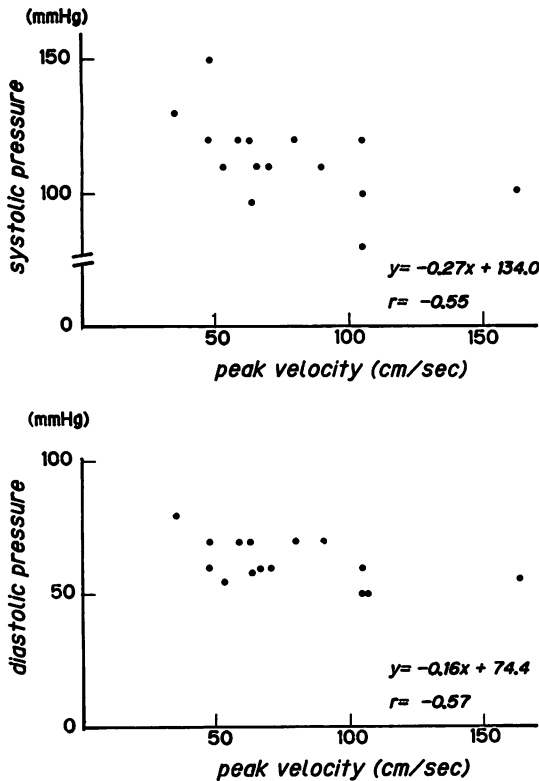


Fig. 2. Correlation between the peak velocity of LMT blood flow and aortic systolic pressure (top), and aortic diastolic pressure (bottom).

No significant relation is observed with aortic systolic or diastolic pressure.

部まで、LMT の解剖学的構造を描出した。22 例中 20 例 (91%) で LMT の解剖学的構造が明瞭に描出され、ドップラー断層によるカラー血流映像は 18 例で得られた。LMT の遠位部が完全閉塞していた虚血性心疾患の 1 例では、解剖学的構造は描出し得たが、カラー血流映像は当然のことではあるが得られなかった。この 1 例を除き、カラー血流映像描出率は 21 例中 18 例で 86% であった。

一方、右冠動脈においても同様に、解剖学的構造およびカラー血流映像の検出を試みたが、解剖学的構造の検出は 22 例中 13 例 (59%) であり、カラー血流映像の検出は 22 例中 2 例 (9%) のみで

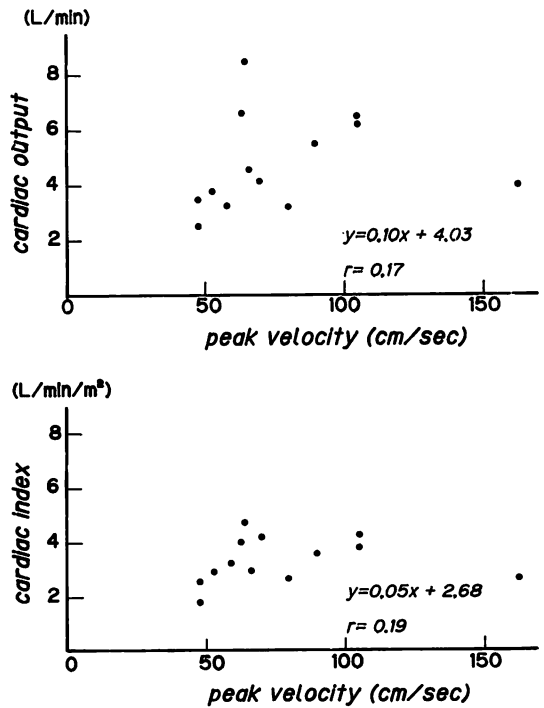


Fig. 3. Correlation between the peak velocity of LMT blood flow and cardiac output (top) and cardiac index (bottom).

No significant correlation is observed.

あった (Table 3).

ドップラー断層による冠動脈血流映像は、収縮期早期 (Fig. 1 上) には観察されず、収縮期後期より拡張期に至りよく観察された (Fig. 1 下). 経食道トランスデューサーと LMT の位置関係により、LMT 血流はその開口部付近ではトランスデューサーに近づく赤色で表示され、LMT 中央部より遠位部はトランスデューサーより離れる青色で表示された。

さらに LMT 血流は fast Fourier transformation (FFT) スペクトル解析により血流速度分析を行った。カラー血流表示と同様に収縮期後期より始まり、拡張期に peak をもつ血流パターンが得られた。カラー血流映像により得られた冠血流方向と FFT 分析で得られた血流速度分析によ

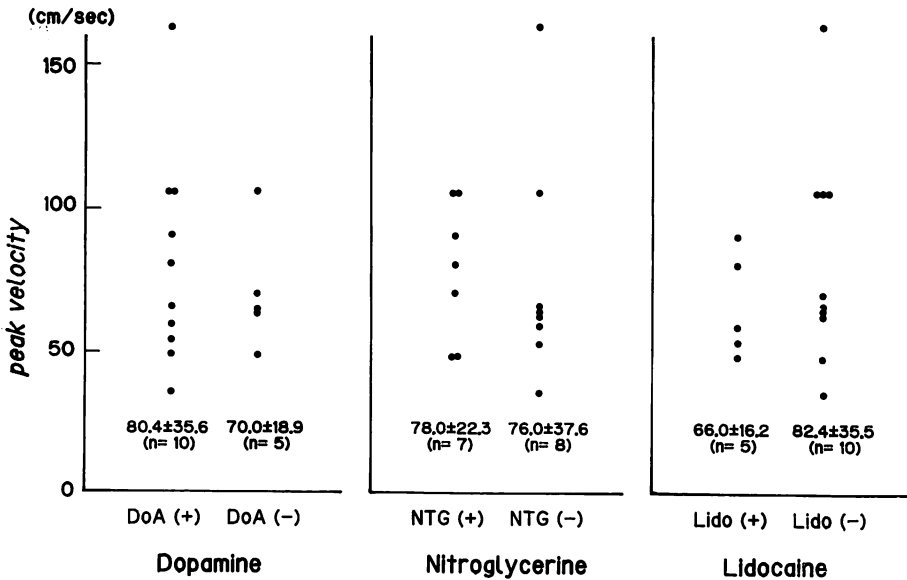


Fig. 4. Relationships between the peak velocity of LMT blood flow and dopamine, nitroglycerine and lidocaine administration.

No relationship is observed between the peak velocity and these drugs.

り, LMT 血流の peak velocity を計算した. 明瞭な冠血流の wave form が得られた 15 例の peak velocity は 35~163 cm/sec であり, 平均 76.9 ± 31.4 cm/sec であった.

2. 冠動脈血流速度と血行動態 および薬物投与の影響

LMT 血流の peak velocity と収縮期圧 (Fig. 2 上) および拡張期圧 (Fig. 2 下) との間に特に有意な正相関は認められず, 心拍出量 (Fig. 3 上) や心係数 (Fig. 3 下) との正相関も認められなかった. また dopamine や nitroglycerine, lidocaine などの薬物持続投与群と非投与群との間にも, LMT 血流の peak velocity に有意差は認められなかった (Fig. 4).

3. IABP 補助効果

2 例に IABP 補助 (コントロール製, パルーンサイズ 40 ml) を行ったが, LMT 血流の peak velocity は, それぞれ 23%, 40% の増加を見た.

Fig. 5 にその 1 例を示す. 症例は 71 歳の大動

脈弁狭窄 (術前大動脈弁圧較差 110 mmHg) で, 大動脈弁置換症例である. IABP 補助により大動脈拡張期圧は 70 mmHg より 110 mmHg に上昇し, LMT 血流の peak velocity は 59 cm/sec より 83 cm/sec に上昇した. この peak velocity の上昇は IABP の駆動条件を 1:1 → 2:1 → 4:1 と変化させても変わりはなかった.

考 按

Frazin ら¹⁰⁾により開発された経食道心エコー図 (M モード) は, 術中の左室機能の連続モニターとして用いられ¹¹⁾, また虚血性心疾患における壁動態分析^{12,13)}にも利用されてきた. また B モード経食道心エコー図¹⁴⁾や経食道トランスドューサーを用いたパルス・ドップラー心エコー図¹⁵⁾も開発され, 通常の前胸壁からの検査では十分検出できない左房内血栓の検出¹⁶⁾や, 僧帽弁逆流の検出¹⁵⁾, あるいは下行大動脈の解離性大動脈瘤の診断¹⁷⁾に有利であることが報告されてきた. 我々は

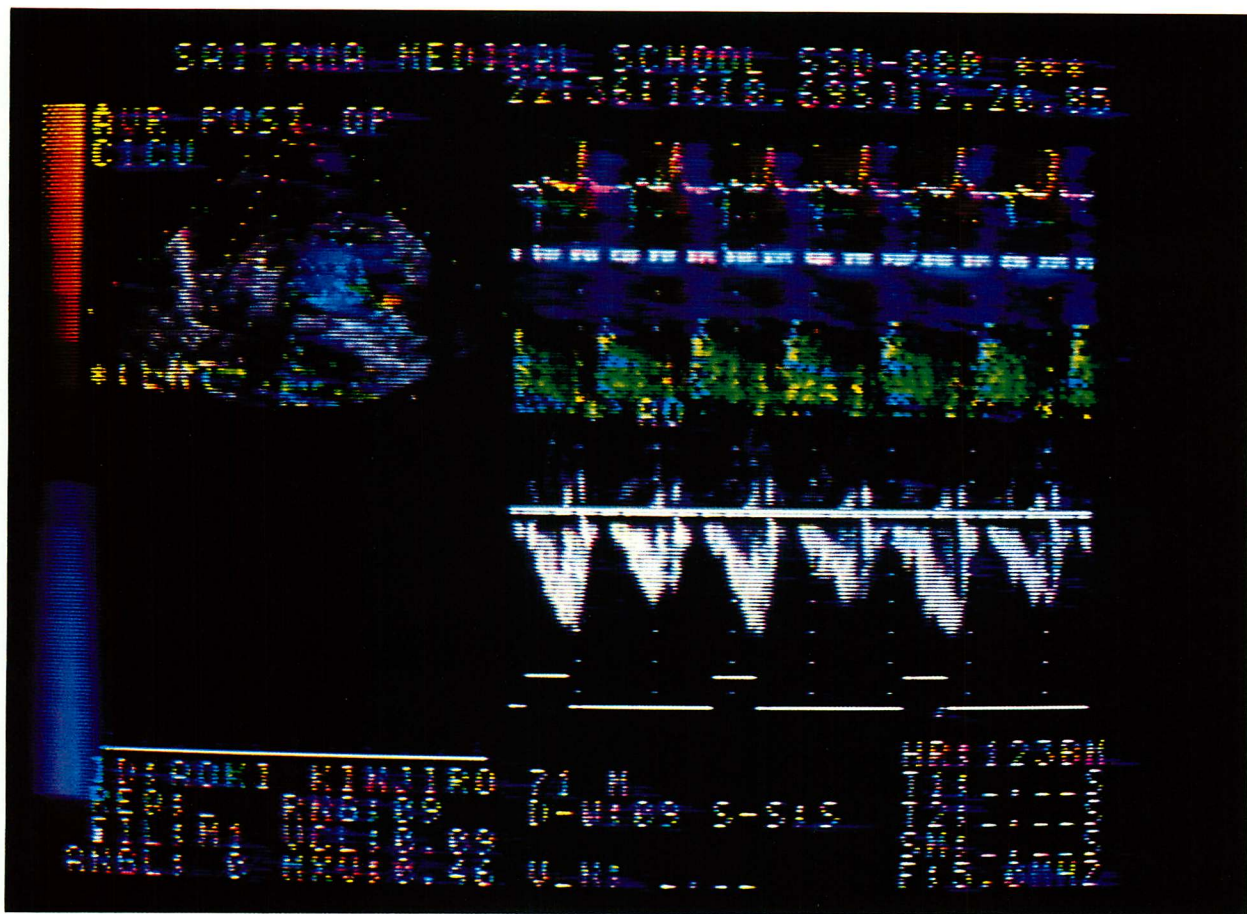


Fig. 5. Transesophageal color flow mapping imaging illustrating effects of intra-aortic balloon pumping (IABP) assist on human coronary blood flow in a case of aortic valve replacement (71-year-old man).

The peak velocity of LMT blood flow is markedly increased by IABP assist (IABP was driving with 2:1 assist ratio).

経食道トランスデューサーによるドップラー断層が、通常の体外からのアプローチでは検出困難な心房中隔欠損の発見に極めて有利であると報告したが¹⁸⁾、今回特に、通常の前胸壁からのアプローチでは描出困難な冠動脈血流の表示が、経食道アプローチにより可能となることを明らかにした。ドップラー断層により体外から冠動脈血流を描出しようとする試み¹⁹⁾はなされているが、正常人にも多く見られる肺動脈弁逆流との鑑別は容易ではない。我々の今回の観察では、解剖的に LMT

と考えられる位置に大動脈と連続した血管構造が見られ、その中を上行大動脈血流と連続した血流が観察されたことより、LMT 血流を観察していると考えてよいであろう。更に FFT による血流速度 spectrum の分析においても、これまで実験的に電磁流量計により観察されてきた²⁰⁾左冠動脈血流パターンと極めて類似し、拡張期に peak 速度をもつ血流速度 spectrum を得たこと、更に IABP 補助症例の 2 例において、補助に対応して増加する血流速度 pattern が得られたことは、我

々が観察した血流が真に冠動脈血流であることを支持するものと考えられる。何故なら心臓に付随した小血管で IABP 駆動により血流速度が増す可能性が考えられるのは、冠動脈以外に考えにくいからである。またヒトで IABP の冠動脈血流に対する直接的な補助効果を開胸検査によらないで観察し得たのは、本報告が最初のものである。

今回描出し得た冠動脈血流は、LMT および LAD, LCX の近位部に限られているが、開胸下の術中検査によらず、冠動脈血流のカラー血流映像が得られた意義は大きく、今後ヒトのより生理的な状況下の冠循環の研究や、各種薬物、あるいは IABP をはじめとする機械的な補助循環の冠動脈血流に及ぼす効果を臨床的に検討する上で、極めて有力な方法になり得るものと考えられる。

右冠動脈は経食道アプローチではより診断深度の深い領域となり、今回主として用いた 5 MHz のトランスデューサーでは十分な感度が得られなかったため、解剖学的構造およびカラー血流表示の描出率が劣ったものと考えられる。今後 3.5 MHz のトランスデューサーを用い、再検討する必要があると同時に、トランスデューサーそのものの感度の向上を得るべく努力する必要がある。こうしたトランスデューサーを含めたドップラー断層システム全体の感度の向上が、更に遠位部までの冠動脈血流映像を得ることを可能ならしめるであろうし、究極的には先天性心疾患や後天性弁膜症と同様、虚血性心疾患に対しても、ドップラー断層が無侵襲的診断を可能ならしめるべく研究する必要がある。

結 語

1. 経食道トランスデューサーを用いたドップラー断層により、近位冠動脈の解剖学的構造および冠動脈血流映像が得られ、その検出率は左主幹冠動脈において、それぞれ 91% (解剖学的構造) および 86% (血流映像)、右冠動脈において、それぞれ 59% (解剖学的構造) および 9% (血流映像) であった。

2. FFT スペクトル分析により測定された LMT 血流の peak velocity は 35~163 cm/sec, 平均 76.9 ± 31.4 cm/sec であった。今回の検討では、測定時の血圧、心拍出量などの血行動態指標や、dopamine, nitroglycerine, lidocaine などの薬物投与と、冠動脈血流の peak velocity との間に相関は認められなかった。

3. 2例の IABP 補助症例で、冠動脈血流速度は補助により平均 32% 増加し、開胸下の術中検査によらずに、ヒト冠動脈血流に及ぼす IABP 補助の効果が確認された。

要 約

心大血管手術症例 22 例を対象として、術後 6 時間以内に、経食道ドップラー断層法により冠動脈血流のカラー血流映像化を試みた。

22 例中 20 例 (91%) において左前下行枝主幹部 (LMT) の解剖学的構造を描出し得、一方、冠動脈造影上、LMT 完全閉塞を示した 1 症例を除き、21 例中 18 例 (86%) で LMT のカラー血流映像が得られた。LMT 血流映像は収縮期後半より観察され、その peak は拡張期に見られた。またその peak velocity は 35~163 cm/sec (平均 76.9 ± 31.4 cm/sec) であった。

右冠動脈の解剖学的構造は 22 例中 13 例 (59%) で観察され、カラー血流映像は 22 例中 2 例 (9%) で得られた。

IABP 補助により、2 例で冠動脈血流に及ぼす IABP 補助効果が観察され、それにより、冠動脈血流の peak velocity は 32% 増加した。

今日まで冠動脈血流をドップラー断層によりとらえることは困難と考えられてきたが、経食道アプローチを用いることにより、少なくとも LMT 血流に関しては、それ程の困難なく、80% 以上の症例でカラー血流映像の得られることが明らかになった。それ故、本手法は、今後、ヒトにおける冠動脈血流動態の臨床研究に大きく貢献しうる新しい手法として期待される。

文 献

- 1) Kyo S, Omoto R, Takamoto S, Ueda K, Emoto H, Asano H, Yokote Y: Real-time two-dimensional Doppler echocardiography in congenital heart disease: Its clinical significance. *J Cardiogr* 14: 785-801, 1984 (in Japanese)
- 2) Omoto R, Yokote Y, Takamoto S, Kyo S, Ueda K, Asano H, Namekawa K, Kasai C, Kondo Y, Koyano A: The development of real-time two-dimensional Doppler echocardiography and its clinical significance in acquired valvular diseases: With special reference to the evaluation of valvular regurgitation. *Jpn Heart J* 25: 325-340, 1984
- 3) Takamoto S, Kondo Y, Yoshikawa Y, Kasai C, Koyano A, Kyo S, Yokote Y, Omoto R: The first clinical experiences of intraoperative real-time two-dimensional Doppler echocardiography in the dissecting aneurysm of the aorta. *Proc of 29th Ann Convention of the Am Inst of Ultras in Med, Kansas City, 1984*, p 167 (abstr)
- 4) Kyo S, Takamoto S, Takanawa E, Matsumura M, Yokote Y, Omoto R: Does color flow mapping Doppler echocardiography allow the cath. lab to be bypassed in surgery of congenital heart disease? Roelandt J (ed): *Color Doppler Flow Imaging*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986
- 5) 許 俊鋭, 松村 誠, 高本真一, 上田恵介, 横手祐二, 尾本良三: ドップラー断層による無侵襲的心臓外科手術適応の決定(心臓カテーテル検査を省略し手術適応決定は可能か). *日外会誌* 87(臨時増刊号): 447, 1986
- 6) Takamoto S, Kyo S, Adachi H, Matsumura M, Yokote Y, Omoto R: Intraoperative color flow mapping real-time two-dimensional Doppler echocardiography for evaluation of valvular and congenital heart disease and vascular disease. *J Thorac Cardiovasc Surg* 90: 802-812, 1985
- 7) 鈴木 茂, 堀越茂樹, 小机敏昭, 佐々木達海, 宮沢総介, 益子健男, 古川 仁, 江本秀斗, 辛島賢二, 新井達太: 冠動脈外科における術中超音波検査法の有用性. *日外会誌* 86(臨時増刊号): 443, 1985
- 8) Kyo S, Adachi H, Takamoto S, Matsumura M, Yokote Y, Omoto R: Intraoperative evaluation of the effects of coronary revascularization by color flow mapping 2-D Doppler echocardiography and thermocardiography. *J Am Coll Cardiol* 7: 150A, 1986 (abstr)
- 9) Ogasawara Y, Hiramatsu O, Kagiya M, Tsujioka K, Tomonaga G, Kajiya F, Yanashima T, Kimura Y: Evaluation of blood velocity profile by high frequency ultrasound pulsed Doppler velocimeter by a multigated zerocross method together with a Fourier transformation method. *IEEE Computer in Cardiology*, Silver Spring, 1984, p 477
- 10) Frazin L, Talano JM, Stephanides L, Loeb HS, Kopel L, Gunnar RM: Esophageal echocardiography. *Circulation* 54: 102-108, 1976
- 11) Matsumoto M, Oka Y, Lin YT, Strom J, Sonnenblick EH, Frater RWM: Transesophageal echocardiography for assessing ventricular function. *NY State J Med* 79: 19-21, 1979
- 12) Matsuzaki M, Toma Y, Anno Y, Sasaki T, Takahashi Y, Hiroyama N, Ishida K, Matsuda Y, Kumada T, Kusukawa R: Prediction of the location of the left anterior descending coronary artery disease by anterior echocardiography and esophageal echocardiography. *J Cardiogr* 11: 401-414, 1981
- 13) Sasaki T, Matsuzaki M, Anno Y, Tohma Y, Hiroyama N, Tamitani M, Yonezawa F, Ogawa H, Matsuda Y, Kumada T, Murata T, Kusukawa R: Diagnosis of the right atrial infarction by esophageal echocardiography. *J Cardiogr* 12: 595-604, 1982
- 14) Hisanaga K, Hisanaga A, Nagata K, Ichie Y: Transesophageal cross-sectional echocardiography. *Am J Cardiol* 100: 605-609, 1980
- 15) Schluter M, Langstein B, Hanrath P, Kremer P, Bleifeld W: Assessment of transesophageal pulsed Doppler echocardiography in the detection of mitral regurgitation. *Circulation* 66: 784-789, 1982
- 16) 末次正治, 松崎益徳, 向武義人, 塔間陽一, 前田敏明, 長谷正彰, 岡田和好, 小西光明, 小野史朗, 田中伸明, 廣 潤子, 西村祐子, 楠川礼造: 食道内超音波心断層・ドップラー法による左心房・左心耳内血栓の検出と左心耳内血流動態について. 第32回臨床心臓図学会発表. 京都, 1986
- 17) Engberding R, Bender F, Muller US, Grosse-Heitmeyer W: Aneurysms and dissections of the descending thoracic aorta: Identification by transesophageal two dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 7: 138A, 1986 (abstr)
- 18) Omoto R, Kyo W, Takamoto S, Matsumura M, Yokote Y, Namekawa K, Kasai C, Yoshikawa Y, Koyano A: Two years' clinical experience with color-coded real time two-dimensional Doppler echocardiography. Roelandt J (ed): *Color Doppler Flow Imaging*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1986
- 19) Recusani F, Valdes-Cruz LM, Dalton N, Sahn DJ, Hoit B: Detection of coronary flow by pulsed

許, 高本, 松村, ほか

Doppler and color Doppler flow mapping and its differentiation from pulmonary insufficiency. J Am Coll Cardiol 7: 14A, 1986 (abstr)

20) Kajiya F, Tomonaga G, Tsujioka K, Ogasawara

Y, Nishihara H: Evaluation of local blood flow velocity in proximal and distal coronary artery by laser Doppler method. J Biomech Eng 107: 10-15, 1985