

Current Topics in Cardiology

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

Transthoracic Doppler Echocardiographic Detection of Intramyocardial Coronary Artery Flow in Humans Using High Frequency Transducer

皆越 眞一
外山 芳史
新添 謙一
山口 浩士
豊嶋慎一郎
梅林 雄介
水上 尚子
宇治野幸博*
鄭 忠和*

Shinichi MINAGOE, MD, FJCC
Yoshifumi TOYAMA, MD
Kenichi NIIZOE, MD
Hiroshi YAMAGUCHI, MD
Shinichiro TOYOSHIMA, MD
Yusuke UMEBAYASHI, MD
Naoko MIZUKAMI, RDS
Yukihiro UJINO, MD*
Chuwa TEI, MD, FJCC*

Abstract

The use of transthoracic color and pulsed Doppler echocardiography to detect intramyocardial coronary artery flow in humans was evaluated in 18 normal healthy subjects (mean age 54 years) and in 16 patients with hypertrophic cardiomyopathy (HCM; mean age 59 years) to measure the intramyocardial coronary artery flow velocity at the ventricular septum and the apex using a 10-5 or 7-4 MHz transducer.

Linear inflow color Doppler signals which passed the interventricular septum were demonstrated in 15 of 18 normal subjects (83%) and 15 of 16 patients with HCM (94%). The phasic flow velocities measured by pulsed Doppler echocardiography consisted of two forward flow signals in mid-systole (S-wave) and holo-diastole (D-wave), and were obtained in 11 of 18 in normal subjects (61%) and 14 of 16 patients with HCM (88%). The mean peak velocities of the S- and D-waves in patients with HCM (mean [\pm SD] 27 ± 9 and 86 ± 23 cm/sec, respectively) were significantly ($p < 0.05$) higher than those in normal subjects (18 ± 4 and 54 ± 11 cm/sec, respectively). At the apex, linear inflow color Doppler signals which passed the myocardium perpendicularly during the whole diastole were demonstrated in 14 of 18 normal subjects (78%) and all 16 patients with HCM (100%). The phasic flow velocities were measured by pulsed Doppler echocardiography in 10 of 18 normal subjects (56%) and 15 of 16 patients with HCM (94%). The mean peak velocities in patients with HCM (74 ± 27 cm/sec) were significantly ($p < 0.05$) higher than those in normal subjects (33 ± 13 cm/sec).

Transthoracic color and pulsed Doppler echocardiography can detect intramyocardial coronary artery flow in humans at the interventricular septum and the apex noninvasively.

J Cardiol 1997; 30 (3): 149-155

Key Words

Coronary circulation, Doppler ultrasound (high frequency transducer),
Echocardiography (transthoracic), Coronary artery (intramyocardial flow)

南風病院 循環器科: 〒892 鹿児島市長田町 14-3; *鹿児島大学医学部 リハビリテーション医学

Division of Cardiology, Nampuh Hospital, Kagoshima; *Department of Rehabilitation, Kagoshima University School of Medicine, Kagoshima

Address for reprints: MINAGOE S, MD, FJCC, Division of Cardiology, Nampuh Hospital, Nagata-cho 14-3, Kagoshima 892

Manuscript received July 9, 1997; accepted July 13, 1997

はじめに

ドップラー心エコー図法を用いたヒト冠血流の検出では、経食道ドップラー心エコー図法を用いた冠動脈近位部の描出と狭窄病変の検出が高い頻度で可能であると報告されている^{1,2)}。一方、心筋内冠動脈の血流速度は心外膜を走行する冠動脈のそれと異なるとされているが^{3,4)}、ドップラー心エコー図法を用いたヒト心筋内血流の検討は、その手技的制約のため極めて少ない。

我々は高周波探触子をイヌ拍動心の臓側心外膜に直接設置することにより(経心外膜ドップラー心エコー図法)⁵⁾、心筋内中隔枝動脈ならびに左室前壁や乳頭筋での小冠動脈血流の描出と、その血流速度の検出が可能であることを報告した⁶⁾。すなわち、心外膜ドップラー心エコー図法で、開胸犬、拍動心において、10-5 MHz リニア型探触子を直接左室心外膜に設置すると、カラードップラーエコー図上、拡張期に心外膜側より心内膜側へ(冠小動脈)、また収縮期に心内膜側より心外膜側へ向かう(冠小静脈)、相近接して心筋内を横断する対向性の線状シグナルが描出され、パルス・ドップラー法による血流速度の記録も可能であった。

今回、我々は同じ高周波探触子を用い、経胸壁ドップラー心エコー図法によって、ヒト心筋内冠動脈血流の描出とその血流速度の検出が可能であるか否かを検討した。

対象と方法

1. 対象

対象は健常成人 18 例(対照群; 平均年齢 51 歳)ならびに肥大型心筋症 16 例(hypertrophic cardiomyopathy: HCM 群; 平均年齢 59 歳)である。

2. 方法

機器は ATL 製, UltraMark 9 HDI を用い, 10-5 MHz リニア型あるいは 7-4 MHz セクター式探触子(症例により 5-3 MHz 探触子も使用した)を用いて描出を行った(Fig. 1)。心筋内冠動脈血流の検出は、左室心室中隔ならびに左室心尖部心筋において行った。

中隔枝血流は 7-4, 5-3 MHz のセクター型探触子を用い、超音波ビームを傍胸骨左縁あるいは心尖部より投入し、胸壁より心室中隔の短軸断面を描出後、カラードップラー法を用い、中隔枝血流シグナルの有無を観

Selected abbreviations and acronyms

HCM=hypertrophic cardiomyopathy
TVI=time-velocity integral

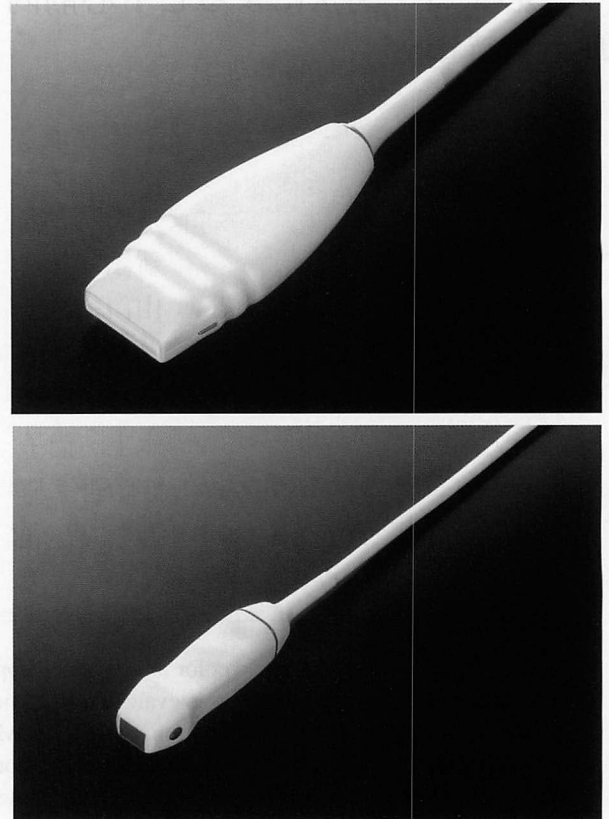


Fig. 1 Linear type transducer of 10-5 MHz (upper) and sector type transducer of 7-4 MHz (lower)

察した。更に、パルス・ドップラー法を用い、これら線状シグナルにサンプルボリュームを設置し、その血流速度を記録した。カラードップラー法の設定条件は Table 1 に示すとおりである。

左室心尖部の心筋内血流は、10-5 MHz あるいは 7-4 MHz のリニア型探触子を左室心尖部あるいは傍胸骨左縁に設置、断層心エコー図上、心尖部心筋を心外膜側より心内膜まで描出後、カラードップラー法を用い、心筋内血流シグナルの有無を観察した。更に、パルス・ドップラー法を用い、これら線状シグナルにサンプルボリュームを設置し、その血流速度を記録した。血流速度波形は連続 2 心拍の最大血流速度ならびに time-velocity integral (TVI) を測定した。

Table 1 Imaging parameters for color Doppler echocardiography to demonstrate intramyocardial coronary artery flow

Location	IVS	Apex
Detected coronary vessels	Septal artery	Small artery
Transducer	Sector type (7-4 or 5-3 MHz)	Linear type (10-5 or 7-4 MHz)
Pulse repetition frequency	3,000 Hz	2,500-4,000 Hz
Frame rate	25 Hz	20 Hz
Write priority	High	High
Wall filter	High	High
Resolution	Normal	High

IVS=interventricular septum.

3. 統計処理

各計測値は平均±標準偏差で示した。各群間の比較は unpaired *t* 検定を用い、 $p < 0.05$ を有意とした。

結 果

1. 心室中隔での検出

Fig. 2 にカラードップラー法による対照群と HCM 群の中隔枝動脈血流シグナルを示す。心室中隔を走行する拡張期流入血流シグナルが認められる。カラードップラー法による中隔枝血流は、対照群 18 例中 15 例 (83%)、HCM 群 16 例中 15 例 (94%) において検出可能であった。パルス・ドップラー法による血流速度は収縮中期 (S) ならびに拡張期優位 (D) な 2 峰性の血流パターンを示し、対照群 18 例中 11 例 (61%)、HCM 群 16 例中 14 例 (88%) において検出された。各群の血流速度値を Table 2 に示す。HCM 群の S 波と D 波の最大血流速度ならびに TVI は、対照群に対しそれぞれ有意に ($p < 0.05$) 高値であった。

2. 左室心尖部での検出

心尖部心筋内冠小動脈血流はカラードップラー法により、対照群 18 例中 14 例 (78%)、HCM 群 16 例中 16 例 (100%) において検出可能であった。パルス・ドップラー法による心筋内血流速度は拡張早期に始まって拡張末期に終わるパターンを示し、対照群 18 例中 10 例 (56%)、HCM 群 16 例中 15 例 (94%) において記録された。その 1 例を Fig. 3 に示す。また各群の血流速度値は Table 2 に示すごとくである。HCM 群の最大血流速度ならびに TVI は、対照群よりもそれぞれ有意に

($p < 0.05$) 高値であった。

考 察

心筋内の冠血流速度波形は心外膜表面を走る太い冠動脈のそれとは異なるとされているが^{3,4)}、その方法論的制約により、ドップラー心エコー図法による心筋内血流の報告は極めて少ない。我々は先に開胸犬、拍動心において高周波探触子を臓側心外膜に直接設置して、心室中隔を走行する中隔枝動脈や左室心尖部、前壁、乳頭筋などの心筋を穿通する心筋内冠動脈血流の記録が可能なることを報告した⁶⁾。同方法をヒトを対象に経胸壁的に試みた今回の検討では、心室中隔を走行する中隔枝動脈血流、ならびに心尖部左室心筋内小動脈血流の描出とその血流速度の記録が可能であり、再現性も良好であった。

1. 心筋内シグナルの同定

心筋内の血管枝は心外膜下を走行する大きな冠動脈より分枝し、小動脈(穿通枝)、細動脈、毛細血管、細静脈、小静脈より構成され、冠動脈に至る。今回の研究で得られた拡張期流入シグナルは、開胸犬で得られた結果と同様(心外膜ドップラー心エコー図法)、カラードップラー法による心筋内の走行とパルス・ドップラー法によるその拡張期優位血流速度パターンは、解剖学的に、また生理学的に、心室中隔では中隔枝動脈の、また心尖部では冠小動脈血流(穿通枝)の血流を描出したものと考えられる⁷⁻⁹⁾。すなわち、左前下行枝の比較的近位部の分枝(中隔枝)と遠位部の分枝(小動脈)の血流を検出したことを意味する。

一方、今回の研究でもイヌを用いた実験同様、拡張期流入血流に並列して走行する収縮期流出血流が、心室中隔および心尖部で観察された。一般に心筋内の小動脈と小静脈の走行は解剖学的に鏡面像を示すとされている¹⁰⁾。また心筋内の血液量は心周期によって変動し、心筋内冠動脈の流入血流はほぼ拡張期に、また冠静脈のそれはほぼ収縮期に限られると報告されている¹¹⁻¹⁴⁾。今回パルス・ドップラー法により得られた流入ならびに流出シグナルは、それぞれ時相を違えて反対方向へ向かうことより、収縮期にみられる流出血流シグナルは、中隔枝静脈ならびに心尖部小静脈血流と考えられる。しかし、これまでの他の動物実験では、nitroglycerin 投与時、あるいは心外膜冠動脈狭窄時な

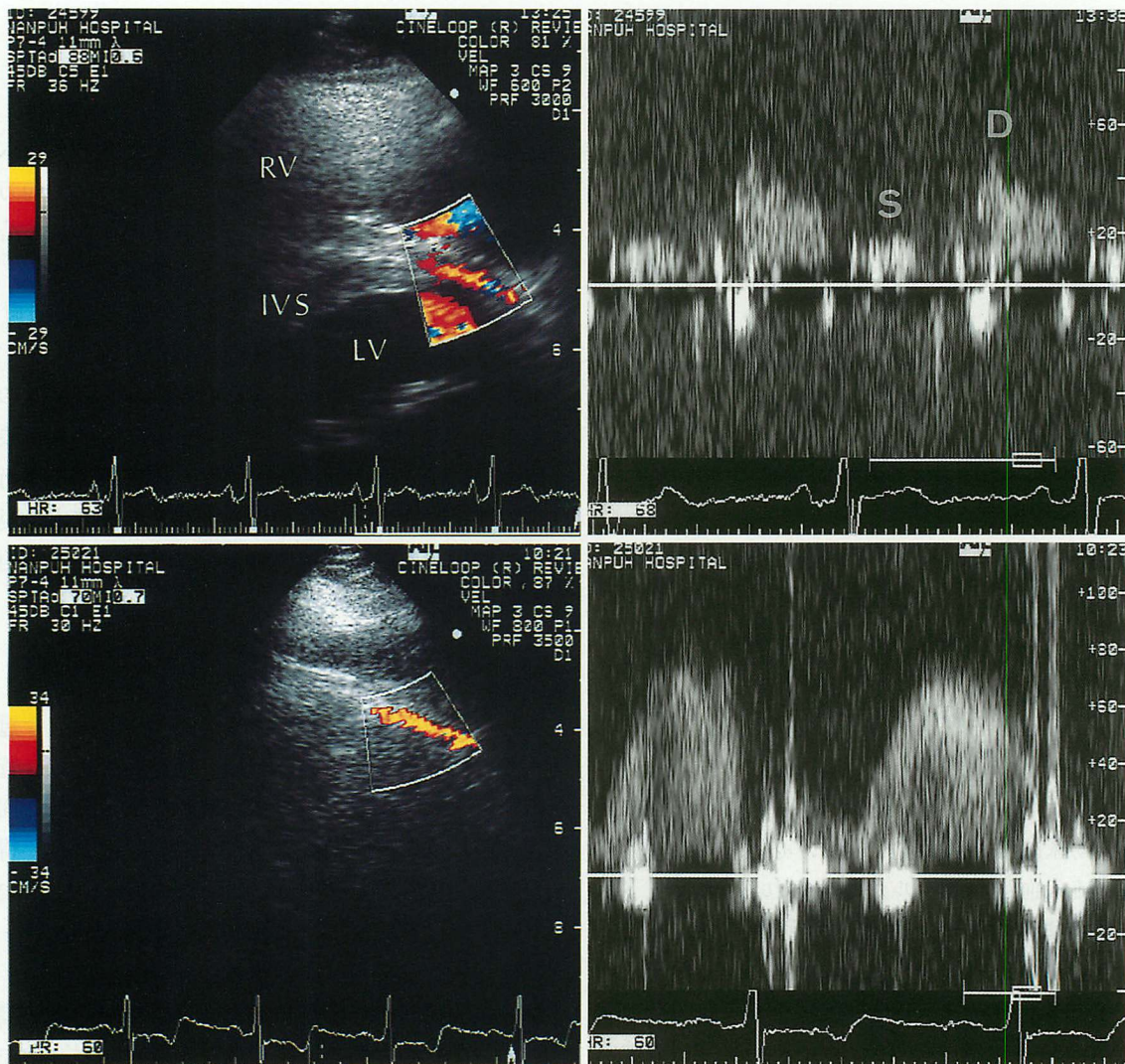


Fig. 2 Color and pulsed Doppler flow signals at the interventricular septum obtained from a normal subject (*upper row*) and a patient with hypertrophic cardiomyopathy (*lower row*)

The color Doppler echocardiograms (*left column*) show septal arterial Doppler signals which run parallel to the endocardial surface of the IVS. The pulsed Doppler echocardiograms (*right column*) show two forward flow signals in mid-systole (S) and holodiastole (D). The diastolic flow velocity in the patient with HCM is higher than that in the normal subject.

RV=right ventricle; LV=left ventricle. Other abbreviation as in Table 1.

どにおいて、心筋内冠動脈の収縮期逆流がみられるとされており (slosh phenomenon)³⁾、本法でみられた収縮期流出血流シグナルは、動脈の逆流血流との鑑別が必要である。またこれまでの報告では、心筋内動脈の収縮期逆流血流は等容収縮期における急峻で短時間の波形であるのに対し、今回我々の得た収縮期流出シグナルの血流波形は収縮期全般にわたっており、持続時間より判断すると静脈血流と考えられる。更に、我々は、今回の研究の対象外であるが、アミロイド心の症例において収縮期静脈血流とは別に心筋内中隔枝動脈

の収縮期逆流を経験しており、したがって本法でも特別な症例においては収縮期の心筋内冠動脈逆流の検出が可能であると思われる。

2. 心筋冠血流ドップラー心エコー図法による心筋内血流検出の意義

中隔枝動脈は、日常临床上、冠動脈造影でも可視化され、またドップラーガイドワイヤー法でその血流速度が測定可能な唯一の心筋内冠動脈である。一方、心尖部心筋内で得られた血流シグナルは、中隔枝動脈血

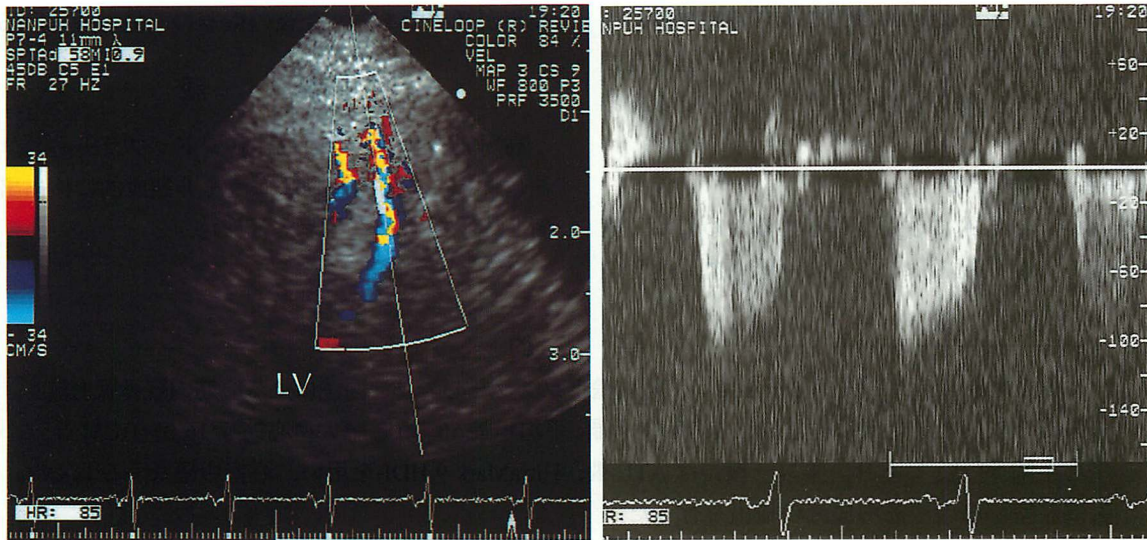


Fig. 3 Color and pulsed Doppler flow signals at the apex obtained from a patient with hypertrophic cardiomyopathy
 The color Doppler echocardiogram (left) shows transmyocardial coronary artery Doppler signals which penetrate from the epicardium to the endocardium of the left ventricular wall at the apex. The pulsed Doppler echocardiogram (right) shows high holodiastolic velocity.
 Abbreviation as in Fig. 2.

Table 2 Flow velocities of intramyocardial coronary artery at the interventricular septum and the apex

		Control		HCM	
		Peak (cm/sec)	TVI (cm/sec)	Peak (cm/sec)	TVI (cm/sec)
IVS	S	18±4	4±1	27±9*	7±3†
	D	54±11	15±13	86±23*	27±3†
Apex	D	33±13	9±3	74±27*	22±8†

* $p < 0.05$ vs peak velocity in normal subjects. † $p < 0.05$ vs TVI in normal subjects.
 S=flow dominant in systole; D=flow dominant in diastole. Other abbreviation as in Table 1.

流より更に小さい心筋を直角に穿通する冠小動脈の血流で、冠動脈造影でも可視化されず、またドップラーガイドワイヤー法によってもその血流速度の検出は出来ない。今回の経胸壁ドップラー心エコー図法によって、ヒト心筋内血流は成人健常者でも比較的高い頻度で検出され、肥大型心筋症では殆どの例で検出された。したがって、経胸壁ドップラー心エコー図法はヒトにおいて心筋内中隔枝動脈を、またこれまで他の方法では描出されなかった小動脈血流を非観血的に、検出出来る新しい手段と考えられる。

3. ドップラー心エコー図法による心筋内冠血流検出の問題点

本法の臨床的応用が可能になるためには、以下に述べる問題点が解決される必要がある。

1) 血流速度シグナルの記録

パルス・ドップラー法により心筋内血流を検出する際、目的とする血管が心拍動により移動するため、心筋内血流の全周期にわたる血流速度が記録されにくい。しかし被験者の呼吸を止めるなどの工夫により、少なくとも拡張期全般にわたる記録は可能である。

2) 描出血管の大きさ

今回の研究で検出された心筋内血流シグナルは、500 μm 径以上の中隔枝ならびに小動脈(伝導血管)からのものであるが、小動脈より細い細動脈(抵抗血管)血流シグナルは、一部を除き描出されなかった。抵抗血管が細動脈レベルであることを考慮すると、更に小さいレベルの血管血流の描出やその速度波形の記録が望まれる。

3) 検出心筋部位

ヒト心筋内血流の描出は、イヌでの実験と異なり、心尖部の小動脈や心室中隔の中隔枝動脈血流に限られた。特にイヌを用いた心外膜アプローチで明瞭に描出された中隔枝からの分枝血流は、ヒトでは一部の症例で観察されたのみであった。左室心筋全体にわたる心

筋内血流が描出されるためには、これら心室中隔の小動脈や、心膜腔の更に深い位置にある左室後壁や乳頭筋などの血流シグナルの描出されることが必要であろう。

4) 健常者での検出率

本法を用いて臨床的に虚血を評価するためには、健常者より高い血流速度ではなく、より低い血流速度の

検出が必要である。今後の機器の開発が望まれる。

結 語

高周波探触子を用いた経胸壁ドップラー心エコー図法は、ヒト心筋内冠動脈血流を非観血的に検出出来る新しい手技であると考えられた。

要 約

ヒトを対象に、高周波探触子を用い、経胸壁ドップラー心エコー図法による心筋内冠動脈血流の描出を試みた。対象は健常成人 18 例(対照群; 平均年齢 56 歳)と肥大型心筋症 16 例(HCM 群; 平均年齢 59 歳)であり、エコー機器は ATL 製, UltraMark 9 HDI を用い、心室中隔ならびに心尖部左室心筋の心筋内血流の描出を行った。

カラーならびにパルス・ドップラー法による中隔枝血流の検出は、それぞれ、対照群では 18 例中 15 例(83%)と 11 例(61%), HCM 群では 16 例中 15 例(94%)と 14 例(88%)において検出された。中隔枝血流は収縮中期(S)ならびに拡張早期(D)にピークを持つ拡張期優位の 2 峰性の血流パターンを示し、HCM 群(S)の最大血流速度(平均[±SD] 27±9 cm/sec)は対照群(18±4 cm/sec)より有意に($p<0.05$)高値であった。また HCM 群(D)の最大血流速度(86±23 cm/sec)は対照群(54±11 cm/sec)より有意に($p<0.05$)高値であった。一方、心尖部冠小動脈血流は、カラードップラー法により、対照群 18 例中 14 例(78%)ならびに HCM 群 16 例中 16 例(100%)において検出された。パルス・ドップラー法による小動脈血流は 1 峰性の全拡張期パターンを示し、対照群 18 例中 10 例(56%)ならびに HCM 群 16 例中 15 例(94%)において記録され、その最大血流速度は HCM 群(74±27 cm/sec)が対照群(33±13 cm/sec)よりも有意に($p<0.05$)高値であった。

以上より、高周波探触子を用いた経胸壁ドップラー心エコー図法は、ヒト心室中隔および心尖部左室心筋内冠動脈血流を非観血的に検出出来る新しい方法であると考えられた。

J Cardiol 1997; 30 (3): 149-155

文 献

- 1) 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* 1990; **81**: 1271-1276
- 2) Yamagishi M, Yasu T, Ohara K, Kuro M, Miyatake K: Detection of coronary blood flow associated with left main coronary artery stenosis by transesophageal Doppler color flow echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 1991; **17**: 87-93
- 3) Chilian WM, Marcus ML: Phasic coronary blood flow velocity in intramural and epicardial coronary arteries. *Circ Res* 1982; **50**: 775-781
- 4) Marcus M, Wright C, Doty D, Eastham C, Laughlin D, Krumm P, Fastenow C, Brody M: Measurements of coronary velocity and reactive hyperemia in the coronary circulation of humans. *Circ Res* 1981; **49**: 877-891
- 5) Aragam JR, Main J, Guerrero JL, Vlahakes GJ, Southern JF, Adams MS, Weyman AE, Levine RA: Doppler color flow mapping of epicardial coronary arteries: Initial observations. *J Am Coll Cardiol* 1993; **21**: 478-487
- 6) Minagoe S, Toyama Y, Nizoe K, Toyoshima S, Nakamura K, Sakamoto H, Tei C: Detection of transmural coronary blood flow using epicardial color Doppler echocardiography. *Circulation* 1995; **92** (Suppl I): I-534 (abstr)
- 7) James TN: Anatomy and pathology of small coronary arteries. *in* Coronary Circulation (ed by Spaan JAE). Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1987; pp 3-12
- 8) Estes EH, Dalton FM, Entman ML, Dixon HB II, Hackel DB: The vascular supply of the left ventricular wall: Anatomic observations, plus a hypothesis regarding acute events in coronary artery disease. *Am Heart J* 1966; **71**: 58-67
- 9) Estes EH, Dalton FM, Entman ML, Dixon HB II, Hackel DB: The anatomy and blood supply of the papillary muscles of the left ventricle. *Am Heart J* 1966; **71**: 356-362
- 10) Hutchins GM, Moore GW, Hatton EV: Arterial-venous relation-

- ships in the human left ventricular myocardium : Anatomic basis for countercurrent regulation of blood flow. *Circulation* 1986; **74** : 1195–1202
- 11) Hiramatsu O, Kimura A, Yada T, Yamamoto T, Ogasawara Y, Goto M, Tsujioka K, Kajiya F : Phasic characteristics of arterial inflow and venous outflow of right ventricular myocardium in dogs. *Am J Physiol* 1992; **262** : H1422–H1427
- 12) Mito K, Ogasawara Y, Hiramatsu O, Wada Y, Goto M, Tadaoka S, Tsujioka K, Kajiya F : Evaluation of velocity waveform in an intramyocardial small artery and vein by laser Doppler method. *Circulation* 1987; **76** (Suppl IV) : IV-386 (abstr)
- 13) Kajiya F, Tsujioka K, Ogasawara Y, Mito K, Hiramatsu O, Goto M, Wada Y, Matsuoka S : Mechanical control of coronary artery inflow and vein outflow. *Jpn Circ J* 1989; **53** : 431–439
- 14) Kajiya F, Tsujioka K, Goto M, Wada Y, Chen XL, Nakai M, Tadaoka S, Hiramatsu O, Ogasawara Y, Mito K, Tomonaga G : Functional characteristics of intramyocardial capacitance vessels during diastole in the dog. *Circ Res* 1986; **58** : 476–485