

心音図, 心エコー図および
ドップラー法による楽音様
雑音の検討

Musical murmurs: Pho-
nocardiographic, echo-
cardiographic and Dopp-
ler echocardiographic
study

鈴木 順一
坂本 二哉
羽田 勝征
天野 恵子
高橋 久子
長谷川一朗
高橋 利之
杉本 恒明

Jun-ichi SUZUKI
Tsuguya SAKAMOTO
Yoshiyuki HADA
Keiko AMANO
Hisako TAKAHASHI
Ichiro HASEGAWA
Toshiyuki TAKAHASHI
Tsuneaki SUGIMOTO

Summary

Musical murmurs are probably related to the vibrations of some structures in the cardiovascular system, and this may be reflected in the characteristic stripes which are recorded by the fast Fourier transformation (FFT) of the pulsed Doppler echocardiography (so-called FFT stripe).

In the present study, we demonstrated new stripes by color Doppler echocardiography, which were composed of multiple warm and cold color bands which we termed color Doppler stripes (CD stripe).

An experiment was performed to obtain Doppler signals from the surface of a vibrating tonometer at a frequency of 128 Hz. When the CD stripe was obtained, a similar FFT stripe was also recorded from the same sampling site.

Fourteen patients with musical murmurs were selected from 2,000 consecutive phonocardiographic records made during the last one and a half years. The CD stripe was obtained in three and the FFT stripe in six. When both stripes were obtained, the FFT stripe was always obtained if we set carefully the sample site in the CD stripe, and these two were consistent in timing.

We concluded that, in view of the close correlation between the CD stripe and the FFT stripe, the newly observed CD stripe is also a characteristic finding reflecting a regularly vibrating structure. The technical feasibility of color Doppler echocardiography to detect fine movements of structures may be helpful in the study of musical murmurs.

Key words

Musical murmur Phonocardiography Echocardiography Doppler echocardiography

東京大学医学部 第二内科
東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)

The Second Department of Internal Medicine, Fac-
ulty of Medicine, University of Tokyo, Hongo 7-3-1,
Bunkyo-ku, Tokyo 113

Received for publication June 13, 1985; accepted March 17, 1986 (Ref. No. 30-15)

はじめに

楽音様雑音はその特徴的な聴診所見により古くから関心が持たれ、又音源に関しては様々な推論がなされてきた¹⁻⁶⁾。近年、循環器学領域における非侵襲的検査法の進歩により、従来からのスペクトル心音図法⁷⁾、心腔内心音図法⁸⁾に加え、心エコー図法^{9,10)}、パルス・ドップラー法が導入され、特にパルス・ドップラー法高速フーリエ変換 (fast Fourier transformation: FFT) が本雑音の音源推定に有用であるとの報告がなされた¹¹⁻¹³⁾。すなわち、楽音様雑音例の FFT 所見に特徴的な縞模様 (本研究ではこれを仮に FFT stripe と呼ぶ。) が記録され (Fig. 1), その記録部位の限局性および周波数の一致より、本所見は心腔内構造物の微細振動を表わし、楽音様雑音の音源である可能性が大であると述べられている。しかし現在のところ、カラー・ドップラー法に関する知見はほとんどない。今回、我々はカラー・ドップラー法の本雑音研究における有用性を評価することを目的とし、実験的、臨床的検討を行った。

対象と方法

1. 実験的検討

アロカ製 SSD880 を用い、カラー表示角度 90 度、フレームレート毎秒 7.5、パルスレート 4,000 Hz の条件で、空中に置かれた振動数 128 Hz の音叉振動面のカラー・ドップラー記録を試みた。超音波ビームが音叉の振動面に垂直に当たるよう探触子および音叉を保持し、両者の距離を D として記録した (Fig. 2 上段)。

2. 臨床的検討

対象は 1983 年 10 月から 1985 年 3 月までの約 18 ヶ月間に、当科にて心音図、心エコー図、パルス・ドップラー法を施行した延べ 2,000 例である。心音図は三栄測器製電磁オシログラフ 500 を用い、多段階、多誘導同時記録により記録、心エコー図、パルス・ドップラー信号はアロカ製 SSD 800, SSD910, SSD880 により記録した。

結果

2. 実験結果

128 Hz で振動する音叉の表面のカラー・ドップラー所見は、表示上距離約 D (実測距離)×4.5 の位置に、暖色と寒色の帯が交互に並ぶ縞模様 (本研究ではこれを color Doppler stripe: CD stripe と呼ぶ) であった (Fig. 3)。次に CD stripe の表示部位に sample volume を設定し、FFT 表示すると、FFT stripe に酷似する模様が得られた (Fig. 2 下段)。

2. 臨床結果

今回対象とした延べ 2,000 例中、14 例の心音図所見に楽音成分を認めた (Tables 1, 2)。年齢は 3 歳から 84 歳、平均 59.6 歳、男性 7 例、女性 7 例であった。楽音成分を有する心雑音の種類は、僧帽弁閉鎖不全 (MR) 雑音 5 例、大動脈弁閉鎖不全 (AR) 雑音 2 例、収縮期駆出性雑音 6 例、収縮後期雑音 1 例であった。楽音様雑音の周波数は、MR の 5 例は 200~400 Hz、AR の 2 例は 400~500 Hz、駆出性の 6 例では 80~200 Hz であった。パルス・ドップラー法所見では (Table 3)、MR 雑音に楽音成分を有する 5 例全例に MR signal が記録され、うち 4 例では収縮期の僧帽弁付近に FFT stripe が記録された。AR 雑音に楽音成分を有する 2 例では AR signal が記録され、また拡張期の大動脈弁付近に CD stripe 類似の模様が、さらに同部位、同時相に FFT stripe が記録された (Fig. 4)。収縮期駆出性雑音に楽音成分を認めた症例 13 では、大動脈弁無冠尖の収縮期に CD stripe 類似の模様が記録された (Fig. 5)。

考 按

1. CD stripe の機序 (音叉の実験)

周波数 128 Hz で振動する音叉の表面のカラー・ドップラー所見で、暖色と寒色の帯が交互に並ぶ縞模様が出現する機序としては、以下の如き推察が可能であると思われる。アロカ製 SSD880 におけるパルス、ビーム、フレームの関係は、Fig.

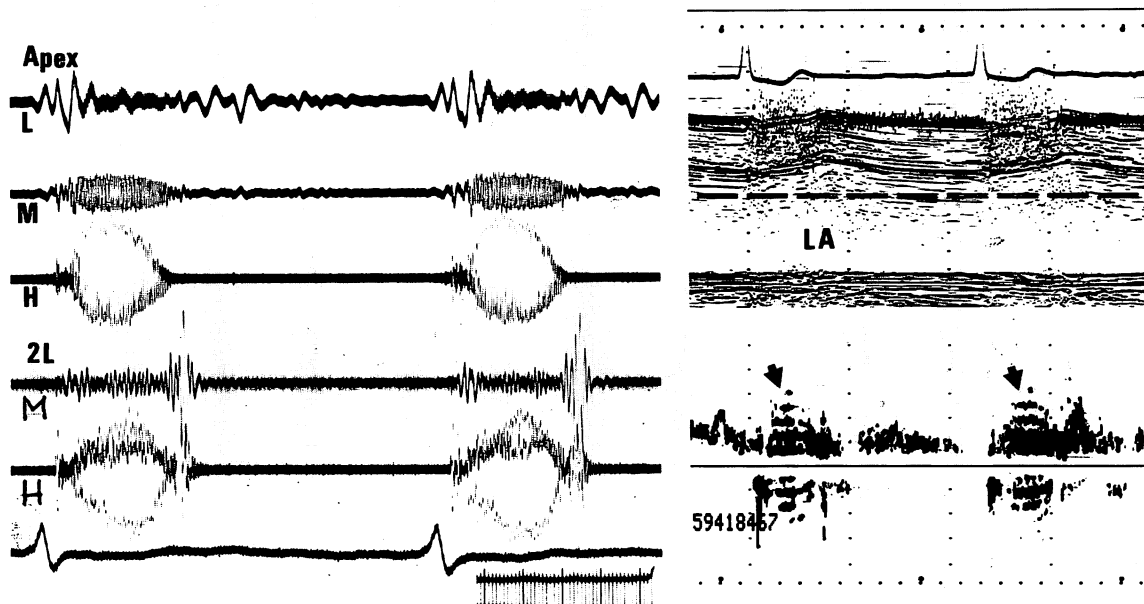


Fig. 1. Phonocardiogram and FFT stripe of Case 2.

L=flat; M=100 Hz/12 dB filter; H=400 Hz/24 dB filter; 2L=phonocardiogram recorded in the second intercostal space at the left sternal border; LA=left atrium.


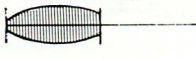



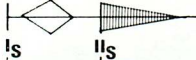

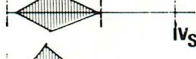


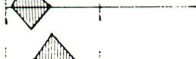


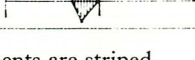
Arrows indicate FFT stripes.

Table 1. Subjects with cardiac murmurs associated with musicality (14 of 2,000 consecutive phonocardiographic records: Oct. 1983–Mar. 85)

Case	Age	Sex	Cardiac murmurs with musicality	Etiology of musical murmurs
1	57	F	Mitral regurgitant murmur	Rheumatic MSR
2	54	M	ditto	Prosthesis
3	37	M	ditto	LV dilatation
4	59	F	ditto	Mitral valve prolapse
5	73	M	ditto	Unknown
6	52	M	Aortic regurgitant murmur	Unknown
7	56	F	ditto	Unknown
8	84	M	Systolic ejection murmur	Sclerotic
9	78	M	ditto	Unknown
10	76	F	ditto	Sclerotic
11	3	F	ditto	Still's murmur
12	76	F	ditto	Sclerotic
13	62	M	ditto	Sclerotic
14	68	F	Late systolic murmur	Unknown

M=male; F=female; MRS=mitral stenosis and regurgitation; LV=left ventricle.

Table 2. Phonocardiographic findings of 14 patients with musical murmurs

Case	PCG	Frequency
1		200
2		300
MR murmur 3		200
4		400
5		200
AR murmur 6		400
7		500
8		150
9		200
Ejection SM 10		100
11		120
12		80
13		150
Late SM 14		200

Musical components are striped.

PCG=phonocardiogram; MR murmur=mitral regurgitant murmur; AR murmur=aortic regurgitant murmur; Ejection SM=ejection systolic murmur; Late SM=late systolic murmur; OS=opening snap of the mitral valve; Is=first heart sound; IIs=second heart sound; IIIs=third heart sound; IVs=fourth heart sound.

6 に示す如く, 1本の超音波ビームは8パルスより形成され, 第1のビームが完成すると, 第2の方向へパルスが送信され, 第2のビームの形成に入る. 64本の超音波ビームで90度の1フレームが完像する. したがって, パルス・レートが4,000 Hzの条件では, ある方向のビームが次の方向へ移るのに要する時間は約2 msecであり, 一方, 128 Hzの音叉の振動周期は約8 msecである

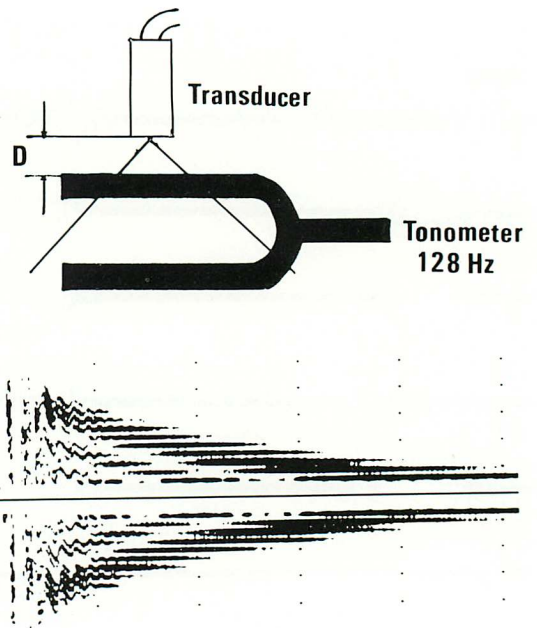


Fig. 2. Methods of experimental study using a tonometer.

Upper panel shows the relationship of the position of a transducer and a tonometer.

D=distance between the trasducer and the tonometer.

Lower panel shows a FFT-like pattern which is obtained by setting a sample site of FFT in the position of the CD stripe in two-dimensional display.



Fig. 3. Color Doppler (CD) stripe.

The CD stripe consists of the repetition of warm and cold color bands.

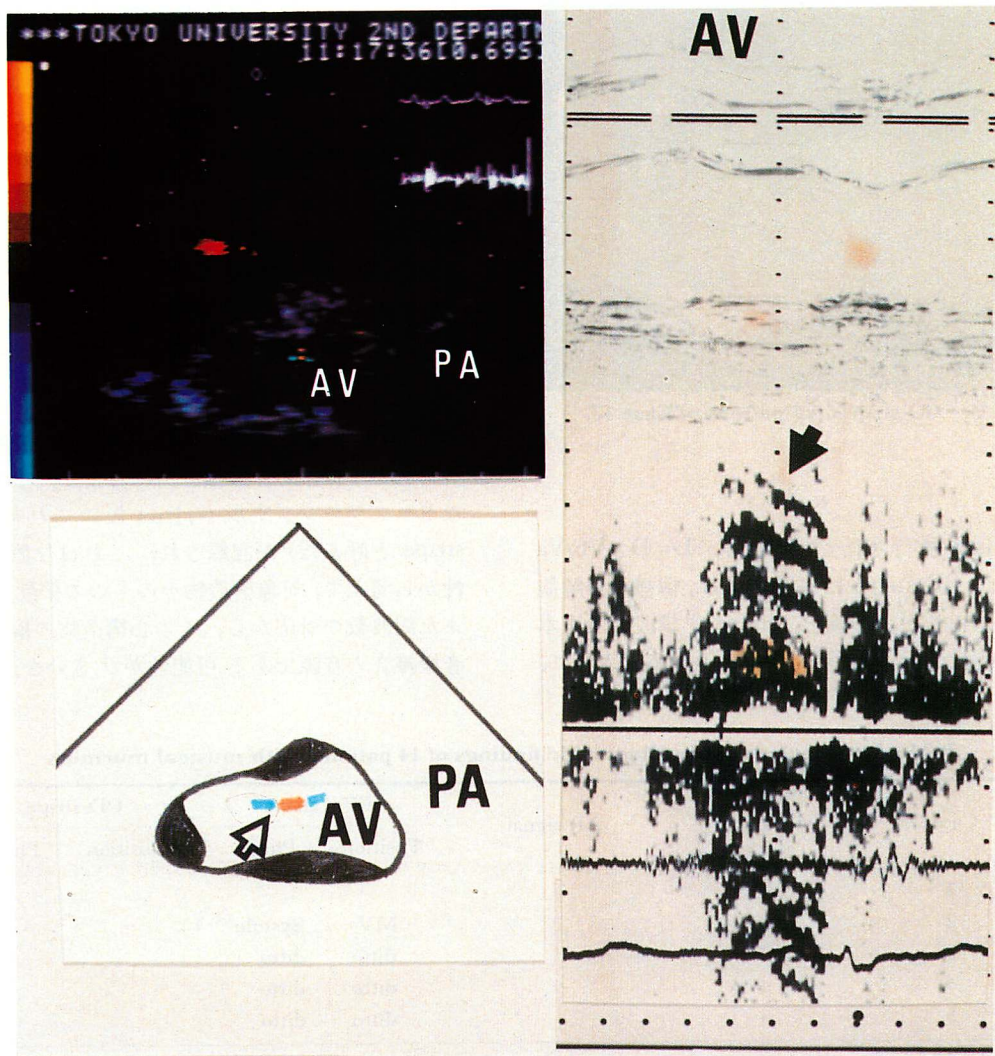


Fig. 4. Doppler findings of Case 6.
Arrows represent the CD stripe-like pattern (left) and FFT stripe (right).

ため、音叉の振動の1周期の間にビームは約4回方向を変える計算になる。Fig. 6 の下段に示す如く、音叉の表面の運動方向と超音波ビームの方向との関係は、音叉の振動周期の $\frac{1}{2}$ を周期とし、forward と backward を交互に繰り返すこととなり、CD stripe が記録されるものと考えられる。

CD stripe の性質は、以下に述べる各パラメー

ターにより規定されると考えられる (Fig. 7)。すなわち、カラー表示角度 (θ)、フレーム・レート (F_f)、パルス・レート (F_p)、音叉の振動数 (F_t)、1フレーム形成ビーム本数 (N_b)、1ビーム形成パルス数 (N_p)、音叉と探触子間の実測距離 (D)、空中の音速 (V_a)、生体内の音速 (V_b 、機械では一律1,530 m/sec として計算している)である。本実験



Fig. 5. CD stripe-like pattern of Case 13.

は空中にて施行されているため、 $L=D \times V_b/V_a$ の距離に CD stripe は表示される。機械の分解能の問題があるが、理論上、stripe を構成する1本の帯の幅は $X=D \theta V_b F_f / 2 V_a F_t$ となる。さらに、

1 フレーム完像時間が音叉の振動周期の整数倍となる特別の場合を除き、一般的にはあるフレームの音叉の振動位相と次のフレームの振動位相とにずれが生ずるため、CD stripe は同じ表示部位で、時間の経過とともに、ビームと垂直の方向へ少しずつ shift して観察される。以上の理論的考察は音叉の振動数が約 250 Hz までは適用可能であるが、それ以上の振動数では、1本のビームを構成する反射パルスの周波数の分散が極端に大となるため、必ずしも暖色と寒色の帯が交互に並ぶ模様としては得られなくなる事が予想される。

2. FFT stripe の機序, CD stripe との関係

宮武ら¹¹⁾は、楽音様雑音例において、harmonic なドップラーシグナル (今回は仮にこれを FFT stripe と呼んだ) が記録され、これは位置的限局性から考えて、対象構造物そのものの振動を示し、また周波数の対応から、その心構造物の振動が楽音様雑音の音源である可能性が大きいと述べた。

Table 3. Doppler echocardiographic findings of 14 patients with musical murmurs

Case	MR signal	AR signal	FFT stripe		CD stripe	
			Position	Phase	Position	Phase
1	+					
2	+		MV	Systole		
3	+		ditto	ditto		
4	+		ditto	ditto		
5	+		ditto	ditto		
6		+	AV	Diastole	AV	Diastole
7		+	ditto	ditto	ditto	ditto
8	-	-				
9	-	-				
10	-	-				
11	-	-				
12	-	-				
13	-	-			AV	Systole
14	-	-				

AR signal=pulsed Doppler FFT signal or color Doppler signal of aortic regurgitation; MR signal=pulsed Doppler FFT signal or color Doppler signal of mitral regurgitation; MV=mitral valve; AV=aortic valve.

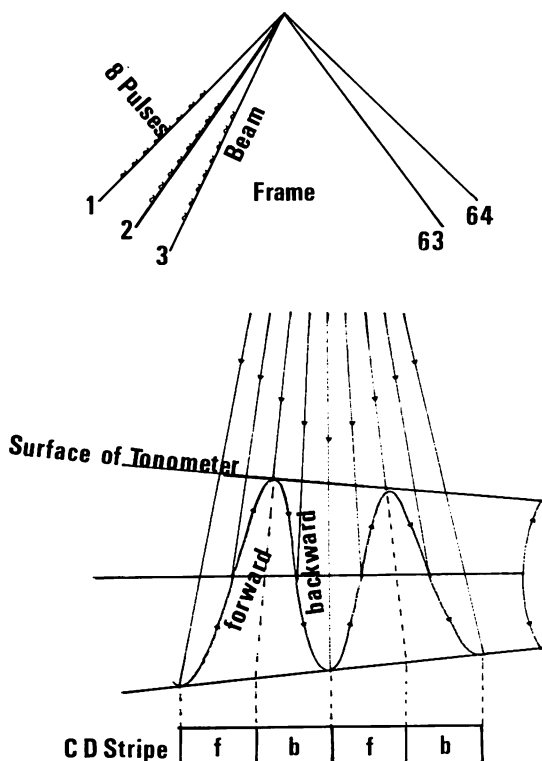
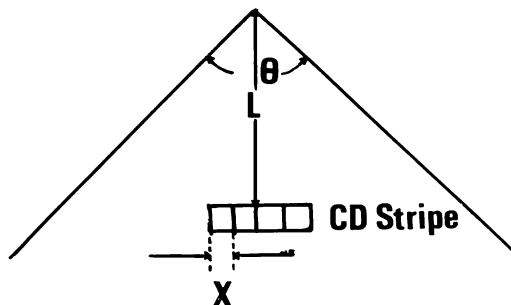


Fig. 6. Schema illustrating the mechanism of the genesis of the CD stripe.

Upper panel shows the relationships among pulse, beam and frame. One beam is composed of 8 pulses, and 64 beams constitute one frame. Lower panel shows the relationship of the motion of the surface of the tonometer and the directions of the beams. The motion of the surface of the tonometer approximates simple harmonic. If the surface moves toward the transducer (forward), warm color is displayed; if backward, cold color is displayed.

さらに仁村¹²⁾はスピーカーのダイアフラムを用いた実験より、スピーカーの振動を $y = \sin \omega_1 t$ とし、送信パルスを $y = \sin \omega_2 t$ とすると、反射パルスは $y = \sin(\omega_2 t - k \sin \omega_1 t)$ となり、この時のドップラー出力はベッセル級数を含む複雑な式で表わされるが、周波数分析の結果は、基線の上下に $\omega_1 \times n$ (n は自然数) の縞が時間軸と平行に現われることを示した。したがって、FFT stripe の数条の縞は倍音の反映ではなく、基音 ω_1 のみを有



- θ : Frame angle
- Ff : Frame rate
- Fp : Pulse rate
- Ft : Frequency of tonometer
- Nb : Number of beams constituting a frame
- Np : Number of pulses constituting a beam
- D : Distance between tonometer and transducer
- Va : Velocity of sound wave in the air
- Vb : Velocity of sound wave in the body
- X : Width of a band of the CD stripe
- $L = D \times Vb / Va$
- $X = D \theta Vb Fp / 2 Nb Np Va Ft = D \theta Vb Ff / 2 Va Ft$
- $1/Ff = n \cdot 1/Ft \rightarrow$ fixed CD stripe
- $1/Ff \approx n \cdot 1/Ft \rightarrow$ shifting CD stripe

Fig. 7. Parameters of CD stripe.

Parameters which regulate CD stripe are shown. $n =$ natural numbers.

する振動でも $\pm \omega_1, \pm 2\omega_1, \pm 3\omega_1 \dots$ の数条の縞が記録される。今回の音叉実験の CD stripe にサンプルサイトを設定し得られた FFT 所見は、仁村のスピーカー実験にて記録された FFT stripe と同一のものと考えられる。

3. CD stripe 類似の模様様の臨床的意義

楽音様雑音例における FFT stripe の記録は、音源ないし共鳴心内構造物に単振動様の規則的振動が存在することを意味する。しかし、FFT stripe を得るサンプルサイトは非常に小範囲な領域に限られ、通常の検査時間内に必ずしも FFT stripe が記録されるとは限らない。一方、CD stripe は、本来音叉の実験にて定義されたものであるが、臨床例においては、低感度のフローゲイン設定下にあっても、CD stripe 類似の模様は高輝度であり、したがって同所見の同定は容易であ

る。ついでサンプルサイトをこの CD stripe 類似の模様の記録部位に置くと, FFT stripe が記録される。したがってカラー・ドップラー法によるこの CD stripe 類似の模様は, 短時間内に FFT stripe を記録するためのサンプルサイトを指定し得る点で有用と言える。しかし, 単振動様微細振動のカラー・ドップラー所見として, CD stripe 類似の模様が持つ特異性は高いとは言えず, 例えば, AR の際みられる僧帽弁の不規則な粗動においても, 時として振動様式の整った数振動が含まれれば, CD stripe 類似の模様に似た所見が得られることがある。この場合, 模様の出現持続時間および FFT を併用することにより, 単振動様規則的振動と粗動とを鑑別することが可能と考えられる。

結 論

CD stripe 類似の模様は, FFT stripe と併用することにより, 単振動様微細振動部位の同定に有用であり, 楽音様雑音の音源を議論する際に重要な所見の1つであると言える。カラー・ドップラー法は血流情報を得ることが本来の目的であり, 心構造物からの反射パルスは単なるアーチファクトとして処理されていたが, 心構造物の振動の評価に, 本法が応用され得る可能性が示された。

要 約

楽音様雑音例において, 単振動様の微細な振動をしている心腔内構造物の FFT 所見は特徴的な縞模様 (FFT stripe) であり, 本雑音の音源の同定に有用であるという事実は既に推定されている。今回我々は, 128 Hz で振動している音又のカラー・ドップラー所見に暖色と寒色の帯が交叉に並ぶ特徴的縞模様 (CD stripe) が記録され, 同部位の FFT 所見が上述した FFT stripe に酷似するという事実に発見した。臨床的には延べ2,000例の心音図, 心エコー図, パルス・ドップラー法検査施行例中, 14例の心音図にみられた楽音成分を検討した。楽音成分を有する心雑音の種

類は僧帽弁閉鎖不全5例, 大動脈弁閉鎖不全2例, 駆出性収縮期雑音6例, 収縮後期雑音1例であった。これらのうち CD stripe 類似の模様は3例に, FFT stripe は6例に記録され, FFT stripe は CD stripe 類似の模様と同部位, 同時相に記録された。CD stripe 類似の模様は, FFT 所見を併用することにより, 楽音様雑音例の単振動様微細振動体の同定に有用と考えられた。

アロカ製 SSD-880 の仕様等に関し, 御教示いただいたアロカ株式会社, 河西千広先生に感謝いたします。

文 献

- 1) 上田英雄, 海渡五郎, 坂本二哉: 臨床心音図学, 南山堂, 東京, 1963, p 292
- 2) 坂本二哉, 張 櫻培, 井上 清, 伊藤梅乃, 魚住善一郎: いわゆる機能性収縮期雑音の発生源の多様性に関する臨床的観察. 臨床心音図 1: 131, 1971
- 3) 山本廣史, 相良頼彦, 金谷久司, 大内 穰, 鳥井紳一郎: マルファン症候群における大動脈弁閉鎖音の低周波楽音様化の1観察例. 臨床心音図 2: 433, 1972
- 4) 小林 毅, 飛世克之, 富田壽夫, 館田邦彦, 橋本正信, 本間紀久雄, 川合榮邦, 小野寺壮吉, 村尾 誠, 小笠原四郎: 拡張期楽音様雑音の2症例. 臨床心音図 2: 443, 1972
- 5) Killebrew E, Cohn K: Observations on murmurs originating from incompetent heterograft mitral valves. Am Heart J 81: 490, 1971
- 6) Rackley CE, Whalen RE, Floyd WL, Orgain ES, McIntosh HD: The precordial honk. Am J Cardiol 17: 509, 1966
- 7) McKusick VA: Spectral phonocardiography. Am J Cardiol 3: 200, 1959
- 8) 盛岡茂文, 延吉正清, 福森重剛: 収縮期楽音様雑音を呈した僧帽弁膜症の1例. 臨床心音図 2: 419, 1972
- 9) 伊東紘一, 吉野定之, 柳沢正義: 一過性に楽音様雑音をみたりウマチ熱の超音波学的検討. 日超医講演論文集 37: 189, 1980
- 10) 藤井諄一, 渡辺 熙, 久保木正夫, 加藤和三: 心エコー図による楽音様雑音の検討. J Cardiogr 6: 385, 1976
- 11) 宮武邦夫, 木下直和, 岡本光師, 大森文夫, 仁村泰治, 榊原 博: 楽音様雑音分析における超音波エコー・ドブラ法の意義について. 日超医講演論文集 39: 69, 1981

- 12) 仁村泰治：パルス・ドプラ法データ判読上問題となる特殊現象. 超音波医学 **10**: 215, 1983
- 13) 鈴木 修, 伊藤紘一, 細田瑛一：大動脈弁狭窄症に

おける楽音様雑音の音源に関する検討. 日超医講演
論文集 **40**: 529, 1982