

周波数解析を用いた超音波 心筋組織性状診断の検討

Ultrasonic tissue characterization by spectral analysis of myocardial textural pattern

立川 弘孝
古川 啓三
勝目 紘
小杉 義和
東 秋弘
井上 直人
杉原 洋樹
井上 大介
朝山 純
中川 雅夫

Hirota TATSUKAWA
Keizo FURUKAWA
Hiroshi KATSUME
Yoshikazu KOSUGI
Akihiro AZUMA
Naoto INOUE
Hiroki SUGIHARA
Daisuke INOUE
Jun ASAYAMA
Masao NAKAGAWA

Summary

Based on the fact that ultrasonic myocardial textural patterns are more irregular in the pathological myocardium than in the normal, evaluation of the myocardial tissue character was attempted in vivo using spectral analysis. Parasternal left ventricular long-axis echocardiograms were obtained from five patients with old myocardial infarction diagnosed by history, electrocardiography and coronary angiography. These echocardiograms were transferred to an image analyzer and digitized ($256 \times 256 \times 8$). The waveforms of the gray-scale-changes from the normal myocardium showed periodicity in each 8-pixel cycle, but those from the infarcted myocardium did not. To quantify pattern changes in gray-scale values in the ultrasound beam direction, spectral analysis was performed by the maximum entropy method (MEM). There were four peaks in the MEM spectra both in the normal and infarcted myocardia, but there was a great significance in these patterns: with high, steep peaks in normal MEM spectra, and low, blunt peaks in infarcted ones. By discriminatory analysis of these four peak values, normalized by the whole spatial frequencies as multivariate, the misclassification rate was 4.8~22.7% in anteroseptal infarctions and 5.0~20.0% in posterior infarctions.

Thus, spectral analysis of the myocardial textural pattern has advantages for analyzing routine echocardiograms without corrections by any absolute ultrasonic references. Furthermore, the misclassification rate is so low that we are able to characterize myocardial tissue.

Key words

Two-dimensional echocardiogram
analysis

Tissue characterization

Myocardial infarction

Spectral

京都府立医科大学 第二内科
上京区河原町広小路上る (〒602)

The Second Department of Internal Medicine, Kyoto
Prefectural University of Medicine, Kawaramachi-
Hirokoji, Kamigyoku, Kyoto 602

Received for publication April 9, 1988; accepted July 13, 1988 (Ref. No. 35-PS 21)

はじめに

近年, 超音波を用いた組織性状診断の試みが盛んに行われ, 従来より, *in vitro*, すなわち心筋切除標本を用いた反射エコー強度¹⁾や, 周波数依存性減衰を用いた解析法²⁾が検討されてきた. 一方, *in vivo* では, 超音波画像上で心筋エコー輝度分布^{3,4)}や *texture* の分析による診断が試みられているが, これらの方法は, 使用装置の特性, 記録条件, また雑音成分の処理や画像の標準化などの点に問題を残し, したがって *in vivo* での解析はいまだ一定の見解が得られていない. 中でも, 心筋組織性状診断は動きのある臓器を対象とし, また狭いエコーウィンドーより超音波を投入せざるをえない画像構成上, *in vivo* での解析の報告は少なく, これらの問題を解決する方法が検討されている. 本検討では超音波検査より得た画像の周波数解析と判別分析から, 心筋組織性状の診断を試みた. 特に今回は, 梗塞心筋に生じる超音波画像の変化, すなわち病的心筋の超音波画像上の不均一, 反射エコーのきめ (*texture*) の乱れなどに着目し, 心臓超音波検査から得た画像上, 心筋に設定した関心領域内の反射エコーを周波数解析することにより, 梗塞心筋と正常心筋の分別を試みた.

対象と方法

対象は冠動脈造影などで確診した発症後4週間以上経た陳旧性心筋梗塞患者5例(前壁中隔梗塞3例, 後壁梗塞2例)である. 方法は心臓超音波診断装置(Hewlett-Packard製, 77020A, 電子走査型)を用いて, 傍胸骨左室長軸断面の動画およびR波同期静止画像をビデオテープに収録した. 用いた探触子は3.5 MHzで, 高周波パルス発生器および *dynamic range* の増幅は一定とし, *edge enhancement* や γ 補正などの画像処理は“off”の状態とした. 超音波診断装置の外部出力より画像入力装置(ATL 512-8-2 DMA)に転送し, 標準化間隔0.8 mm, 256×256画素, 256階調でデジ

タル化したデータをパーソナルコンピュータ(NEC PC-9801)を用い, 以下の画像処理を行った(Fig. 1A).

心筋に設定した関心領域内のグレイレベルの変化を超音波ビーム方向の8点を8例(Fig. 1B)にわたってサンプリングし, そのデータを1行に並べ替えた64点のグレイレベルの波形(データ波形)を記録した(Fig. 2).

得られた64点のデータ波形につき, 周波数解析を施行した. 周波数解析には, 少量のデータで分解能のよい連続スペクトルが得られるとされる最大エントロピー法を用いた. 一般に, 空間周波数領域でのスペクトル解析法としてはフーリエ変換が用いられることが多いが, 梗塞部位が心筋内に局在していることや, 心筋壁厚を考慮して関心領域を前述のごとく設定したため, データ波形長は制限されている. このような少量のデータに対しては, フーリエ変換で求めた離散スペクトルはスペクトル周波数の間隔が広くなり, その特徴が十分に把握できないことがある⁵⁾.

以上の点を考慮して, 今回は最大エントロピー法により解析した. 最大エントロピー法では自己回帰モデルの次数によってスペクトルが変化するが, この自己回帰モデルの次数に関しては, 最終予測誤差(*final prediction error*)により最適値を検討した結果, 多くの関心領域で7~9次の範囲に分布したため, 今回の検討では8次に固定して検討した⁶⁾.

このようにして求めた最大エントロピー法スペクトルより梗塞心筋群(梗塞群)および正常心筋群(正常群)の2群を想定し(*initial sample*), 新たに同一画像上の心筋部分に設定した任意の関心領域の最大エントロピー法スペクトル(*follow-up sample*)より, マハラノビス汎距離(*Maharanobis' generalized distance*)を用いて判別分布を行った.

結 果

1. データ波形

Fig. 2に示すごとく, 正常心筋(A)では超音波

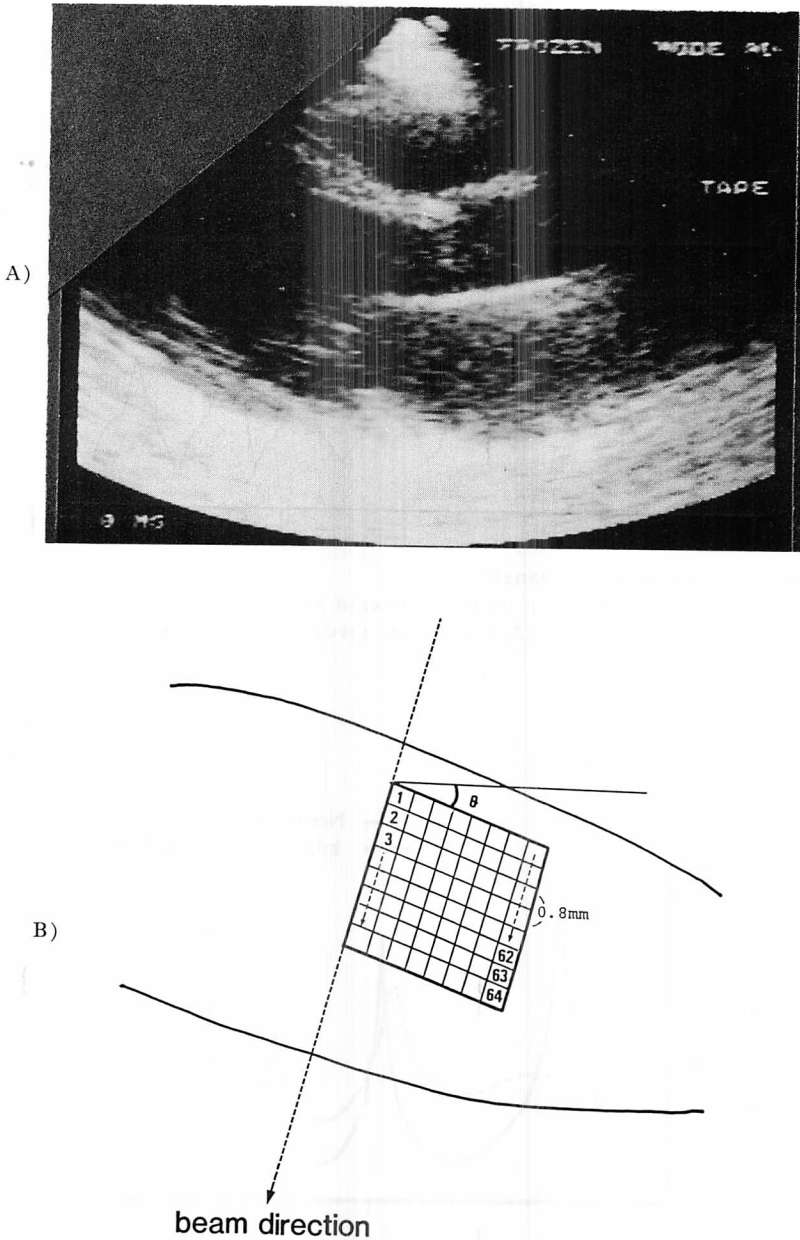


Fig. 1. Two-dimensional echocardiogram in a case of anteroseptal infarction and sampling procedure of 64 pixels in region of interest.

(A) The left ventricular long-axis view of a two-dimensional echocardiogram reveals irregularity in the infarcted septal myocardial texture in comparison with the normal posterior myocardial texture.

(B) Rectangular regions of interest (8×8 pixels) are set on myocardial images, and a gray-scale value along the ultrasound beam direction in each pixel is estimated.

θ : angle between the axis of the myocardium and the horizontal line.

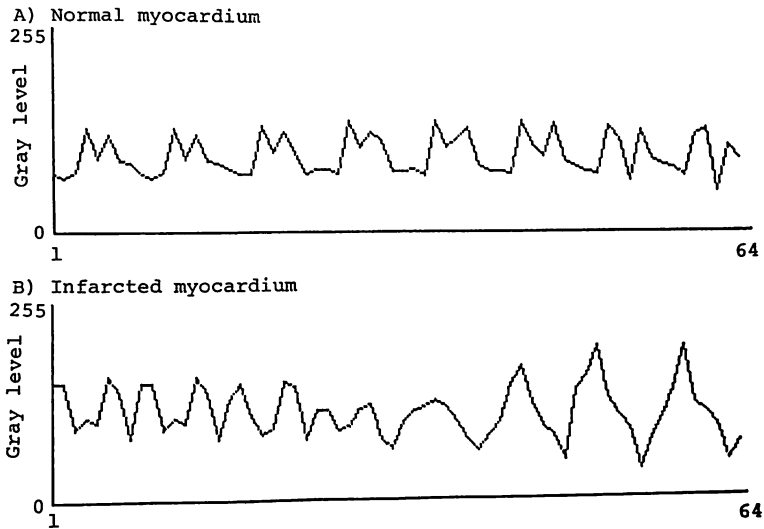


Fig. 2. Waveforms of gray-level changes.

The gray-scale changes of 64 pixels in regions of interest are recorded in continuous waveforms. The wave from the normal myocardium (A) is a periodic wave and that from the infarcted myocardium (B) has no periodicity.

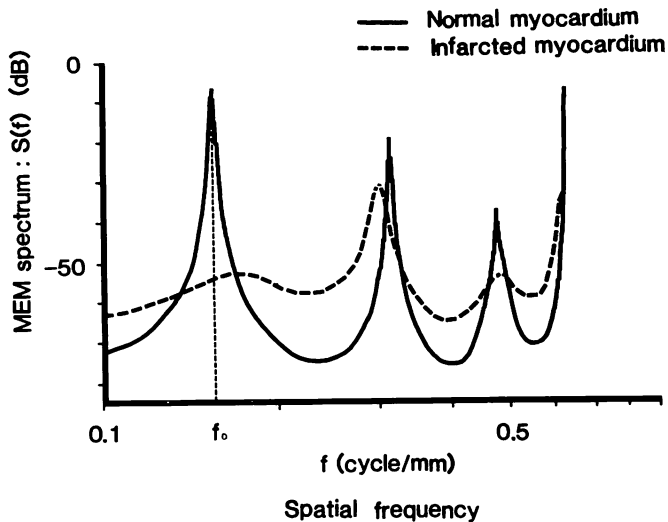


Fig. 3. Spectral analysis by the maximum entropy method (MEM).

Spectral analysis by the maximum entropy method (MEM) reveals a significant distinction between low, blunt peaks in the infarcted myocardium (broken line) and high, steep peaks in the normal one (solid line).

ビーム方向の1列8点のデータ波形を基本波形とするような類似の波形が8列にわたって繰り返され、周期性が認められるのに対し、梗塞心筋 (B) でのデータ波形には全く周期性は認められなかった。

2. 最大エントロピー法による周波数解析

前壁中隔心筋梗塞患者の最大エントロピースペクトル (Fig. 3) を示すごとく、梗塞部、健常部のいずれにも、1列8点のデータ長 6.4 mm の周期性を代表する基本周波数 f_0 {= $1/8 \times 0.8$ (mm) = 0.15625 (cycle/mm)} と、その高調波周波数の近傍に4つのピークが現れた。しかしスペクトルのピークは、正常心筋では高く、尖鋭であるのに対して、梗塞心筋ではなだらかで、ピークも低値を示し、梗塞心筋の周期性の乱れを表した。この周期性の乱れが梗塞時の心筋組織性状の変化に深く関係しているものと考え、画像間の条件による差や体表面からの深さによる差を減少させるために、スペクトルの総和で規格化した4つのピーク値の dB 値を変数として、判別分析を行った。

3. 前壁中隔梗塞例 (Table 1)

陳旧性心筋梗塞患者3例で記録した超音波画像において、梗塞部および健常部にそれぞれ20点以上の関心領域を設定し、解析を行った。その結

Table 1. Misclassification rate between clinical diagnosis and discriminatory analysis in 3 cases with old anteroseptal myocardial infarction

Case	Dx.	Discriminatory analysis		Misclassification rate (%)
		MI	Normal	
1	MI	11	2	15.4
	Normal	1	12	7.7
2	MI	17	5	22.7
	Normal	3	30	9.1
3	MI	20	1	4.8
	Normal	4	16	20.0

MI=infarcted myocardium; Normal=normal myocardium.

果、initial sample と follow-up sample を同一の画像上で設定した場合、誤判別率は 4.8~22.7% と、良好な結果を得た。

4. 後壁梗塞患者例 (Table 2)

同様にして後壁梗塞3例より得た画像上で判別分析を行った結果、誤判別率は 5.0~20.0% であった。

5. 症例間での検討 (Table 3)

前壁中隔梗塞3例の画像上で initial sample を設定し、Case 2 および 3 の画像上で設定した任意の関心領域を follow-up sample として分析した結果、誤判別率は 0~18.2% と良好であった。一方、前壁中隔梗塞例 (Case 1) にて設定した2群

Table 2. Misclassification rate between clinical diagnosis and discriminatory analysis in 2 cases with old posterior myocardial infarction

Case	Dx.	Discriminatory analysis		Misclassification rate (%)
		MI	Normal	
4	MI	19	1	5.0
	Normal	4	16	20.0
5	MI	19	2	9.5
	Normal	3	12	20.0

Abbreviations: see Table 1.

Table 3. Misclassification rate of discriminatory analysis in different images in comparison with the image of Case 1

Case	Dx.	Discriminatory analysis		Misclassification rate (%)
		MI	Normal	
2	MI	20	2	9.1
	Normal	3	18	14.3
3	MI	18	4	18.2
	Normal	0	23	0.0
4	MI	16	8	34.8
	Normal	11	21	34.3

Abbreviations: see Table 1.

で後壁梗塞例 (Case 4) を判別した場合, 誤判別率は 34.8% と高値を示した。

考 察

In vivo における心筋組織性状診断の試みは, 核磁気共鳴装置や, 高速度 X 線コンピューター断層装置などによる方法が散見されるようになってきたが, いまだ分解能や装置そのものの価格の面で, 一般的であるとはいえない。一方, 超音波による方法は, 時に心周期全体にわたって安定した画像を得ることが困難であり, 胸壁での減衰が強く, 雑音成分が多く混入し, 空間的に同一な画像を得ることが難しいなどの制約も多いが, ベッドサイドで容易に, しかも非侵襲的に繰り返し施行可能である。また他の検査法に比し距離分解能が 2 mm 以下と優れており, 魅力ある手法であると考えられる。

従来, in vivo における心筋組織性状診断には傍胸骨左室短軸断面が多く採用されてきたが, 本断面は lateral resolution 劣化の影響が大きく, 超音波ビームとほぼ平行になる心室中隔や左室側壁の心筋の反射エコーは弱い。また超音波ビームと垂直な左室前壁と後壁はセクター面との曲率が逆になるため, これらの部分の定量的な比較は行えない。これらの点を考慮して, 今回の検討では, 断層面を変化させることなく, 比較的広範囲の心室中隔および左室後壁像が得られる左室長軸断面を採用した。

超音波による in vivo 心筋組織性状診断の試みは, X 線コンピューター断層法での CT 値などのような絶対値評価には問題があるため, 現在では心腔内や心内膜のエコー輝度を基に標準化した未処理の RF (radio frequency) 信号を解析する方法や, 心周期による画像の変化を解析する方法^{7,8)}など, 相対的な解析が主流となっている。RF 信号による解析法には, 従来より心筋に設定した関心領域内のグレイレベルの変化を平均輝度^{9,10)}や, ヒストグラム^{5,11,12)}を用いて解析した報告が多いが, 画像間の比較には厳密な画像の標準

化を必要とする。

これに対して, 本検討での周波数解析を利用した方法は, 関心領域毎のグレイレベルの変化を一つの連続波形として捕えているため, 関心領域内の輝度がグレイレベル 256 階調内に入るように設定すればよく, 通常的心臓超音波検査によって得られる画像を, そのまま解析し得るという利点がある。また, 空間周波数領域でのスペクトルの総和で規格化した解析であるため, 診断装置の増幅特性や, 観察部位によって異なるエコーレベルを考慮せず, 定量的な解析が可能であると考えられる。しかし, 本法は超音波診断装置により得られた画像を解析するため, 入力や画像条件を一定に設定しても, 極座標変換による画像構成など, ある程度の画像処理が加わることは不可避である。そのため, 厳密には RF 信号の解析法ではないが, 雑音成分が比較的少なく, 安定した画像が得られる場合には, 今回の結果にみられるように, 低い誤判別率で診断し得るものと考えられる。

上述のごとく判別分析の結果, follow-up sample を同一画面上で設定した場合, 誤判別率は 4.8~22.7% と良好であった。しかし, 他の症例で設定した initial sample により判別分析をした場合, 同じ前壁中隔梗塞症例間での検討では誤判別率 0~18.2% と良好であったが, 前壁中隔梗塞例の画像より得た initial sample にて後壁梗塞例を判別分析した場合のそれは 34.8% であった。

心臓超音波検査では電子セクター方式で画像が構成されているが, 実際には約 120 本の超音波ビームから成り, 間隙は周囲の情報で補間され 1 枚の画像が構成されている。そのため, トランスデューサーからの遠位部では近位部に比しビーム間の距離が大きく, 補間の影響を強く受けるため, 深度による空間周波数の差が生じることは容易に想像できる。したがって, トランスデューサーから遠位の後壁は, 心室中隔に比し, 比較的均一に描出される。しかし本法による後壁梗塞例の検討では, 正常の心室中隔より後壁側の不均一性が証明され, 本法によっても十分解析可能であること

が示された。

いかなる組織学的な変化が超音波画像上の変化として描出されるかは不明であるが、梗塞心筋や心筋症での検討では、コラーゲンの含有量が backscatter の変化の主要因であることが、in vitro における多くの研究で認められている^{13~15)}。一方、Hoyt ら¹⁶⁾は、正常心筋においては、backscatter とコラーゲン含有量に相関関係が認められなかったことから、健全心筋においてはコラーゲン以外の他の変化が backscatter に変化を及ぼしているとした。Yaun ら¹⁷⁾は赤血球の分布の変化で超音波画像に変化が生じることを明らかにしたが、Schnittger ら¹²⁾は、心筋細胞や心筋筋束の分布の変化は超音波により backscatter の変化として検出し得ることを証明した。さらに Cohen ら^{18,19)}は in vivo においても胸壁による超音波減衰を補正することによって、integrated backscatter により、虚血心筋の性状を表し得ることを報告した。

以上のごとく backscatter の出現機序に一定の見解はないが、いずれにしろ、梗塞心筋では不規則な線維化、あるいは島状の健全心筋の残存による心筋筋束の配列の乱れのため、超音波 backscatter に変化が生じ、in vivo の画像上では texture の乱れとして描出されると考えられる。

方法論的には、我々は健全心筋に比し病的な心筋では何らかの組織学的な変化が生じ、心筋の texture が不均一になるという仮説を基に検討した。今回の検討では、梗塞により菲薄化した心筋上でも関心領域が設定できるよう、標本化間隔 0.8 mm、関心領域の大きさを 6.4 mm に設定し、超音波ビーム方向の 8 点 8 列にわたってサンプリングした。セクター方式の超音波画像では、扇型方向の距離分解能はビーム間の補間やサイドローブの影響のため、深部では劣化が著しいのに対して、本法では超音波ビーム方向の距離分解能が比較的保たれていることをファントムによる検討で明らかにした。このような方法で 64 点についてグレイレベルの変化を記録したところ、組織学的

に一様であると考えられる健全心筋のデータ波形は、8 点 1 列の波形と類似の波形が繰り返し、データ波形上で周期性を認めたのに対し、梗塞部では、貫壁性に癒痕化した場合は除き、データ波形には全く周期性を認めず、本仮説の妥当性を裏付ける結果と考えられた。

これまで超音波診断は、専ら心筋肥厚や心筋壁動態により正常心筋か病的な心筋かの鑑別を行ってきたが^{20,21)}、心筋エコーの空間的周期性の乱れの有無を加味することにより、より精度の高い診断が可能になると考えられる。しかし、前述のごとく in vivo 組織性状診断の確立にはいまだ多くの難問があり、特に診断装置の解像力の向上なくして本分野の発展は望めず、工学系の進歩が切望されるところである。

要 約

超音波画像上で病的な心筋は正常心筋に比し不均一になり、心筋エコーのきめ (texture) の乱れを生じることに着目し、心筋に設定した関心領域内の反射エコーの周波数解析を行って、正常心筋と梗塞心筋の分別を試みた。すなわち、傍胸骨左室長軸断層像をデジタル化し、心筋に設定した関心領域のグレイレベルの変化を、超音波ビーム方向の 8 点について 8 列にわたってサンプリングし、そのデータを 1 行に並べ替えた 64 点について、データ波形を検討した。

1. 健全心筋では、超音波ビーム方向 1 列 8 点の周波数波形を基本波形とするような、類似の波形が 8 列にわたって繰り返され、周期性を認めたのに対し、梗塞心筋でのデータ波形には全く周期性は認められなかった。

2. 得られた 64 点のデータ波形より、最大エントロピー法を用いて周波数解析を行うと、梗塞部、健全部のいずれにも 4 つのピークが現れたが、スペクトルのピークは、正常心筋では高く尖鋭であるのに対して、梗塞心筋ではなだらかでピークも低値を示し、梗塞心筋の周期性の乱れを表した。

3. 空間スペクトルの総和で規格化した4つのピーク値のdB値を変量として判別分析を行うと, 冠動脈造影などで確診された梗塞患者6例の超音波画像において, 誤判別率は4.8~22.7%と良好な結果を得た。

本法は通常の心臓超音波検査によって得られる画像を無処理のまま解析し得るという利点があり, 従来の心筋壁厚や壁動態による診断に加え, 心筋エコーの空間的周期性の乱れの高い超音波診断が可能になると考えられる。

文 献

- 1) Gramiac R, Waag RC, Schenk EA, Lee PPK, Thomson K, Macintosh P: Ultrasonic detection of myocardial infarction by amplitude analysis. *Radiology* **130**: 713, 1979
- 2) Miller JG, Sobel BE: Cardiac ultrasonic tissue characterization. *Hosp Pract J*: 143, 1982
- 3) Haendrichen RV, Ong K, Fishbein MC, Zwehl W, Meerbaum S, Corday E: Early differentiation of infarcted and noninfarcted reperfused myocardium in dogs by quantitative analysis of regional myocardial echo amplitude. *Circ Res* **57**: 718, 1985
- 4) Skorton DJ, Melton HE, Pandian NG, Nichols J, Koyanagi S, Marcus ML, Collins SM, Kerber RE: Detection of acute myocardial infarction in closed chest dogs by analysis of regional two-dimensional echocardiographic gray-level distribution. *Circ Res* **52**: 36, 1983
- 5) 峰久次郎, 清水孝一, 松本伍良, 増田武志, 長谷川功: スペクトル解析による骨 X 線像の線密度推定. 電子通信学会画像工学研究会 IE84-114: 37, 1984
- 6) 市川幸治, 溝尻 勲, 立川弘孝, 勝目 紘: 超音波心臓断層像を用いた心筋組織性状診断. 電子情報通信学会論文誌 J70-D: 1659, 1987
- 7) Wickline SA, Thomas LJ, III, Miller JG, Sobel BE, Perez JE: The dependence of myocardial ultrasonic integrated backscatter on contractile performance. *Circulation* **72**: 183, 1985
- 8) Wickline SA, Thomas LJ, III, Miller JG, Sobel BE, Perez JE: A relationship between integrated backscatter and myocardial contractile function. *J Clin Invest* **76**: 2151, 1985
- 9) Parisi AF, Nieminen M, O'Boyle JE, Moynihan PF, Khuri SF, Kloner RA, Folland ED, Scheon FJ: Enhanced detection of the evaluation of tissue changes after acute myocardial infarction using color-encoded two-dimensional echocardiography. *Circulation* **66**: 764, 1982
- 10) Chandraratna PAN, Ulene R, Nimalasuriya A, Reid CL, Kawanishi D, Rahimtoola SH: Differentiation between acute and healed myocardial infarction by signal averaging and color encoding two-dimensional echocardiography. *Am J Cardiol* **56**: 381, 1985
- 11) 高元俊彦, 辻林 隆, 伊藤 宏, 谷口興一, 菊田憲二: 超音波組織性状: 心筋症, 心筋疾患における心筋組織性状の検討. 日超医講演論文集 **48**: 259, 1986
- 12) Schnittger I, Vieli A, Heiserman JE, Director BA, Billingham ME, Ellis SG, Kernoff RS, Takamoto T, Popp RL: Ultrasonic tissue characterization: Detection of acute myocardial ischemia in dogs. *Circulation* **72**: 193, 1985
- 13) O'Donnell M, Mimbs JW, Miller JG: Relationship between collagen and ultrasonic backscatter in myocardial tissue. *J Acoust Soc Am* **69**: 580, 1981
- 14) O'Brien WD: The role of collagen in determining ultrasonic propagation properties in tissue. *Acoust Holog* **7**: 37, 1977
- 15) Mimbs JW, O'Donnell M, Bauwens D, Miller JG, Sobel BE: The dependence of ultrasonic attenuation and backscatter on collagen content in dog and rabbit hearts. *Circ Res* **47**: 49, 1980
- 16) Hoyt RH, Collins SM, Skorton DJ, Ericksen EE, Conyers D: Assessment of fibrosis in infarcted human hearts by analysis of ultrasonic backscatter. *Circulation* **71**: 740, 1985
- 17) Yaun YW, Chung KK, Fei DY: Effects of flow disturbance and erythrocyte aggregation on ultrasonic backscatter from blood. *J Acoust Soc Am* **75**: 1265, 1985
- 18) Mimbs JW, Bauwens D, Cohen RD, O'Donnell M, Miller JG, Sobel BE: Effects of myocardial ischemia on quantitative ultrasonic backscatter and identification of responsible determinants. *Circ Res* **49**: 89, 1981
- 19) Cohen RD, Mottley JG, Miller JG, Kurnik PB, Sobel BE: Detection of ischemic myocardium in video through the chest wall by quantitative ultrasonic tissue characterization. *Am J Cardiol* **50**: 838, 1982
- 20) Weyman AE: Correlation between extent of abnormal regional wall motion and myocardial infarction size in chronically infarcted dogs. *Circulation* **56**: 72, 1977
- 21) 神代秀爾: 急性心筋梗塞における壁運動と壁厚の関係について. 呼吸と循環 **33**: 1477, 1985