



熱過渡負荷を受ける構造物の損傷評価

— 超音波信号のウェーブレット解析による損傷検出 —

(研究報告書)

2000年3月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

熱過渡負荷を受ける構造物の損傷評価
——超音波信号のウェーブレット解析による損傷検出——
(研究報告書)

川崎 弘嗣*、菅谷 全**

要 旨

熱過渡の繰り返し負荷を受けた構造物の損傷を評価するため、超音波法により基礎的な検討を実施した。き裂発生以前からの損傷状態を検出するため、超音波エコー波形の解析法としてウェーブレット解析を適用した。ウェーブレット変換による時間一周波数解析を行い、超音波パラメータの評価を行った。その結果、超音波エコーの解析にいくつかの基本ウェーブレット変換を適用した結果、Gabor ウェーブレットが適切であった。Gabor ウェーブレット変換を用いて超音波エコー波形を解析した結果、エコーの周波数特性において、ピーク周波数より高周波成分で音速の低下と損傷量との対応が得られた。超音波エコーの周波数解析から、2つの底面エコーB1 および B2 のそれぞれのピーク周波数 f_p に対してその差分 Δf_p を取ることにより、損傷量に対応したパラメータとして評価できた。損傷量に対して、微小硬さと超音波音速特性はよい相関関係が得られ、計測方法の相互利用が可能である。

本研究より、超音波エコーの波形解析方法として、ウェーブレット解析が有効であり、その方法を用いてき裂発生以前の損傷状態を検出できる見通しが得られた。

*) 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部 機器・構造安全工学 Gr

**) 常陽産業株式会社

Damage evaluation of vessel model under thermal transient loading
— Detection of damage by wavelet analysis for ultrasonic waveform —

Hirotsugu Kawasaki *, Hitoshi Sugaya **

ABSTRACT

The damage evaluation for the vessel model on the cyclic thermal transient loading in sodium were performed by the ultrasonic detection method. The wavelet analysis that was an analysis method of the waveform was applied to detect the micro damage before a sign of the crack initiation. The time-frequency analysis by the wavelet transform was performed to evaluate the ultrasonic parameter for the micro damage. As the results, the ultrasonic echo was analyzed by some mother wavelet, and Gabor wavelet was reasonable. The analysis of ultrasonic echo by Gabor wavelet showed drop of the sound velocity at higher frequency than the peak frequency because of attenuation in the high frequency component. The difference of the peak frequency Δf_p between B1 and B2 echoes increased with the amount of damage, and Δf_p was available as a parameter for the micro damage detection. The correlation between the sound velocity and the micro hardness for the amount of damage was also found, and each method suggested to available alternately. In this study, it was indicated that an ultrasonic wave characteristic value that can detect damaged state before crack initiation was obtained from the wavelet analysis.

*) Structure Safety Engineering Group, Oarai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute
**) Joyo Industry Co., LTD.

目 次

1. 緒論	1
2. 試験および解析方法	3
2.1 超音波検出試験	3
2.1.1 供試材	3
2.1.2 超音波試験方法	3
2.2 ウェーブレット解析	4
3. 試験結果	7
3.1 基本ウェーブレットによる超音波エコーの比較	7
3.2 損傷に対する一般的な超音波特性	8
3.3 ウェーブレット解析による超音波特性	9
3.3.1 音速特性	9
3.3.2 ピーク周波数特性	10
4. 考 察	12
4.1 ウェーブレット解析から得られる超音波測定性能	12
4.2 板厚方向の相対的な損傷量の比較	13
4.3 音速と微小硬さとの相互関係	14
5. 結 論	16
参考文献	17

図リスト

図 2.1 溶接容器型モデル熱過渡強度試験体

図 2.2 超音波検出システム構成図

図 2.3 超音波の測定位置

図 3.1 損傷材の超音波エコー

図 3.2 超音波エコーに対する基本ウェーブレット変換の比較

図 3.3 超音波パラメータの一般的算出法による結果

図 3.4 ウェーブレット変換による周波数ごとの音速特性

図 3.5 B1 および B2 エコーのピーク周波数の変化

図 4.1 ウェーブレット変換による底面エコーの等高線図

図 4.2 ウェーブレット変換による板厚方向の等高線図

図 4.3 Δf_p に対する音速変化

図 4.4 クリープ疲労損傷の分布

図 4.5 超音波音速と微小硬さとの相互関係

1. 緒論

F B R プラントでは、一つの主要な損傷形態として、クリープ疲労によって構造材料に損傷劣化が生じることが考えられるが、プラントの長寿命化(寿命延伸)を図るためにには、このような損傷に基づいた余寿命を診断する必要がある。このため、損傷状態を検出し、損傷機構を明らかにすることで、寿命予測精度を向上させ、長時間外挿における裕度改善が図れる。このため、損傷状態を検出する基礎的研究として、超音波を用いた非破壊的な手法によりき裂発生以前からの損傷検出性能を調べている。

このようなミクロレベルからの損傷を非破壊的に検出する方法としては、これまで高周波超音波を用いて、材料試験におけるクリープ疲労損傷材の寿命初期から破損までの損傷進行に対応する信号変化を調べており、損傷進行に対応する信号変化が得られているが¹⁾、き裂発生以前の損傷程度を評価しようとした場合、音速や周波数等のパラメータは、損傷に対応した変化が微少である。そこで、き裂が発生する前兆現象を捉えるため、超音波エコーの波形解析方法により損傷に対応した変化量を抽出できるかどうか検討した。ここで検討する波形解析方法としては、周波数特性変化を詳細に捉えることを試みる。超音波エコーに含まれる情報は、種々の周波数成分に対する平均的な値となる。エコー波形から得られる損傷情報を損傷因子や発生時刻までより詳細に引き出すには、フーリエ変換の周波数情報に加えて、時間軸に対する情報を周波数成分ごとに調べることは有効と考えられる。この時間－周波数解析の方法には、近年注目されているウェーブレット変換がある。

ウェーブレット解析は、医学、工学等の分野で近年著しくその適用範囲を広めており、例えば、疲労信号の検出への適用²⁾、異常信号検出への適用^{3), 4)}、信号の再構成への適用⁵⁾がある。非破壊検出評価の分野でもウェーブレットの適用性が試みられている^{6), 7)}。ウェーブレット変換は、超音波エコー波形の時間－周波数解析を行い、エコーを周波数ごとに調べることができるため、非破壊検出性能の精度や信頼性が向上する。井上ら⁸⁾によれば、SUS316鋼材の材料試験におけるクリープ疲労損傷の非破壊検出への適用を試み、損傷部分の音速や減衰特性の変化を調べた報告はあるが、繰り返しを700サイクル受けた損傷材であるため、寿命末

期の損傷状態の検出とみることができる。しかし、熱過渡の繰り返しを受けた（クリープ疲労損傷）構造物に対して、寿命初期に相当する、あるいは損傷の程度が小さい時期に対応するような、いわゆるき裂発生以前の損傷状態を超音波法で捉えようとした場合においても、ウェーブレット解析を用いることによって、信号処理の面から損傷に対応するパラメータを抽出できる可能性がある。

そこで本研究では、ナトリウム中で熱過渡の繰り返しによるクリープ疲労負荷を受けた構造物に対してき裂発生以前の損傷検出性能を調べるために、構造物板厚方向の損傷分布に対して超音波検出を行い、超音波検出信号の基礎的解析方法としてウェーブレット解析の損傷検出への適用性を検討した。

2. 試験および解析方法

2.1 超音波検出試験

2.1.1 供試材

本研究に用いた構造物の試験体は、構造物強度確性試験装置(TTS)と呼ばれる熱過渡を与える試験装置により、高温と低温の液体金属ナトリウムを繰り返し流動させて、クリープ疲労による損傷を与えたものである⁹⁾。図2.1に示すように、外側容器の内部に内側容器を有しており、ナトリウムは、外側容器と内側容器との間を上部から流入し、下部から流出し、常に流動しており、また、内側容器の中も上部からわずかなナトリウムの流入によりナトリウムで満たされ、滞留ナトリウムの状態となっている。熱過渡負荷の方法は、600°Cのナトリウムを試験体の上部ノズルから与えた後、250°Cのナトリウムを与え(コールドショック)、250°Cで60分保持した後、再び600°Cのナトリウムを与え(ホットショック)、120分保持することで1サイクルの熱過渡が終了する。試験体には、このような熱過渡負荷を1055サイクル繰り返し与えてある。よって、熱過渡は流動ナトリウムの接液面である外側容器の内面と中子の外表面から与えられるが、中子の内側も緩やかではあるが滞留ナトリウムの温度変化による熱過渡が考えられる。

本研究に用いた試料は、熱過渡による損傷を受けた内側容器胴のSUS304母材部から採取し、測定面は容器の外表面から内表面にかけての板厚方向20mmの縦断面とし、採取した試料厚さは5mmである。

2.1.2 超音波試験方法

超音波検出システムの構成図を図2.2に示す。信号の流れは、レシーバーからパルス波がセンサーに打ち出され、その波は試料底面で跳ね返り再びセンサーに拾われ、レシーバを通してデジタルストレージスコープで記録・表示され、同時にパソコンに取り込まれる。超音波センサーには水浸式を用い、水槽はX-Yステージ上に取り付けられているので、センサーは定位置で水槽を水平方向に移動するようになっている。測定周波数は、微小な欠陥ほど高い周波数の方が有利であるが、反面減衰が大きくなりS/N比が悪くなるので

複数の超音波エコーが精度よく得られなくなるため、できるだけ高周波で複数の超音波エコーが明瞭に得られたものとして、15MHzの超音波センサーを用いて測定した。入力波形はパルス波とし、超音波センサーのビーム径はφ3.2mm(実測値)である。測定ピッチは、図2.3に示すように、2.5mmピッチで多少ビーム径をオーバーラップさせるものとし、外表面側から内表面方向に板厚20mmに沿って7点測定した。こうすることで、板厚方向の損傷程度に対する検出性能を見ることができる。

超音波波形をデジタル化する上では、サンプリング速度に時間分割幅を一致させておくことが精度よい。また、信号に含まれる周波数の何倍のサンプリング速度とするかによっても周波数解析精度に影響を与える。倪ら¹⁰⁾によれば、AE信号の解析から、データサンプリング速度は信号周波数の2.5倍以上が望ましいとしている。本試験では、デジタルストレージスコープで超音波エコーが最低2個得られるサンプリング速度から1nsecとしたが、15MHzの超音波センサーを用いているため67倍となり、25倍を十分上回る。このとき得られるデータ点数は1測定点につき4000点である。

超音波検出信号の解析は、従来から行われている音速や減衰特性、パワースペクトル振幅の最大となるところの周波数(ピーク周波数)特性を調べることとするが、超音波エコー波形のウェーブレット解析を用いて、これら音速、減衰特性等をより詳細に調べた。

2.2 ウェーブレット解析

ウェーブレット(wavelet)とは、小さい波、つまり局在する波を表すさまざまな関数の総称である。ウェーブレット変換は、信号f(x)の時間周波数解析を行う方法の一つである。関数をf(x)とすると、ウェーブレット変換は次式で定義される¹¹⁾。

$$(W_\psi f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \overline{\psi(\frac{x-b}{a})} f(x) dx \quad (1)$$

ここで、ψ(x)は基本ウェーブレットであり、ψ(x)はψ(x)の複素共役とする。

x が時間を表す場合、パラメータ b は時間、スケールパラメータ a は $1/a$ が周波数に対応する。ウェーブレット変換($W_{\psi} f$)(a, b)の値を、 b を横軸、 $1/a$ を縦軸とした信号平面にプロットすることで、各時間と周波数の情報を同時に表わせる。

ウェーブレット変換には、連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換に大別され、連続ウェーブレットでは、アドミッシブル条件¹¹⁾を満たす関数であれば、どんな関数でも扱うことができる。しかし、扱うデータにより時間周波数解析に適切な基本ウェーブレット関数を選ぶことは重要である。基本ウェーブレット関数は、これまでにいくつか提案されているものがあるため、ここでは代表的なものとして倪ら¹⁰⁾もAE信号の解析で検討した以下の基本ウェーブレット関数を選び、超音波検出信号処理に適切なものを比較検討する。

(1) Gabor ウェーブレット

Gabor ウェーブレットは、窓関数としてガウス関数を使って短時間フーリエ変換を行うことに基づいて考えられたもので、次式で定義される。

$$\psi(x) = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_0 x}{\gamma}\right)^2\right] \exp(i\omega_0 x) \quad (2)$$

ここで、 ω_0/a の値が角周波数と一致するように $\omega_0=2\pi$ とする。しかしこれはアドミッシブル条件を満足しないため、、

$$\gamma = \pi \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} \quad (3)$$

と置くことで、近似的にアドミッシブル条件を満足する。Gabor ウェーブレットは、連続ウェーブレット変換に用いて信号の周波数を探り出すのに適している。

(2) メキシカン・ハット

メキシカン・ハットは、ガウス関数の2階導関数を用いて、次式で表される。

$$\psi(x) = -\frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2} e^{x^2} = (1-2x^2)e^{x^2} \quad (4)$$

メキシカン・ハットは、Gaborウェーブレットに似ているが、偶関数である。

(3) フレンチ・ハット

フレンチ・ハットは、メキシカン・ハットの滑らかさを犠牲にして、全体的な形を区別的に近似した関数で、次式で定義される。

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & -1 \leq x \leq 1 \\ -\frac{1}{2}, & -3 \leq x < -1 \text{, または } 1 \leq x \leq 3 \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \quad (5)$$

(4) Shannonウェーブレット

関数 $f(x)$ を次式のように置く。

$$\psi(x) = \text{sinc } x = \frac{\sin \pi x}{\pi x} \quad (6)$$

これを基にして次のように定義される。

$$\psi(x) = 2f(2x) - f(x) \quad (7)$$

(5) Harmonicウェーブレット

Harmonicウェーブレットは、次式のように定義される。

$$\psi(x) = \frac{e^{4\pi xi} - e^{2\pi xi}}{2\pi xi} \quad (8)$$

3. 試験結果

3.1 基本ウェーブレットによる超音波エコーの比較

超音波エコーの解析に適した基本ウェーブレットを選択するため、代表的なものいくつかを比較した。メキシカン・ハット、フレンチ・ハット、Shannon ウェーブレット、Harmonic ウェーブレット、Gabor ウェーブレットの基本ウェーブレットを用いて超音波エコーのウェーブレット解析をおこなった。図 3.1は解析に用いた超音波エコーを示し、試料中央部における15MHzセンサーの超音波エコーである。図3.2は上記の各基本ウェーブレット変換による結果を示す。縦軸がウェーブレット振幅値、横軸は時間と周波数を示している。

図3.1から超音波エコー波形は、入射波の後に第1底面エコー、第2底面エコーと複数の超音波エコーが観察される。また、超音波センサーは15MHzのものを用いているため、超音波エコーの周波数特性は15MHz付近をピークとして山形の特性を示す。これらの観点から図3.2の基本ウェーブレットを比較すると、以下のようになる。

- ・メキシカン・ハットは、2つの底面エコーの存在は分かるが、15MHz付近のピークを表わせていない。
- ・フレンチ・ハットは、2つの底面エコー、ピーク周波数とともに表わせていない。
- ・Shannon ウェーブレットは、メキシカン・ハットと同様、ピーク周波数が表わせていない。
- ・Harmonic ウェーブレットは、2つの底面エコー、ピーク周波数とともに認められるが、ピーク周波数が多少低くでている。
- ・Gabor ウェーブレットは、2つの底面エコー、ピーク周波数とともに表わせており、ピーク周波数も15MHz付近にあり、フーリエ変換に見られるような滑らかさがある。

以上の結果から、基本ウェーブレットとしてはGabor ウェーブレットが一番適切であった。倪ら¹⁰⁾は、非破壊検査への適用としていくつかの基本

ウェーブレットによりAE信号の解析を行い、Gaborウェーブレットが最適であったとしている。クリープ疲労損傷材の超音波検出波形についてもGaborウェーブレットは適切な近似であり、以下の超音波波形の解析においてはGaborウェーブレットを基本ウェーブレットとして評価した。

3.2 損傷に対する一般的な超音波特性

超音波特性を示す一般的なパラメータには、音速、減衰、ピーク周波数等の特性がある。これらは、得られた底面エコー波形を基に、例えば音速の算出は、複数得られたエコー間の時間間隔と測定した試料厚みとから音波の伝播速度として算出される。減衰は、複数のエコー間の振幅比から算出される。ピーク周波数は、底面エコーをフーリエ変換してその周波数特性からピークの周波数として算出される。図3.3は、これらの超音波特性値について算出し、板厚方向に対して調べた結果を示す。超音波エコーとしては、第1底面エコーと第2底面エコーを基に算出した。本研究で用いた熱過渡負荷を受ける容器型構造物の損傷は、構造物表面が最も損傷が大きく、板厚内部では除々に小さくなり、容器の外側表面では深さ1mm以下のき裂が多数存在することが確認されている¹²⁾。したがって、損傷量に対応した超音波特性の変化としては、例えば音速変化としては表面近傍に近づくほど低下が予測される。しかしながら、従来の一般的な算出法である底面エコー波形間隔から計算される音速結果からは、板厚中央部付近の音速が若干大きいものが見られるが、損傷に対応した有意な音速の変化は認められなかった。減衰特性についても同様、板厚方向に対する変化はほとんど認められない。ピーク周波数特性に関しては、板厚中央部と表面に近い所ではその変化量は小さい。

超音波の計測位置としては、表面に一番近い所で2.5mmの位置である。超音波ビームのスポット径 $\phi 3.2\text{mm}$ を考慮しても、き裂深さは最大0.56mmであったことから、表面から2.5mmの位置においてき裂は計測領域に入っていない。したがって、今回の計測範囲では、粒界析出物の発生や弾塑性ひずみ変化等の材質変化が損傷量として反映されると考えられるが、従来の超音波パラメータの算出法では、そのような変化に対しての検出性能は低く、相違が認めにくいことがわかる。

3.3 ウエーブレット解析による超音波特性

3.3.1 音速特性

底面エコー波形のウェーブレット解析により、時間-周波数平面上で、底面エコーのウェーブレット値が最大となる所の時間間隔から任意の周波数における音速を算出してみると、図3.4に示すように、B1エコー波形のピーク周波数付近である17MHzでの音速は、やはり板厚方向に対して変化は認められない。しかし、17MHzより高周波側になると相違が見られ、例えば30MHzでの音速は、内外表面に近づくと中央部に比べて低下する傾向がある。つまり、構造物表面に近づくほど損傷が大きいことに対応して、音速の低下が現れ、ピーク周波数より高周波側の周波数成分で顕著に低下し、例えば30MHzの周波数成分で算出された音速に明瞭な低下が認められた。

超音波エコーの周波数特性において、損傷によりその波の高周波成分の低下が大きいことは、クリープ損傷に関する研究でも報告されている¹³⁾。また、超音波の伝播特性に及ぼす金属組織因子としては、析出物、転位密度、結晶粒径、塑性変形等が音速や減衰に影響を及ぼすといわれている¹⁴⁾。空孔も音速や減衰に影響を及ぼすが^{15)、16)}、本構造物の組織観察からキャビティのような空孔は認められていない。本構造物は、熱過渡を受けたことによるひずみの繰り返しが生じ、クリープによる熱的組織変化に加えて弾塑性変形に伴う塑性ひずみの硬化が起り、その結果ヤング率の低下が生じたことによって超音波エコーを散乱させると考えられる。このことは、得られた計測値がき裂化した領域の測定値でないことから密度変化は無視できるものとすれば、塑性変形によるヤング率の低下が音速低下の一因と考えられるが、これまでのクリープ疲労損傷材の組織観察や超音波計測結果¹⁾から、き裂発生以前では析出物等による音波の散乱も考えられることによる。本結果から音波の散乱に影響を与えた因子を明確に特定することはできないが、超音波はある有限の領域における総合的な情報を探っているため、複数の因子の総合的な影響が反映されていると考えられる。高周波は障害物等で散乱し減衰し易いため、エコーの高周波成分のパワーが低下してしまい、それに伴って高周波数域では音波の遅れも生じると考えら

れる。底面エコー波形はいろいろな周波数成分を含んでいて、高周波成分の低下だけを捉え難いため、一般的な波形間から算出される音速ではこの影響が見えにくくなっていると考えられる。このため、ウェーブレット解析による時間－周波数面での詳細な算出により、減衰の大きい周波数成分での音速変化から損傷量を評価できることがわかる。

3.3.2 ピーク周波数特性

図3.5は、第1底面エコーB1と第2底面エコーB2のピーク周波数をそれぞれ求め、板厚方向に対する変化を調べたものである。一般に、底面エコーには欠陥による情報が反映されていると考えられるが、第1番目、第2番目と進むにつれ底面エコーは小さくなり、それに伴って高周波成分の減衰が著しいため、欠陥情報を反映した周波数特性の変化は認めにくくなると考えられる。図からも分かるように、板厚方向に対するB1エコーのピーク周波数変化に比べ、B2エコーのピーク周波数変化の方がフラットで変化が小さい。B1エコーのピーク周波数変化は、板厚中央付近は若干小さく、損傷量に対応した変化量がわずかではあるが認められる。そこで、この変化量を明らかにするため、B1エコーとB2エコーのピーク周波数の相違に着目して、両者の差分 Δf_p (=B1エコーのピーク周波数-B2エコーのピーク周波数) を調べた結果、多少ばらつきはあるものの、内外表面に近づくと中央部に比べて Δf_p は大きくなる傾向を示す。最小2乗法による2次式の近似曲線を引けば、その傾向は明らかである。これは、損傷の大きい方が、高周波成分の減衰が大きいことを反映しており、ピーク周波数の差分 Δf_p によりその相違が明確になったといえる。

B1エコーとB2エコーの周波数平面における評価は、例えば両者のスペクトル波形に対する面積重心点間の移動量（面積重心点における周波数の差）を調べることにより、焼結材の空孔密度に増加するパラメータ量として評価した結果がある¹⁷⁾。基本的には、損傷材が損傷量に応じて高周波成分で減衰することを利用したものであり、本手法のピーク周波数変化も考え方は同じであるが、ピーク周波数の算定は比較的簡便である。本構造物は、前述したようにクリープによる熱的組織変化に加えて弾塑性変形に伴う塑性ひずみの硬化が起こり、その結果ヤング率の低下が生じたことによって、高周波成分の低下と音波の遅

れを生じさせるが、ピーク周波数の変化ももたらしている。しかし、ピーク周波数の音波の到達時間遅れまでは影響を及ぼしていない。本試験では、15MHzの超音波センサーを用いたが、30MHzで音速低下が顕著なことから、さらに高周波のセンサーを用いればより明確なピーク周波数特性変化が期待できるものと思われる。本結果より、ピーク周波数の変化は、熱過渡の繰り返し（クリープ疲労）によるき裂発生以前の組織変化状態に対しても評価できるパラメータである。

4. 考 察

4.1 ウエーブレット解析から得られる超音波測定性能

ウェーブレット解析により得られる3次元データは、時間と周波数とウェーブレット振幅である。時間一周波数の2次元平面で観察すれば、ウェーブレット振幅は等高線図として描かれる。図4.1は、外表面からの測定位置が2.5mmと10mmの位置における超音波エコーのウェーブレット解析における時間一周波数平面上での等高線分布を示している。定性的には、周波数分布は時間軸に対して低周波側で波の到達がやや早く、高周波側でやや遅くなっている。したがって、周波数成分により波の到達時間が若干異なることを示している。時間軸の情報の追加により、フーリエスペクトルのような周波数平面では観察できない情報が得られている。前述したような音速やピーク周波数の変化量は、測定位置によるこのような分布を定量的に示したものである。測定はパルス波を用いているが、時間軸方向へ $0.5\mu\text{sec}$ 程度の拡がりがあるため、音速測定の精度を向上するには、センサーやパルス発生条件を適正化する必要がある。また、周波数軸方向の拡がりを改善するには、例えばバースト波を用いて測定周波数を单一化することも有効と考える。しかしながら、本試験のように通常用いられるパルス波でも、ウェーブレット解析により損傷程度の相違が認められる時間一周波数情報が得られることがわかった。

図4.2は、板厚方向に計測して得られた第1底面エコーと第2底面エコーそれぞれの超音波波形をウェーブレット変換し、時間一周波数平面上に変換してウェーブレット振幅の等高線分布として示したものである。音速やピーク周波数特性で観察された変化に対応するように、板厚中央付近でやや小さく、表面に近い所で大きく、外表面からの深さで4mmと15mm付近に2つのピークの中心があり、4mm位置の方がややピーク範囲が大きいこと、2つのエコー間でピーク周波数の低下があることがわかる。この2つのピークが発生している位置は、音速やピーク周波数において、板厚中央部に比べて増減変化が大きかった2.5mmや17.5mmの位置と比べると、数ミリのズレがあるが、超音波のスポット径3.2mmの視野範囲を考慮すれば、ほぼ対応しているとみることもできる。ピークの位置ズレの要因としては、スポット径が大きいこと、測定間隔が

2.5mmピッチでは粗かったことが考えられる。材質変化の観点からは、定性的には、ピークの現れた付近ではひずみ範囲が大きくなる所で、クリープによる熱的組織変化に加えて弾塑性変形に伴う塑性ひずみの繰り返し硬化も大きくなるため、このような材質変化が顕著に反映されてくる領域と考えられる。しかし、これが等高線(ウェーブレット振幅)の上昇となって現れてくることに関しては、音波の減衰が起りにくくということになる。音速は低下しているため、音波の時間遅れを伴うが基本周波数成分のパワーは大きくなることであり、この因果関係は今後検討の余地がある。

4.2 板厚方向の相対的な損傷量の比較

板厚方向の損傷を相対的に比較し、超音波パラメータの検出精度を考察してみる。B1エコーとB2エコーのピーク周波数差 Δf_p は、損傷量に対応する一つのパラメータとなり得ることから、音速と Δf_p との関係を調べた結果を図4.3に示す。板厚表面に近づくほど Δf_p の増加に伴って音速は低下する負の相関関係が明瞭にわかる。ここで、外表面でき裂の発生が見られたことから、内表面に比べて外表面の損傷は大きいことが予想され、音速の低下も大きいと考えられる。しかしながら、外表面から2.5 mmと17.5 mmの位置におけるこれら2点の Δf_p や音速はほぼ変わらない値であった。3.2項で述べたように、どちらの測定位置もき裂はビーム径に入っておらず、き裂の影響はない。したがって、本測定点は、き裂発生以前の金属組織変化のみが生じるような材質変化に対して計測されたものであり、2.5 mmや17.5 mmの位置よりも内側領域の測定値は、これらの値より音速と Δf_p の関係が大きく、相違は明らかであることから、板厚方向に対する相違は検出されている。しかしながら、板厚中央を境にしてその両側対象位置における測定点同士を比べた場合の損傷による相違は、元々小さいと推測できる。

そこで、これら対象位置における損傷程度を試算した結果¹²⁾によれば、図4.4に示すような分布となる。図は、FEM解析により板厚方向の応力ひずみ解析を行い、線形損傷則に基づくクリープ疲労評価法により損傷値を算出した結果である。計算されるひずみ分布は、構造物表面に近づくほど大きくなり、クリープ疲労損傷値もそれに伴って板厚表面ほど大きく、特に外表面側の方が

大きい。例えば、外表面から2.5 mmと17.5 mmの位置における計算されたひずみ範囲は0.45%程度、損傷値は0.5~0.55程度であり、その相違は小さい。この程度の損傷の差異に関しては、本試験からその相違を抽出することはできなかつたが、表面付近から板厚中央部までの損傷程度に関しては相対的な変化量として抽出できている。

音速もピーク周波数変化も共に超音波特性を表す代表的なパラメータであるが、それらのパラメータの算定方法によってはミクロな組織変化の損傷評価も可能である。すなわち、両者の関係は損傷量に対して共に低下し、一般に評価されているき裂や空孔タイプの欠陥ばかりでなく、どちらもき裂発生以前の損傷による材質変化の程度を相対的に表せる見通しが得られた。

4.3 音速と微小硬さとの相互関係

本構造物に対して、圧子押し込み試験による微小硬さを測定した結果¹²⁾によれば、板厚方向に対してその微小硬さ特性は表面近傍で硬化する傾向を示している。そこで、微小硬さと超音波音速との比較を行った結果を図4.5に示す。微小硬さは、き裂発生部分を除く2mm~18mmの測定範囲で結晶粒内(マトリックス)の測定データである。また図には、それぞれのデータに対して最小2乗法による2次式の近似曲線を示してある。微小硬さは、構造物の表面に近づくにつれ大きくなるが、これは塑性ひずみの繰り返し硬化に対応している。SUS304は繰り返し負荷を受けると硬化するいわゆる繰り返し硬化特性を示し、ひずみ範囲が大きいほど硬化は大きい。SUS304のナトリウム中での疲労試験においても繰り返し硬化は観察されている¹³⁾。熱過渡の厳しい表面ほど生ずるひずみは大きく、その結果繰り返し硬化も顕著に現れると考えられる。図から、30MHzでの音速特性と微小硬さ特性とを比較すれば、逆の相関ではあるが、よい相関関係が得られている。微小硬さは局部的な平面での計測に対し、超音波は任意の体積での計測であり、また、微小硬さは塑性的な変化を計測し、超音波は弾性的な変化を計測するため、両者の測定する物理量には相違がある。このため、計測法によっては捉えられる損傷の主因子を明確に把握すべきと考える。しかし、クリープ疲労損傷による強度低下は、図4.4に示したような分布に対応し、微小硬さも音速変化もこのような分布に比較的よい対応関係を示すこと、ひず

み範囲の大きいほどクリープ疲労強度は低下することから、総体的には強度低下も損傷分布に対応しているため、計測する物理量に相違はあるが、共に損傷の進行や大きさによる寿命低下を示す指標となっている。このような関係が得られるということは、例えば超音波法が適用できない部位における損傷計測を、硬さ測定で行うことができるこ意味する。この逆の場合も同様であり、損傷計測方法の選定の拡張性、互換性がある。さらに、硬さと音速の関係があることから、硬さと引張強度特性との関係¹⁹⁾を用いれば、超音波計測から損傷による強度低下の推測も可能であると考えられる。

5. 結 論

熱過渡の繰り返し負荷を受けた構造物の損傷を超音波法により計測する手法の基礎的な検討を実施した。き裂発生以前の損傷状態を検出する方法として、ウェーブレット変換による時間一周波数解析を用い、超音波エコーの周波数特性から超音波パラメータの評価を行い、ウェーブレット解析を用いた超音波波形解析法による損傷検出への適用性を検討した。得られた結果は、以下のようなである。

- (1) 超音波エコーの解析にいくつかの基本ウェーブレット変換を適用した結果、Gaborウェーブレットが適切であった。
 - (2) Gabor ウェーブレット変換を用いて超音波エコー波形を解析した結果、エコーの周波数特性において、ピーク周波数より高周波成分で音速の低下と損傷量との対応が得られ、時間一周波数軸上での解析が有効であった。
 - (3) 超音波エコーの周波数解析により、底面エコーB1 と底面エコーB2 のそれぞれのピーク周波数 f_p に対してその差分 Δf_p を取ることにより、損傷量に対応したパラメータとして有効であった。
 - (4) 微小硬さは、塑性ひずみの繰り返し硬化を示しており、これと音速特性はよい相関関係が得られ、計測方法の相互利用が可能である。
- したがって、得られた超音波エコーの波形解析方法として、ウェーブレット解析が有効であり、その方法を用いてき裂発生以前の損傷状態を検出できる見通しが得られ、超音波法を利用した一つの損傷検出評価法として適用できる。

本研究で用いた超音波法は、基礎的手法を検討するために、試料としては平板の理想的な状態での計測である。実機適用においては、測定面の影響効果、各種の構造形状・部位への適用性、放射性環境での適用性、最適検出システム・条件等検討すべき課題はある。しかし、同型機器の交換時に試料採取できる場合、微小なサンプリングにより計測できる場合、放射性レベルの低い環境での場合、対象部位を特定した場合等、限定された状態での適用においては可能性があること、また、損傷機構解明のための計測法として十分適用できる基礎的手法として提案できる。

参考文献

- 1) 川崎弘嗣 : ミクロ損傷の非破壊検出法の開発－超音波検出システムによるクリープ疲労損傷検出試験－、PNC TN9410 96-288、(1996)
- 2) 曽根彰、山本鎮男、有馬幸蔵、増田新、中岡明 : ウエーブレット変換を用いた機械・構造物のヘルスモニタリングシステム、日本機械学会論文集C編、61卷、586号、pp166-172(1995)
- 3) 笠島永吉、森和男 : 離散ウェーブレット変換によるフライス加工時の工具欠損検知、日本機械学会論文集C編、61卷、583号、pp468-474(1995)
- 4) 曽根彰、山本鎮男、増田新、中岡明、芦野隆一 : 出力のウェーブレット変換と印加入力および物理系の間の正則性、日本機械学会論文集C編、61卷、589号、pp108-114(1995)
- 5) 伊藤忠宏、川上高史、北川孟、堀畠聰 : Wavelet逆変換による非定常信号の再構成、日本機械学会論文集C編、61卷、586号、pp173-178(1995)
- 6) 井上裕嗣 : ウエーブレットの基礎と超音波波形解析への応用、非破壊検査、45卷、12号、pp854-859(1996)
- 7) 井上裕嗣 : ウエーブレットが拓く超音波材料評価の新境地、材料、45卷、12号、pp1353-1354(1996)
- 8) 井上裕嗣、岸本喜久雄、中西智明、堀譲治、荒井正行、渋谷寿一 : エコード波形のウェーブレット解析による超音波の速度と減衰の算定、非破壊検査、46卷、3号、pp206-213(1997)
- 9) M. Kikuchi, H. Umeda : Creep-Fatigue Test on LMFBR Structure with Weldment in Flowing Sodium at Thermal Transient Test Facility, *Abstract Proceedings of the VIII International Congress on Experimental Mechanics*, pp114-115(1996)
- 10) 倪慶清、美佐田泰治 : ウエーブレット変換を用いたAE信号波形の解析、材料、47卷、3号、pp305-311(1998)
- 11) 例えば、榎原進 : ウエーブレットビギナーズガイド、東京電機大学出版局、pp6-7(1995)
- 12) 川崎弘嗣 : 熱過渡負荷を受ける構造物の損傷評価－微小硬さによるミク

- 口き裂の検出ー、JNC TN9400 99-062、(1999)
- 13)中代雅士、米山弘志、芝田三郎、村上晃一、大友 晓、材料学会第37期講演会
前刷集、p277 (1988)
- 14)今中拓一、音波の伝播特性と材料評価、材料試験技術、34-3、pp157-164
(1989)
- 15)CM Sayers, Ultrasonic velocity dispersion in porous materials, J. Phys.
D; Appl. Phys., 14, pp413-420 (1981)
- 16)J.H. Williams, Jr. H. Yuce, S. S. Lee, Ultrasonic Attenuation of a
Void-containing Medium for Very Long Wavelengths, Materials Evaluation,
42, pp219-224 (1984)
- 17)岡崎正和、矢田敏夫、橋本昌光、材料学会第37期講演会前刷集, p274 (1988)
- 18)加藤信一郎、小峰龍司、平野正敦、和田雄作、SUS304鋼の高温流動ナトリウム
中における低サイクル疲労特性、材料、37-414、p330 (1988)
- 19)稻村元則、鈴木敬愛、超微小押込み試験による材料強度評価法、生産研究、42
-4、pp257-260 (1990)

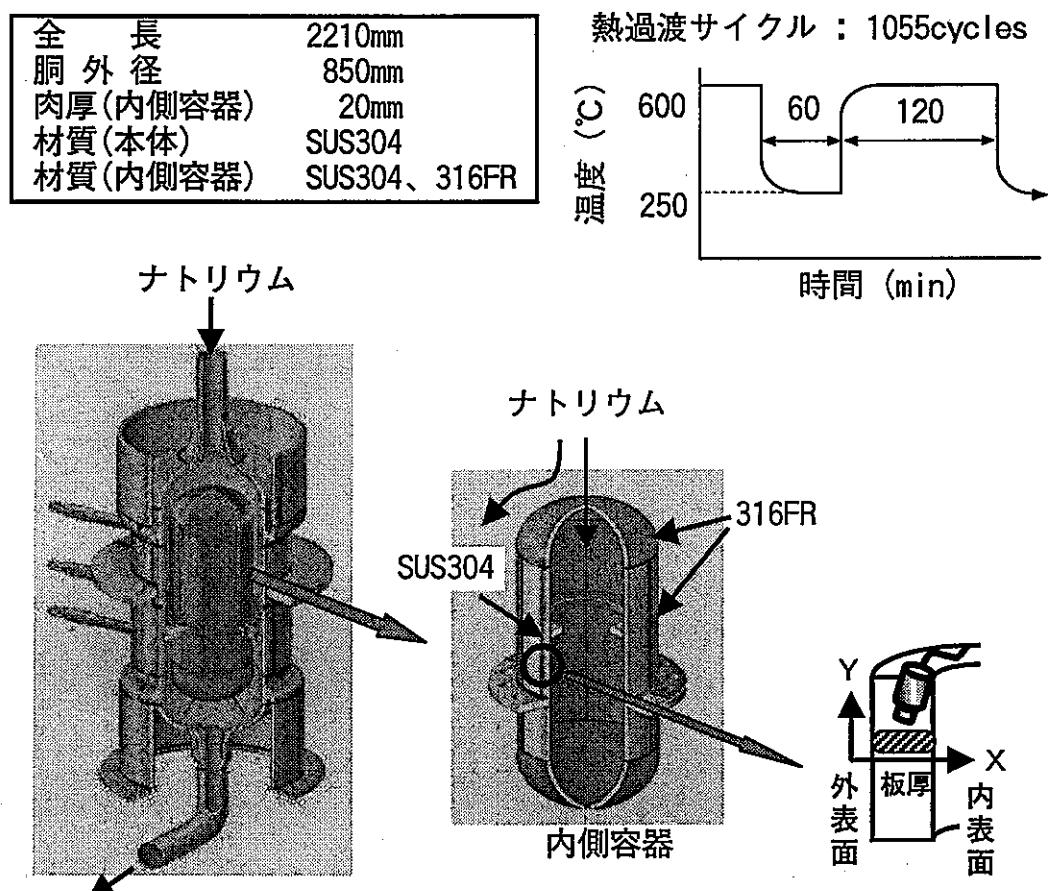


図2.1 溶接容器型モデル熱過渡強度試験体

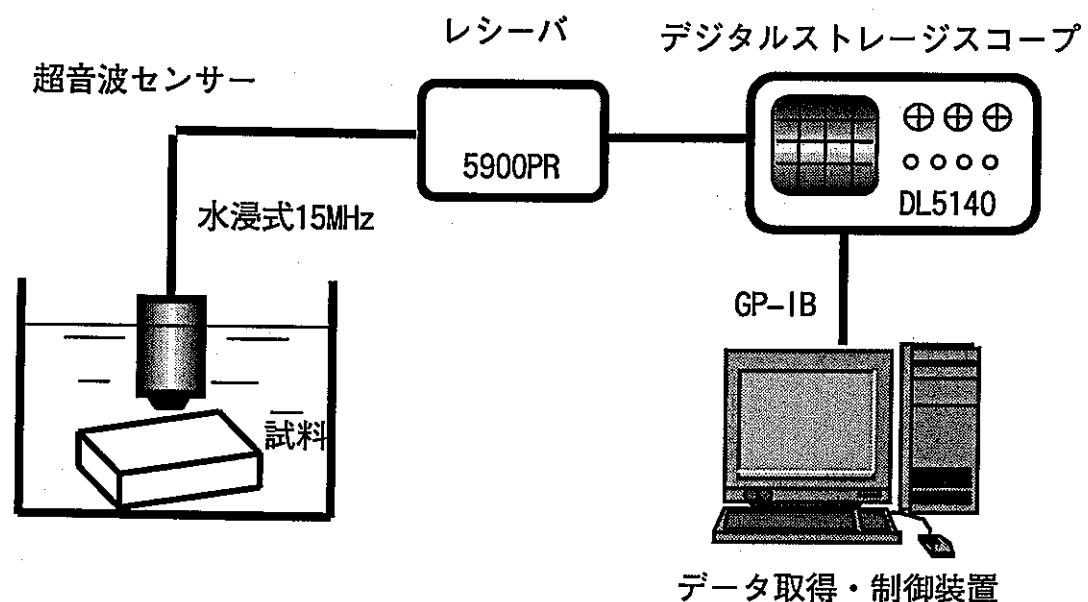


図2.2 超音波検出システム構成図

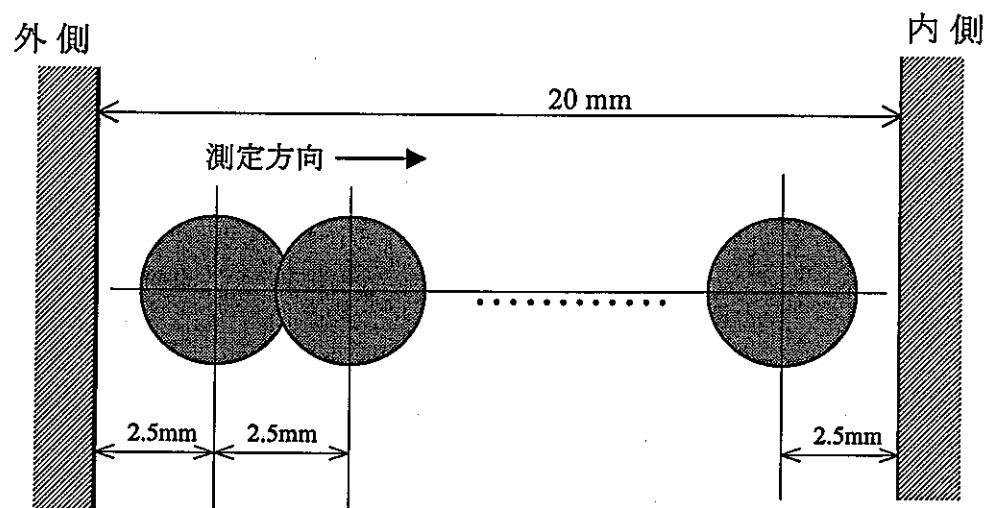


図2.3 超音波の測定位置

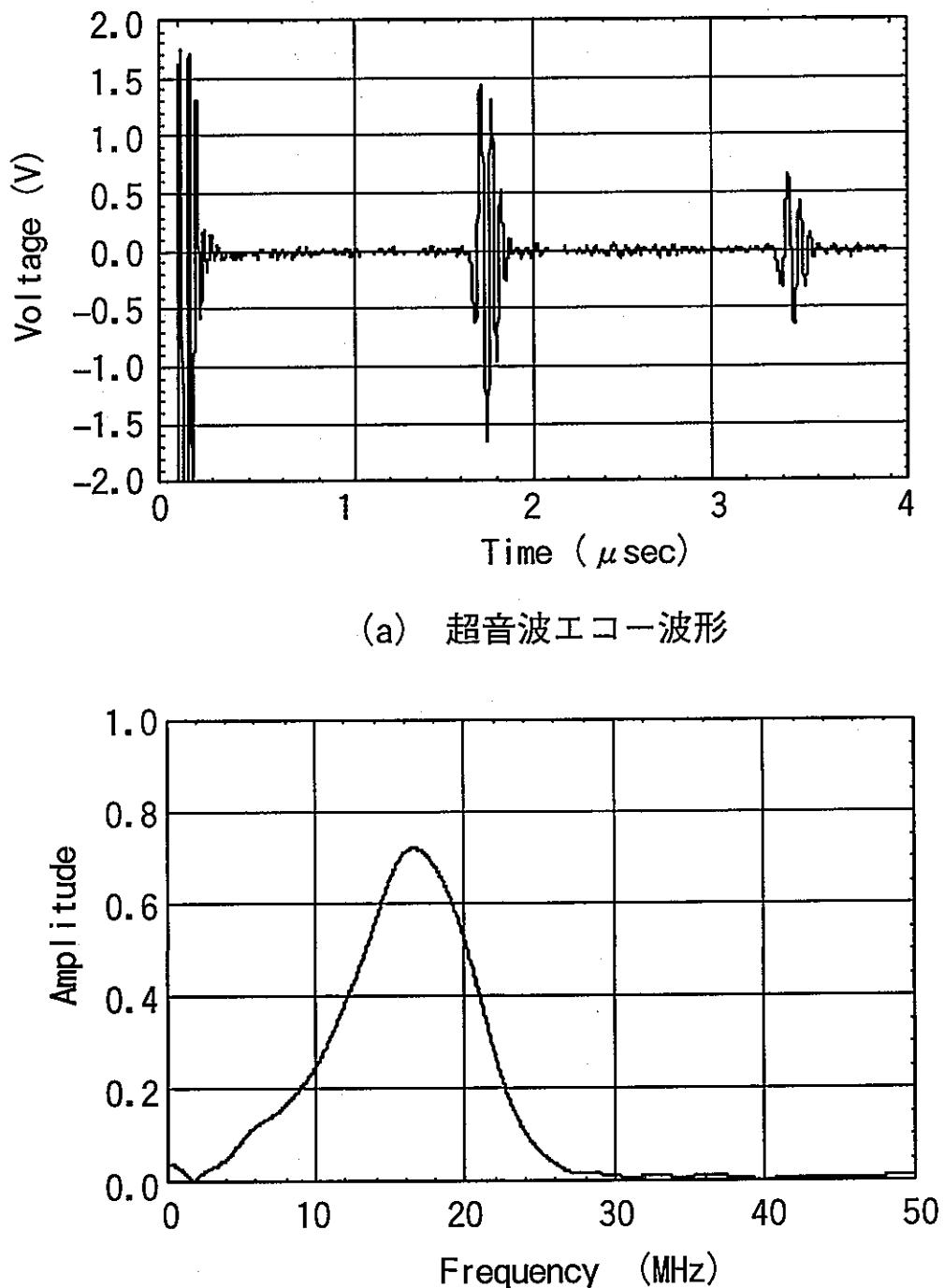
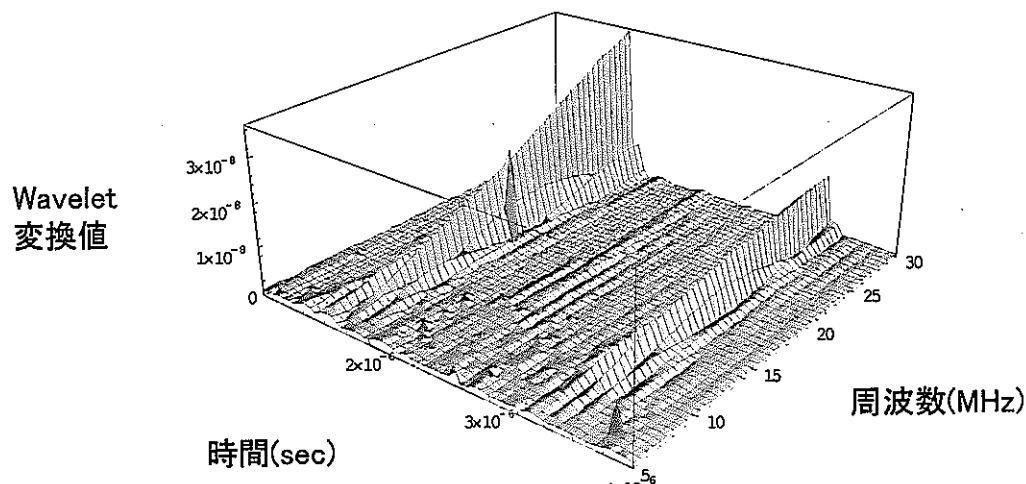
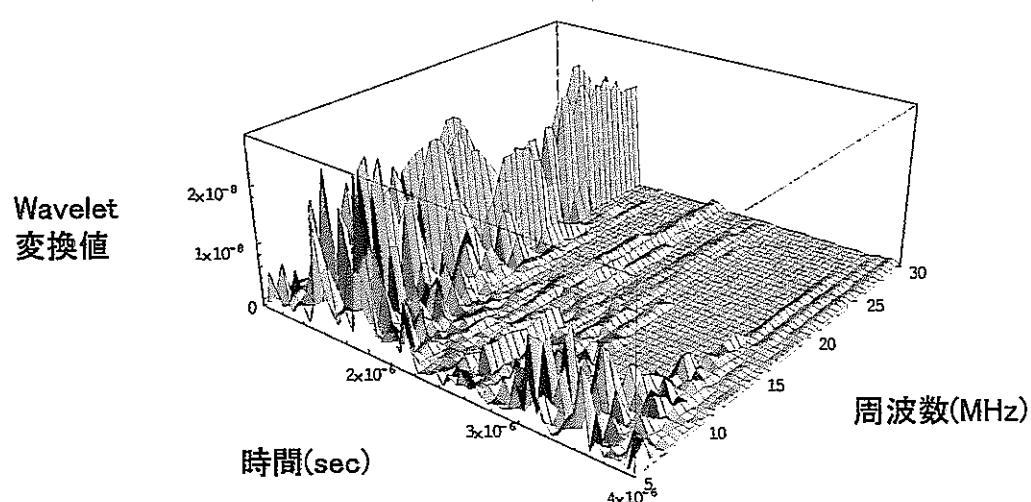


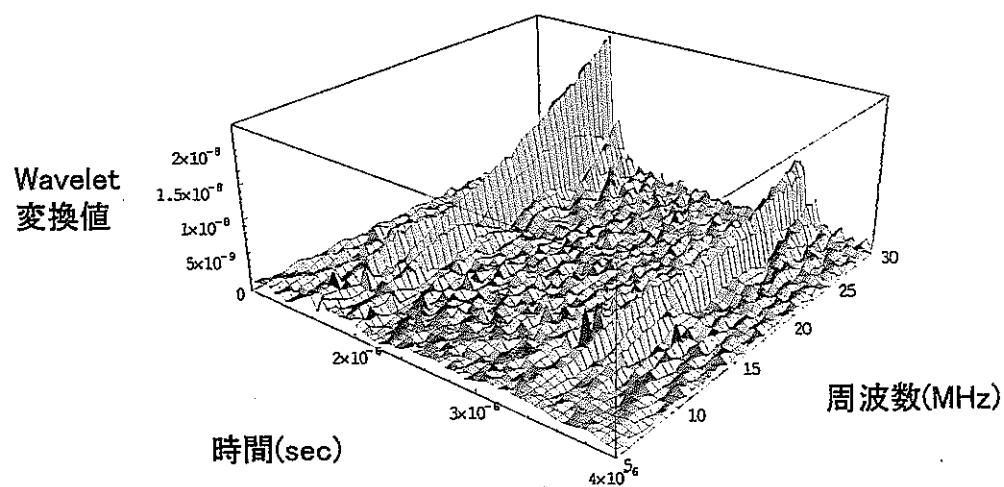
図3.1 損傷材の超音波エコー



(a)メキシカン・ハット

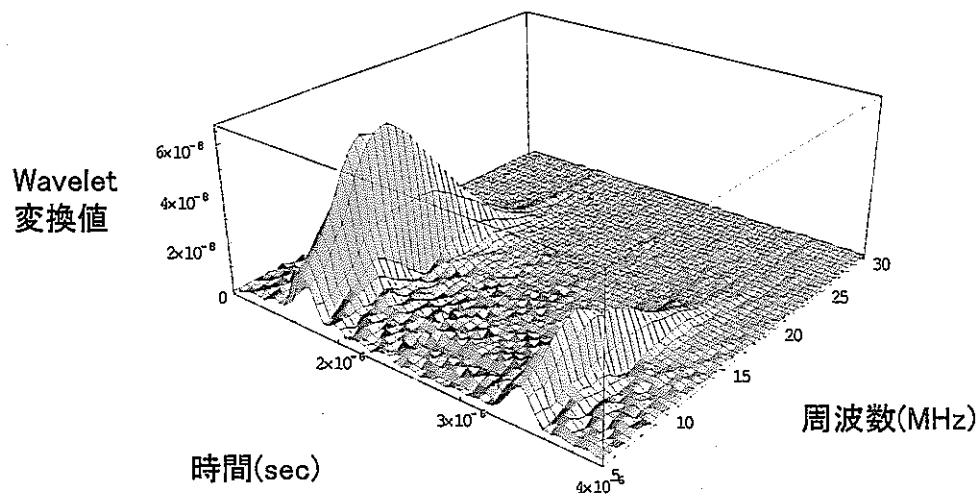


(b)フレンチ・ハット

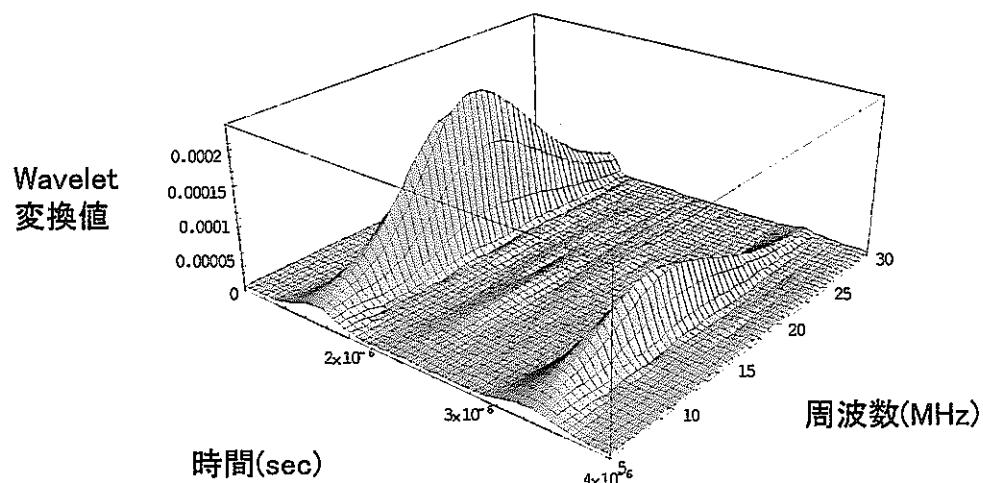


(c)Shannon ウエーブレット

図3.2 超音波エコーに対する基本ウェーブレット変換の比較



(d)Harmonicウェーブレット



(e)Gaborウェーブレット

図3.2 超音波エコーに対する基本ウェーブレット変換の比較(続き)

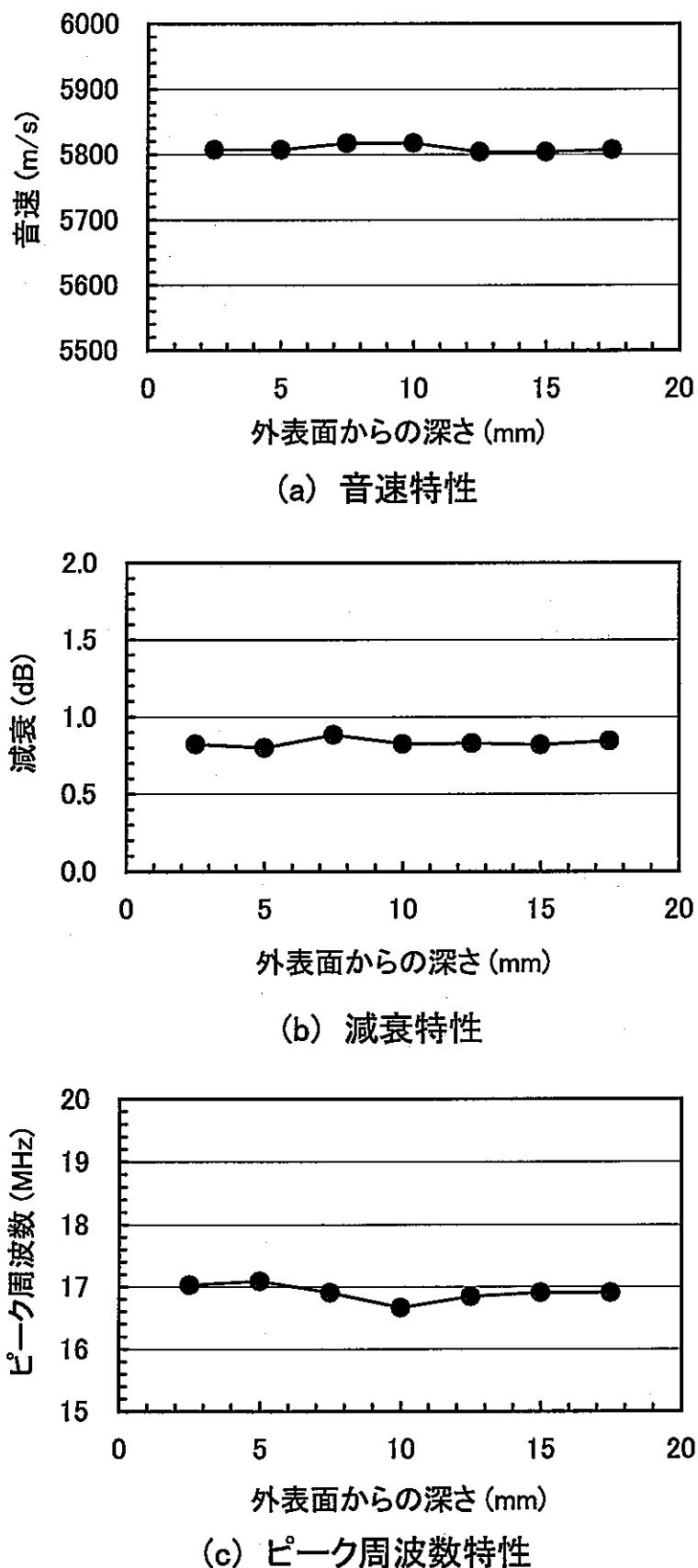


図3.3 超音波パラメータの一般的算出法による結果

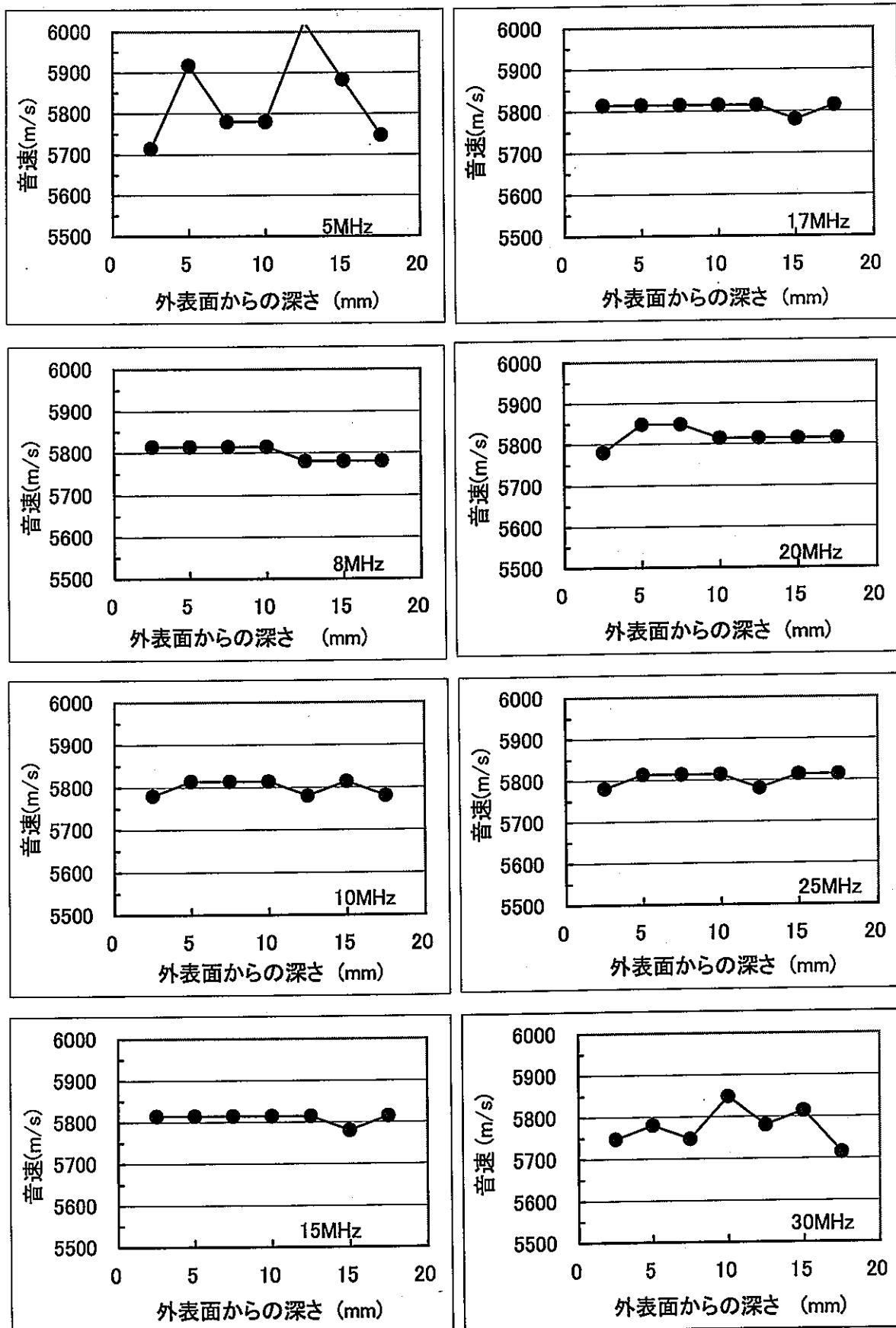


図3.4 ウェーブレット変換による周波数ごとの音速特性

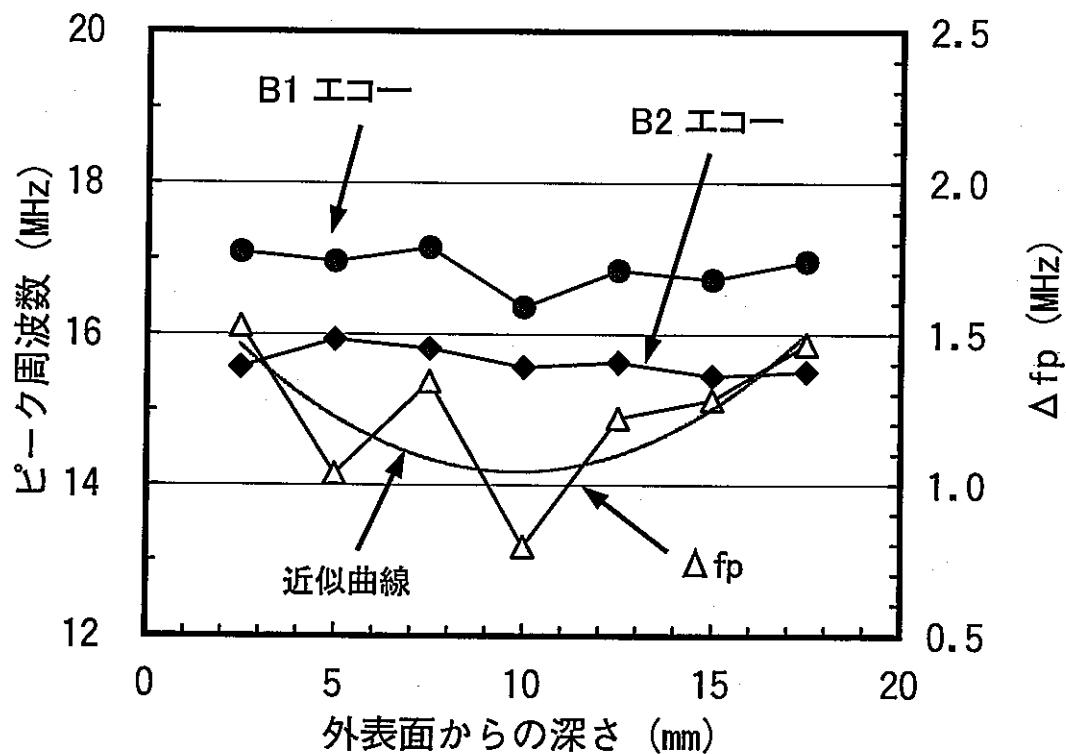


図3.5 B1およびB2エコーのピーク周波数の変化

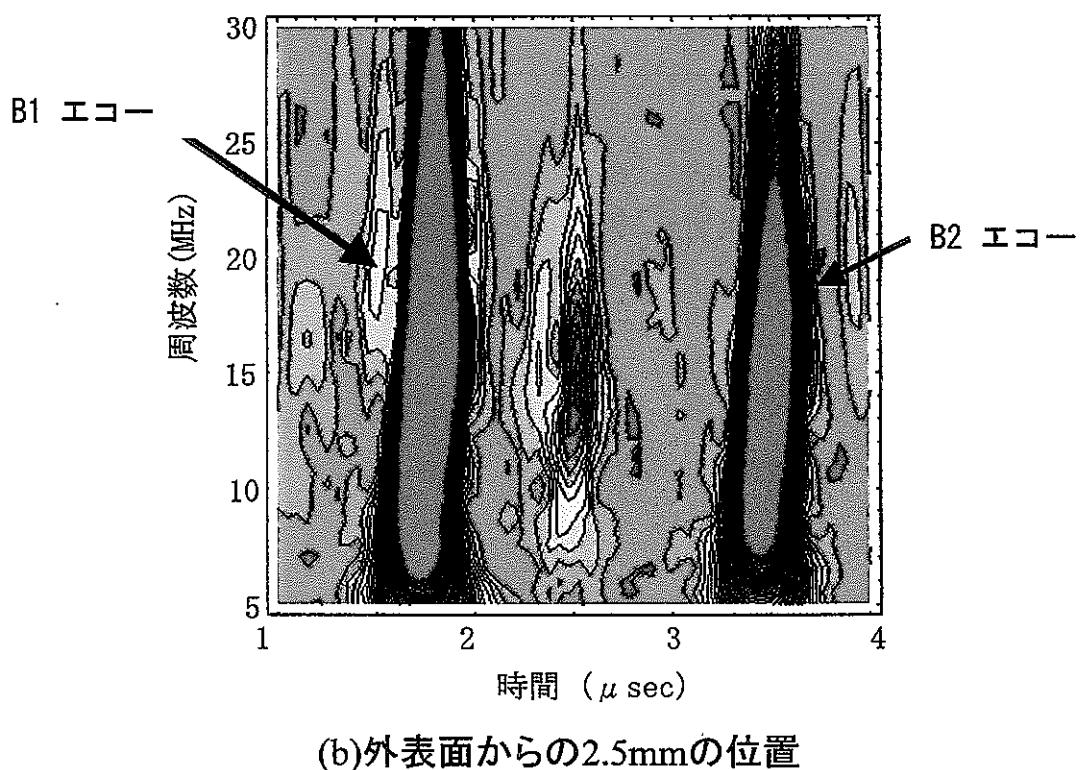
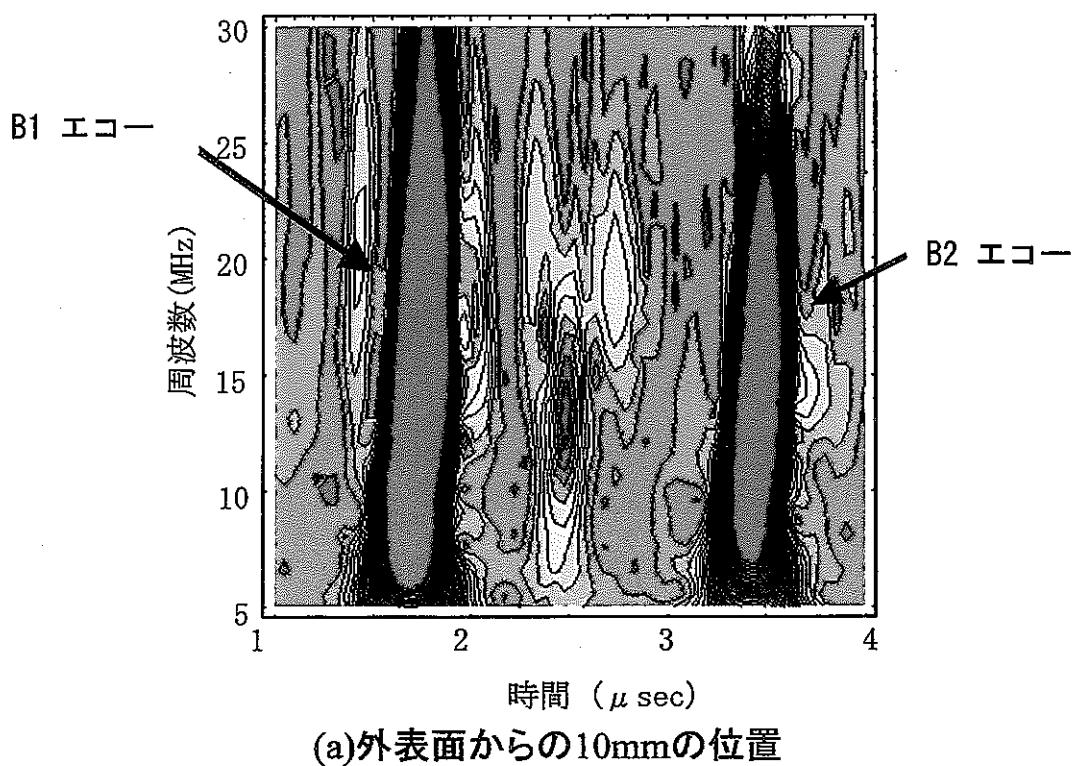
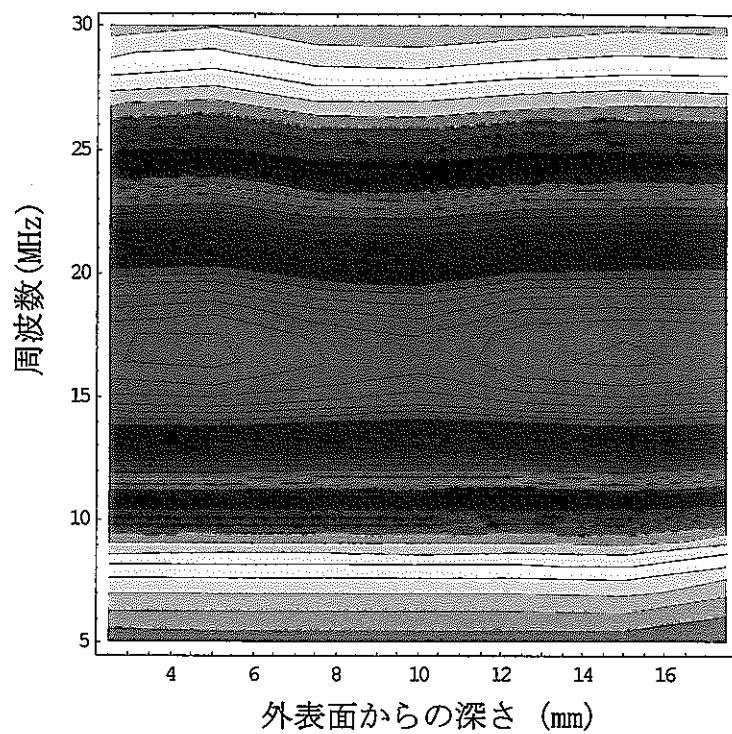
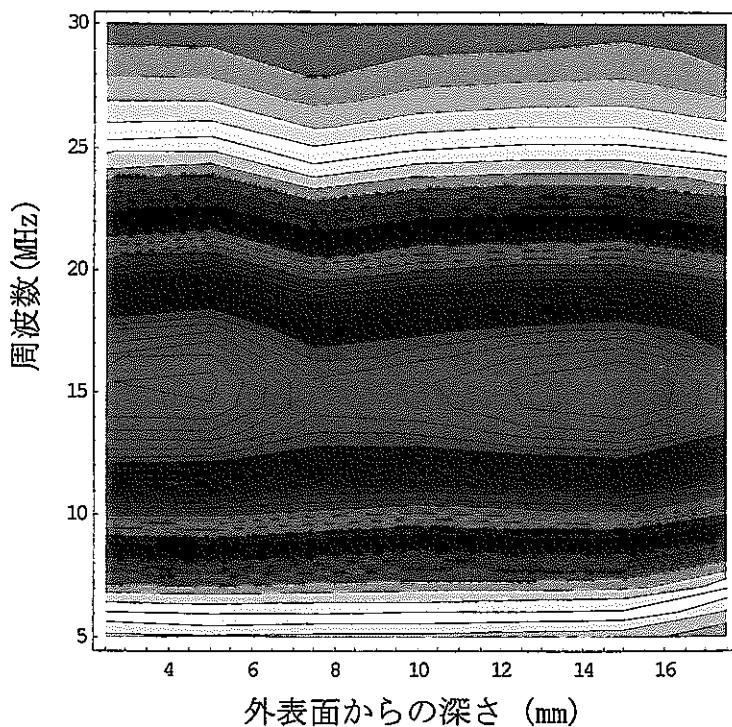


図4.1 ウェーブレット変換による底面エコーの等高線図



(a)第1底面エコーーB1



(b)第2底面エコーーB2

図4.2 ウェーブレット変換による板厚方向の等高線図

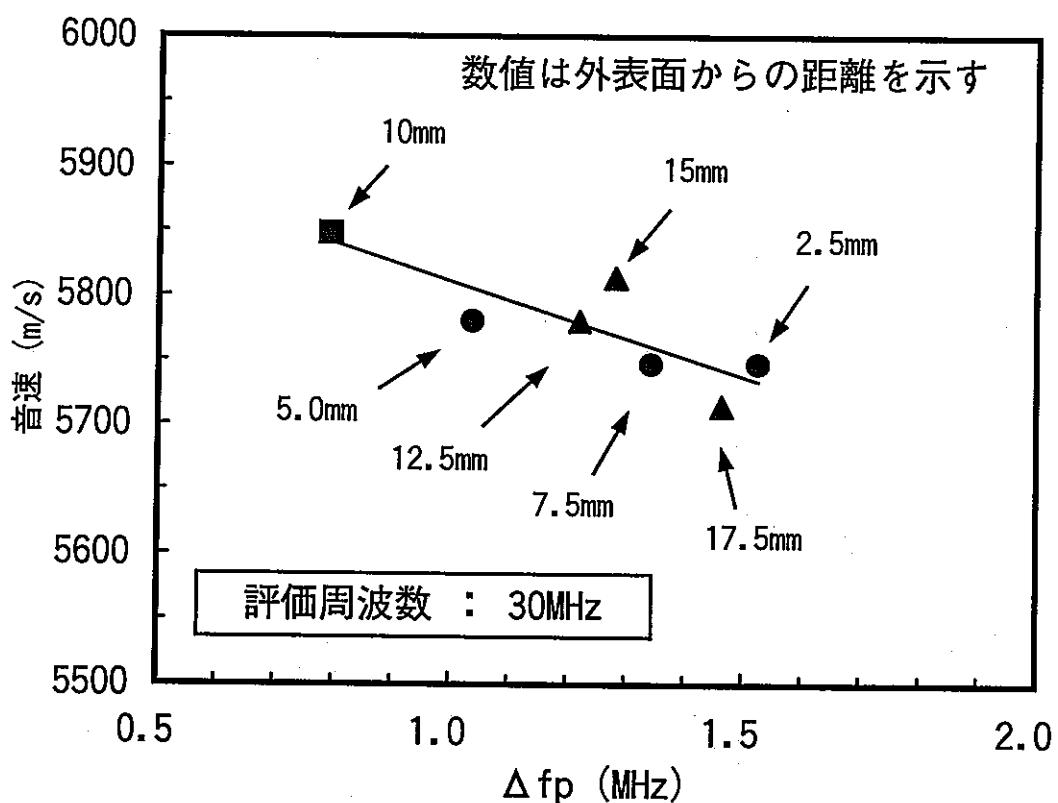


図4.3 Δf_p に対する音速変化

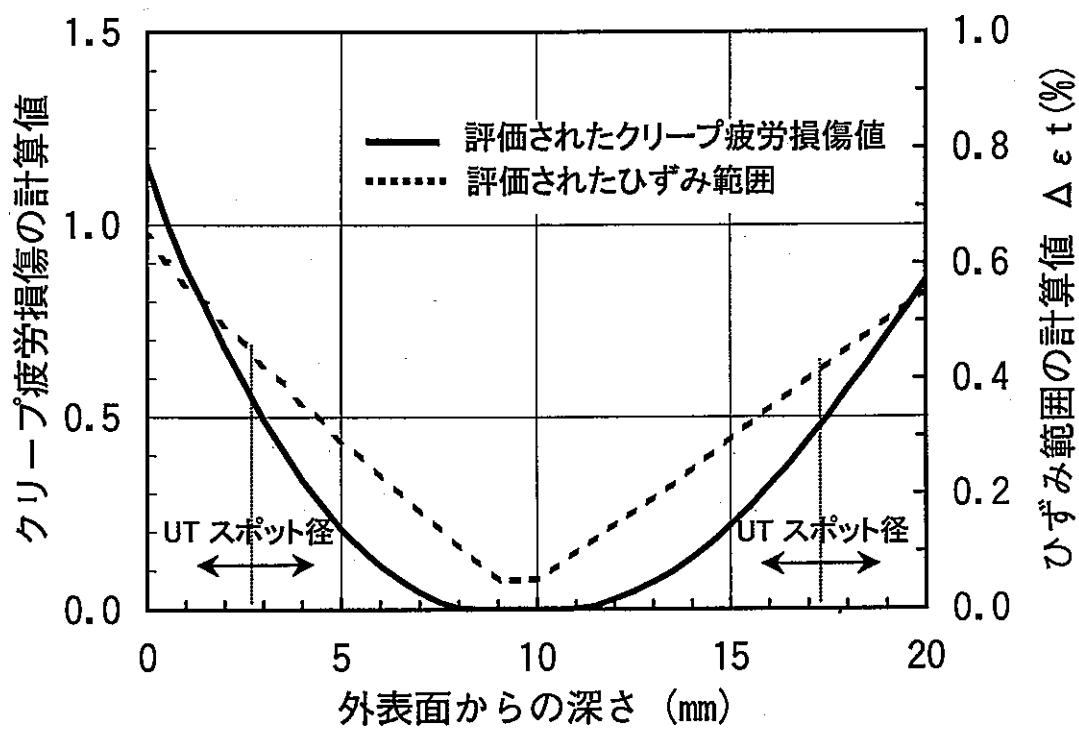


図4.4 クリープ疲労損傷の分布

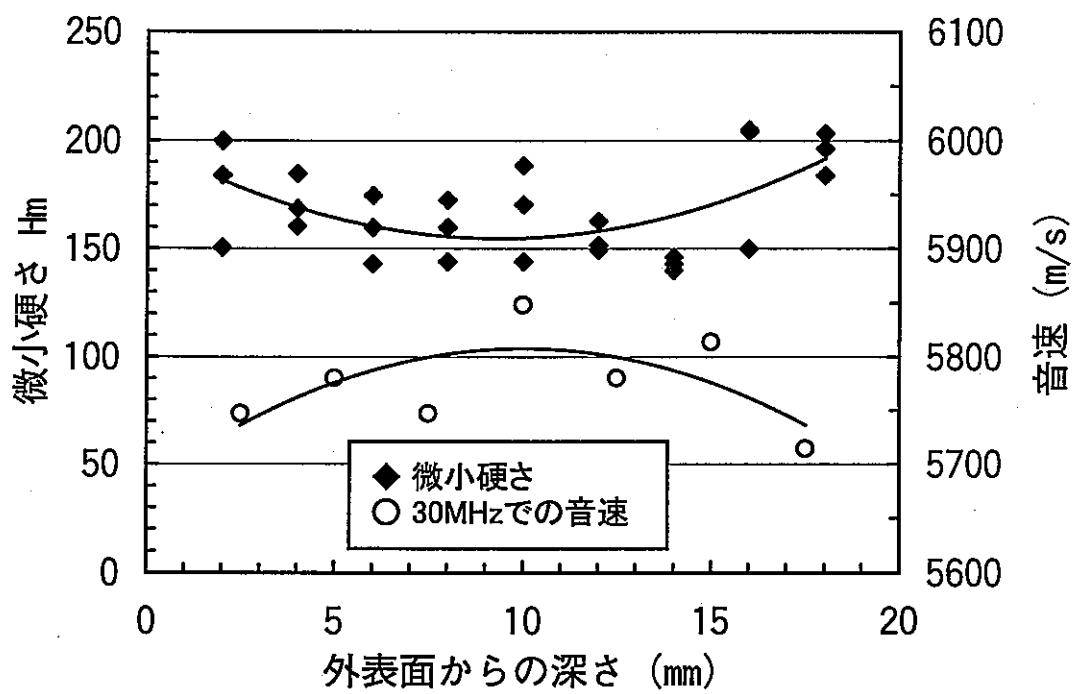


図4.5 超音波音速と微小硬さとの相互関係