

線形及び非線形デジタル超音波計測による構造材料の非破壊特性評価

川 嶋 紘一郎

おもひ領域

(2003年9月5日受理)

Nondestructive Evaluation of Structural Materials with Linear and Nonlinear Digital Ultrasonic Measurements

Koichiro KAWASHIMA

Omohi College

(Received September 5, 2003)

Abstract

This study reviews recent progress in the non-destructive evaluation of structural materials and their damage using linear and non-linear ultrasonics. Rapid advances in digital signal acquisition and processing are fully utilized to extract ultrasonic features of sound velocity, velocity dispersion, attenuation, attenuation spectrum, and the second harmonic amplitude. The combination of these ultrasonic features with theories developed by physical acoustics provides a quantitative evaluation of characteristics and damage of structural materials. In particular, the effectiveness of non-linear ultrasonics is emphasized. The non-linear ultrasonic method using large incident wave amplitude measures dynamic response at minute cracks or voids. Moreover, this method does not depend on propagation distance, different from sound velocity and attenuation. This opens the possibility of a new non-destructive evaluation of initial structural damage such as fatigue, creep, stress corrosion, radiation damage, etc.

Keywords: ultrasonic evaluation, non-destructive testing, non-linear ultrasonics, higher harmonics, material characterization, digital signal processing.

目次	13	6. 5 音弾性応力測定	9
1. 序論	2	6. 6 最適入射波形による受信波形の短パルス化	11
2. 超音波材料評価のための波動伝播の基礎	2	7. 固体の非線形(高調波)超音波計測の基礎	11
3. デジタル超音波計測とアナログ超音波計測の比較	3	7. 1 非線形弾性連続体の音響非線形性	11
4. デジタル超音波計測システム	4	7. 2 微視空隙を含む弾性体の音響非線形性	12
5. 線形デジタル超音波計測の基礎	4	7. 3 引張と圧縮の応答が異なる接合体の音響非線形性	13
5. 1 高精度音速測定	4	8. 非線形超音波計測システム	13
5. 2 速度分散測定(位相スペクトル)	5	9. 非線形(高調波)デジタル超音波計測による材料特性評価	13
5. 3 減衰スペクトル測定	5	9. 1 焼結鉄粉末の識別	13
5. 4 ウェーブレット変換による群速度測定	6	9. 2 液相拡散接合面の評価	14
5. 5 漏洩表面波の速度測定	6	9. 3 漏洩レイリー波による閉じた表面き裂の評価	14
6. 線形デジタル超音波計測による材料特性評価例	7	9. 4 繊維強化金属基複合材料の疲労損傷評価	16
6. 1 複合材料の異方弾性係数同定	7	10. 今後の展望	17
6. 2 コーティング層の特性評価	8	謝辞	17
6. 3 材料表面層の密度及び弾性係数評価	9	参考文献	18
6. 4 レーザー超音波とウェーブレット変換を用いた接合板の剥離検出	9		

1. 序論

昨年夏以降、国内原子力発電所の一次配管系におけるき裂、石油化学プラントの火災、高速道路橋脚・橋梁のき裂、新幹線トンネルのコンクリート落下など、高度成長期に建設された社会基盤構造の経年劣化が顕在化しつつある。人と同様、構造物も使用年数とともに、劣化損傷が進行するので、それらの劣化・損傷度をその場で非破壊的に評価し、必要であれば補修をしなければならない。2003年以降、原子力発電所の圧力機器に対して、損傷許容の設備規格維持基準⁽¹⁾が適用され、き裂欠陥が検出されたとき、無条件で継続運転可、破壊力学に基づく解析による安全確認後一定期間を限って運転可、直ちに補修必要のいずれかを判定することになる。この評価の出発点は、き裂の形状、寸法、主応力方向に対する方位をその場で非破壊的に測定することである。さらに、原子炉圧力容器の耐用年数を60年まで認めると、その放射線損傷、巨視き裂発生以前の材料劣化を非破壊的に評価することが不可欠となる。他方、航空機、自動車駆動部など高信頼性が要求される構造部材・製品の材料特性、健全性をインラインで評価することが求められている。

日本では、1950年以降、鉄鋼・造船・重工業業界が鋼材及び溶接構造部の内部欠陥の超音波非破壊検査を積極的に推進したので、産業界を中心にその応用研究が進んだ。これに対し米国では、4軍、NASA、DOEなどが新素材の非破壊評価に相当な研究費を交付しているため、超音波を用いた材料評価及びそのための基礎研究が大学を含めて広範囲の機関で進められており、いくつかの大学に非破壊評価センター（Center for Nondestructive Evaluation）が設置されている。これに対し、日本ではそのような組織がなく、超音波材料特性評価研究は極めて少数の大学で個々に進められているに過ぎない。

現在用いられている超音波材料評価は1960年代にほぼ完成された、微小振幅（線形）超音波を用いた準静的ア

ナログ測定技術に基づく。パーソナルコンピュータとそれを用いたデジタル信号処理がこの10年間に飛躍的に進歩したが、超音波材料評価にはまだ部分的にしか採用されていない。さらに従来の超音波法に対し、大振幅（振幅10nm程度）、周波数10MHzの超音波を入射すると金属では10MPa程度の応力を励起できるので、これによる非線形動的応答を計測することが可能である。固体の非線形超音波現象^(2,3)は1963年に見出されていたが、圧電素子を測定物に貼付ける方式であったため、材料特性評価への適用が限られていた。最近では、デジタル計測により、従来型超音波センサーを用いた非線形（高調波）超音波計測・材料特性評価⁽⁴⁻⁶⁾が可能になりつつあり、従来超音波法で不可能な微細組織変化が検出できるようになってきた。

本レビューは、筆者らの研究室でこの15年間に開発したデジタル超音波法を用いた、線形及び非線形材料特性評価の主要な成果をまとめたものである。

超音波を用いる非破壊材料特性評価を、図1左側の超音波特性を計測し、既知の音響物理学の理論あるいは逆解析により、右側の材料特性を求めることと定義⁽⁷⁾する。実線は実用段階、破線は研究段階を意味する。なお、音速は伝搬距離だけから求められるので 10^{-4} 程度の分解能をもつが、それ以外の特性は振幅を用いるので、通常%台の分解能である。また、音速・減衰係数などは超音波伝搬距離に依存するので、それらの変動部分の割合がわずかな初期の損傷・劣化の検出は原理的に不可能である。これに対し背面散乱波、反射率、高調波振幅などは異常部表面性状だけに依存するので、高S/N比が実現できれば、微細構造変化の検出に適している。また、図1に示すように、材料強度特性は多くの超音波特性に依存するので、できるだけ多くの超音波特性を同時に計測し、材料特性の推定精度を高めることが望ましい。

10年前までのアナログ計測を用いたこの分野の研究については文献⁽⁸⁻¹²⁾が詳しいので参考にされたい。

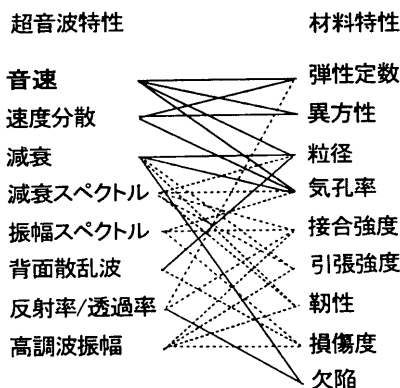


図1 超音波と材料特性

2. 超音波材料評価のための波動伝播の基礎

以降の説明に必要な固体内波動伝搬のごく基本的な事項を要約する。詳細は教科書・参考書⁽¹³⁻¹⁷⁾を参照されたい。

図2に一次元平面波の伝搬を模式的に示す。減衰と伝搬速度の周波数依存性（分散）がない理想的な場合、波は形状・振幅を保ったまま一定速度で伝搬する（図2鎖線）。減衰があれば、振幅は伝搬距離の増大と共に減少し分散も現われる（図2実線）。

一次元波動の変位は次式で表される。

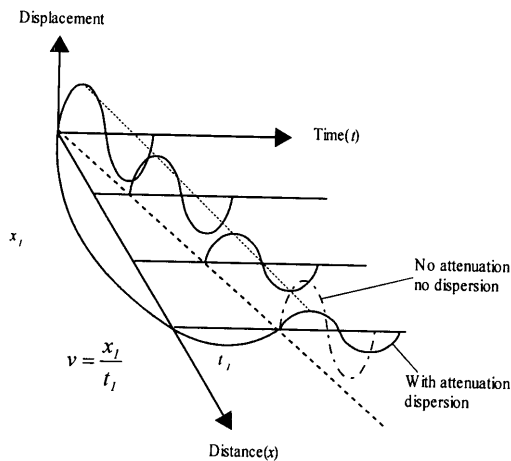


図2 1次元波動伝搬の模式図

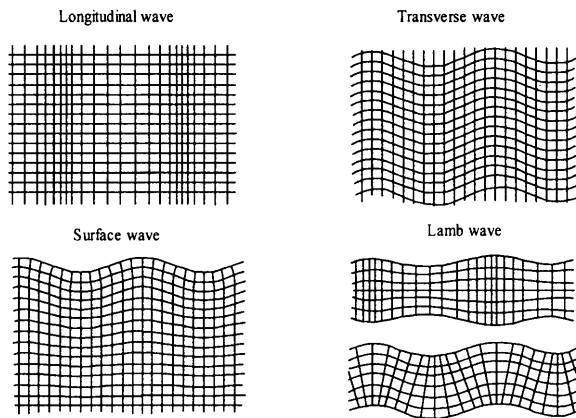


図3 固体中を伝搬する代表的な波

$$u(x, t) = A \exp[i(kx - \omega t)] \quad (1)$$

A は初期振幅, $\exp[]$ は位相を, k は波数($= \omega/v = 2\pi/\lambda$, v :音速), ω は角周波数, i は虚数単位である。分散と減衰を含む一般の場合, 波数 k は

$$k = k_R(\omega) + ik_I(\omega) \quad (2)$$

と表され, 減衰がなければ虚数項 k_I は存在しない。また分散がなければ実数項 k_R は ω に独立である。

波の位相速度は

$$v = \omega/k_R \quad (3)$$

与えられる。波の波長は $\lambda = v/f$ (v :音速, f :周波数)である。固体では波長と物体の代表寸法(境界条件)に依存して図3に示す種々の波が伝搬する。波長に比べて十分大きい等方性弾性体内では体積波(バルク波)と呼ばれる縦波と横波が伝搬する。半無限体の表面に沿っては, 面の法線方向の応力成分が存在しないという境界条件を満足する表面波が, 波長と同程度の厚さの板では, 板の両表面での応力境界条件を満たす板波(Lamb波), 波長より直径が十分小さい棒では同様に境界条件を満たす棒波, 薄肉円筒では円筒ガイド波が伝搬^(18,19)する。

3. デジタル超音波計測とアナログ超音波計測の比較

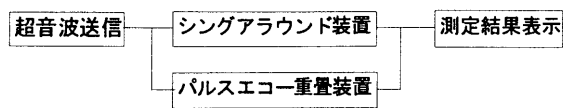
アナログ計測とデジタル計測の主な違いを図4, 両者の比較を表1に示す。アナログ計測では測定対象特性毎に異なる計測装置を必要とし, 測定結果の自動保存は困難である。これに対し, デジタル超音波計測では, 評価に最適な波形(パルス波, バースト波, あるいは合成波)を材料に入射し, 伝搬後の波形をデジタル収録し, それに各種デジタル波形処理を施すことにより^(20,21), 音速, 速度分散, 減衰, 減衰スペクトルなど図1に示す多数の超音波特性を算出することができる。また, 一旦波形を収録すれば, 再測定することなく, 必要な時に必要な特性を抽出できる。また, アナログ測定では単発でS/N比の高い結果が得られるようエネルギーの大きな入射波を用いるため, 入射波形のひずみも大きい。これに対し, デジタル測定ではできるだけひずみの少ない波を材料に

表1 デジタルとアナログ超音波計測の比較

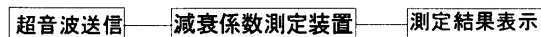
項目	デジタル計測	アナログ計測
同時測定特性の数	多数(各種波形処理により)	単一
入力波形の種類	多種類(任意波形発生ボード使用)	装置により規定される
S/N比	高い(同期加算により)	低い
測定後の特性抽出	可	不可(再測定が必要)
測定の精度(再現性)	可変(ソフトウェアにより)	固定
計測解析ソフトとの結合	可	不可
特性抽出ソフトウェア	自作または購入	不用(ハードウェアで処理)
高速測定	困難	可
適用分野	主にオフライン計測	主にオンライン計測

(アナログ法)

伝播時間測定



減衰係数測定



(デジタル法)

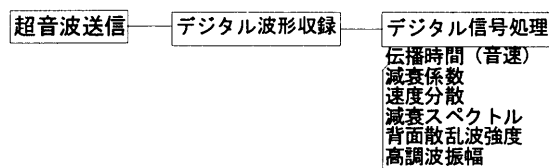


図4 デジタルとアナログ超音波計測の比較

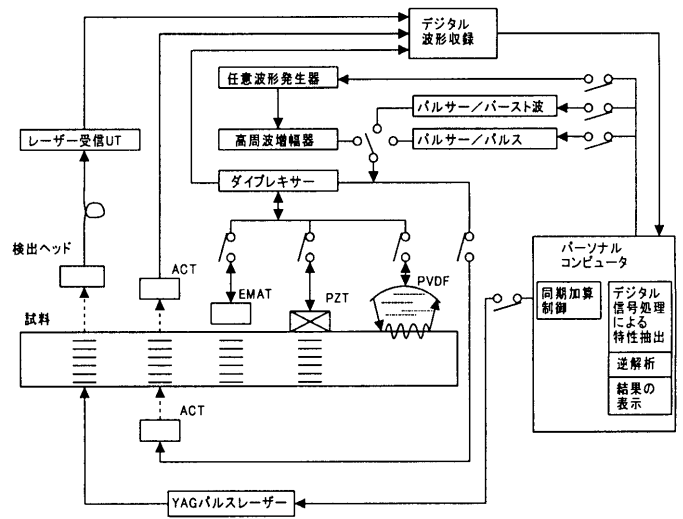


図5 デジタル超音波計測システム

入射し、増幅により材料内を伝搬する過程での波形のゆがみを検出する。

受信波形を同期加算すれば、電磁ランダムノイズを大幅に低減させることができ、S/N比が向上し、後述のようにアナログ計測ではノイズに埋もれていた微弱な信号をも検出することができる。測定結果を市販のLabVIEW, MATLABなどの解析・表示パッケージツールと組合せることにより、従来データ収録後行っていた解析・結果の表示をセミリアルタイムで実行することも可能になる。さらに、分散性の著しい材料・構造に対して、測定結果が短パルス波形となるような最適波形を入力することも可能である。

4. デジタル超音波計測システム

筆者らが使用しているデジタル超音波計測システムを図5に示す。市販の超音波送受信器あるいは任意関数発生ボードと高周波増幅器を用いて発生させた入射波信号により、接触式圧電変換器（以下探触子と呼ぶ）、水浸用高分子圧電膜（PVDF）探触子、空気伝搬超音波探触子（ACT）、あるいは電磁超音波探触子（EMAT）を励起する。レーザーによる超音波励起にはYAGパルスレーザーを使用する。受信波形をデジタルオシロスコープあるいはA/D変換ボードを用いてデジタル集録する。デジタル超音波計測は、デジタル波形集録、デジタル信号処理、結果のデジタル表示の3段階から構成される。市販の超音波計測機器を組合せ、さらに超音波特性抽出ソフト、材料特性評価用ソフトを組み込むことにより、デジタル超音波計測評価システムを比較的容易に構成することができる。

デジタル波形処理を行う前に、波形の平滑化あるいは内挿等の前処理を行うことにより変動の少ない計測結果が、さらに測定波形と基準波形（例えば内部欠陥のない試料からの波形）との差分をとることにより機器ノイズを除去できる。

時間軸上の短パルスは周波数領域では広帯域であるので、アナログ法で必要な周波数を掃引することなく、デジタル法では短パルスを入射して伝搬速度、減衰係数の周波数依存性を求めることができる。

超音波計測で得られる結果は、超音波が伝搬した領域にわたる平均値である。通常測定では直径5-10mmの円柱領域であるが、集束探触子を用いれば直径0.1mm程度までの局部評価が可能である。しかし伝播領域に含まれる結晶粒の数が1000以下では、測定結果は個々の結晶粒の異方性に依存し、変動が大きくなる。

5. 線形デジタル超音波計測の基礎

5.1 高精度音速測定

デジタル収録した波形はサンプリング時間間隔で離散化された点列である。収録した波形から、以下の方法により、伝搬時間（音速）を精密に求める^(20,21)ことができる。

1) ゼロクロス法 図6に示すように、 n 及び $n+1$ 番目反射波の同一位相の点（図では最初のゼロクロス点）間の伝搬時間差を求める。この方法は対象とする2つの波形が相似に近い（分散の少ない）場合に適用できる。内挿により最小収録時間間隔の1/100以下まで伝搬時間を求めることにより、容易に相対精密度（標準偏差/平均値）が 10^{-4} 程度の高精度音速測定ができる。

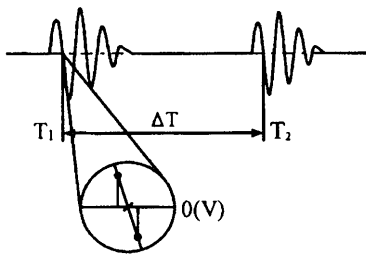


図6 ゼロクロス法

温度を適切に制御すれば相対精密度 10^{-6} の測定もできる。

- 2) 相関法 上記方法は波形の1点だけを測定対象とするのでノイズの影響を受けやすい。また、材料の微視構造により超音波が散乱され対象とする波形の相似性が低下した場合には適用できない。図7に示すように、2つの波形が最も良く重なるように時間軸に沿って平行移動させ、相関関数が最大となるTを求め伝搬時間とする。この場合も相関関数が最大値を取る位置を内挿することで、伝搬時間の変動幅を小さくできる。これはアナログ法のパルス重畳法をデジタル化したものといえる。これら方法で測定される音速は波束の伝搬速度であるので群速度に近い。

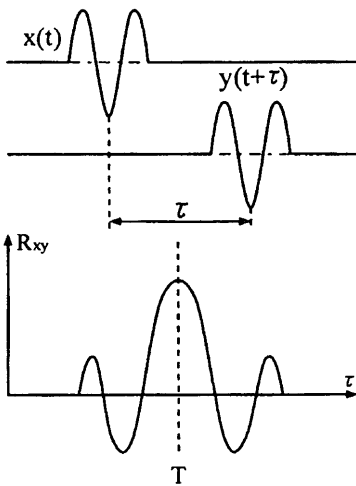


図7 相互相関法

5.2 速度分散測定 (位相スペクトル法)

分散性材料では周波数に依存して位相速度が変化する。伝搬距離が異なる2点で収録した時間波形にFFTを施し各波形の位相スペクトルを算出し、その位相差 (図8) を用いて、次式より位相速度を求める⁽²²⁾。

$$V_p = 2\pi f \Delta L / (\Delta \phi) \tag{4}$$

ここで ΔL は伝搬距離差、 $\Delta \phi$ は位相差である

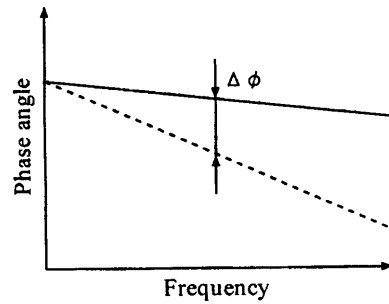


図8 位相スペクトル

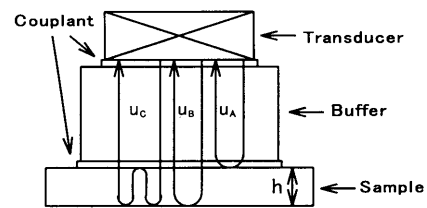


図9 バッファを用いる減衰測定

5.3 減衰スペクトル測定

- 1) 接触パルスエコー法⁽²³⁾ 図9に示すようにバッファ材裏面反射波、試験片裏面の1回目及び2回目の反射波振幅を同時に収録し次式より試験片の減衰係数を求める。反射波 u_A, u_B, u_C のスペクトル絶対値 A, B, C は、

$$\begin{aligned} A &= UR, \\ B &= UT_{BS}T_{SB} \exp(-2\alpha h) \\ C &= UT_{BS}RT_{SB} \exp(-4\alpha h) \end{aligned} \tag{5}$$

と表される。ここで、 α は試験片の減衰係数、 U は入射波振幅やバッファ内減衰など3つの反射波に共通の因子、 R はバッファ材-試験片界面での反射係数の絶対値、 T_{BS} (T_{SB}) はバッファ (試験片) から試験片 (バッファ) 方向の透過係数である。式 (5) と、 $R^2 + T_{BS}T_{SB} = 1$ の関係から、減衰係数 α は

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln\left(\frac{R}{C/B}\right) \quad R = \sqrt{\frac{AC}{AC+B^2}} \tag{6}$$

と求められる。この場合原理的にはバッファと試験片間の反射・透過損失は消去されるので、超音波ビームの拡散補正だけをすれば良い。

- 2) 水浸パルスエコー法⁽¹⁵⁾ 水を接触媒体とするので、接触面の状況の影響を受けにくく、また第1反射波だけを用いるので高減衰材料にも適用できる。図10に示すように、水中に置いた試験片の表面及び裏面の反射波を用いて、減衰係数を求める。いずれの方法も広帯域パルスを入射することにより、1回の測定で探触子帯域内の周波数について減衰スペクトルを求めることができる。

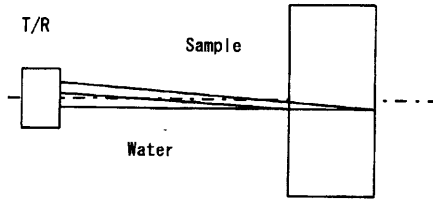


図10 水浸減衰測定

5. 4 ウェーブレット変換による群速度測定

ガイド波のように分散性が著しい波では、早く到着する波と遅く到着する波束の形状がかなり異なる (図24)。このような場合、ウィンドウ (窓幅) を狭めて各時間毎に FFT 処理する短時間FFTが用いられることもある。しかし、窓幅が狭くなると周波数分解能が低下する。そこで最近では、連続時間周波数変換 (ウェーブレット変換) が用いられる。

最も広く用いられているウェーブレット変換は次式のガボール関数⁽²⁴⁾

$$g(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma} e^{\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{-it} \quad (7)$$

を受信時間波形に対して畳み込み積分を行い、その係数を求める。図11に示すように、 σ の値によりガボール関数の形状が変化する。 σ が小さい場合には時間分解能は向上するが周波数分解能が低下する。逆に σ が大きい場合時間分解能は低下するが周波数分解能が向上する。適切な σ を選択することにより、必要な時間及び周波数分解能を持つウェーブレット変換を実行できる。

一般のウェーブレット変換結果は時間-周波数平面上に表示される。一定距離 L を群速度 v で伝搬した超音波の伝搬時間 t は $t=L/v$ であり、群速度は時間の逆数で表される。この方法を用いれば、1種類の伝搬距離で測定した波形から群速度分散を求めることができる。

5. 5 漏洩表面波の速度測定

図12に示す液体と固体の界面を伝搬する漏洩表面波を用いると、適切な伝搬距離において縦波、横波、表面波 (レイリー波) を同時に検出できる。各波のエネルギー伝搬速度は、幾何学的関係から次式で求められる。

$$\Delta t_i = 2\Delta z \left(\frac{\tan \theta_i}{V_i} - \frac{1}{V_W \cos \theta_i} \right) \equiv m_i \Delta z \quad (8)$$

$$V_i = V_W \left(m_i V_W - \frac{V_W m_i^2}{4} \right)^{-1/2} \quad (9)$$

また式 (4) に次式を用いれば漏洩レイリー波の位相速度が求められる。

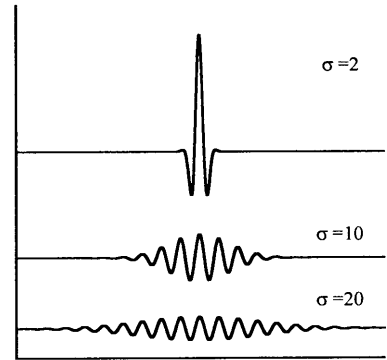


図11 ガボール関数の σ による変化

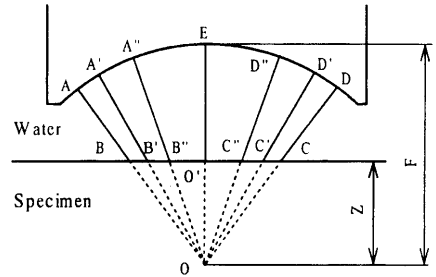


図12 各種漏洩表面波測定原理

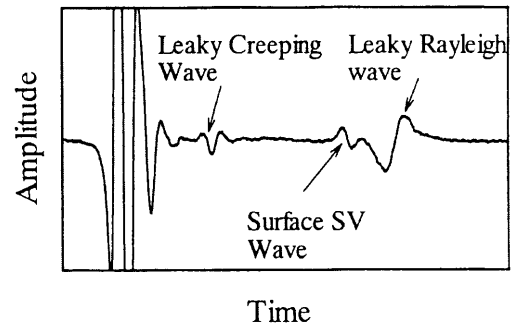


図13 PVDFセンサーによる各種表面波受信波形

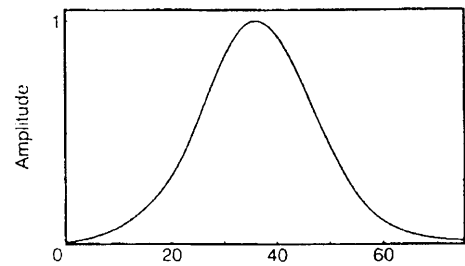


図14 PVDFセンサーの振幅スペクトル (焦点距離 5 mm, 溶融石英)

表2 各種漏洩表面波の測定精度 (溶融石英) (m/s)

回数	レイリー波	クリーピング波	表面SV波
1	3436.7	5863.6	3777.0
2	3437.5	5861.6	3777.4
3	3437.7	5860.7	3777.4
4	3437.8	5864.2	3778.7
5	3437.8	5864.3	3777.4
平均	3437.5	5862.9	3777.6
標準偏差	0.46	1.63	0.66

$$\Delta\phi = \phi_2 - \left\{ \phi_1 - \frac{4\pi f \Delta z}{V_w \cos\theta_R} \right\} \quad (10)$$

$$\Delta L = 2 \tan\theta_R \Delta z$$

ここで、 V_i と θ_i は各漏洩表面波の速度と臨界角、 V_w は液体中の音速、 Δz はデフォーカス量の差、 θ_R は漏洩レイリー波の臨界角を表す。

上記の式は、超音波送受信面が球面あるいは円筒面であり、平滑平面である測定物表面の法線とセンサー軸が一致することを前提とするので、それを実現する機構が必要である。

図13のクリーピング波、SV波のような微小振幅の波形はアナログ測定ではノイズに埋もれるが、同期加算するとノイズレベルが低下し、このような極めて微弱な信号も有効に利用できる。ちなみに、3種類の漏洩表面波速度を同時に測定できるのは現在のところ、世界でこの方法⁽²⁵⁾だけである。

レイリー波の浸透深さは1波長程度であり、適切な周波数を選択することにより表面から任意の深さの層の特性評価が可能となる。なお、平面圧電素子の前面に音響レンズを貼りつけた構造では、音響レンズ界面でのノイズが避けられないが、高分子圧電膜を球面あるいは円筒凹面に張付けた構造ではそのようなノイズは生じないので、図13に示した微弱な信号を確実に検出できる。図14に示すように、PVDFセンサーの振幅スペクトルの対称性は極めてよく、位相スペクトル法による速度分散も高精度で求めることができる。表2に示すように平滑平面の各種漏洩表面波速度の相対精度は 10^{-4} 程度である。

6. 線形デジタル超音波計測による材料特性評価例

本章では、主に音速測定に基づく材料評価例を示す。

6.1 複合材料の異方弾性係数同定⁽²⁶⁾

等方性材料の剛性率とヤング率は、縦波音速 C_L 、横波速度 C_T と密度 ρ より次式により求められる。

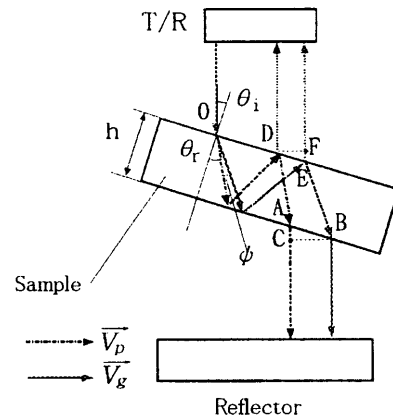


図15 改良水浸2回透過法

$$G = \rho C_T^2 E = \rho C_T^2 \frac{3\gamma^2 - 4}{\gamma^2 - 1}, \gamma = C_L / C_T \quad (11)$$

音速は容易に0.1%の精度で測定できるので、超音波法を用いれば有効数字3桁で弾性係数を求めることができ、弾性係数の変化から内部構造の変化、損傷度を推定することができる。

異方性材料では、下記のクリストッフェルの式に基づき、指定した方向に伝搬する準縦波及び準横波の位相速度を測定し、弾性スティフネスを求める。

$$(C_{ijkl}n_j n_k - v^2 \delta_{il})u_l = 0 \quad (12)$$

ここで C は弾性スティフネス、 n は波の伝搬方向、 v は位相速度、 u は変位である。

通常のパルス伝搬時間間隔から求める音速は群速度に近いので、式(12)を用いるためには群速度を位相速度に変換する必要がある。しかし、反射板を用いた水浸2回透過法⁽²⁶⁾では、図15の材料中 DA と水中 AC を位相速度で伝搬する時間が材料中 EB を群速度で伝搬する時間と等しいので、この補正が不要である。図16のように測定試験片の表面に反射プリズムを用いる⁽²⁷⁾と、反射板を使用せず一面からの測定により位相速度を測定でき、構造部材の評価にも適用できる。

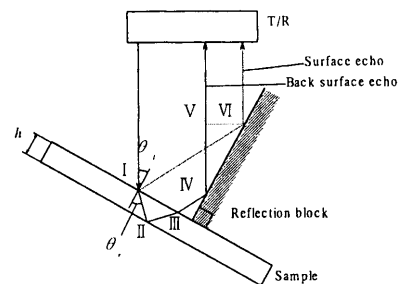
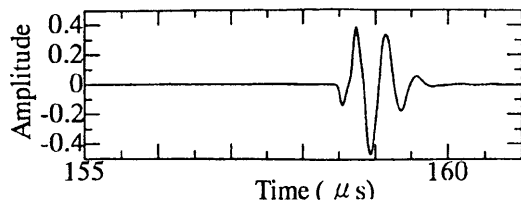
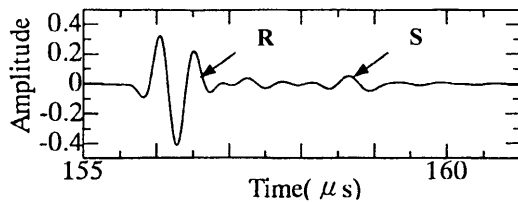


図16 反射プリズム法



(a) Waveform from the reflector.



(b) Waveforms from the reflector (R) and reflection at sample surface (S).

図17 多重反射波形

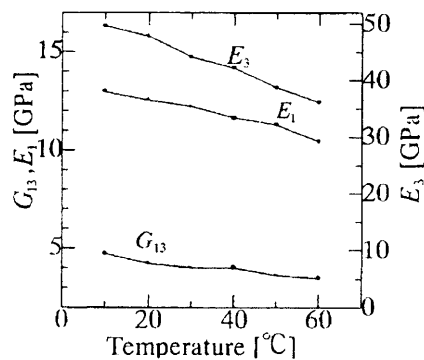


図18 一方向強化GFRPの弾性係数の温度依存性

さらに、デジタル超音波法では板面での多重反射波も図17に示すように収録できるので、水の音速を用いずに異方弾性係数を求めることができる。図18はこの方法で求めた一方向強化GFRPの弾性係数の温度依存性⁽²⁸⁾を示す。なお、一方向に補強した複合材料は面内等方性とみなすことができ独立な弾性定数は5個となる。

6. 2 コーティング層の特性評価

材料表面層は最も劣化損傷を受けやすいので、耐摩耗性、耐熱性などを高めるため、CVD、PVD、プラズマ溶射などの各種表面処理により表面の改質が図られている。改質処理後における特性の評価、同一試験片について加速試験下での機能変化を評価することが課題である。

図19は、超硬合金(WC-Co)の表面に厚さ $4\mu\text{m}$ のTiNをCVDまたはPVD法によりコーティングし、図12に示した方法により漏洩レイリー波の位相速度分散を求め、層状構造を伝搬する波動伝搬⁽²⁹⁾逆解析により推定した弾性係数⁽³⁰⁾を示す。図の下部に示すように、超硬合金では

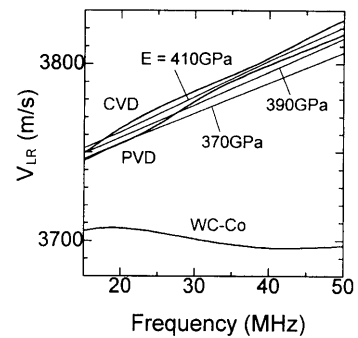


図19 TiNコーティング材の推定弾性係数

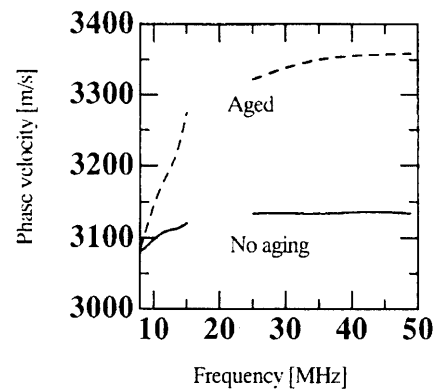


図20 インコネル基盤上の遮熱コーティングの速度分散

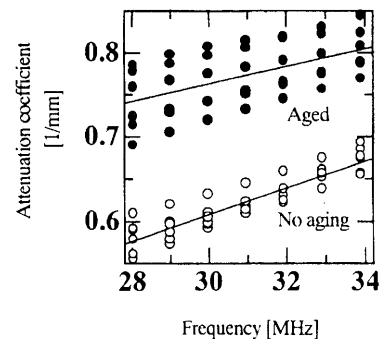
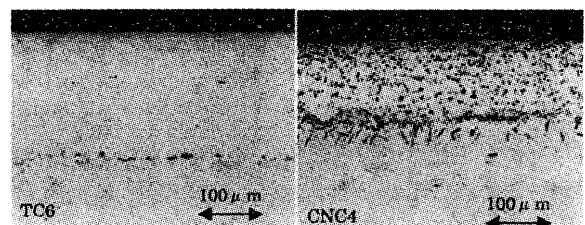


図21 インコネル基盤上の遮熱コーティングの減衰係数

図22 遮熱コーティング材の微視組織変化
(左：高温保持なし、右：高温保持後)

有意な速度分散は見られないが、TiNコーティングを含む層ではTiNの音速が大きいため高周波域(短波長)ほど位相速度が高く現れる。なお、周波数30MHzでの波長(表面波の浸透深さ)が 0.12mm とTiN層の厚さよりはるかに大きいのでWC-Coの速度の影響を受けるため、右上が

表3 各種材料の表面層密度と弾性係数

材料	表面層密度 (g/cm ³)		ヤング率 (GPa)	
	表面波法	通常法	表面波法	通常法
熔融石英	2.0-2.2	2.2	68-73	73
2017Al	2.7-2.9	2.8	70-73	72
CoCrAlY	7.7	7.3	230	210

りの分散曲線となる。

水, TiN層, 超硬合金の3層構造についてTiN層のヤング率を未知数として位相速度分散の式を導き, 非線形最小自乗法により測定結果を最適に近似するヤング率を求めた結果370-410GPaとなり, これはTiNバルク材の値にほぼ近い。数ミクロンの薄いコーティング層の弾性係数評価にもこの方法は有効であることが実証された。

図20と21はインコネル基盤上にプラズマ溶射したCoCrAlY遮熱コーティングの1000℃500時間の高温保持による微視組織変化に伴う漏洩レイリー波速度と減衰の変化⁽³¹⁾を示す。図22に示すように, 高温保持によりコーティング層内部に音速の大きなAIN粒子が析出するため, 音速及び減衰係数が変化する。溶射後ではほとんど速度分散が見られないが, 高温保持後には高周波域での音速が200m/sほど上昇している(図20)。ここでは中心周波数10(焦点距離15mm)及び30MHz(焦点距離5mm)の2種類の線集束センサーによる測定結果を示すが, 両者はほぼ連続した速度分散を示す。図21に示す減衰係数についてもAIN粒子析出による有意な減衰係数の増加が見られる。5箇所異なる位置で測定した減衰係数は, 位置による変動が大きい。

6.3 材料表面層の密度及び弾性係数評価⁽³²⁾

Viktrov は等方性固体に対し, 漏洩表面波速度と液体及び固体表面層の密度, 弾性係数ならびに減衰係数の関係を導いた⁽¹⁸⁾。

$$4k^2qs - (k^2 + s^2)^2 = i \frac{\rho_w}{\rho} \frac{qk_T^4}{(k_w^2 - k^2)^{1/2}} \quad (13)$$

ここで

$$q^2 = k^2 - k_L^2, s^2 = k^2 - k_T^2$$

であり, 液体の音速, 減衰係数は既知であるので, 固体の縦波, 横波, レイリー波速度及びレイリー波の減衰係数を測定すれば, 式(13)より固体表面の密度を求めることができる。

各種材料について上記方法により測定した表面密度と弾性係数を, 従来法で測定した結果と対比して表3に示す。等方性で均質な材料では数%以内の誤差で従来法と

一致する値が得られる。プラズマ溶射したコーティング材は測定位置による変動があるので, これを考慮すれば超音波法で測定したCoCrAlYの密度は妥当と考えられる。超音波表面波を用いて表面層の密度を直接測定できるのは現在のところ, 世界で筆者らの研究グループだけである。なお, 異方性が顕著な材料では等方性の仮定が成立しないため, この方法は適用できない。

6.4 レーザー超音波とウェーブレット変換を用いた接合板の剥離検出⁽³³⁾

レーザー超音波を用いた非接触材料評価の一例として, 圧接板の剥離検出例を示す。図23に示すように, YAGレーザー光を線状に集束し, 極表面層を気化させ板内にLamb波を励起し, 伝搬波形をレーザー超音波検出器で収録する。受信時間波形を図24に示す。高速で伝搬する高周波の波と低速で伝搬する低周波の波があり, これから直接速度を求めることはできない。5.4に示した方法を用いると, 図25の群速度分散曲線が得られる。健全部の(a)と剥離部を含む領域(b)の違いは明瞭でないので, 両者の差をとり, 最大強度で正規化すると図26のように特定モードの群速度の変化が強調される。このようにデジタル波形処理により, 時間波形では直接見ることでできない特性を抽出できる。

6.5 音弾性応力測定

等方性弾性体に応力を加えると応力誘起音響異方性が生じ, 波の伝搬方向に依存してごくわずかに音速が変化す

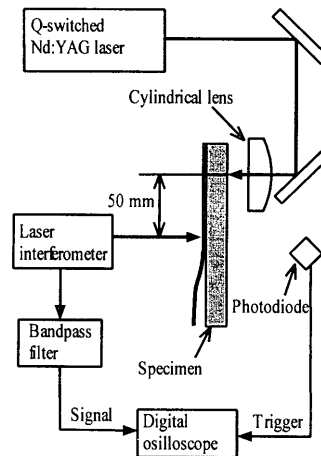


図23 測定装置概略

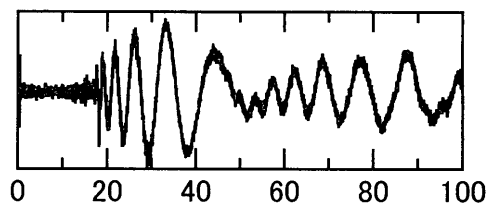
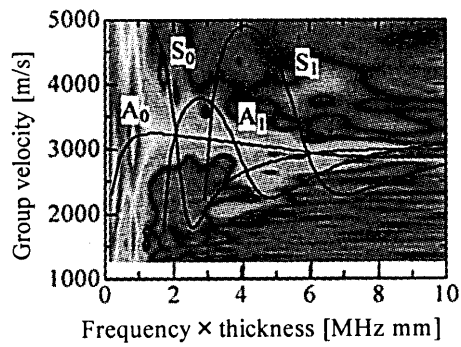
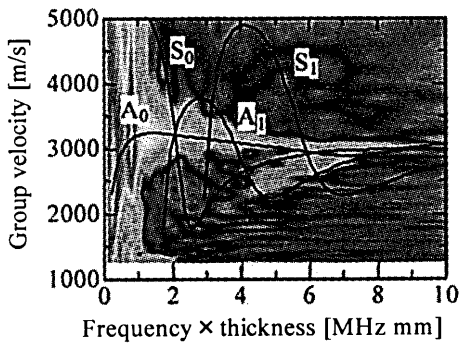


図24 レーザー超音波による受信波形



(a)



(b)

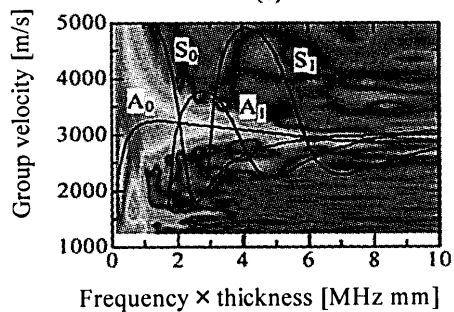
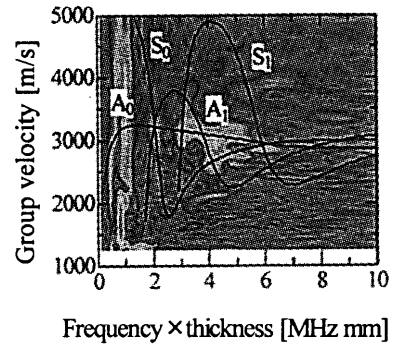
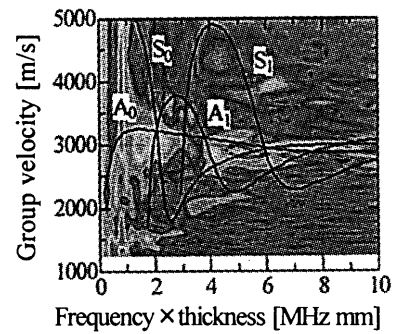


図25 健全部と剥離部の群速度分散
(a: 健全部, b: 剥離部含む, c: 剥離部)



(b)- (a) in Fig. 25



(c)- (a) in Fig. 25

図26 健全部と剥離部の群速度の差分

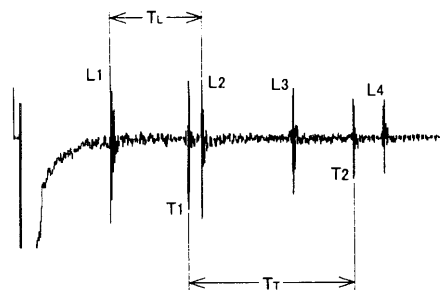


図27 ボルト端部からの縦波及び横波反射波

ることが実験的⁽³⁴⁾及び理論的⁽³⁵⁾に示され、その音弾性法則を用いて実構造物のその場応力測定が行われてきた。アナログ法では電磁ノイズの影響が避けられないので、高精度音速測定には1万回程度伝搬時間を加算するシングア라운드法が用いられてきた。

前述のように、受信超音波波形をデジタル収録し同期加算することにより高精度音速測定が可能になった。安井らは、異なる周波数の縦波と横波を同時に送受信できる超音波センサーを自動車用短小ボルト頭部に密着させ、ボルト端部からの反射波形(図27)を100回程度同期加算しデジタル収録し、相互相関法を適用し、縦波及び横波伝搬時間から締付けた状態だけの音速測定によりボルトに作用する平均軸力を求める方法を開発した。これにより測定した伝搬時間と負荷軸応力の関係を図28⁽³⁶⁾に示す。音響結合材の適切な制御により10%程度の

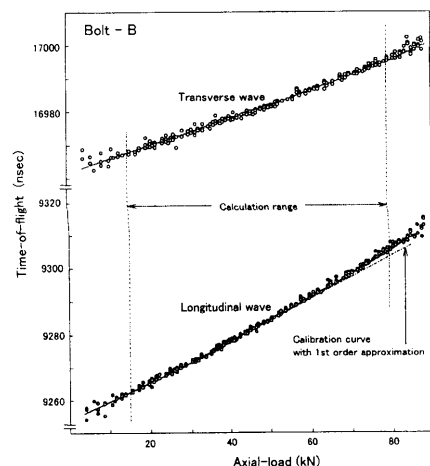


図28 ボルト軸力と縦波及び横波伝播時間

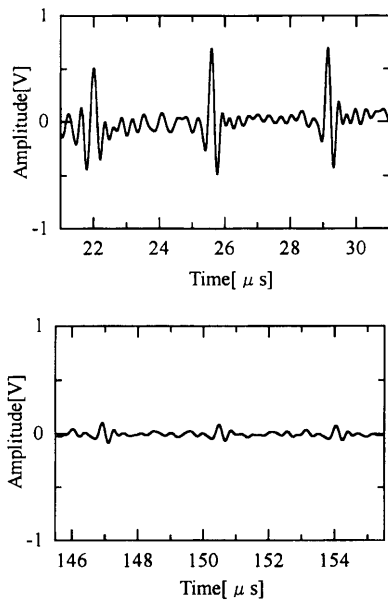


図29 厚さ6mmの鋼板のEMAT受信波形 (30回同期加算後：4-6回目，下：39-41回目反射波)

誤差で軸力を評価できる。

音弾性応力では一般に音弾性係数（応力に対する音速変化率）が大きな横波を用いるので，高粘度の音響結合材を必要とし，その厚さを制御する必要がある。

電磁超音波センサー (EMAT) (37)を用いればこれを回避できるが，EMATが低感度でまた電磁ノイズの影響を受けやすいため，高出力のパルス電源を必要とした。アナログ計測ではランダムノイズに埋もれる場合でも波形をデジタル収録同期加算することにより，音弾性応力測定が可能になる。EMATによる鋼の収録波形を図29に，U型切欠き底断面における主応力差の音弾性測定結果を有限要素法解析結果と対比して図30(38)に示す。図27及び図28に示した直接接触圧電探触子による結果より，ノイズが大きいため，応力の変動も著しいが，± 20-30 MPaの誤差で応力測定ができる。

6. 6 最適入射波形による受信波形の短パルス化

デジタル超音波計測の特徴のひとつは，分散性の著しい材料・構造についても，受信時間波形が短パルスになるような入射波形をデジタル的に合成し，入力波形とすることができることである。

入射及び受信波形のフーリエ変換を $I(\omega)$ と $O(\omega)$ ，測定系を含めた応答関数を $G(\omega)$ と表せば，

$$O(\omega) = I(\omega)G(\omega) \tag{14}$$

であるので，

$$I(\omega) = G(\omega)^{-1}O(\omega) \tag{15}$$

の関係より既知の入射波形に対する受信波形を測定し，

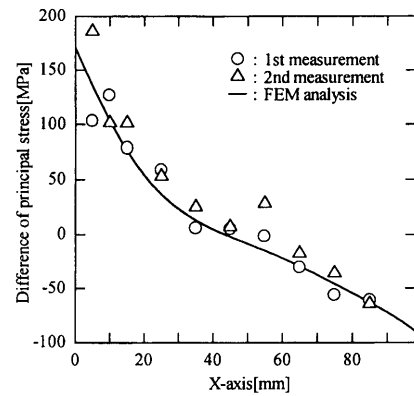


図30 EMATとFEMによるU型切欠き断面の主応力差分布(厚さ6mm 鋼板)

後者が単純な形状となる入射波形が求められることができる(39,40)。

例として平板中の溝状欠陥からのラム波の透過波形を短パルス化した結果(41)を図31と32に示す。通常の短パルスで励起したときには，図32のように分散性の波が受信される。これに対し，図31の入射波を用いれば分散性が抑制された短パルスに近い波形を得ることができる。図5に示したように，任意関数発生器と必要な帯域を持つ高周波増幅器があればこれが実現できる。

7 固体の非線形超音波計測の基礎

7. 1 非線形弾性連続体の音響非線形性

線形弾性体 $\sigma = E\varepsilon$ では，音速は $(E/\rho)^{1/2}$ に比例するので，音速は一定であると考えますが，前述のように金属材料の音弾性が知られており，圧縮応力負荷時の音速が引張応力負荷時よりわずかに大きい。これを考慮す

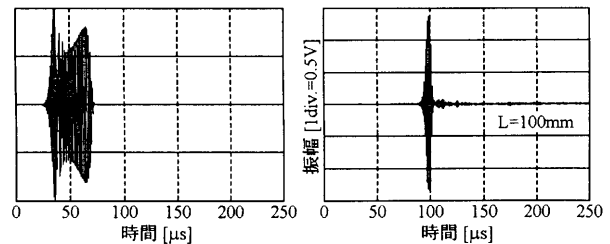


図31 最適入射波 (左) により短パルス化した受信波形 (右)

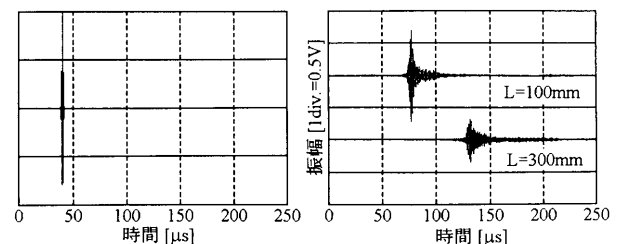


図32 通常のパルス入射波形 (左) と受信波形 (右)

るため非線形応力ひずみ関係を

$$\sigma = E_1 \epsilon + E_2 \epsilon^2 \quad (E_2 < 0) \quad (16)$$

と仮定すると図33に示すように、細線と破線の和で表される太曲線の圧縮側の局部的弾数係数 ($d\sigma/d\epsilon$) が引張側より大きいので、圧縮相の音速が大きい。これにより、図34のように入射波形に対して伝搬後の波は引張側(図の下側)において波の伝搬速度が1周期内で遅い。

バースト波の周波数は一定であるので、入射正弦波からの偏りは高次高調波の重ね合わせとして高調波振幅により定量化できる。

式(16)に従う弾性体の1次元波動方程式の解は次式⁽⁴²⁾で与えられる。

$$u = A_1 \exp[i(kx - \omega t)] + (E_2/8E_1) \times A_1^2 k^2 x \exp[2i(kx - \omega t)] \quad (17)$$

ここで2次高調波振幅比⁽⁴³⁾

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{E_2 A_1 k^2 x}{8E_1} \quad (18)$$

は弾性係数の比 (E_2/E_1)、入射波振幅、高調波励起部分の伝搬距離に比例し、波数の2乗に比例する。後述の2次高調波測定結果にこの2次高調波振幅比を用いる。

7.2 微視空隙を含む弾性体の音響非線形性

思考実験として、完全な平滑平面が隙間なく接し、表面の凝着・摩擦が無視できる理想的接触面(図35)を考える。この接触面への大振幅縦波を入射すると、圧縮波は透過するが、希薄(引張)波は反射される。入射波が周波数 f の正弦波であるとき、透過波は周波数域では多数の高調波を含む。このモデルから明らかのように、非線形弾性連続体のごくわずかな波形ひずみに比べて、不

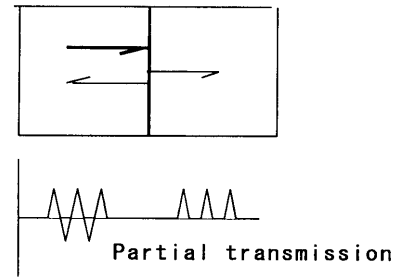


図35 理想的接触面での透過波

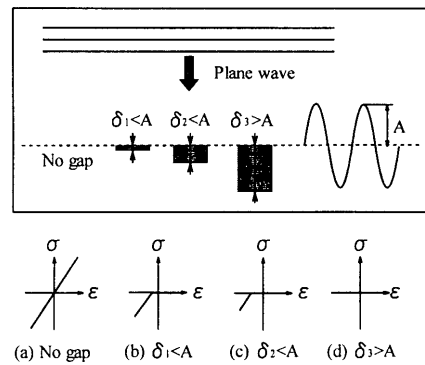


図36 内部微小開口き裂での応答

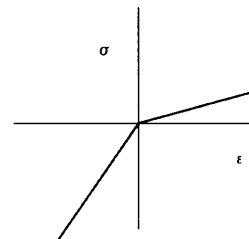


図37 圧縮と引張応答の異なる弾性体

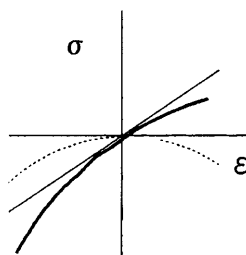


図33 非線形弾性連続体

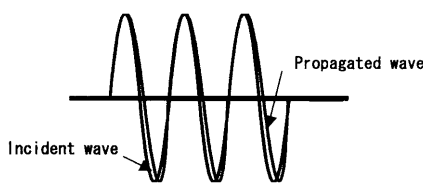


図34 波形のひずみ

完全結合面を透過した波形ひずみはきわめて大きいので、接触型音響非線形性⁽⁴⁴⁾ (Contact Acoustic Nonlinearity: CAN) と呼ばれる。実際の固体接触面には微細な凹凸が存在するので、圧縮波は部分的にしか透過せず、上記の理想的接触面よりはるかに小さな透過波しか生じない。さらに、完全結合部分(連続体)の中に不完全結合部分がわずかに存在する不完全接触面での高調波発生は更に弱くなる。しかし、それでも非線形弾性連続体の高調波よりはるかに強いことが知られている⁽⁴⁴⁾。

構造材料の初期損傷は入射波振幅よりはるかに狭い開口のき裂としてモデル化⁽⁴³⁾できよう(図36上)。大振幅入射波により圧縮相ではき裂面が接触し、接触後圧縮応力波は伝搬するが引張応力波は反射される。隙間部の応力ひずみ関係は折れ線で表され(図36下)、健全部と空隙部を合わせた全体の応力ひずみ関係は図33と同様に非線形となり、非線形弾性連続体と巨視的には同様な挙動を示す。

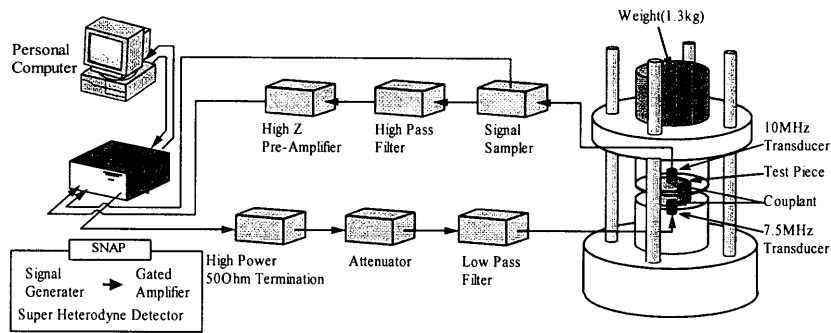


図38 縦波高調波測定装置

7.3 引張と圧縮応答が異なる接合体の音響非線形性

内部微視き裂を含む金属材料以外、土砂、き裂を含む岩、水を含む土砂、焼結前セラミック成形体、キッキングボンド等はいずれも圧縮側と引張側の応力ひずみ関係が異なる (図37) ので、それらの微視構造に対応した大振幅の入射波を用いれば高調波が励起される。高調波測定と機械的材料試験結果を対応させることによりそれらの結合状況の判定が可能である。

8 非線形超音波計測システム

従来、金属材料の2次高調波をアナログ法で計測するため、非線形性の少ないLiNbO₃結晶を測定部分に貼付け、大振幅超音波を入射し、対向する面に検出したい高調波周波数に対応する厚みの結晶を貼付け透過波を検出してきた。この方法では任意の位置での測定が不可能で、特定周波数の高調波しか検出できないという問題点がある。工業材料や構造物の非破壊評価・検査に非線形超音波を適用するためには、従来の超音波測定と同程度のセンサーの走査性が必要である。4章で示した測定装置の中の通常の超音波送信機に変えて大振幅バースト波発生装置を用いるだけで非線形超音波計測を行うことができる。所望の高調波をデジタル的に抽出するためには、高分解能FFT (高速フーリエ変換)、パルスインバージョンを用いる。なお以下では、アナログ的に高調波を抽出する非線形音響測定装置 (RITEC SNAP5000) による結果を示す。

9 非線形デジタル超音波計測 (高調波) による材料特性評価例

9.1 粉末焼結鉄の識別 (45)

還元鉄粉及び噴霧鉄粉を焼結した直径30mm、長さ9mmの円盤状試験片の一面から、公称周波数7.5MHz、直径6.4mmの超音波センサーにより5MHz、波数20のバースト波を入射し、中心周波数10MHz、直径9.6mmのセン

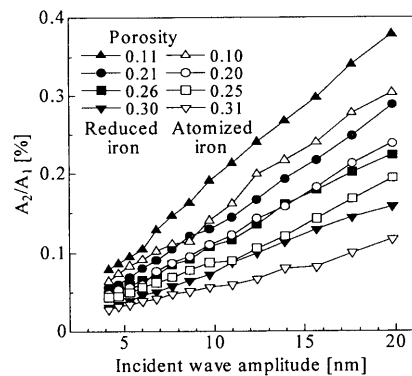


図39 還元及び噴霧鉄粉焼結体の2次高調波振幅比 (入射波5MHz)

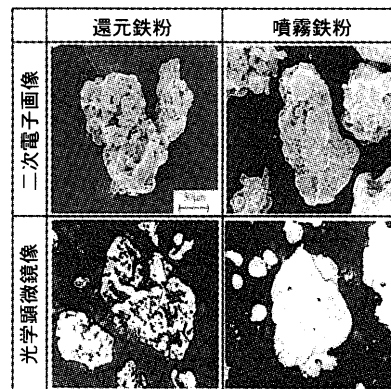


図40 還元及び噴霧鉄粉の微細構造

サーにより受信した波形を非線形音響測定装置により処理し、2次高調波振幅比を求めた。測定システムの概要を図38に示す。図39に示すように、ほぼ同一の気孔率において、入射波により接触する微細な空隙を多数含む還元鉄粉 (図40) の2次高調波振幅比 (A_2/A_1) が有意に高い。気孔率の増大 (気孔径の増大) とともに A_2/A_1 が低下するのは、入射超音波により接触する空隙が少なくなるためである。なお、音速測定では、同一気孔率の噴霧鉄粉と還元鉄粉を区別できないことが報告 (46) されている。また、式 (18) の理論予測のように入射波振幅に比例して A_2/A_1 が増加する。この方法では0.03%以上の A_2/A_1 を、

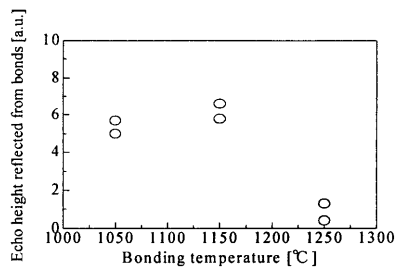


図41 接合面のエコーの振幅

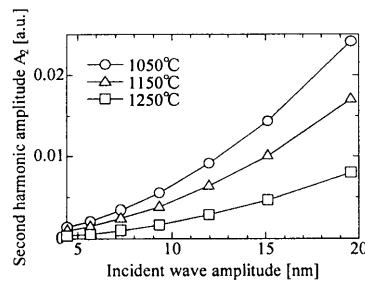


図42 SNAPによる2次高調波振幅比

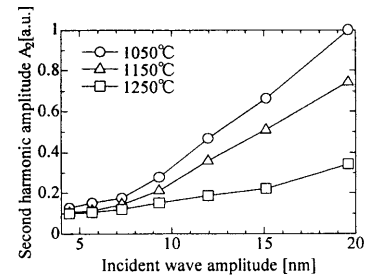


図43 パルスインバージョンによる2次高調波振幅比

分解能0.01%程度で計測できる。

完全非接触の電磁超音波共鳴法による表面SH波を用いた疲労損傷検出では0.01%の分解能で0.1-0.4%の2次高調波振幅比が測定⁽⁴⁷⁾されており、本直接接触法による測定精度はこれとほぼ同様である。

9.2 液相拡散接合面の評価⁽⁴⁸⁾

高級接合及び異質材料の接合に用いられる液相拡散接合状態の識別に非線形超音波を適用した。測定試料は鋼円柱(直径20mm,長さ50mm)を高周波加熱し5MPaの加圧下で60s保持しNi系フィラーを用いて液相拡散接合したものである。接合温度を1050, 1150, 1250°Cと変えて接合した。通常のパルスエコー法による接合界面からの反射波強度は図41に示すように、温度依存性は明らかでない。これに対し、図42に示す非線形超音波計測装置で求めた2次高調波振幅は接合温度に明確に依存する。また、立上がり波が正のバースト波受信波形と負のバースト波受信波形を重ね合わせ2次及び偶数次高調波振幅を求めるとパルスインバージョン⁽⁴⁹⁾法でも、図43のようにはほぼ同様な結果が得られる。パルスインバージョンでは、高価な非線形超音波計測装置を使用せずに、デジタル信号処理を用い繰返しサイクルが少ないバースト波に対しても2次高調波振幅を求めることができる。

2次高調波振幅と静的引張強さの関係(図44)には明瞭な相関が認められ、前者を測定して後者を予測することができる。なお1250°Cでの破断位置は接合面ではなく母材側であった。このように数十 μm 以下の拡散接合層に起因する2次高調波振幅を検出することができ、接合温度に依存した微視構造との対応、引張強さ等の強度特性との相関を明らかにすることにより2次高調波を用いた高品位接合面評価が可能になる。

9.3 漏洩レイリー波による閉じた表面き裂の評価

構造物に発生する初期の疲労き裂、応力腐食割れ、水素脆化などのき裂面はほとんど閉じている。また、压力容器の開放点検時には、加圧時に開いている表面き裂も弾性拘束応力により閉口することもある。通常のパルスエコー法では、閉じたき裂面から明瞭な反射波が得られないので、閉じたき裂の検出はほとんど不可能である。

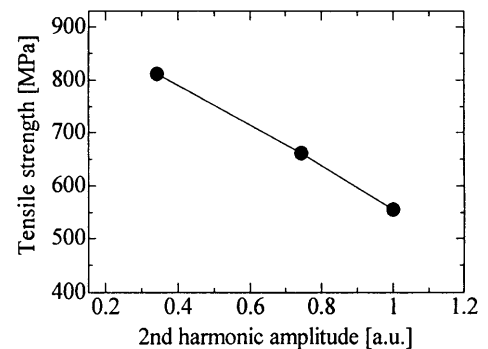


図44 2次高調波振幅比と引張強さ

そこで非線形超音波を用いて閉じたき裂の検出を試みた。

直接接触あるいは非接触レーザー超音波法で大振幅、バースト波のレイリー波を励起することは困難であるので、水を媒体とする漏洩レイリー波法を用いる。このとき、き裂に起因する非線形性より強い水の非線形性を抑制する工夫が必要である。そこで水中伝搬の垂直反射波(図13左端の波形)を除くため漏洩レイリー波だけを送受するセンサー⁽⁵⁰⁾を使用した(図45)。中心周波数8.6MHz,半径15mm,奥行8mmであり、アルミニウムのレイリー波の臨界角に対応する位置だけに幅2mmのPVDF圧電素子を貼り付けた。試験片は、①平均粗さ0.03 μm に仕上げた2個の2017アルミニウムブロック、②7075アルミニウムのV溝より疲労き裂を進展させた後、き裂先端部を含む直方体試験片を切出したもの(図46)、③疲労き裂を進展させ、完全破断後破断面を接触させたものである。

受信波形をデジタルオシロスコープに300回同期加算後FFTにより2次高調波振幅を求めた。

試験片①及び③については、無圧縮応力状態では入射波振幅より隙間が大きく2次高調波が励起されないため、圧縮応力を負荷し2次高調波振幅比の変化を求めた。図47のように、平滑ブロック接触面では2次高調波振幅比は圧縮応力をごくわずかに加えると最大値をとり、応力が大きくなると低下する。

圧縮応力が37.1kPaでは、2次高調波振幅比は励起電圧

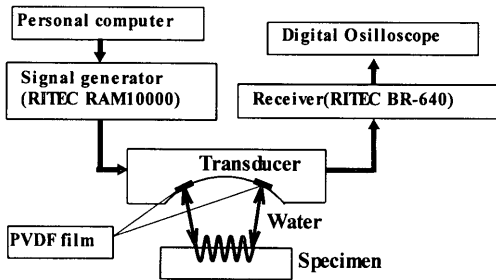


図45 漏洩レイリー波だけを送受信する超音波センサー

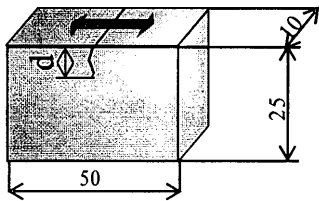


図46 疲労試験片より切出した表面波測定用サンプル (矢印の方向に表面波が伝播)

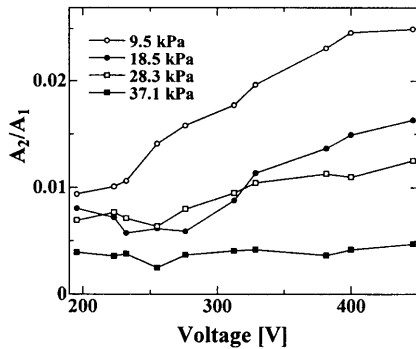


図47 平滑アルミニウムブロック界面での漏洩レイリー波の2次高調波振幅比

入射波振幅)に依存せずほぼ一定であり⁽⁵¹⁾, その値は図48のき裂を含まない平面の測定値とほぼ同一である。これは、使用したPVDFセンサーと水の非線形性によると考えられる。

V型切欠き先端から進展させた疲労き裂を完全に破断させた後、き裂面を接触させ圧縮応力を負荷しながら2次高調波を測定した結果⁽⁵¹⁾を図48に示す。この場合き裂面は結晶粒程度あるいはそれ以上の凹凸を持つので、2次高調波を励起するためには図47よりかなり大きな圧縮応力を必要とするが、一定の圧縮応力で2次高調波振幅比が最大値を取り、それ以上の圧縮応力に対しで減少することは図47と同様である。

次に、閉口き裂深さを評価するため、異なるき裂深さに対して無応力状態にて2次高調波を測定した。き裂による2次高調波と水中伝播による2次高調波の差が最大となる水中伝播距離において測定を行った。図49に示す

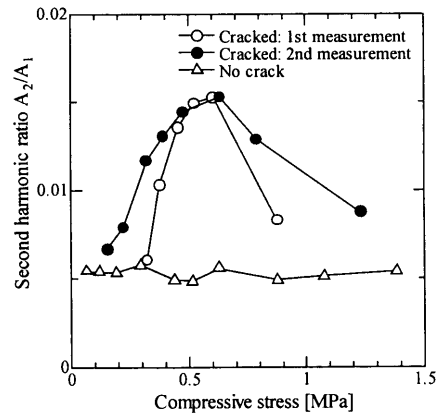


図48 完全破断疲労試験片の漏洩レイリー波の2次高調波振幅比

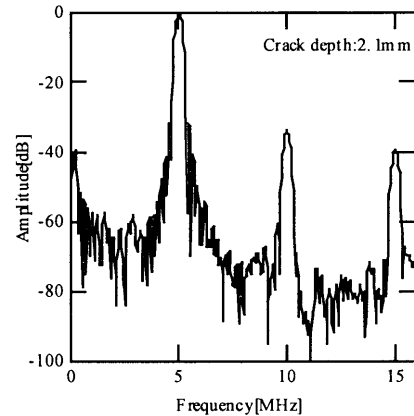


図49 漏洩レイリー波の振幅スペクトル (表面き裂深さ: 2.1mm)

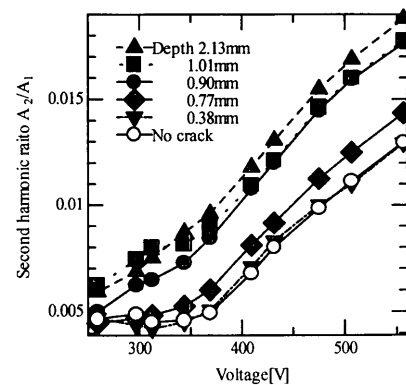


図50 き裂深さと2次高調波振幅比

ように、5MHz入射波に対して2次(10MHz)及び3次(15MHz)の高調波が受信される。異なるき裂深さに対する2次高調波振幅比を図50に示す。き裂深さが増大すると高調波振幅が有意に変化⁽⁵²⁾する。なお、き裂のない面(○印)でも水およびセンサー自体の非線形性による2次高調波が発生する。レイリー波の波長(浸透深さ)は0.6mm程度であるのに、深さ2mmのき裂の2次高調波振

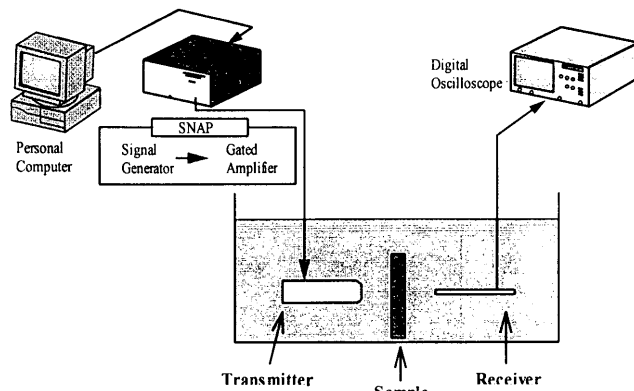


図51 水浸高調波測定システム

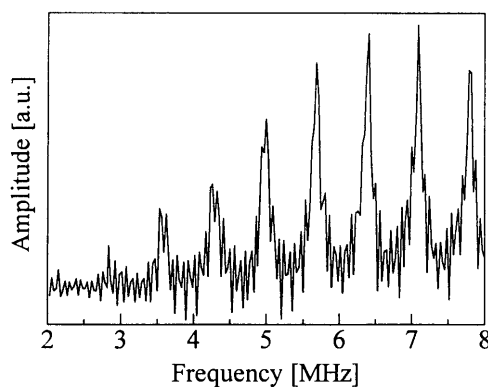


図52 引張損傷材の共鳴スペクトル

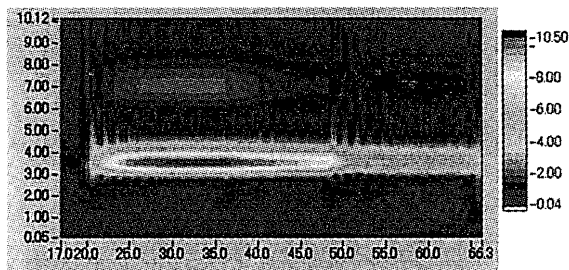


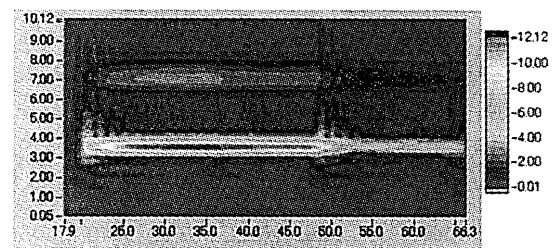
図53 受信波形のウェーブレット変換 (損傷なし)

幅比が最大となる理由は、き裂先端は局部塑性変形によりき裂面が閉じず、その上側の表面に近い部分が接触していることによると考えられる。き裂面を通過した漏洩レイリー波の伝搬時間はき裂の無い面の伝搬時間より7%と低下するだけで、ほぼ自由表面に沿って伝搬していることを別の実験により確認⁽⁵²⁾している。

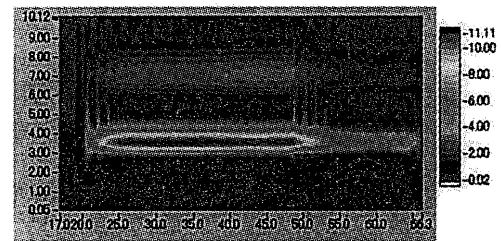
以上により漏洩レイリー波の2次高調波を用いて閉じた疲労き裂の検出・深さ評価が実験室では可能であることが確認できた。

9.4 繊維強化金属基複合材の引張損傷評価

上記の水浸高調波測定は表面に沿った走査が可能であるが、水及びPVDFセンサーの非線形性のため、2次高調



(a) Grip area.



(b) Fractured area.

図54 測定位置による2次高調波振幅比の変動

波振幅比の検出下限は約0.5%である。一方、2次高調波の検出感度の高い直接接触法では試験片に対しセンサーの走査は困難であるので、走査が容易で高感度の非線形超音波計測法が望まれる。

内部に欠陥が存在するとその固有振動数(共鳴周波数)が変化するので、周波数を掃引して高分解能で共鳴周波数変化を測定すれば微細内部欠陥検出が可能である。通常の接触式測定では、試験片以外のセンサーをも含めた複合系の共鳴周波数を測定するので、検出感度が低下する。接触拘束を最小にする超音波共鳴法が開発⁽⁵³⁾されたが、切出した試験片にしか適用できないし、欠陥位置の同定はできない。そこで、水浸透過法で板状試験片の共鳴周波数を測定し、対応する周波数の入射波に対する高調波振幅を測定する方式(図51)を用いた。引張損傷を与えた一方向強化金属基複合材料の共鳴周波数を図52に、3.54MHzの入射波に対応する損傷を受けていない試験片の受信波のウェーブレット変換結果を図53に、引張損傷材の結果を図54(a)(試験片の掴み部)と図54(b)(試験片の破断部近傍)に示す。2次高調波(7.08MHz)の強度は未損傷材と損傷材の掴み部では差が見られないが、破断部近傍では40-50 μ sで明らかに2次高調波振幅が増大している。送信に集束探触子、受信に小径のマイクロホンを用いれば2次高調波振幅最大値を画像化することで、損傷度マップを作成できる。

非接触測定である電磁超音波共鳴法を用いて2次高調波振幅あるいは減衰係数による損傷評価も行われているが、EMATの面積が大きいため数平方cmの単位の評価となるし、対象が金属に限定される。これに対し本方法は、直径0.1-0.2mmの空間分解能の2次高調波振幅測定が可能である。

10. 今後の展望

筆者の所属が機械工学科の材料強度グループであったため、超音波材料評価の対象は金属・セラミックスなどの構造材料に限られていた。今後も構造安全性を確保するために、もちろんこの方面の研究が必要であるが、多層LSI、パワーIC基盤などの電子素子関連、各種多孔質材料、積層フィルム、コーティング膜など機能材料の非破壊インプロセス評価が重要になろう。

線形超音波の分野では数値波動解析、あるいは逆解析を測定結果と組み合わせることにより、信頼性の高い材料特性評価が可能となる。数値波動解析は、差分法⁽⁵⁴⁾、境界要素法⁽⁵⁵⁾、有限要素法⁽⁵⁶⁾、半解析的有限要素法⁽⁵⁷⁾などが開発されているので、詳細は文献を参照されたい。

より基本的課題として、多孔質材料、とりわけ不規則薄膜構造材料内でどのように波が伝搬しているかはまだ分かっていないので、その理論モデルの研究が必要である。

固体材料の非線形超音波計測はある程度可能になったが、非線形弾性連続体以外では、高調波発生の定量的モデルがまだ確立されていない。材料特性評価の観点から、材料の各種微視構造と大振幅超音波の相互作用をモデル化することができれば、非線形超音波による定量的材料評価へと発展する。特に、医療超音波診断では、現在の音響インピーダンスの異なる組織からの反射波振幅による画像化だけでなく、高調波を用いた正常組織と異常組織の識別、手術後の治療過程のモニタリングなども将来可能になろう。

大学での基礎的研究が社会で利用されるにはいくらかの時間遅れがあるが、近い将来ここに紹介した超音波計測技術が実用化されること、また若い研究者が超音波計測の分野に参加されることを期待したい。

謝辞

筆者にとって全く未経験の超音波材料評価の研究を卒研究生と始めたのは1987年であり、漸く国産デジタルオシロスコープが市場に出た頃であった。当時（現在も残っているが）のアナログ法による超音波測定は、シングア라운드法、パルスエコー重畳法などの伝搬時間測定装置、多重エコー振幅の減衰測定装置など、測定する超音波特性毎に異なる測定装置が必要であった。また、アナログ単発測定では電磁ノイズの影響が不可避で、波形のデジタル収録は不可能であった。他の分野で用いられているデジタル技術がなぜ超音波非破壊評価に応用されないのが不思議であり、それが、デジタル超音波計測の出発点であった。幸い、この頃ソニックス(株)がパソコンに1枚のボードを差し込むだけで超音波信号

A/D変換し、同期加算・収録するシステムを販売し始め、市販のデジタルオシロスコープで不可能な高度の信号処理を行うことが可能になった。その後もソニックス(株)宮武和代表取締役、藤田文雄、西方修取締役には計測・信号処理の技術面の支援、特殊な装置の設計製作、海外からのレーザー超音波機器の導入など多面に亘りご支援いただいた。また、丹羽登東京大学名誉教授、福岡秀和大阪大学名誉教授、木村勝美元金属材料研究所非破壊検査室長(いずれも元日本非破壊検査協会会長)からデジタル超音波法の新規性を評価し励ましていただいた。さらに、当時の音弾性研究会を通じて、戸田裕己和歌山大学教授、岩清水幸夫立命館大学教授、平尾雅彦大阪大学教授から有益な助言を戴いた。

ここで紹介した研究は、研究室の卒研究生、大学院生諸氏ならびに共同研究者、伊藤智啓、小島正友、池野仁志、藤井郁也、佐藤剛志、山本晃浩、森貴一郎、西村尚哉、清水良行、植田正紀、表竜二、竹之内直樹、名和宏二、内藤大資、平松祐輔、藤田博、岡田純一、林山、島利彦、山本龍司、村瀬守正、永溝久志、奥村毅、小原良和、さらに論文博士の岡出元宏、林高弘、安井一氏との共同研究によるものであることを付記し謝意を表す。また、筆者の不完全接合面の非線形超音波研究は南京大学声学(音響学)研究所章徳副所長との対話から始まった。また、カナダウインザー大学G. Maev非破壊研究所所長からは有益な情報を戴いた。

共同研究、奨学寄附金、あるいはサンプル提供などにより、アイシン精機(株)、石川島播磨重工業(株)、川崎重工業(株)、新東工業(株)、新東Vセラックス(株)、新日本製鉄(株)、住友金属工業(株)、ソニックス(株)、大同特殊鋼(株)、大同メタル(株)、(株)東芝、(株)豊田自動織機製作所、トヨタ自動車(株)、TYK(株)、日本ガイシ(株)、日本発条(株)、(財)ファインセラミックスセンター、三菱重工業(株)、三菱化学(株)から支援いただいた。

また、川嶋を代表者とする下記の科学研究費補助金の交付を受けて最新の超音波計測装置を設置することができた。(1996-98)基盤研究A 低周波超音波顕微鏡の開発1260万円、(1996-97)同B 広帯域表面波を用いた表面層の損傷・劣化及び残留応力の評価510万円、(1998-00)同B 非線形表面波を用いた構造材料の初期損傷の非破壊評価1420万円、(2000-02)同B 非線形超音波顕微鏡の開発とそれによる接合界面健全性評価(展開)1340万円、(2001-03)同B 非線形超音波CTによる構造材料内部劣化及び損傷評価1520万円、(2003)萌芽レーザー超音波と赤外線サーモグラフィを組合せた非接触広域構造不健全部検出法360万円。また川嶋を代表者とする民間との以下の超音波関連共同研究を実施してき

た。アイシン精機(株)：超音波顕微鏡による応力測定，トヨタ自動車(株)：音弾性法によるボルト軸力測定，ソニックス(株)：非線形超音波法による材料特性評価，新日本製鉄(株)：デジタル超音波法による鋼中介在物検出，大同特殊鋼・大同メタル：超音波によるクラッド材のインライン検査技術，新日本製鉄(株)・福寿工業(株)：液相拡散接合部健全性評価。

参考文献

- (1) 日本機械学会，発電用原子力設備規格 維持規格 (2002年改定版)，日本機械学会，2002
- (2) M.A Breazeale and D. O. Thompson, *Appl. Phys. Lett.*, 3, 77, 1963
- (3) A. Hikata, B. B. Chick and C. Elbaum, *Appl. Phys. Lett.* 3, 195, 1963
- (4) S.U. Faassbeeder, M. Koenig, and W. Arnold, *Mat. Sci. Forum*, 210-213, 783, 1996
- (5) G. E. dace, R. B. Thompson and O. Buck, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 11, 2069, 1992
- (6) R. Zheng, R. G. Maev and I. Yu. Solodov, *Canadian J. Phys.*, 77, 927, 1999
- (7) 川嶋，日本機械学会論文集A67-655, 370-377, 2001
- (8) 和田・生島，超音波スペクトロスコープ（基礎編），培風館，1990。
- (9) 御子柴・生島，超音波スペクトロスコープ（応用編），培風館，1990
- (10) J.Achenbach ed. *Evaluation of Materials and Structures by Quantitative Ultrasonics*, Springer, 1993.
- (11) 福岡，戸田，平尾，音弾性の基礎と応用，オーム社，1993
- (12) K.Goebbels, *Materials Characterization for Process Control and Product Conformity*, CRC, 1994
- (13) J.D.Achenbach, *Wave Propagation in elastic solids*, North-Holland, 1973
- (14) 佐藤，弾性波動論，岩波，1978。
- (15) L.W.Schmerr, Jr, *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum, 1998
- (16) 超音波便覧編集委員会 超音波便覧，丸善，1999
- (17) B. M. Lempriere, *Ultrasound and elastic waves, Frequently asked questions*, Academic Press, 2002
- (18) I.A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, 1967
- (19) J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press, 1999
- (20) D.R. Hull, H. E. Kautz, and A. Vary, *Mat. Eval.*, 43, 1455, 1985
- (21) R. A. Klein, and D. M. Egle, *NDT Int.*, 19, 341, 1986
- (22) W. Sachse and Y.H. Pao, *J. Appl. Phys.* 49-8 4320, 1978
- (23) E. P. Papadakis, in *Physical Acoustics*, XII, 277, 1976
- (24) D. Gabor, *J. IEE*, 93, 429, 1946
- (25) K.Kawashima et. al., in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 15, 2039, 1996
- (26) 1980.S.I. Rokhlin and W.Wang, *J. Acoust.Soc. Am.*,91-6, 3303, 1992
- (27) K.Kawashima, Y.Shimizu, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 17, 1125,1998
- (28) K.Kawashima, D.Naitou and Y.Shimizu, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 19,1121, 2000
- (29) Brekhovskikh, L.K., *Waves in Layered Media*, Academic Press, 1990
- (30) K.Kawashima, H.Tanaka, I. Fujii, Y. Ikeda, *Proc. 4-th Special Symp. Advanced Materials*, 271, 1998
- (31) K. Kawashima, H. Fujita, T. Shima, I. Komura and T. Kubo, *Nondestructive Characterization of Materials X*, 199, 2001
- (32) K.Kawashima, I. Fujii, *Nondestructive Material Characterization VIII*, 707, 1998
- (33) M. Murase, K. Kawashima, R. Yamada and M. Watanabe, *Proc. ATEM 2003*, 印刷中，2003
- (34) R. W. Benson and V. J. Raelson, *Product Eng.*, 30, 56, 1959
- (35) R. A. Toupin and V. B. Bernstein, *J. Acoust. Soc. Am.*, 33, 216, 1961
- (36) 安井，川嶋，日本機械学会論文集 A, 66-642, 390, 2000
- (37) E. R. Dobbs, in *Physical Acoustics*, X, 127, 1976
- (38) 川嶋，小山，山本，第7回超音波による非破壊評価シンポジウム，5，2000
- (39) Y. Murata, H. Toda, T. Kizuka and J. Yohso, *Proc. 2nd Japan-US Symp. on Advances in NDT*, 94, 1999
- (40) P. D. Wilcox, M. J. S. Lowe and P. Cawley, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 20, 555, 2001
- (41) 林，村瀬，増井，第11回超音波による非破壊評価シンポジウム，印刷中，2004
- (42) R. Truell, C. Elbaum and B. B. Chick, *Ultrasonic methods in solid state physics*, Academic Press, 50, 1969.
- (43) J.Okada, K.Kawashima, N.Nishimura,, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, 3579-3582, 2001
- (44) R.Zheng, R.G.Maev and I.Y.Solodov, *Canadian J. Phys.*, 77, 927, 1999

- (45) Y. Ohara, K. Kawashima, M. Murase, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 22, 1257, 2003
- (46) 廣瀬徳豊, 博士学位論文, 東京理科大学, 1999
- (47) 平尾, 萩, 超音波TECNO, 15-2, 73, 2003
- (48) Y. Ohara, Hanaoka, K. Kawashima, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 23, 2004, 印刷中
- (49) S. Krishnan and M. O'Donnell, Ultrasonic Imaging, 18-2, 77, 1996
- (50) K. Kawashima, R. Omote, T. Ito, H. Fujita and T. Shima, Ultrasonics, 40, 611-615, 2002
- (51) K. Kawashima, H. Fujita, T. Shima, T. Okumura and Y. Ohara, Proc.6th Far-East Conf. on NDT, 201, 2002
- (52) 奥村, 佐藤, 川嶋, 非破壊検査, 53-2, 2004
- (53) A. Migliori and J. L. Sarrao, Resonant ultrasound spectroscopy, John Wiley & Sons, 1997
- (54) L. J. Bond, Ultrasonics, 17, 71, 1979
- (55) 小林, 波動解析と境界要素法, 京都大学出版会, 2000
- (56) 伊藤, 川嶋, 森, 表, 機論A, 65-63, 1589, 1999
- (57) 林 高弘, 博士学位論文, 京都大学, 2001