

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2011年2月3日(03.02.2011)



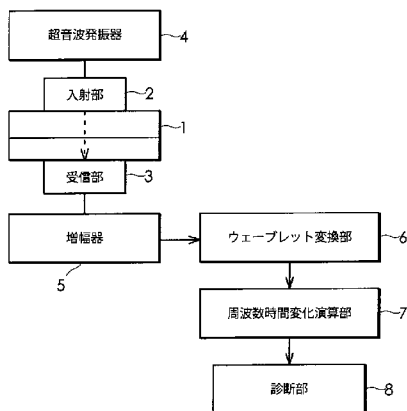
(10) 国際公開番号
WO 2011/013802 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 29/04 (2006.01)
 - (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/062905
 - (22) 国際出願日: 2010年7月30日(30.07.2010)
 - (25) 国際出願の言語: 日本語
 - (26) 国際公開の言語: 日本語
 - (30) 優先権データ:
特願 2009-179510 2009年7月31日(31.07.2009) JP
 - (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人九州大学 (KYUSHU UNIVERSITY, NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION) [JP/JP]; 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 Fukuoka (JP).
 - (72) 発明者; および
 - (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 井上 卓見 (INOUE Takumi).
 - (74) 代理人: 西浦 ▲嗣▼晴 (NISHIURA Tsuguharu); 〒1070052 東京都港区赤坂一丁目9番13号 三会堂ビルディング8階 西浦特許事務所 Tokyo (JP).
 - (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
 - (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD AND DEVICE

(54) 発明の名称: 非破壊検査方法及び装置

[図3]



4 ULTRASONIC OSCILLATOR
 2 INJECTION UNIT
 3 RECEPTION UNIT
 5 AMPLIFIER
 6 WAVELET TRANSFORM UNIT
 7 FREQUENCY TIME CHANGE CALCULATION UNIT
 8 DIAGNOSIS UNIT

(57) Abstract: Provided is a nondestructive testing method capable of diagnosing the state of an object to be tested, using a single ultrasonic pulse signal. The attenuated waveform of the single ultrasonic pulse signal received by a reception unit (3) is wavelet transformed by a wavelet transform unit (6) to thereby obtain the envelope $A(t)$ and phase $\phi(t)$ of the attenuated waveform. A frequency time change calculation unit (7) makes an approximation by an approximate expression capable of calculating the attenuated waveform using the envelope $A(t)$ and phase $\phi(t)$ of the attenuated waveform which are inputted from the wavelet transform unit (6) and finds the change of the instantaneous frequency of the attenuated waveform over time. A diagnosis unit (8) diagnoses the state of the object to be tested, on the basis of the change of the instantaneous frequency over time which is calculated by the frequency time change calculation unit (7).

(57) 要約: 単一超音波パルス信号を用いて被検査対象物の状態を診断できる非破壊検査方法を提供する。受信部3で受信した単一超音波パルス信号の減衰波形を、ウェーブレット変換部6でウェーブレット変換して、減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ とを得る。周波数時間変化演算部7は、ウェーブレット変換部6から入力された減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ を用いて、減衰波形を演算可能な近似式で近似し、減衰波形の瞬時周波数の時間変化を求める。診断部8は、周波数時間変化演算部7が演算した瞬時周波数の時間変化に基づいて、被検査対象物の状態を診断する。

WO 2011/013802 A1

明 細 書

発明の名称：非破壊検査方法及び装置

技術分野

[0001] 本発明は、超音波パルスを用いた非破壊検査方法及び装置に関するものである。

背景技術

[0002] 特許第3705960号公報（特許文献1）には、従来の超音波探傷について開示されている。従来の超音波を利用した異常診断または状態診断方法では、被検査物に投射した超音波が異常部である不連続界面で反射し、これをパルスとして測定する〔図1（a）〕。

[0003] また特開2004-340807号公報（特許文献2）には、接合面へ超音波を入射し、入射波に対する透過波の波形の歪みから微小冷接性欠陥を検出する超音波探傷方法が開示されている。そして該公報には、入射波に対する透過波の波形を周波数分析して基本波と高調波を求め、基本波の振幅と高調波の振幅の比をとり、振幅の比より微小冷接性欠陥の有無を判定する。

[0004] 従来の方法では、図1（B）に示すような明確でない亀裂や剥離（閉じた亀裂などと呼ばれる）は、超音波が通過するため通常の方法での検出は難しい。これに対し、図2に示すような連続的なパルスの超音波信号を被検査対象に投射し、図1（B）のような明確でない亀裂を通過させると、超音波の基本周波数成分に加え高調波成分や分数調波成分が条件によって観測される。図2の連続した超音波パルス信号は、例えば、1/2分数調波成分が含まれる連続パルスである。このような連続した超音波パルス信号を投射した場合に得られる現象を超音波非線形と呼び、この観測によって通常の方法では困難な亀裂や剥離の検出が試みられている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特許第3705960号公報

特許文献2：特開2004-340807号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0006] しかしながら連続した超音波パルス信号を投射して得られる超音波非線形を利用した非破壊検査方法には、以下の問題点がある。
- [0007] (1) 汎用の超音波探傷装置は単一パルスの超音波を発生させるものがほとんどである。そのため図2に示すような連続パルスの超音波を発生させるには特殊な装置が必要となる。
- [0008] (2) 連続パルスの超音波は、多層部材など多くの反射波が発生する場合には波の干渉が生じ、正しい解析ができない場合がある。
- [0009] 本発明の目的は、従来、単一超音波パルス信号を用いた場合には診断できなかった被検査対象物の状態を診断できる非破壊検査方法及び装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

- [0010] 本発明の非破壊検査方法では、まず被検査対象物に単一超音波パルス信号を入射する。本願明細書において、「単一超音波パルス信号」とは、単純な1周期のパルスに限定されるものではなく、汎用の超音波探傷装置で利用できる一般的な単一超音波パルス発生装置で使用している周波数と周期を有するパルス信号である。被検査対象物の性質によって異なるが、ゴム、コンクリート、金属等の非検査対象物に対して使用する単一超音波パルス信号は、1MHz～10MHzの周波数を有する1乃至2周期のパルス信号が好ましい。
- [0011] 次に被検査対象物の内部に入った単一超音波パルスを受信部で受信し、受信した単一超音波パルスの減衰波形の瞬時周波数とその時間変化（時間的な移り変わり）を求める。被検査対象物の内部に入って且つ受信される単一超音波パルスは、被検査対象物の内部を透過した透過波、または被検査対象物の内部で反射した反射波のいずれでもよい。ここで減衰波形の瞬時周波数は、減衰波形の瞬時の位相変化率と言い換えることもできる。なお瞬時周波数

については、例えば、戸田浩、章忠及び川畑洋昭が著作の「最新ウェーブレット実践講座入門と応用」（ソフトバンククリエイティブ株式会社発行）の40頁に説明されている。

[0012] そして本発明の方法では、瞬時周波数の時間変化に基づいて、被検査対象物の状態を診断する。発明者の研究によると、明確でない亀裂を通過した単一超音波パルス信号の減衰波形の周波数は、減少する傾向を示す。したがって単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数の時間変化を見ることにより、従来の単一超音波パルス信号を用いた方法では見つけることができないような異常な状況を発見することができる。本発明では、単一超音波パルス信号を利用するため、反射波の干渉を受けにくく、周波数変化のわずかな量を捉えることができ、従来の高調波成分や分数調波成分を捉える方法よりも精度が高い。

[0013] 例えば、予め定めた時間間隔で減衰波形の瞬時周波数を求め、瞬時周波数の時間変化のパターンの形状を、正常な被検査対象物について事前に測定した基準となる瞬時周波数の時間変化のパターンの形状と比較することにより、被検査対象物の状態を診断することができる。なお瞬時周波数の時間変化に基づく診断の具体的な手法は、任意である。

[0014] 減衰波形の瞬時周波数の求め方も、任意である。例えば、受信した単一超音波パルス信号の減衰波形 $u(t)$ を、該減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表される $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似し、この近似式中の位相から時刻 t における角周波数を求め、角周波数から時刻 t における瞬時周波数を求めるようにしてもよい。減衰波形をこのような近似式で表現した上で、瞬時周波数を求めると、1乃至2周期程度の超音波パルス信号を用いる場合でも、より高い精度で瞬時周波数を求めることができる。

[0015] なお減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ を、ウェーブレット変換またはヒルベルト変換を利用して求めると、1乃至2周期程度の少ない超音波パルス信号の減数波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ を簡単且つ確実に得

ることができる。

[0016] 本発明の非破壊検査装置は、被検査対象物に単一超音波パルス信号を入射するパルス入射部と、被検査対象物内を通った単一超音波パルス信号を受信する受信部と、受信した単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数の時間変化を求める周波数時間変化演算部と、周波数時間変化演算部が演算した瞬時周波数の時間変化に基づいて、被検査対象物の状態を診断する診断部とを備えている。そして診断部は、正常な状態の被検査対象物について事前に測定した瞬時周波数の時間変化を少なくとも一つの判定基準として記憶しており、少なくとも一つの判定基準と周波数時間変化演算部が演算した瞬時周波数の時間変化とを比較して、被検査対象物の状態を診断する。本発明の非破壊検査装置によれば、単一超音波パルス信号の減衰波の瞬時周波数から診断をするため、反射波の干渉を受けにくく、周波数変化のわずかな量を捉えることができ、従来の高調波成分や分数調波成分を捉える装置よりも精度で診断をすることができる。

[0017] パルス入射部は、1 MHz ~ 10 MHz の周波数を有する1乃至2周期のパルス信号を前記単一超音波パルス信号として発生するものである。また周波数時間変換演算部は、受信した単一超音波パルス信号の減衰波形 $u(t)$ を、該減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表される $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似し、近似式中の位相から時刻 t における瞬時角周波数を求め、瞬時角周波数から時刻 t における瞬時周波数を求める。

[0018] パルス入射部及び受信部は、被検査対象物を透過した単一超音波パルス信号を受信するように被検査対象物に配置しても、また被検査対象物内で反射した単一超音波パルス信号を受信するように被検査対象物に配置してもよい。

図面の簡単な説明

[0019] [図1] (A) 及び (B) は、超音波探傷法を説明するために用いる図である。
[図2] 超音波非線形の例 (1 / 2 分数調波) を示す図である。

[図3]本発明の非破壊検査装置の構成の一例を示す図である。

[図4] (A) 及び (B) は、ウェーブレット変換を説明するために用いる波形図である。

[図5]ウェーブレット変換の例を示す図であり、(A) は減衰振動波形 $u(t)$ を示し、(B) は $u(t)$ に対するウェーブレット変換結果を示す図である。

[図6] (A) は1枚のゴム板を通過した超音波パルスを示す図であり、(B) はその時間に対する周波数変化を示す図である。

[図7] (A) は加圧した2枚のゴム板を通過した超音波パルスを示す図であり、(B) はその時間に対する周波数変化を示す図である。

[図8] 2枚のゴム板間の加圧力の違いによる周波数変化の違い(実線:加圧力大, 点線:加圧力小)を示す図である。

[図9]反射波に基づいて診断する場合に用いる被破壊検査装置の構成を示す図である。

[図10]試験に用いた供試体の構成と、推定される複数の反射波の経路を示す図である。

[図11]単一超音波パルス信号を投射したときに受信された4種類の反射パルスA, B, C及びDの波形を示す図である。

[図12]3つの条件下において、反射パルスA~Dの瞬時周波数の時間変化を求めた結果を示す図である。

発明を実施するための形態

[0020] 以下図面を参照して、本発明の非破壊検査方法及び非破壊検査装置の実施の形態を詳細に説明する。図3は、本発明の非破壊検査方法を実施する非破壊検査装置の実施の形態の一例の構成を示す図である。1は、2枚のゴムの板を接合した被検査対象物である。本実施の形態では、被検査対象物を間に挟むように、単一超音波パルス信号のパルス入射部2と受信部3を配置する。超音波発振器4は、1MHz~10MHzの周波数を有する1乃至2周期のパルス信号を入射部2に送信する。入射部2は、被検査対象物1に単一超

音波パルス信号を入射する。受信部 3 は、被検査対象物 1 内に入ってその内部を透過した単一超音波パルス信号（透過波）を受信する。受信部 3 で受信した単一超音波パルス信号の減衰波形は、増幅器 5 で増幅されてウェーブレット変換部 6 に入力される。ウェーブレット変換部 6 は、減衰波形をウェーブレット変換して、後述する減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ を出力する。周波数時間変化演算部 7 は、ウェーブレット変換部 6 から入力された減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ を用いて、減衰波形を演算可能な近似式で近似し、受信した単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数の時間変化を求める。なおこの演算については、後に詳しく説明する。診断部 8 は、周波数時間変化演算部 7 が演算した瞬時周波数の時間変化に基づいて、被検査対象物の状態を診断する。本実施の形態で用いる診断部 8 は、正常な状態の被検査対象物について事前に測定した瞬時周波数の時間変化を少なくとも一つの判定基準として記憶している。そして少なくとも一つの判定基準と周波数時間変化演算部 7 が演算した瞬時周波数の時間変化とを比較して、被検査対象物の状態を診断する。

[0021] ウェーブレット変換部 6 でのウェーブレット変換について説明する。ウェーブレット変換は次式で定義される。

[数1]

$$(W_{\psi}f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

[0022] ここに、 $\psi(t)$ がマザーウェーブレットと呼ばれる局所的な関数であり、よく用いられるガボールウェーブレットでは以下のようなになる。

[数2]

$$\psi(t) = \frac{1}{4\sqrt{\pi\alpha}} e^{-t^2/(4\alpha)} e^{i\omega_0 t} \quad (2)$$

[0023] ω_0 はウェーブレットの基本周波数成分である。a はスケーリングパラメータと呼ばれ、これが小さくなるほど周波数成分が高くなる。例えば、a が $1/2$ ならば周波数成分は $2\omega_0$ となる。b はトランスレートパラメータと呼ばれ、時間の情報を表す。したがって、ウェーブレット変換結果 $(W_\psi f)(b, a)$ は、時刻 b における ω_0/a の周波数成分がどれほどあるかを示している。 $\psi(t)$ は複素数であるので、ウェーブレット変換結果 $(W_\psi f)(b, a)$ も複素数となる。通常のウェーブレット変換結果は、複素数である $(W_\psi f)(b, a)$ の大きさ、すなわち、 $[(\text{実部})^2 + (\text{虚部})^2]^{1/2}$ として表す。例として、図 4 (a) に示す信号に対してウェーブレット変換を行った結果を図 4 (b) に示す。図 4 (b) の横軸が時間 [式 (1) の b に相当]、縦軸が周波数 [式 (1) の ω_0/a に相当] であり、等高線でその時間における周波数成分の強弱を表している。この図から、時間とともに信号の周波数 (周波数) が上昇していく様子がわかる。

[0024] このように、通常のウェーブレット変換は、時間一周波数平面上の等高線や色の濃さなどで、時間と周波数両方の情報を与えることに大きな特徴がある。

[0025] 本実施の形態で用いるウェーブレット変換は、式 (1) の定義式において $a = 1$ と固定し、マザーウェーブレットの基本周波数である式 (2) の ω_0 を超音波パルスの主要周波数と一致させる。例として、超音波波形ではないが、図 5 (a) に示す減衰振動波形 $u(t)$ にこのウェーブレット変換を適用してみる。 $a = 1$ と固定しているので、ウェーブレット変換結果はトランスレートパラメータ b のみの関数となる。結果を $g(b)$ と表すと下記の式 (3) の通りになる。

[数3]

$$g(b) = (W_\psi f)(b, 1) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) \overline{\psi(t-b)} dt \quad (3)$$

[0026] トランスレートパラメータ b は時間 t と等価であるため、引数 b を t と置

き換え、改めてウェーブレット変換結果を $g(t)$ と表す。 $g(t)$ は複素数であり、これを用いてもとの減衰波形 $u(t)$ を以下のように近似する。 $g'(t)$ [下記式(4)中で g の上にバーを表示してある] は $g(t)$ の複素共役である。

[数4]

$$u(t) \cong g(t) + \bar{g}(t) = 2 \operatorname{Re}[g(t)] \quad (4)$$

[0027] この結果を図5(b)の実線に示す。減衰波形の立ち上がりの部分がもとの波形 $u(t)$ よりなだらかになっているが、それ以外は良く近似されることがわかる。一方、 $g(t)$ の虚部について $2 \operatorname{Im}[g(t)]$ を図5(B)の点線で示す。これは、 $2 \operatorname{Re}[g(t)]$ の位相を $1/4$ 周期ずらしたものに相当する。これらの関係を用いると、減衰波形 $u(t)$ を次のように近似することができる。

[数5]

$$u(t) \cong A(t) \sin \phi(t)$$

$$A(t) = 2\sqrt{\operatorname{Re}[g(t)]^2 + \operatorname{Im}[g(t)]^2} \quad (5)$$

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}[g(t)]}{\operatorname{Re}[g(t)]}$$

[0028] $A(t)$ は時刻 t における振幅であり、この減衰波形の包絡線となる。 $\phi(t)$ は時刻 t における位相であり、 $\phi(t)$ の時間微分がその時刻 t における減衰波形の瞬時角周波数 $\omega(t)$ に相当する。すなわち、瞬時角周波数 $\omega(t)$ は以下のように表すことができる。

[数6]

$$\omega(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (6)$$

[0029] そして時刻 t における瞬時周波数 $f(t)$ は、

[数7]

$$f(t) = \omega(t) / 2\pi \quad (7)$$

[0030] である。式 (6) の微分は数値的に行う。

[0031] 本実施の形態の周波数時間変化演算部 7 では、受信した単一超音波パルス信号の減衰波形 $u(t)$ を、減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表されるウェーブレット変換で求めた上記 (5) 式における $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似する。そしてこの近似式中の位相 $\phi(t)$ から時刻 t における瞬時角周波数 $\omega(t)$ を求める。その上で、瞬時角周波数 $\omega(t)$ から時刻 t における瞬時周波数 $f(t)$ を求める。

[0032] 次に具体的な実験例を示す。まず、厚さ約 2 mm のゴム板に圧力をかけ、このゴム板（被検査対象）の一方の側に配置した入射部 2 は単一超音波パルス信号を投射し、反対側に配置した受信部 3 で受信する。図 6 (A) は、受信部 3 が受信した単一超音波パルス信号の波形を示しており、図 6 (B) は、周波数時間変化演算部 7 が演算した超音波パルス信号の瞬時周波数の時間的移り変わりを示す。診断部 8 では、図 6 (B) に示す瞬時周波数の時間的移り変わり（時間変化）を判定基準として記憶する。図 6 (B) の例では、超音波パルス信号の減衰波形の周波数は、6 MHz 付近で時間とともに若干上昇していることがわかる。なお図 6 (B) の例において、中央の波形が判定基準となる波形であって、中央の波形の両側に現れる波形は、ノイズ波形である。

[0033] これに対し、厚さ約 1 mm のゴム板を 2 枚重ねて 2 mm 厚と同じ圧力をか

ける。2枚のゴム間には微小な隙間が存在する。上記同様に単一超音波御パルス信号を入射部2から投射して反対側の受信部3で透過波を受信する。得られた超音波パルス信号の減衰波形の一例を図7(A)に示し、この減衰波形の瞬時周波数の時間的移り変わり(時間変化)を図7(B)に示す。図7(B)においても、図6(B)と同様に、中央の波形が判定対象となる波形であって、中央の波形の両側に現れる波形は、ノイズ波形である。

[0034] 図7(A)と図6(A)を比較すると、受信部3が受信した超音波パルス信号の波形はほとんど変わらないのに、瞬時周波数の時間変化には明らかな低下(5.8MHz付近)が認められる。つまり、この瞬時周波数の時間変化の低下からゴムの間に微小な隙間が存在することが推測できる。診断部8では、瞬時周波数の時間変化のパターンの比較を利用して診断を行う。

[0035] 前述のように、単一超音波パルス信号の瞬時周波数の時間的変化の様子は、物体内部境界の接触状態によって変化する。その結果、この瞬時周波数の時間的変化の現象により、物体内部境界の接触状態を推測できる。前述の実験と類似の実験で、ゴム板の圧縮力が強い場合の瞬時周波数の時間変化を図8中に実線で示し、圧縮力が弱い場合の瞬時周波数変化を図8の点線に示す。図8において、圧縮力が弱い場合の瞬時周波数の時間変化(点線)のパターンは大きく波打つように変動しており、圧縮力が強い場合の瞬時周波数の時間変化(実線)のパターンとは大きく異なっている。また、周波数の平均値も下降していることがわかる。このことから、ゴム板に加えた圧縮力の違い、すなわち、ゴム板間の接触状態の違いを推測できる。なお図8においても、図6(B)及び図7(B)と同様に、中央の波形が判定対象となる波形であって、中央の波形の両側に現れる波形は、ノイズ波形である。

[0036] なお、上記実施の形態は、透過波のみを対象にしているが、被検査対象物の内部に入って、その内部にある何らかの反射層(ギャップ層、材質変化層等)で反射した反射波に基づいても、同様に診断ができる。図9は反射波に基づいて診断する場合に用いる被破壊検査装置の構成を示す。図9においては、図3の透過波に基づいて診断する場合に用いる被破壊検査装置の構成要

素と同様の構成要素には、図3に付した符号の数に10の数を加えた数の符号をしてある。本実施の形態では、パルス入射部12から被検査対象物11に入射してその内部で反射して戻ってくる単一超音波パルス信号の複数の反射波を受信部13で受信できるように、パルス入射部12と受信部13とがセットになったセンサユニット10を用いる。このセンサユニット10を、被検査対象物11の表面に添って移動させることにより反射波を受信部13で受信する。本実施の形態では、反射波の減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とを求めるために、図3のウェーブレット変換部6に代えてヒルベルト変換部16を用いている。反射波形 $u(t)$ をヒルベルト変換して得られる関数 $h(t)$ は、次式で定義される。

[数8]

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(s)}{t-s} ds \quad (8)$$

[0037] 上記式において $u(s)$ は単一超音波パルス信号の減衰波形であり、また s は積分パラメータである。 $h(t)$ は $u(t)$ の位相を $\pi/4$ 周期ずらしたものに相当する。そして時刻 t における位相 $\phi(t)$ は、以下の式から求められる。

[数9]

$$\phi(t) = \tan^{-1} \frac{h(t)}{u(t)} \quad (9)$$

[0038] そして時刻 t における瞬時周波数 $f(t)$ は、以下の式から求めることができる。

[数10]

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (10)$$

[0039] 周波数時間変化演算部 17 は、上記式に基づいて瞬時周波数を演算し、前述の周波数時間変化演算部 7 と同様にして瞬時周波数の時間変化を求める。

[0040] 反射波を用いる本実施の形態でも効果があることを確認するために試験を行った。この試験では、内部状態の診断として、接着剤の接着度強度評価に対する実現可能性を試験した。試験対象として、図 10 に示すように、2 枚の亚克力板をエポキシ系接着剤で接着した簡単な供試体を作成した。その際、以下に示す 3 つの異なる条件で接着を行った。使用した接着剤は、所定の接着強度を得るには塗布後 10 分以内の接着が必要なものである。したがって接着剤塗布から接着までの時間が長いほど接着度は低下することになる。

[0041] [条件 1] 接着剤塗布、20 分後接着（接着度低）

[条件 2] 接着剤塗布、10 分後接着（接着度中）

[条件 3] 接着剤塗布、すぐに接着（接着度高）

図 9 に示す非破壊検査装置を用いて、図 10 に示すように、供試体の一方から単一超音波パルス信号を投射し、供試体内部で反射してきた超音波を測定した。条件 1 の場合において、単一超音波パルス信号を投射したときに受信された 4 種類の反射波 A, B, C 及び D は、図 11 に示す波形のようになる。そしてこれらの反射波の経路は、図 10 に A, B, C 及び D で示すような経路で反射しているものと推測される。条件 2 及び 3 の反射パルスの場合の表示は省略するが、測定データからは、それぞれの条件における音速や反射パルス A ~ D の振幅に大きな違いを確認することはできなかった。また、反射パルス A ~ D に対し区分的に周波数解析を行い、それぞれの周波数スペクトルを求めても、各条件による周波数成分の違いを明確に見出すことはできなかった。すなわち、音速の変化、振幅の変化および周波数成分の変化からは接着条件 1 ~ 3 を区別できないことが確認された。

[0042] 条件 1 ~ 3 におけるそれぞれの反射パルス A ~ D の瞬時周波数の時間変化を求めた結果を図 12 に示す。図 12 において、条件 1（20 分後接着）の結果は黒線、条件 2（10 分後接着）の結果は点線、条件 3（すぐに接着）の

結果はグレーの線で表している。アクリル部分のみを通過した反射パルスA、Cの瞬時周波数の時間変化は条件1～3でほとんど差がないが、接着剤部分を通過した反射パルスB、Dの瞬時周波数の時間変化は条件1～3で大きく異なり、接着剤塗布から時間をおかずに接着するほど、すなわち、接着強度が高いほど瞬時周波数の時間変化が低下している。したがって、接着剤部分を通過した反射パルスの瞬時周波数の時間変化から、接着強さが評価できることがわかる。通常の周波数スペクトルではこのような明確な違いを見出すことができないため、本実施の形態のように瞬時周波数の時間変化に着目する方法は有効であることが確認された。

- [0043] 上記実施の形態では、単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数を求めるのにウェーブレット変換及びヒルベルト変換を利用したが、本発明はウェーブレット変換及びヒルベルト変換を利用することにこだわるものではなく、その他の公知の方法で超音波パルス信号の減衰波形の周波数の時間変化が求められれば、その方法を用いればよい。

産業上の利用可能性

- [0044] 本発明によれば、単一超音波パルス信号を利用するため、汎用の超音波探傷装置を利用できる。また、単一超音波パルス信号はせいぜい1.5～2周期程度の波形であるため、反射波の干渉を受けにくい。したがって本発明によれば、減衰波形の瞬時周波数の時間変化のわずかな量を捉えることができ、高調波成分や分数調波成分を捉える方法より精度が高い診断をすることができる。

符号の説明

- [0045] 1, 11 被検査対象物
2, 12 パルス入射部
3, 13 受信部
4, 14 超音波発信器
5, 15 増幅部
6 ウェーブレット変換部

- 1 6 ヒルベルト変換部
- 7, 1 7 周波数時間変化演算部
- 8, 1 8 診断部

請求の範囲

- [請求項1] 被検査対象物に1MHz～10MHzの周波数を有する1乃至2周期のパルス信号である単一超音波パルス信号をパルス入射部から入射し、
- 前記被検査対象物の内部に入った前記単一超音波パルス信号を受信部で受信し、
- 前記受信した単一超音波パルス信号の前記減衰波形 $u(t)$ を、該減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表される $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似し、前記近似式中の前記位相から時刻 t における瞬時角周波数を求め、前記瞬時角周波数から時刻 t における前記瞬時周波数を求め、前記瞬時周波数の時間変化に基づいて、前記被検査対象物の状態を診断することを特徴とする非破壊検査方法。
- [請求項2] 被検査対象物に単一超音波パルス信号を入射し、
- 前記被検査対象物の内部に入った前記単一超音波パルス信号を受信し、
- 受信した前記単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数の時間変化を求め、
- 前記瞬時周波数の時間変化に基づいて、前記被検査対象物の状態を診断することを特徴とする非破壊検査方法。
- [請求項3] 前記単一超音波パルス信号は、1MHz～10MHzの周波数を有する1乃至2周期のパルス信号である請求項2に記載の非破壊検査方法。
- [請求項4] 前記受信した単一超音波パルス信号は、前記被検査対象物を透過した透過波である請求項1または2に記載の非破壊検査方法。
- [請求項5] 前記受信した単一超音波パルス信号は、前記被検査対象物内で反射した反射波である請求項1または2に記載の非破壊検査方法。
- [請求項6] 前記受信した単一超音波パルス信号の前記減衰波形 $u(t)$ を、該

減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表される $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似し、

前記近似した式中の前記位相から時刻 t における瞬時角周波数を求め、前記瞬時角周波数から時刻 t における前記瞬時周波数を求めることを特徴とする請求項 2 に記載の非破壊検査方法。

[請求項 7] 前記減衰波形の包絡線 $A(t)$ と位相 $\phi(t)$ が、ウェーブレット変換を利用して求められたものである請求項 1 または 2 に記載の非破壊検査方法。

[請求項 8] 前記瞬時周波数の時間変化のパターンの形状を、正常な被検査対象物について事前に測定した基準となる瞬時周波数の時間変化のパターンの形状と比較することにより、前記被検査対象物の状態を診断することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の非破壊検査方法。

[請求項 9] 被検査対象物に単一超音波パルス信号を入射するパルス入射部と、前記被検査対象物内に入った前記単一超音波パルス信号を受信する受信部と、

受信した前記単一超音波パルス信号の減衰波形の瞬時周波数の時間変化を求める周波数時間変化演算部と、

前記周波数時間変化演算部が演算した前記瞬時周波数の時間変化に基づいて、前記被検査対象物の状態を診断する診断部とを備えていることを特徴とする非破壊検査装置。

[請求項 10] 前記診断部は、正常な状態の被検査対象物について事前に測定した瞬時周波数の時間変化を少なくとも一つの判定基準として記憶しており、前記少なくとも一つの判定基準と前記周波数時間変化演算部が演算した前記瞬時周波数の時間変化とを比較して、前記被検査対象物の状態を診断することを特徴とする請求項 9 に記載の非破壊検査装置。

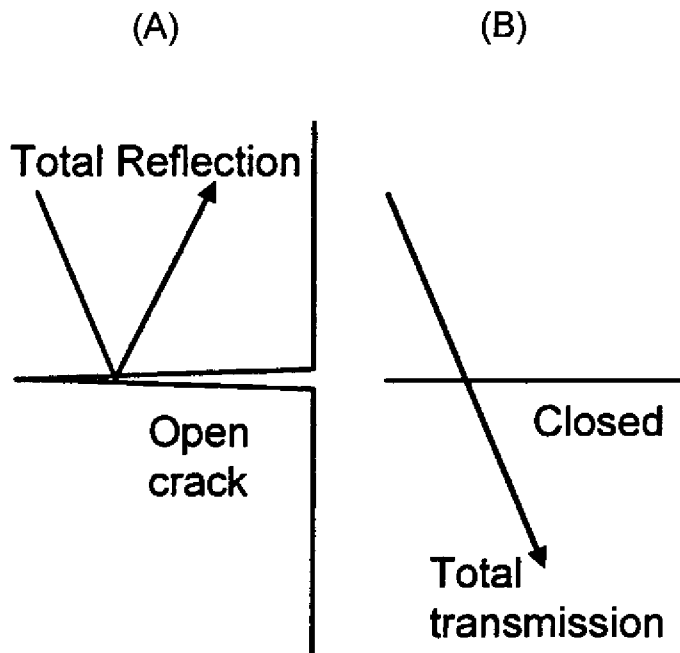
[請求項 11] 前記パルス入射部は、 $1\text{MHz} \sim 10\text{MHz}$ の周波数を有する 1 乃至 2 周期のパルス信号を前記単一超音波パルス信号として発生するものであり、

前記周波数時間変換演算部は、前記受信した単一超音波パルス信号の前記減衰波形 $u(t)$ を、該減衰波形の包絡線 $A(t)$ と時刻 t における位相 $\phi(t)$ とから表される $u(t) = A(t) \sin \phi(t)$ の近似式で近似し、前記近似式中の前記位相から時刻 t における瞬時角周波数を求め、前記瞬時角周波数から時刻 t における前記瞬時周波数を求めることを特徴とする請求項 10 に記載の非破壊検査方法。

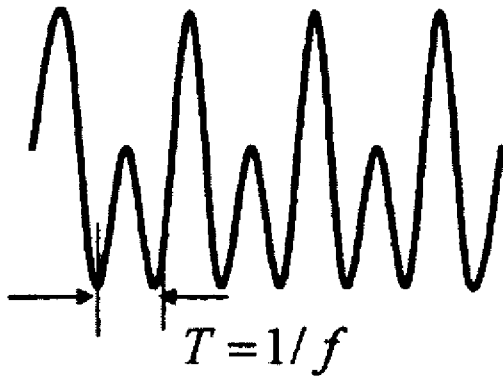
[請求項 12] 前記パルス入射部及び前記受信部が、前記被検査対象物を透過した前記単一超音波パルス信号を受信するように前記被検査対象物に配置される請求項 9 に記載の非破壊検査装置。

[請求項 13] 前記パルス入射部及び前記受信部が、前記被検査対象物内で反射した前記単一超音波パルス信号を受信するように前記被検査対象物に配置される請求項 9 に記載の非破壊検査装置。

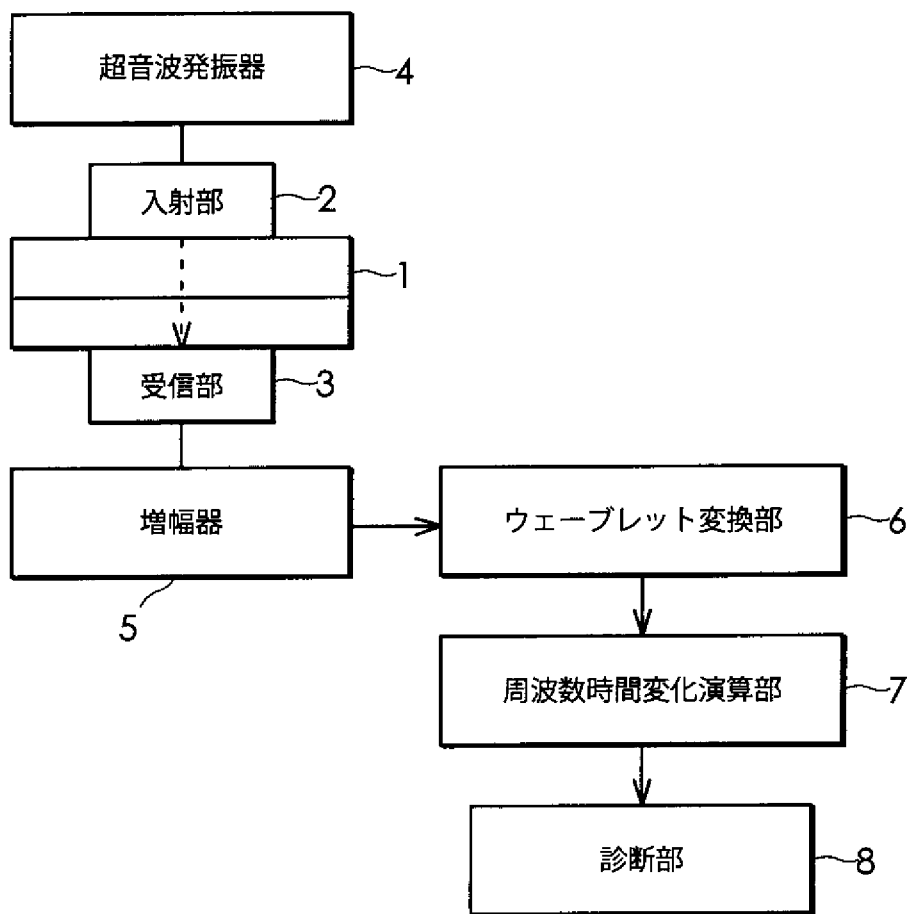
[圖1]



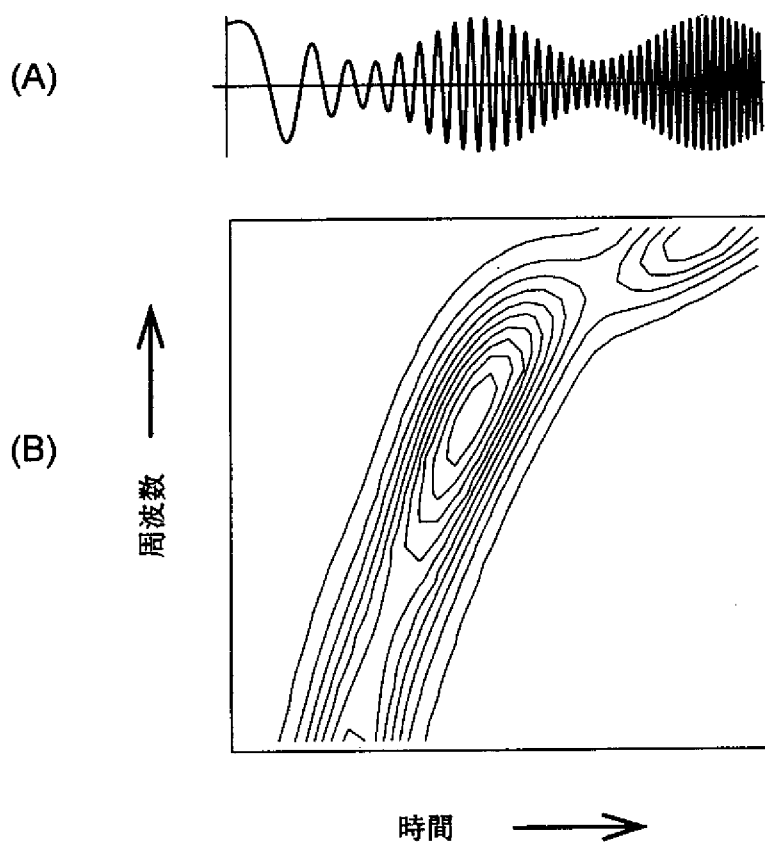
[圖2]



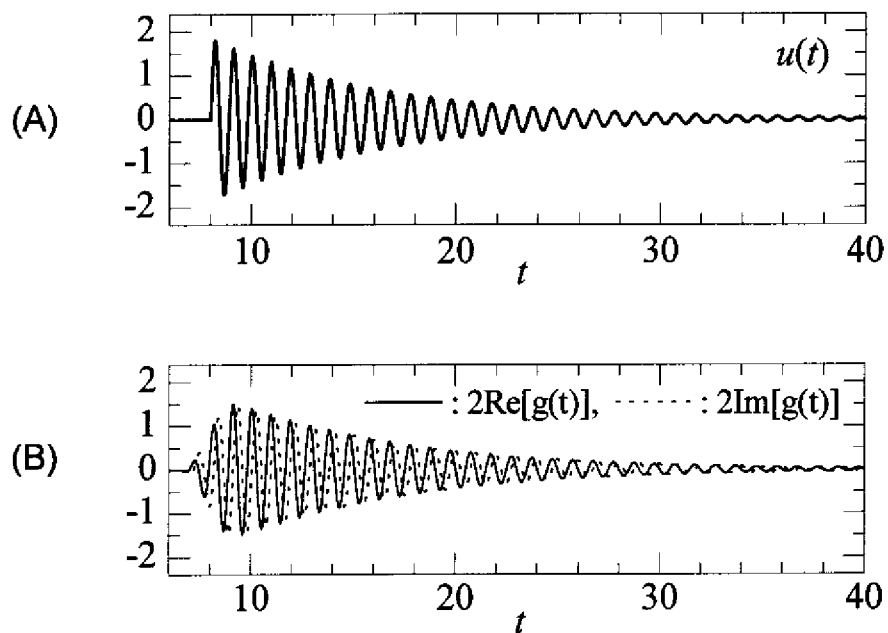
[図3]



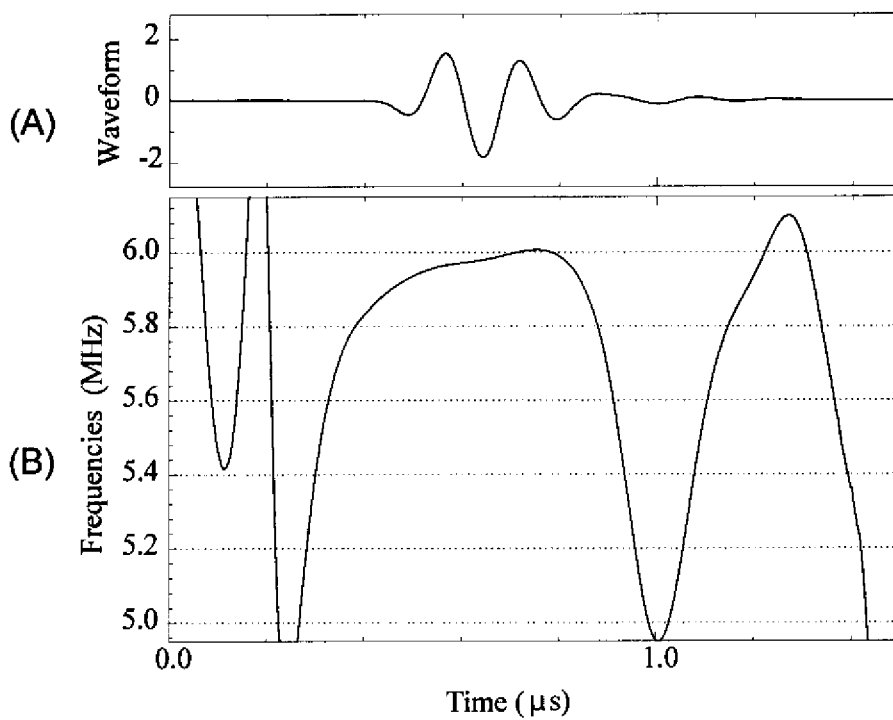
[図4]



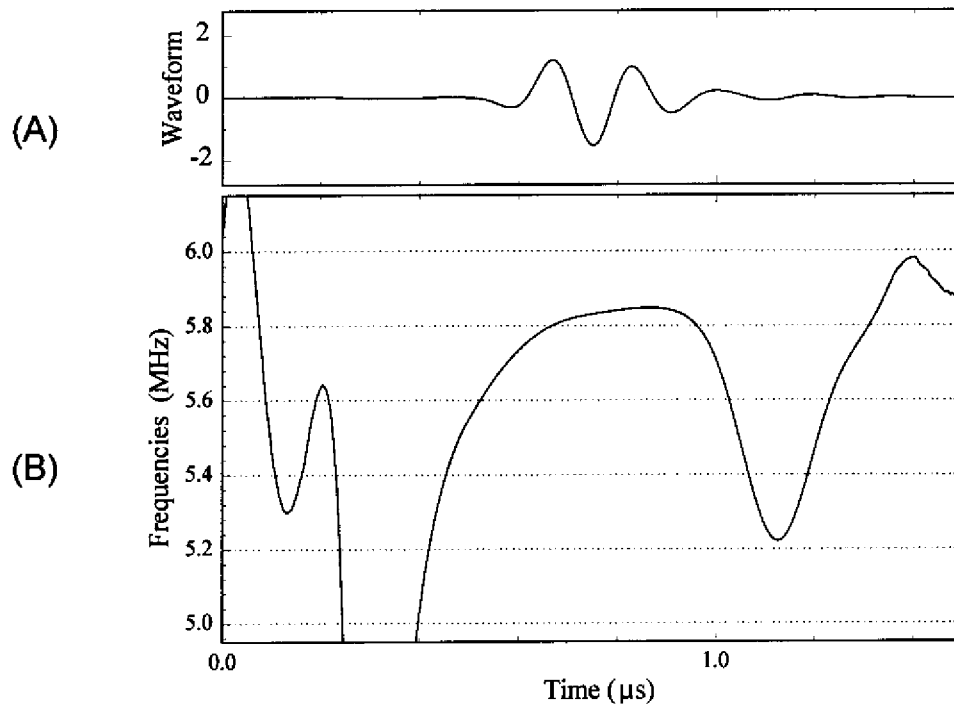
[圖5]



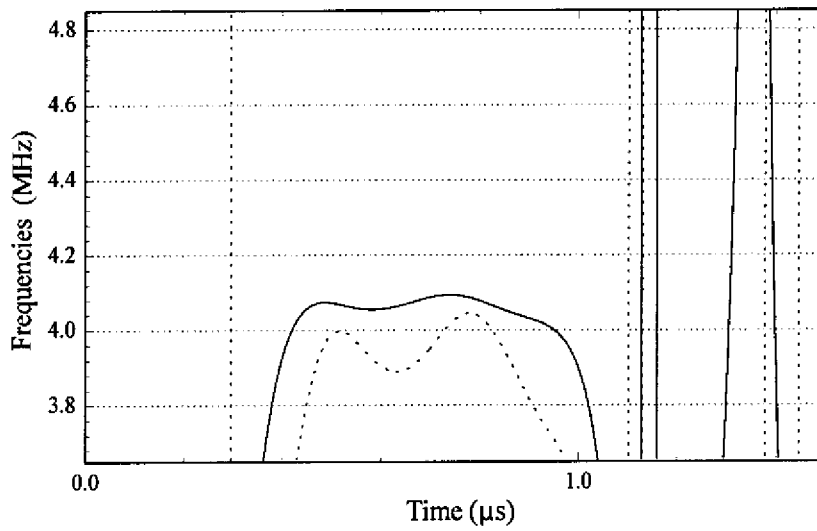
[圖6]



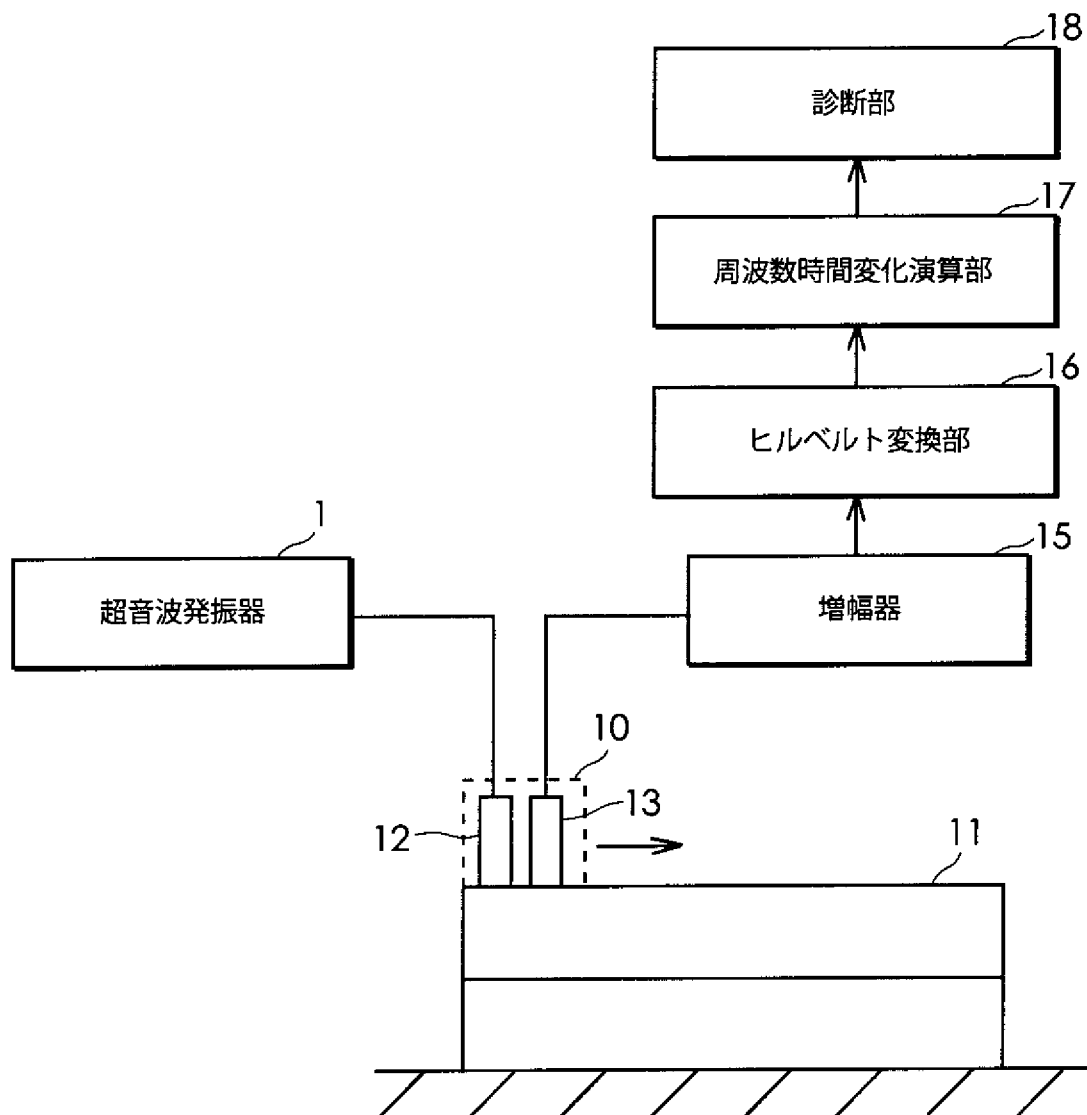
[7]



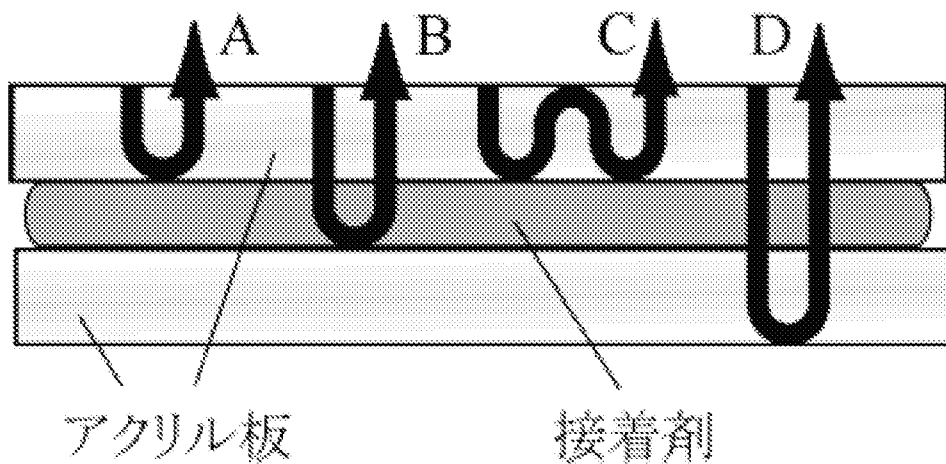
[8]



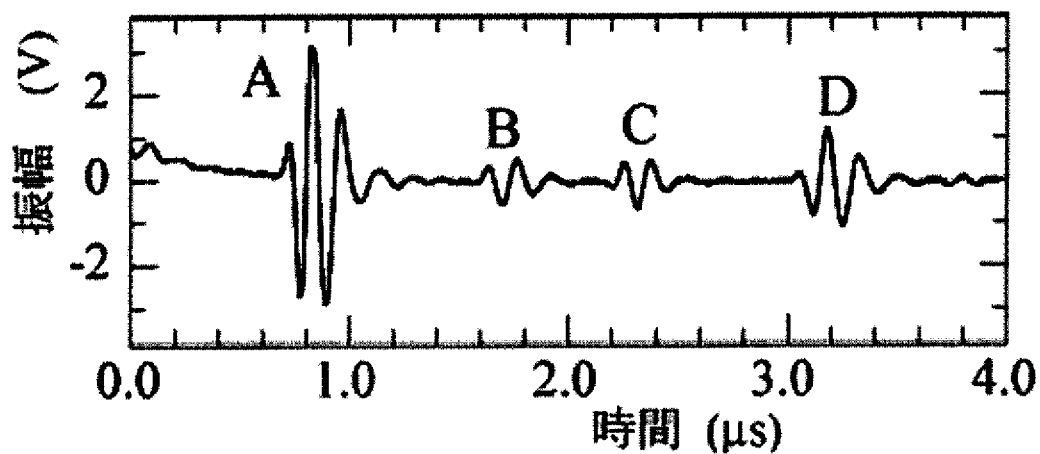
[図9]



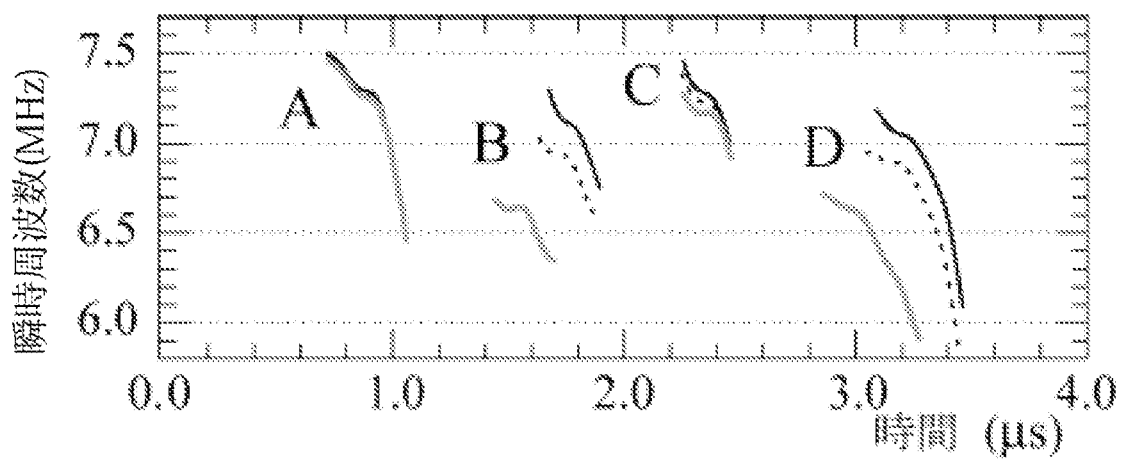
[図10]



[図11]



[図12]



——:すぐに接着 :10分後接着 - - - - :20分後接着

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/062905

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N29/04 (2006.01) i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01N29/00-29/52		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2010 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2010 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2010		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 3705960 B2 (Shikoku-X-Ray, Inc.), 12 October 2005 (12.10.2005), entire text; all drawings (Family: none)	1-13
A	JP 2004-340807 A (JFE Steel Corp.), 02 December 2004 (02.12.2004), entire text; all drawings (Family: none)	1-13
A	Takumi INOUE et al., "Estimation of Time-Varying Vibration Parameters by the Segmental Use of the Harmonic Wavelet", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, vol.74, no.741, 2008.05, 1145-1153	1-13
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 27 August, 2010 (27.08.10)		Date of mailing of the international search report 07 September, 2010 (07.09.10)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/062905

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P, X	Takumi INOUE et al., "Choonpa Shuhasu Hencho no Kenshutsu ni yoru Buttai Naibu no Jotai Sokutei", The Japan Society of Mechanical Engineers, Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM Ronbunshu, no.09/23, 05 August 2009 (05.08.2009), Ronbun no.205	2-4, 8-10, 12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N29/04(2006.01)i		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. G01N29/00-29/52		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2010年 日本国実用新案登録公報 1996-2010年 日本国登録実用新案公報 1994-2010年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語) JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 3705960 B2 (四国エックス線株式会社) 2005. 10. 12, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-13
A	JP 2004-340807 A (JFEスチール株式会社) 2004. 12. 02, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-13
A	井上卓見、外2名, ハーモニックウェーブレットの区分利用による時変振動パラメータ推定, 日本機械学会論文集 (C編), 74 巻/741号, 2008. 05, 1145-1153	1-13
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 27. 08. 2010	国際調査報告の発送日 07. 09. 2010	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 鹿戸 俊介 電話番号 03-3581-1101 内線 3292	2W 3108

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
P, X	井上卓見、外 1 名, 超音波周波数変調の検出による物体内部の状態推定, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009 CD-ROM 論文集, No. 09/23, 2009. 08. 05, ロンブン NO. 205	2-4, 8-10, 12