

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4166222号
(P4166222)

(45) 発行日 平成20年10月15日 (2008.10.15)

(24) 登録日 平成20年8月8日 (2008.8.8)

(51) Int. Cl.

F I

GO 1 N 29/04 (2006.01)

GO 1 N 29/04 5 O 2

GO 1 N 29/24 (2006.01)

GO 1 N 29/24 5 O 2

請求項の数 6 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2005-16106 (P2005-16106)	(73) 特許権者	507250427
(22) 出願日	平成17年1月24日 (2005.1.24)		日立GEニュークリア・エナジー株式会社
(65) 公開番号	特開2005-274557 (P2005-274557A)		茨城県日立市幸町三丁目1番1号
(43) 公開日	平成17年10月6日 (2005.10.6)	(74) 代理人	110000442
審査請求日	平成18年12月7日 (2006.12.7)		特許業務法人 武和国際特許事務所
(31) 優先権主張番号	特願2004-46583 (P2004-46583)	(72) 発明者	河野 尚幸
(32) 優先日	平成16年2月23日 (2004.2.23)		茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		式会社 日立製作所 電力・電機開発研究
早期審査対象出願		(72) 発明者	松井 哲也
			茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株
			式会社 日立製作所 電力・電機開発研究
			所内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超音波探傷方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷方法において、

前記複数の圧電素子の中心間距離が、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収められており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記検査対象の板厚方向に往復伝播する第1の時間と横波が前記板厚方向に往復伝播する第2の時間の和に相当する時間経過後、前記アレイセンサにより受信される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷方法。

【請求項 2】

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷方法において、

前記複数の圧電素子の中心間距離が、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収められており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記検査対象の板厚方向に往復伝播する第1の時間の2倍に相当する時間を越え、前記第1の時間と前記第2の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより検出される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷方法。

【請求項 3】

10

20

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷方法において、

前記複数の圧電素子の中心間距離が、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収められており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記板厚方向に片道伝播する第3の時間と前記横波が前記板厚方向に片道伝播する第4の時間の和に相当する時間を越え、前記第3の時間の3倍と前記第4の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより検出される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷方法。

【請求項4】

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷装置において、

前記アレイセンサが、前記複数の圧電素子の中心間距離を、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収まっているアレイセンサで構成されており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記検査対象の板厚方向に往復伝播する第1の時間と横波が前記板厚方向に往復伝播する第2の時間の和に相当する時間経過後、前記アレイセンサにより受信される反射波による信号を表示させる表示部が設けられ、

前記表示部による前記反射波による信号の表示の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷装置。

【請求項5】

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷装置において、

前記アレイセンサが、前記複数の圧電素子の中心間距離を、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収まっているアレイセンサで構成されており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から前記第1の時間の2倍に相当する時間を越え、前記第1の時間と前記第2の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより受信される反射波による信号を表示させる表示部が設けられ、

前記表示部による前記反射波による信号の表示の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷装置。

【請求項6】

複数の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷装置において、

前記アレイセンサが、前記複数の圧電素子の中心間距離を、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の4分の1の長さを越え、2分の1の長さ未満に収まっているアレイセンサで構成されており、

前記アレイセンサから超音波が発射された時点から前記縦波が前記板厚方向に片道伝播する第3の時間と前記横波が前記板厚方向に片道伝播する第4の時間の和に相当する時間を越え、前記第3の時間の3倍と前記第4の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより受信される反射波による信号を表示させる表示部が設けられ、

前記表示部による前記反射波による信号の表示の有無により前記検査対象の健全性を評価することを特徴とする超音波探傷装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、固体を検査対象とする超音波探傷技術に係り、特に、アレイセンサを用いてフェーズドアレイ方式により超音波探傷を行なう超音波探傷技術に関するものである。

【背景技術】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 2 】

鋼材など縦波と横波の双方の伝播を許す固体の非破壊検査方法として、超音波による手法(超音波探傷法)が従来から一般に用いられているが、この超音波探傷法の一に、いわゆるフェーズドアレイ方式の超音波探傷法がある。

【 0 0 0 3 】

ここで、このフェーズドアレイ方式とは、電子走査方式又は電子スキャン方式とも呼ばれるので、例えば圧電素子からなる複数の超音波発生素子をアレイ状に配置した探触子、いわゆるアレイ探触子を用い、超音波発生の契機となる電気信号を、このアレイ探触子の各素子毎に所定の時間だけ遅延させて与え、各素子から発生した超音波が重ね合わされ、合成波を形成することで、被検査体への超音波の送信角度と受信角度、送信位置と受信位置、或いは合成波が干渉して互いにエネルギーを強め合う位置、つまり焦点位置などの条件が電氣的な制御により高速で変化させることができるようにした超音波探傷法のことである。

10

【 0 0 0 4 】

このようにアレイ探触子を用いて探傷条件を電氣的に走査する理由は、広い検査範囲にわたって超音波の送受信角度位置や焦点を自由に变化させられるからであり、そうすることにより、被検査体の内部或いは表面の反射源(欠陥等)からの反射波をより強く受信できる角度や位置、焦点を選択することで、反射源である欠陥が見付け易くできるからである。

【 0 0 0 5 】

これに対して、従来から広く用いられている1つの超音波探触子(但し、送信と受信で素子を分ける場合は、送受信で各1つの合計2つの場合もある)を用いた超音波探傷法の場合、探触子の条件(送受信角度、送受信位置、焦点位置)も一つの値しか持つことができないため、探傷条件ごとに別の探触子を準備する必要があった。

20

【 0 0 0 6 】

ここで、上記のアレイ探触子を用いたフェーズドアレイ法の場合でも、従来は通常の探触子の機能拡張を狙ったものがほとんどで、このため、フェーズドアレイ法により検査対象の健全性を評価する場合においても、通常の探触子による探傷法と同様、横波又は縦波を検査対象に斜め方向に伝播させ、欠陥等の反射源で反射された波を受信することで健全性を評価する、いわゆる斜角探傷法が主として用いられている。

30

【 0 0 0 7 】

ここで、この斜角探傷法では、送信に使用される波と被検査体中を伝播する波、それに受信に使用される波の3者とも、伝播モード(縦波か横波)は常に一定であることが特徴といえる。例えば、縦波斜角探傷法では、送信した縦波が欠陥などの反射源で反射し、その反射波を再び探触子で同じく縦波として受信している。

【 0 0 0 8 】

一方、固定角を利用した探傷法として、斜角探傷法以外に、欠陥などの反射源の有無を判断する2次クリーピング波法や、欠陥のおおまかな寸法評価が可能なモード変換波法がある。

【 0 0 0 9 】

これらの手法は、縦波斜角法の信頼性向上に寄与する機能を持つ。例えば、検査対象の検査領域内の欠陥を斜角法で探傷する場合、検査対象の形状変化部分(例えば、溶接や機械加工による変形など)からの反射波が得られることがあるが、この場合、形状変化部分による反射波と欠陥からの反射波の識別が困難になる可能性がある。

40

【 0 0 1 0 】

このようなとき、2次クリーピング波やモード変換波を併用してやれば、反射波の識別性が向上し、従って、斜角法による探傷結果の信頼性向上に寄与できることになる。

【 0 0 1 1 】

ところで、前記手法で利用される2次クリーピング波やモード変換波は、斜角探傷法の場合とは異なり、送信に使用した波と伝播中の波、それに受信される波は、伝播モードが

50

必ずしも一致していない。例えば、２次クリーピング波法では、縦波(角度約 70 度)の探触子から縦波と同時に発生する横波(角度約 30 度)の超音波が利用されている。

【 0 0 1 2 】

ここで、図 4 を用いて 2 次クリーピング波法における超音波伝播の概要を説明する。いま、探触子から横波成分 401 が発射されたとすると、この横波成分 401 は被検査体の底面で反射した際に横波から縦波 402 に伝播モードが変化(モード変換という)し、反射源である欠陥 403 の開口部で反射する。

【 0 0 1 3 】

そして、この欠陥開口部付近で反射した縦波 404 は、被検査体の底面近傍を伝播するが、この伝播中、横波にモード変換するため、横波成分 405 が再び探触子に戻り、欠陥開口部からの反射波として受信される。

10

【 0 0 1 4 】

このように、２次クリーピング波法では、欠陥の開口部付近での反射波が受信でき、このため欠陥の有無の判定に効果的になるのである。

【 0 0 1 5 】

また、このようにモード変換を利用した、いわゆるモード変換波法では、縦波(角度 60 度)の探触子から縦波と同時に発生する横波(角度約 28 度)の超音波を利用している。

【 0 0 1 6 】

そこで、このモード変換波法における超音波伝播の概要について、図 5 を用いて説明する。まず、探触子から発生した横波成分 501 は、被検査体底面で反射する際に、横波から縦波 502 へと伝播モードが変化する。

20

【 0 0 1 7 】

ここで、図 5 A に示す反射源 502 がある程度の高さを持つ欠陥であった場合、欠陥の先端、或いは先端に至る途中の面で反射が起きる。そして、この欠陥で反射した縦波成分 504 は、そのまま被検査体中を伝播して探触子に戻り、欠陥からの反射波として受信される。

【 0 0 1 8 】

しかし、図 5 B に示す反射源 507 の高さが比較的小さい場合には、被検査体底面で横波 505 からモード変換した縦波 506 が欠陥の先端に届かないために、探触子に戻る超音波は現れない。このように、モード変換波法では、欠陥がある程度の高さ(板厚の 3 分の 1 程度)を有するか否かが、反射波の有無に対応するため、欠陥のおおまかな高さ寸法測定に効果的である。

30

【 0 0 1 9 】

しかし、上述の 2 手法は、縦軸に超音波の受信強度、横軸に検査体内部の伝播距離(又は伝播時間)を取った A スコープと呼ばれる波形により判断しているので、図 4、図 5 に示した検査体内部における複雑な伝播経路の由来を解明し、欠陥の有無または概略の寸法を判断するのは極めて困難であり、また、熟練を要するものであった。

【 0 0 2 0 】

ところで、アレイ探触子を用いて、上述の 2 次クリーピング波法やモード変換波法を実現するためには、アレイ探触子から縦波と横波の両方を所望の方向に発生させる必要がある。

40

【 0 0 2 1 】

しかしながら、従来のアレイ探触子では、所望の角度方向以外にも超音波が輻射してしまう現象が発生し、受信される超音波がどのような伝播経路を経たものかを識別することが困難であり、アレイ探触子を用いての上記手法の実現は困難であった。

【 0 0 2 2 】

また、従来のフェーズドアレイ法では、直接検査体に接触させる縦波用のアレイ探触子、いわゆる直接接触式のアレイ探触子と、楔(ウェッジ、シュー)と呼ばれるくさび状の中間媒質を用いて縦波と横波の両方に対応した、いわゆる楔有アレイ探触子の 2 種が主に用いられてきた。そこで、以下、それぞれのアレイ探触子の特徴と課題について説明する

50

。

【 0 0 2 3 】

ここで、前者の直接接触式のアレイ探触子は、検査対象に直接接触または平行に配置して使用する縦波用のアレイ探触子であり、これは、圧電素子などの超音波発生素子を実列状に一列に配置し、被検査体内部に垂直(角度 0 度)から角度 4 5 度(ないしは角度 6 0 度)まで超音波の送信または受信の角度を電子的に変化させるものである。

【 0 0 2 4 】

この場合、アレイ探触子を構成している個々夫々の超音波発生素子から、検査対象に垂直方向の成分を持つ縦波が発生する。そこで、これらの各素子に対して、例えば(数 1)式で表される遅延時間を与えることで、角度 方向に伝播する縦波を合成することができる (例えば、非特許文献 1 参照。)

【 0 0 2 5 】

(数 1)

$$t_i = (i - 1) P \cdot \sin \theta / c \dots\dots(1)$$

i : 素子に対する通し番号

t_i : i 番目の素子に与える遅延時間

c : 検査対象(固体)中の縦波の音速(伝播速度)

P : 素子ピッチ

θ : 超音波の入射角(入射方向)

【 0 0 2 6 】

そして、このとき、想定した角度 方向に伝播する超音波(メインビームという)以外に、別の角度 にも超音波が合成されてしまう現象が発生することも知られている。

【 0 0 2 7 】

そこで、この所望の伝播方向(角度) に対して、メインビーム以外の超音波(グレーティングローブという)が発生させないようにするには、(数 1)式中の素子ピッチ P の値を、(数 2)式で表される値以下に設定する必要がある。

【 0 0 2 8 】

(数 2)

$$P = \lambda / (1 + |\sin \theta|) \dots\dots(2)$$

λ : 検査対象(固体)中の縦波の波長

【 0 0 2 9 】

このとき、超音波の入射角 の最大値は 9 0 度であるため、(数 2)式から、縦波を用いる場合の素子ギャップの最小値は、波長 の 2 分の 1 となる。

【 0 0 3 0 】

この直接接触式のアレイ探触子によれば、縦波をグレーティングローブ無しに広い角度に送信することは可能であるが、このとき横波成分にはグレーティングが発生し、このため、アレイ探触子により上述の 2 次クリーピング波法やモード変換波法を実現する際の妨げとなる。

【 0 0 3 1 】

このとき、アレイ探触子を構成する各圧電素子から同時に発生する横波成分に着目し、横波と同時に発生する縦波成分をノイズとして扱い、低減するようにして、アレイ探触子によっても横波斜角探傷が行えるようにした方法及び装置が提案されている(例えば、特許文献 1 参照。)

【 0 0 3 2 】

しかし、この提案に係る方法及び装置も、アレイ探触子から同時に発生する縦波と横波の両方を活用する 2 次クリーピング波法やモード変換波法に関しては開示がない。

【 0 0 3 3 】

次に、後者の楔有リアレイ探触子は、検査対象に対して、もう一つの媒質を間に配置させ、アレイセンサを傾斜させて使用するものであり、このとき検査対象とアレイセンサの間に配置される媒質としては、代表的なものに水や合成樹脂(アクリル、ポリスチレン、

10

20

30

40

50

ポリイミドなど)があり、これらは、上記したように、楔(ウェッジ、シュー)と呼ばれている。

【 0 0 3 4 】

そして、この楔を用いることにより、楔に対する超音波の入射角が小さくても、超音波の屈折現象により、検査対象内部に入射する屈折角としては大きな角度を得ることができる(例えば、非特許文献 2 参照)。

【 0 0 3 5 】

ここで、(数 3) 式に楔に対する入射角 θ' と検査体中の屈折角 θ の関係式を示す。

【 0 0 3 6 】

(数 3)

$$\theta' = \sin^{-1}(\sin \theta \times V' / V)$$

θ' : 楔に対する縦波の入射角度

θ : に入射される超音波の屈折角

V' : 楔中の縦波音速

V : 検査対象(固体)中の縦波音速

【 0 0 3 7 】

例えば、音速約 1 5 0 0 m / 秒の水から縦波 約 5 9 0 0 m / 秒、横波 約 3 0 0 0 m / 秒の鋼(鉄)に超音波を入射する場合、検査対象に入射角度 7 0 度の横波を得るには、水に対して約 1 4 度の角度で超音波を入射すればよいが、このとき、鋼の内部には、角度が約 2 9 度の横波も同時に発生してしまう。

【 0 0 3 8 】

このため、楔内部の多重反射波がノイズ信号として探触子で受信されることになり、欠陥からの反射波の識別を妨げる可能性がある。

【非特許文献 1】社団法人 日本電子機械工業会編
「波機器ハンドブック」1 9 9 7 年

「改訂 医用超音

【非特許文献 2】日本学術振興会製鋼第 1 9 委員会編
「波探傷法」昭和 4 9 年

「改訂 超音

【特許文献 1】特開 2 0 0 1 - 2 5 5 3 0 8 公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 3 9 】

上記従来技術は、アレイ探触子を用いて所望の方向以外の超音波(グレーティングローブ)のないメインビームのみからなる超音波を発生させる点に配慮がされておらず、2 次クリーピング波法やモード変換波法の実現に問題があった。

【 0 0 4 0 】

また、上記従来技術は、欠陥からの反射波の識別について配慮がされておらず、2 次クリーピング波またはモード変換波を、画像を用いて明瞭に識別する点に問題があった、

本発明の目的は、アレイ探触子を用いても、横波と縦波の両方に対して、所望の方向以外の超音波(グレーティングローブ)のないメインビームのみからなる超音波を発生させることができるようにした超音波探傷方法及び装置を提供することにある。

【 0 0 4 1 】

また、本発明の他の目的は、検査体中を複雑な径路で伝播する 2 次クリーピング波またはモード変換波が画像を用いて明瞭に識別することができるようにした超音波探傷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】

【 0 0 4 2 】

上記目的は、複数個の圧電素子の配列からなるアレイセンサを用い、フェーズドアレイ方式により動作する超音波探傷方法において、前記複数個の圧電素子の中心間距離が、検査対象内での超音波の縦波成分の波長の 4 分の 1 の長さを越え、2 分の 1 の長さ未満に収められており、前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記

10

20

30

40

50

検査対象の板厚方向に往復伝播する第 1 の時間と横波が前記板厚方向に往復伝播する第 2 の時間の和に相当する時間経過後、前記アレイセンサにより受信される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価するようにして達成される。

【 0 0 4 3 】

このとき、前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記検査対象の板厚方向に往復伝播する第 1 の時間の 2 倍に相当する時間を越え、前記第 1 の時間と前記第 2 の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより検出される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価するようにしても上記目的を達成することができる。

【 0 0 4 4 】

更に、ここで、前記アレイセンサから超音波が発射された時点から、超音波の縦波が前記板厚方向に片道伝播する第 3 の時間と前記横波が前記板厚方向に片道伝播する第 4 の時間の和に相当する時間を越え、前記第 3 の時間の 3 倍と前記第 4 の時間の和に相当する時間までの間に前記アレイセンサにより検出される反射波による信号の有無により前記検査対象の健全性を評価するようにしてもよい。

【 0 0 4 5 】

前記した手段によれば、圧電素子と圧電素子の中心間距離が、圧電素子から発生される縦波成分の波長の 4 分の 1 以上 2 分の 1 以下である探触子を使用すれば、アレイ探触子を用いても、横波と縦波の両方に対して、所望の方向以外の超音波(グレーティングローブ)のないメインビームのみからなる超音波を発生させることができる。

【 0 0 4 6 】

このとき、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間までの受信信号を表示し、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間の 2 倍に相当する時間から、縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間に表示される信号の有無により、アレイ探触子による 2 次クリーピング波の有無の判定が可能となり、欠陥の有無を画像により判断することができる。

【 0 0 4 7 】

更に、このとき、検査対象の縦波による板厚片道伝播時間と横波による板厚片道伝播時間の和に相当する時間から、縦波による板厚往復伝播時間の 2 倍に相当する時間に表示される信号の有無により、アレイ探触子によるモード変換波の有無の判定が可能となり、欠陥のおおまかな高さ測定を画像により判断することができる。

【発明の効果】

【 0 0 4 8 】

本発明によれば、縦波及び横波を伝えることが可能な固体を含む検査対象において、横波と縦波の両方に対して、所望の方向以外の超音波(グレーティングローブ)のないメインビームのみからなる超音波を、アレイ探触子を用いて発生させることができる。

【 0 0 4 9 】

また、本発明によれば、複雑な伝播径路を持つ 2 次クリーピング波やモード変換波に対しても、伝播時間によって定められた領域内の表示信号の有無を判断することにより、画像から明瞭に識別に 2 次クリーピング波やモード変換波の識別が可能になり、欠陥有無の判定やおおまかな欠陥高さ寸法評価をすることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 5 0 】

以下、本発明による超音波探傷方法及び装置について、図示の実施の形態により詳細に説明する。

【 0 0 5 1 】

・第 1 の実施形態

図 1 は本発明の第 1 の実施形態で、図示のように、この実施形態は、検査対象である被検査体 100 と、これに超音波を入射するアレイ探触子 101、送受信部 102、受信信号を表示する表示部 103 で構成されている。なお、この実施形態の適用対象は、図示の

10

20

30

40

50

ように、配管などの管状体であり、被検査体 100 は配管の軸方向断面を示しているが、本実施形態に記載の方法及び装置は、平板形状の検査対象にも同様に適用することが可能である。

【0052】

アレイ探触子 101 は被検査体 100 の探傷面に設定され、送受信部 102 から供給される駆動信号により超音波を発生し、これを被検査体 100 内に伝播させ、これにより現れる反射波を検出し、受信信号を送受信部 102 に入力する。

【0053】

送受信部 102 は、計算機 102A と遅延時間制御部 102B、パルサー 102C、レシーバ 102D、データ収録部 102E を備え、パルサー 102C が駆動信号をアレイ探触子 101 に供給し、これによりアレイ探触子 101 から入力される受信信号をレシーバ 102D が処理するようになっている。

【0054】

ここで、計算機 102A は、遅延時間制御部 102B、パルサー 102C、レシーバ 102D、それにデータ収録部 102E を制御して、必要な動作が得られるようにする。

【0055】

そこで、まず、遅延時間制御部 102B は、パルサー 102C から出力される駆動信号のタイミングを制御すると共に、レシーバ 102D による受信信号の入力タイミングを制御し、これによりフェーズドアレイ方式によるアレイ探触子 101 の動作が得られるようにする。

【0056】

そして、データ収録部 102E は、レシーバ 102D から供給される受信信号を処理し、表示部 103 に供給する働きをするが、ここで、表示部 103 の動作については、後で詳述する。

【0057】

次に、アレイ探触子 101 の詳細について図 2 により説明する。ここで、この図 2 はアレイ探触子 101 の最も基本的な構成を模式図で示したもので、図示のように、このアレイ探触子 101 は、基本的には複数個の超音波発生素子 201 で構成されている。

【0058】

そして、この実施形態では、この超音波発生素子 201 の一例として PZT 圧電セラミックスの細棒を高分子材の中に埋めこんだ複合圧電体(コンポジットともいう)を用いているが、このとき、このアレイ探触子 101 の性能を左右するパラメータの一つに素子ピッチ P がある。

【0059】

この素子ピッチ P は、超音波発生素子 201 の素子幅 W と、素子間のギャップ G を加えた値であり、アレイ探触子から発生するメインビームやグレーティングローブの発生を決定する主要な因子の一つである。

【0060】

背景技術で記述したように、従来技術では、縦波の発生を目的としているため、それに使用する超音波発生素子については、各素子から発生する超音波を合成して形成される縦波成分に主として注目しており、このため、縦波成分に対して、所望の入射方向と異なる波(グレーティングローブ)が発生しないようにするため、素子ピッチを 2 分の 1 波長とすることが実施されてきた。

【0061】

ここで、図 3 により素子ピッチの働きについて説明すると、まず、ここでは一例として、24 個の素子からなるアレイ探触子を用い、鋼の中で角度 60 度方向の縦波成分からなる超音波を得る場合について計算した結果を示す。

【0062】

まず、図 3A は、従来のアレイ探触子で用いられてきた 2 分の 1 波長のピッチのメインビーム及びグレーティングローブを示したもので、次に図 3B は、素子ピッチを波長の 4

10

20

30

40

50

分の1と細かくした場合で、図3Cが本発明で提案する素子ピッチが3分の1波長の場合である。

【0063】

これらの図から、従来の素子ピッチ(2分の1波長)及び本発明の場合の素子ピッチ(3分の1波長)は、縦波成分に関しては、共に所望する角度60度方向にメインビームが発生しており、この点では問題がない。

【0064】

しかし、ここで縦波と同時に発生する横波成分に注目すると、横波のメインビームは、本来は約29度の角度方向にだけ発生する筈であるが、図3Aの従来の素子ピッチの場合、角度がマイナス40度方向に、更にもう一本、別の横波成分(グレーティングローブ)が発生してしまうことが判る。

10

【0065】

一方、図3Cの本発明における素子ピッチ(3分の1波長)の場合、横波に関してもメインビームしか発生しておらず、この点でも、本発明の場合は問題ないことが判る。

【0066】

ここで、図3Bに示すように、素子ピッチを3分の1波長よりも更に細かくした場合でも、縦波横波共にグレーティングローブは発生しないので、これでも特に問題が無いように思えるが、しかし、この図3Bの場合、縦波成分に注目すると、角度60度方向に伝播するメインビームの半値幅(以下、指向角と呼ぶ)が、図3Cの場合に比較して広がっていて、約20度の角度に大きくなっているため、受信された信号がどの方向から反射してきたのかの同定が困難になるという問題が生じてしまう。

20

【0067】

従って、アレイ探触子を用い、縦波成分と横波成分の両方の超音波成分を発生させるようにした2次クリーピング波法やモード変換波法を実現するためには、縦波と横波の双方に関してメインビームだけを発生させる必要があり、しかも、このとき指向角を一定の範囲に抑え、反射波の発生した方向が同定できるようにしなければならないことが判る。

【0068】

そこで、本発明では、素子ピッチPの決定のための基準となる素子ピッチとして、縦波を角度90度方向に伝播するとき横波角度(横波臨界角)の範囲内において縦波と横波の双方に関してグレーティングローブが発生しない値、すなわち、次の(数4)で与えられる素子ピッチP0を採用したのである。

30

(数4)

$$P0 = \lambda / (1 + (V / Vs))$$

λ : 検査対象(固体)中の波長

V : 検査対象(固体)中の縦波音速

Vs : 検査対象(固体)中の横波音速

【0069】

ここで、一般に固体中の縦波音速(V)と横波音速(Vs)について、それらの比(音速比という)V/Vsを比較すると、図6に示すように、多くの固体において、音速比(V/Vs)の値が2の近傍にあることが判る(非特許文献2参照)。

40

【0070】

そこで、数4の結果を一般化し、最適な素子ピッチとして、本発明では、縦波音速の3分の1波長近傍(4分の1波長から2分の1波長まで)を最適値とした。

【0071】

例えば、被検査体の音速が縦波6000m/秒で、このときに使用する超音波の周波数が2MHzの場合、本発明の実施形態では、最適な素子ピッチPとして、例えば、3分の1波長の値である1.0mmが選定される。

【0072】

そして、このとき、素子幅WとギャップGとして、例えばW=0.9mm、G=0.1mmを選定すれば、グレーティングローブの発生しない縦波と横波の超音波が送受信でき

50

ることになる。

【0073】

次に、本発明の実施形態による探傷結果の表示方法について説明する。ここで、まず、2次クリーピング波やモード変換波は、縦波よりも音速の遅い横波成分が被検査体を伝播する特徴を持つ。

【0074】

このため、2次クリーピング波やモード変換波は、縦波のみの伝播を取り扱う通常の縦波斜角探傷法の場合と比較して、反射波が探触子に受信するまでにより多くの伝播時間を必要とする。

【0075】

ここで、まず、図7は、縦波斜角法で広く用いられている角度45度方向送受(信縦波45度斜角法)の場合の伝播経路の概要を示したもので、この場合、探触子から送信された縦波成分701は、反射源702に当たって、反射源の開口部又は先端部で反射し、再び縦波成分703として探触子に戻り、信号として受信される。

【0076】

この図7に示した縦波45度斜角法と比較して、本発明の実施形態による2次クリーピング波法やモード変換波法における伝播経路は、図4及び図5で説明したように、複雑且つ長距離になっており、従って、これらの反射波を表示するには、或る一定の長さの伝播時間に相当する間、反射波を表示している必要がある。

【0077】

ここで、この実施形態では、波形表示のための伝播時間を決定する基準として、被検査体の多重底面反射波の時間を利用している。そこで、図8に、超音波の入射角度を電氣的に走査するフェーズドアレイ法を用いて平板形状の試験体底面の多重反射波を映像化した例と、それら多重反射の伝播経路を模式的に示す。

【0078】

被検査体の表面にアレイ探触子を設置すると、表面と底面の間で多重反射が発生する。それらの反射波のうち、伝播時間の短いイベント順に整理すると、図8Aから図8Eに示すようになる。実際に、これら5つのイベントに由来する多重底面反射波は、図8Fに示すように、アレイ探触子による探傷結果の画像例でも受信されている(図8Fの楕円(1)~(5)内の黒く表示した部分参照)。

【0079】

そこで、本発明の実施形態では、特に次に列挙する5種の時間に注目することにより2次クリーピング波及びモード変換波の識別性の向上が得られるようにしたものである。

【0080】

- i . 縦波による板厚往復伝播時間に相当する第1底面反射波の時間(図8Aに相当)
- ii . 縦波による板厚片道伝播時間と横波による板厚片道伝播時間の和に相当する時間(図8Bに相当)
- iii . 検査対象の縦波による板厚往復伝播時間の2倍に相当する第2底面反射波の時間(図8Cに相当)
- iv . 縦波による板厚片道伝播時間の3倍と横波による板厚片道伝播時間の和に相当する時間(図8Dに相当)
- v . 縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚往復伝播時間の和に相当する時間(図8Eに相当)

ここで、図1のデータ表示部103に示した線分110は縦波による往復伝播時間(第1底面反射波)に相当する時間(図8Aに相当)、すなわち試験体底面を示す。同様に、線分111は図8Bに相当する時間、線分112は図8Cに相当する時間、線分113は図8Dに相当する時間、そして線分114は図8Eに相当する時間に、夫々対応する。

【0081】

本発明の表示方法に関しては、図1の実施形態に示すように、多重底面反射波の時間(

10

20

30

40

50

又は音速を乗算して距離に換算したもの)に対応した線分を表示してもよいし、図8に示すように、多重反射波の時間(又は音速を乗算して距離に換算したもの)に対応した同心円で表示してもよく、更には、これらの併用でもよい。

【0082】

次に、図9により、本発明の実施形態による具体的な波形識別方法について詳細に説明する。ここでは一例として、被検査体の底面に開口した欠陥がある場合の超音波探傷を想定し、ここで欠陥と思われる反射波(以下、インジケーションと呼ぶ)が得られた場合、図9Aのエリアに対して、図9Bのフローチャートに従って欠陥が否かを判断する。

【0083】

まず、通常の斜角探傷でインジケーションの有無を確認し(S904)、次いで縦波斜角法の角度を45度近傍に設定するか、若しくは縦波斜角法によるインジケーションが図9Aのエリア901近傍に表示されるように、探触子位置を調整する(S905)。

【0084】

続いて2次クリーピング波による反射波の有無を確認するためにエリア903内における反射波の有無を確認し(S906)、最後にモード変換波による反射波の有無を確認するため、エリア902内における反射波の有無を確認するのである(S907)。

【0085】

そして、これらS904、S906、S907のいずれかのステップにおいて信号有りと判断された場合は、そのインジケーションは欠陥に由来する可能性があると判断するのである。

【0086】

ここで、インジケーションの欠陥判定の具体的な説明に先立って、まず、図9Bの各ステップにおいて信号が出現するエリア、すなわち図9Bのエリア901、902、903の特徴について詳細に説明する。

【0087】

<エリア901>

まず、斜角45度のエコーの伝播距離は、コサイン45度の逆数に底面の値を乗算した値となる。このとき、図6に示したように、固体中の縦波音速と横波音速の比(V/V_s)が約2であることから、多重反射波(1)の伝播時間は、底面の約1.5倍となる。

【0088】

ここで、両者の伝播時間がほぼ一致することから、縦波45度近傍で受信される反射波は、多重反射波(2)と45度の方向の直線が交差するエリア901の近傍に表示されることとなる。

【0089】

<エリア903>

まず、2次クリーピング波による欠陥有無の判定を行うにあたって、縦波斜角探傷法において、図7に示す角度が45度近傍になる位置にアレクサ探触子が設置されているとする。

【0090】

次に、図4における2次クリーピング波の径路401、402、404、405の往復伝播時間の和と多重底面反射波を比較して図10、図11、図12にグラフで示す。このとき、まず図10は縦波音速と横波音速の音速比(V/V_s)が2の場合、次に図11は音速比(V/V_s)が1.5の場合、それに図12は音速比(V/V_s)が2.5の場合であり、夫々縦波音速は5900m/秒で固定し、横波音速のみを音速比によって変化させている。

【0091】

そうすると、これら図10と図11、それに図12の各グラフからも、縦波音速と横波音速の比(V/V_s)が2±0.5の範囲にある一般的な固体に対して、縦波斜角法の探傷角度が45度から約5度程度変化しても、2次クリーピング波による往復伝播時間は、縦波による板厚往復伝播時間及び横波による板厚往復伝播時間の和に相当する時間(図8

10

20

30

40

50

Eに相当)と、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間の2倍に相当する時間(図8Cに相当)の間に存在することが判る。

【0092】

そして、このことから、これらの伝播時間(図8Cと図8E)と2次クリーピング波の探傷角度(70度から90度)に囲まれた領域であるエリア903内に、2次クリーピング波による反射波が表示され、そのエリア内の信号の有無から、欠陥の有無を判断することができる。

【0093】

<エリア902>

まず、モード変換波による欠陥有無の判定を行うにあたって、縦波斜角探傷において図7に示す角度が45度近傍になる位置にアレイ探触子が設置されているとする。

【0094】

次に、図5A及び図5Bの径路501、502、504におけるモード変換波の往復伝播時間の和と多重底面反射波を比較して、図13、図14、図15にグラフで示す。このとき、まず図13は縦波と横波の音速比(V/V_s)が2の場合、次に図14は音速比(V/V_s)が1.5の場合、そして図15は音速比(V/V_s)が2.5の場合であり、夫々縦波音速は5900m/秒で固定し、横波音速のみを音速比によって変化させている。

【0095】

そうすると、これら図13と図14、それに図15からも、縦波と横波の音速比(V/V_s)が 2 ± 0.5 の範囲にある一般的な固体に対して、縦波斜角法の探傷角度が45度から約5度程度変化しても、モード変換波による往復伝播時間は、縦波による板厚片道伝播時間の3倍及び横波による板厚片道伝播時間の和(図8Dに相当)と、縦波及び横波による板厚片道伝播時間の和(図8Bに相当)の間に存在することが判る。

【0096】

このことから、これらの伝播時間(図8Bと図8D)とモード変換波の探傷角度(60度近傍)に囲まれた領域であるエリア902内に、モード変換波による反射波が表示され、そのエリア内の信号の有無から、欠陥のおおよその高さを判断することができる。

【0097】

ここで、図16は、モード変換波が受信される場合の欠陥高さをグラフで示した図で、この場合、縦波音速と横波音速の音速比(V/V_s)の値(2.0 ± 0.5)によって、若干の変化はみられるが、板厚の約3分の1以上の高さを持つ欠陥の場合にモード変換波が得られることが判る。

【0098】

なお、図16では、縦波音速は5900m/秒で固定し、横波音速のみを音速比によって変化させた。

【0099】

次に、この実施形態による欠陥判定の具体的な欠陥判定方法について、図25、図26、図27、図31、図32に示した超音波探傷結果表示画面を用いて説明する。ここでは、図1に示したように、アレイ探触子を被検査体に設置して探傷する場合を想定し、このとき予想される欠陥は、被検査体の底面側に開口するものとする。

【0100】

そうすると、まず、表示画面には、図25に示すように、被検査体の表面と超音波の入射角度、それに伝播時間に対応した扇形で示された信号表示領域2501が表示される。例えば、入射角度としては、マイナス5度からプラス85度が設定され、伝播時間として、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間が設定される。

【0101】

そして、この信号表示領域2501には、被検査体の表面と底面の間で発生する多重反射によって受信される信号が多重底面反射波の信号群2502として表示されるが、このとき、探傷結果は大きく3つにグループ分けされる。

【 0 1 0 2 】

第 1 は、図 2 7 に示すように、まず縦波斜角法(45 度近傍)によるインジケーションが図 9 で説明したエリア 9 0 1 に表示され、次に 2 次クリーピング波によるインジケーションは同じく図 9 で説明したエリア 9 0 3 に表示され、そしてモード変換波によるインジケーションがやはり図 9 で説明したエリア 9 0 2 (図 9 参照)に表示される場合である。

【 0 1 0 3 】

この場合は、縦波斜角と 2 次クリーピング波の両方でインジケーションが得られているために、欠陥が発生すると予想される箇所からの反射波は、欠陥によるものと判断される。また、更にモード変換波も受信されていることから、その欠陥の高さは板厚の約 3 分の 1 以上もあり、従って、比較的大きなひびであると判断される。

10

【 0 1 0 4 】

第 2 は、図 2 6 に示すように、エリア 9 0 1 (図 9)とエリア 9 0 3 (図 9)の両方にインジケーションが得られ、エリア 9 0 2 にはインジケーションが得られない場合である。

【 0 1 0 5 】

この場合は、縦波斜角と 2 次クリーピング波の両方でインジケーションが得られているために、このときのインジケーションは欠陥によるものと判断される。

【 0 1 0 6 】

しかし、モード変換波による反射波がエリア 9 0 2 に受信されていないことから、このときの欠陥は、その高さが板厚の約 3 分の 1 に満たない、比較的小さなひびであると判断される。

20

【 0 1 0 7 】

第 3 は、図 2 5 に示すように、縦波斜角によるインジケーションがエリア 9 0 1 (図 9)だけに表示される場合で、この場合は、縦波斜角により何らかのインジケーションが得られているため、欠陥が発生すると予想される箇所に何らかの反射源があることが予想されるが、その反射源は欠陥ではないと判断される。

【 0 1 0 8 】

このときの欠陥以外の反射源としては、例えば、被検査体底面の溶接による形状変化や加工跡などが考えられる。

【 0 1 0 9 】

ここで、この第 3 の場合の被検査体底面の状況の例を図 3 3 と図 3 4 を用いて説明する。いま、第 1 の場合や第 2 の場合のように、非検査体底面に欠陥が存在する場合、図 3 3 に示すように、縦波斜角成分と 2 次クリーピング波成分の両方の反射波が得られる。

30

【 0 1 1 0 】

しかし、非検査体底面に溶接部の垂れ込み(溶接裏波と呼ばれる)形状変化部が存在した場合は、図 3 4 に示すように、縦波斜角成分によるインジケーションは受信されるが、試験体底面から垂直に進展する割れ状の形状の反射源は存在しない。

【 0 1 1 1 】

このため、溶接部の垂れ込み形状変化部など欠陥以外の反射源では 2 次クリーピング波成分による反射は起きず、従って、2 次クリーピング波やモード変換波によるインジケーションが現れないのである。

40

【 0 1 1 2 】

一方、欠陥有りだと判断された場合は、図 3 1 に示すように、エリア 9 0 1 に表示された縦波斜角による反射波により、欠陥の先端部のエコー 3 1 0 2 と欠陥の開口部のエコー 3 1 0 1 から、欠陥の高さ評価を実施してもよい。

【 0 1 1 3 】

ここで、この実施形態による超音波探傷結果の表示方法によって、上記した本発明の実施形態による最適な素子ピッチを適用しなかった場合の超音波探傷結果の表示画面例について、図 3 2 により説明する。

【 0 1 1 4 】

この場合、縦波と横波を所定の角度に送信することが可能な素子ピッチを持っていない

50

ので、グレーティングローブ現象が発生し、例えば、多重底面反射波の信号が、図 3 2 に示すように、所望する角度とは異なる角度の部分に表示されてしまう。

【 0 1 1 5 】

そうすると、このグレーティング現象による信号がノイズ成分となり、それぞれのエリア 9 0 1、9 0 2、9 0 3 内の信号の有無の判定を阻害する可能性が生じてしまう。

【 0 1 1 6 】

従って、この実施形態によれば、グレーティングローブの低減と、縦波と横波の両方に対してメインビームの送信を可能にするための最適な素子ピッチを備えたアレイ探触子を用い、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間までの受信信号を表示し、前記受信信号のうち、特に、5 つの多重底面反射波(図 8 A ~ 図 8 E)と超音波の入射角度に注目することで、アレイ探触子を用いても、通常の斜角探傷法に加えて、2 次クリーピング波法やモード変換波法を実現でき、より信頼性の高い超音波探傷方法と装置を提供することができる。

10

【 0 1 1 7 】

なお、図 1 や図 8 A ~ 図 8 F などにおいては、多重底面反射波の時間に、超音波探傷に用いるアレイ探触子の多重底面反射波から直接得る方法を採用しているが、本発明の実施形態としては、これ以外にも、垂直方向に超音波を入射する探触子を利用して多重反射波の時間を計測し、その値を用いて実施してもよい。

【 0 1 1 8 】

一方、検査対象の縦波音速と横波音速及び板厚が既知である場合は、板厚を音速で除算すると、計算により多重反射波の時間を求めてもよく、反対に検査対象の横波音速が不明である場合は、概算値として縦波音速の 2 分の 1 の値を用いてよい。

20

【 0 1 1 9 】

・第 2 の実施形態

次に、本発明の第 2 の実施形態として、被検査体表面に開口した欠陥がある場合に好適な超音波探傷について説明すると、まず、この場合でも、超音波探傷に用いるアレイ探触子及び装置構成は既に説明した第 1 の実施形態と同じである。

【 0 1 2 0 】

そこで、ここでは探傷結果の表示と波形の識別に重点をおいて詳細に説明すると、まず、図 1 7 と図 1 8 は、縦波斜角法により被検査体の開口面側の欠陥を探傷する場合の伝播径路の概要について示したもので、このとき図 1 7 は欠陥高さが比較的小さい場合で、図 1 8 は欠陥高さが比較的大きい場合である。

30

【 0 1 2 1 】

そして、図 1 7 の欠陥高さが小さい場合、探触子から送信された縦波成分 1 7 0 1 は、反射源となる欠陥 1 7 0 2 の開口部近傍で反射し、そのまま縦波成分 1 7 0 3 が探触子に戻り、信号として受信される。

【 0 1 2 2 】

このときの縦波成分(1 7 0 1 及び 1 7 0 3)は、入射角度 1 7 0 4 が約 7 0 度から 9 0 度の方向に伝播し、1 次クリーピング波とも呼ばれる。

【 0 1 2 3 】

40

また、図 1 8 の欠陥高さが大きい場合、探触子から送信された縦波成分 1 8 0 1 は、反射源 1 8 0 2 の先端部近傍で反射し、やはり縦波成分 1 8 0 3 が探触子に戻り、信号として受信される。このときの縦波成分(1 8 0 1 及び 1 8 0 3)の入射角度 1 8 0 4 は、6 0 度近傍(4 5 度から 7 0 度程度)となる。

【 0 1 2 4 】

次に、図 1 9 は、モード変換波法により欠陥の開口面側から探傷する場合の伝播径路の概要を示したもので、この場合、基本的には、図 5 で説明した、底面側に開口している欠陥の探傷の場合と同様で、探触子から発生した横波成分 1 9 0 1 は、被検査体底面で反射する際、横波から縦波 1 9 0 2 に伝播モードが変化する。

【 0 1 2 5 】

50

このとき反射源がある程度の高さを有する欠陥 1903 であった場合、図 19A に示すように、欠陥 1903 の先端、或いは先端に至る途中の面の何れかに縦波 1902 が到達し、ここで反射した縦波成分 1904 がそのまま被検査体中を伝播して探触子に戻り、欠陥からの反射波として受信される。

【0126】

しかし、反射源の高さが比較的小さい場合、つまり図 19B に示す欠陥 1907 であった場合には、被検査体の底面で横波 1905 からモード変換波した縦波 1906 が、欠陥 1907 の先端に届かないため、探触子に戻る超音波は発生しない。

【0127】

このように、欠陥開口面側から探傷する場合、モード変換波法によれば、欠陥が非常に高い場合(板厚の 3 分の 2 程度)を有するか否か評価することができる。

10

【0128】

次に、図 20、図 28、図 29、図 30 を用いて、欠陥の開口面側から探傷する場合の具体的な波形識別方法について詳細に説明すると、欠陥と思われる反射波(同じく以下、インジケーションと呼ぶ)が得られた場合、図 20 に記載したフローチャートに従って、欠陥か否かを判断する。

【0129】

この図 20 では、一例として、被検査体の表面に開口した欠陥がある場合の超音波探傷を想定し、ここで欠陥と思われる反射波(以下、インジケーションと呼ぶ)が得られた場合、図 20A のエリアに対して、図 20B のフローチャートに従って欠陥か否かを判断する。

20

【0130】

まず、通常の斜角探傷法によりインジケーションの有無を確認する(S2004)。このとき、上述したように、欠陥の高さに応じて欠陥先端近傍の反射波又は欠陥開口部近傍の反射波と推定される反射波が得られる。

【0131】

次に、欠陥先端部からと推定されるインジケーションがエリア 2001 近傍に表示されるように、又は開口部からと思われるインジケーションがエリア 2003 近傍に表示されるように、探触子位置を調整する(S2005)。

【0132】

30

最後にモード変換波による反射波の有無を確認するため、エリア 2002 内における反射波の有無を確認する(S2006)。そして、処理 S2004 と処理 S2006 の何れかのステップで信号有りと判断された場合は、そのインジケーションは、欠陥に由来する可能性がある判断する。

【0133】

ここで、これらインジケーションによる欠陥判定について説明するのであるが、その具体的な説明に先立って、この図 20 の各ステップにおいて、信号が出現するエリア 2001、2002、2003 の特徴について説明する。

【0134】

ここで、図 21 から図 23 は、縦波斜角探傷法による欠陥先端からの反射波の伝播時間の和、つまり図 17 の径路 1701、1703 の和と、1 次クリーニング波法による欠陥開口面からの反射波の伝播時間の和、つまり図 18 の径路 1801、1803 の和と、モード変換波法による往復伝播時間の和、つまり図 19A の径路 1901、1902、1904 の和と、多重底面反射波による伝播時間を、夫々グラフで示したものである。

40

【0135】

なお、図 21 は縦波音速と横波音速の音速比(V/V_s)が 2 の場合、図 22 は音速比(V/V_s)が 1.5 の場合、そして図 23 は音速比(V/V_s)が 2.5 の場合の結果であり、夫々縦波音速は 5900 m/秒で固定し、横波音速のみを音速比によって変化させている。

【0136】

50

< エリア 2 0 0 1 >

図 2 1、図 2 2、図 2 3 に示すように、縦波音速と横波音速の音速比(V / V_s)が一般的な固体(2 ± 0.5)を対象とした場合において、開口面側から欠陥を探傷する場合の斜角探傷法によるエコーの伝播時間は、図 1 7 に示す伝播経路をとる、1 次クリーピング波(縦波 7 0 度から 9 0 度)による欠陥開口部からの反射波の伝播時間(2 1 0 2、2 2 0 2、2 3 0 2)と、図 1 8 に示す伝播経路をとる、欠陥先端からの反射波の伝播時間(2 1 0 1、2 2 0 1、2 3 0 1)となり、これらは、ほぼ試験体の第 1 底面反射波(図 8 A 相当)近傍に表示されることが判る。

【 0 1 3 7 】

特に、モード変換波で重要な縦波 6 0 度の場合においても、この関係は満たされていることが確認でき、このことから、縦波斜角法による反射波のうち、1 次クリーピング波による欠陥開口部からの反射波は縦波による板厚往復伝播時間(図 8 A)と、屈折角 7 0 度から 9 0 度近傍の領域の重なるエリア 2 0 0 3 の近傍に表示され、縦波斜角による欠陥先端部からの反射波は、板厚往復伝播時間(図 8 A)と屈折角 6 0 度近傍の領域の重なるエリア 2 0 0 1 の近傍に表示されることとなる。

【 0 1 3 8 】

< エリア 2 0 0 2 >

モード変換波による欠陥有無の判定を行うにあたって、縦波斜角探傷法によるインジケーションがエリア 2 0 0 1 又は 2 0 0 1 近傍に表示されているものとする。

【 0 1 3 9 】

図 2 1、図 2 2、図 2 3 から明らかなように、縦波音速と横波音速の比(V / V_s)が 2 ± 0.5 の範囲にある一般的な固体に対して、欠陥先端からの反射波を受信する縦波斜角法の探傷角度が 6 0 度から約 5 度程度変化しても、モード変換波による往復伝播時間(2 1 0 3、2 2 0 3、2 3 0 3)は、縦波による板厚片道伝播時間の 3 倍と横波による板厚片道伝播時間の和(図 8 D に相当)と、縦波及び横波による板厚片道伝播時間の和(図 8 B に相当)の間に存在することが判る。

【 0 1 4 0 】

このことから、これらの伝播時間(図 8 B と図 8 D)とモード変換波の探傷角度(6 0 度近傍)に囲まれた領域であるエリア 2 0 0 2 内に、モード変換波による反射波が表示され、そのエリア内の信号の有無から、欠陥のおおよその高さを判断することができる。

【 0 1 4 1 】

ここで、モード変換波が受信される場合の欠陥高さを、図 2 4 にグラフで示す。縦波音速と横波音速の音速比(V / V_s)の値(2.0 ± 0.5)によって、若干の変化はみられるが、板厚の約 3 分の 2 以上の高さを持つ欠陥の場合には、モード変換波が得られることが判る。なお、図 2 4 は、縦波音速は 5 9 0 0 m / 秒で固定し、横波音速のみを音速比(V / V_s)によって変化させた結果である。

【 0 1 4 2 】

次に、欠陥判定の具体的な欠陥判定方法について、図 2 8、図 2 9、図 3 0 に示した超音波探傷結果表示画面を用いて説明する。

【 0 1 4 3 】

図 1 で説明したアレイセンサ(探触子)を被検査体に設置して探傷する場合を想定し、このとき予想される欠陥は、被検査体の表面側に開口しているものとする。

【 0 1 4 4 】

そうすると、表示画面には、図 2 8 に示すように、被検査体の表面と超音波の入射角度と伝播時間に対応した扇形で示された信号表示領域 2 8 0 1 が表示される。

【 0 1 4 5 】

このとき、入射角度としては、例えばマイナス 5 度からプラス 8 5 度が設定され、伝播時間としては、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間が設定される。

【 0 1 4 6 】

この信号表示領域 2801 には、被検査体の表面と底面の間で発生する多重反射によって受信される信号が多重底面反射波の信号群 2802 として表示される。そして、この場合、探傷結果は大きく 3 つにグループ分けされる。

【0147】

まず、第 1 のグループの場合は、図 30 に示すように、縦波斜角法(70 度から 90 度近傍)による欠陥開口部近傍からと想定されるインジケーションはエリア 2001 に表示され、縦波斜角による欠陥先端部近傍からと想定されるインジケーションはエリア 2003 に表示され、さらにモード変換波によるインジケーションはエリア 2002 に表示される場合である。

【0148】

この場合は、縦波斜角で開口部近傍と想定されるインジケーションが得られているので、欠陥が発生すると予想される箇所からの反射波は、欠陥によるものと判断される。モード変換波によるインジケーションが受信されていることから、表面から板厚の約 3 分の 2 以上あるかなり大きなひびであると判断される。

【0149】

ここで、縦波斜角で欠陥先端部と想定されるインジケーションから推定される欠陥深さとモード変換波による推定値(板厚の約 3 分の 2 以上)の両者が一致していれば、縦波斜角での先端近傍からのエコーにより、欠陥高さの寸法評価をする。

【0150】

もしも、両者が一致していない場合は、欠陥先端からと想定されるエコーが実際は欠陥先端を捉えていない可能性が考えられるため、再度詳細に探傷を行う必要がある。

【0151】

次に、第 2 のグループの場合は、図 29 に示すように、エリア 2001 とエリア 2003 の両方にインジケーションが得られ、エリア 2002 にはインジケーションが得られない場合である。

【0152】

この場合は、縦波斜角で欠陥開口部と想定されるインジケーションが得られているために、インジケーションは欠陥によるものと判断され、しかもモード変換波による反射波がエリア 2002 に受信されていないことから、その高さは板厚の約 3 分の 2 に満たない、比較的小さなひびであると判断される。

【0153】

ここで、縦波斜角で欠陥先端部と想定されるインジケーションから推定される欠陥深さとモード変換波による推定値(板厚の約 3 分の 2 未満)の両者が一致していれば、縦波斜角での先端近傍からのエコーにより欠陥高さの寸法評価をする。

【0154】

もしも、両者が一致していない場合は、欠陥先端からと想定されるエコーが実際は欠陥先端を捉えていない可能性も考えられるため、再度詳細に探傷を行う必要がある。

【0155】

更に、第 3 のグループの場合は、図 28 に示すように、縦波斜角によるインジケーションがエリア 2001 にだけ表示される場合である。

【0156】

ここで、このような欠陥の開口面側からの探傷の場合、超音波以外の別の手法、例えば、液体浸透探傷法、渦電流探傷法、肉眼やカメラによる目視検査などにより開口部の位置が測定可能な場合が多い。

【0157】

そこで、これら他の手法による欠陥位置と超音波による位置が一致した場合は、エリア 2001 に表示されるインジケーションは欠陥の開口部近傍からの反射波であると判断できる。

【0158】

しかして、他の手法の結果と矛盾する場合は、開口部の反射波でない可能性があり、再

10

20

30

40

50

探傷が必要となるが、ここで、他の手法と一致していた場合は、縦波斜角で欠陥先端部による反射波も受信されず、モード変換波による反射波も受信されていないことから、板厚の約3分の1未満の比較的小さい欠陥であると判断される。

【0159】

この第3のグループの場合において説明した、エリア2001に表示されるエコーと他の手法による欠陥位置の比較については、可能であれば、第1と第2のグループの場合も同様に実施し、互いの結果が矛盾しないことを確認する方が望ましい。

【0160】

なお、欠陥有りと判断された場合は、図31に示すように、エリア901に表示された縦波斜角による反射波により、欠陥の先端部のエコー3102と欠陥の開口部のエコー3101から、欠陥の高さ評価を実施してもよい。

10

【0161】

なお、ここでも、グレーティングローブの低減に最適な素子ピッチを持ったアレイ探触子を用いない場合には、エリア(2001、2002、2003)内での信号の有無判定が阻害される可能性があることは、第1の実施形態の場合と同様である。

【0162】

このように、以上の実施形態によれば、欠陥の開口面側からの探傷の場合においても、グレーティングローブを低減した最適な素子ピッチを持つ、縦波と横波の両方に対してメインビームを送信可能なアレイ探触子を用いて、検査対象の縦波による板厚往復伝播時間と横波による板厚伝播時間の和に相当する時間までの受信信号を表示し、前記受信信号のうち、特に5つの多重底面反射波(図8A~E)及び超音波の入射角度に注目することで、アレイ探触子を用いても、通常の斜角探傷法に加えて、モード変換波法を実現でき、より信頼性の高い超音波探傷方法または装置を提供することができる。

20

【0163】

なお、図1又は図20などで示した多重底面反射波の時間については、上記した超音波探傷に用いるアレイ探触子の多重底面反射波から直接得る方法に限らず、それ以外にも別に垂直方向に超音波を入射する探触子を利用して多重反射波の時間を計測し、その値を用いてもよい。

【0164】

また、検査対象の縦波音速と横波音速及び板厚が既知である場合は、板厚を音速で除算するという計算により多重反射波の時間を求めてもよい。

30

【0165】

一方、検査対象の横波音速が不明である場合は、概算値として縦波音速の2分の1の値を用いてよい。

【図面の簡単な説明】

【0166】

【図1】本発明による超音波探傷方法及び装置の第1の実施形態を説明するための装置構成図である。

【図2】本発明による超音波探傷方法及び装置における超音波探触子の第1の実施形態を示す構成図である。

40

【図3A】超音波探触子から発生する縦波及び横波のメインビームとグレーティングローブを説明するための特性図である。

【図3B】超音波探触子から発生する縦波及び横波のメインビームとグレーティングローブを説明するための特性図である。

【図3C】超音波探触子から発生する縦波及び横波のメインビームとグレーティングローブを説明するための特性図である。

【図4】2次クリーピング波法の説明図である。

【図5A】モード変換波法の説明図である。

【図5B】モード変換波法の説明図である。

【図6】固体の音速及び音速比を説明するための特性図である。

50

【図 7】斜角探傷法の説明図である。

【図 8 A】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 8 B】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 8 C】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 8 D】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 8 E】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 8 F】検査対象の多重底面反射波と表示画像の説明図である。

【図 9 A】本発明の第 1 の実施形態における表示方法の説明図である。

【図 9 B】本発明の第 1 の実施形態における表示方法の動作を説明するためのフローチャートである。

10

【図 10】本発明の第 1 の実施形態における 2 次クリーピング波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 11】本発明の第 1 の実施形態における 2 次クリーピング波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 12】本発明の第 1 の実施形態における 2 次クリーピング波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 13】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 14】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

20

【図 15】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 16 A】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 16 B】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 16 C】本発明の第 1 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 17】欠陥の開口面側からの縦波斜角探傷の説明図である。

【図 18】欠陥の開口面側からの縦波斜角探傷の説明図である。

30

【図 19 A】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 19 B】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 20 A】本発明の第 2 の実施形態における表示方法の説明図である。

【図 20 B】本発明の第 2 の実施形態における表示方法の動作を説明するためのフローチャートである。

【図 21】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 22】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

40

【図 23】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波による反射波の伝播時間の説明図である。

【図 24 A】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 24 B】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 24 C】本発明の第 2 の実施形態におけるモード変換波が受信される場合の欠陥高さの説明図である。

【図 25】本発明の第 1 の実施形態において縦波斜角による反射波が表示される場合の探

50

傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図26】本発明の第1の実施形態において縦波斜角及び2次クリーピング波による反射波が表示される場合の探傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図27】本発明の第1の実施形態において縦波斜角と2次クリーピング波及びモード変換波による反射波が表示される場合の探傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図28】本発明の第2の実施形態において縦波斜角による欠陥開口部近傍からの反射波が表示される場合の探傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図29】本発明の第2の実施形態において縦波斜角による欠陥開口部及び欠陥先端部近傍からの反射波が表示される場合の探傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図30】本発明の第2の実施形態において縦波斜角による欠陥開口部及び欠陥先端部近傍からの反射波及びモード変換波が表示される場合の探傷表示画面の一例を示す説明図である。

【図31】本発明の第1の実施形態において縦波斜角による欠陥開口部及び欠陥先端部の反射波で欠陥高さをサイジングするための説明図である。

【図32】素子ピッチが大きい場合における探傷画面の一例を示す説明図である。

【図33】本発明の第1の実施形態において被検査体底面に欠陥がある場合の反射波の説明図である。

【図34】本発明の第1の実施形態において被検査体底面に形状変化部がある場合の反射波の説明図である。

【符号の説明】

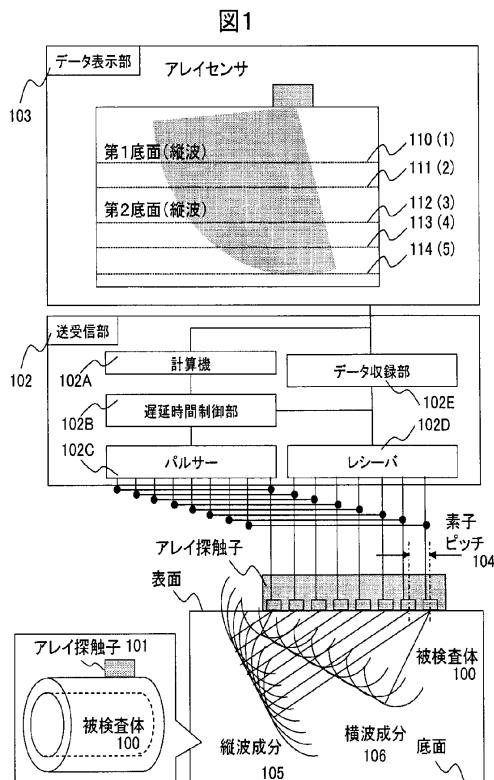
【0167】

101：アレイ探触子

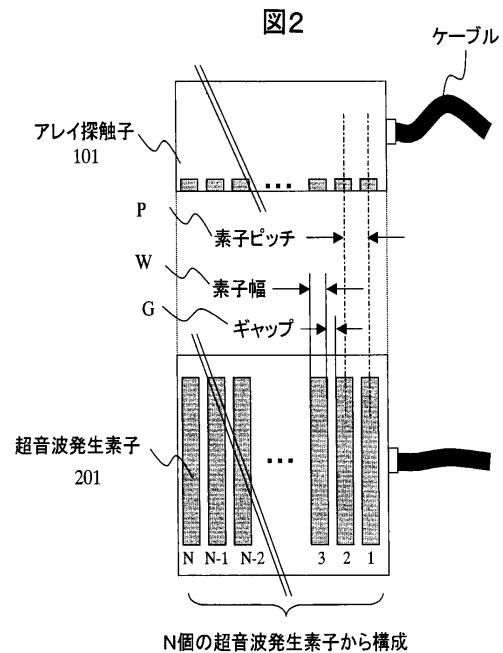
102：送受信部

103：データ表示部

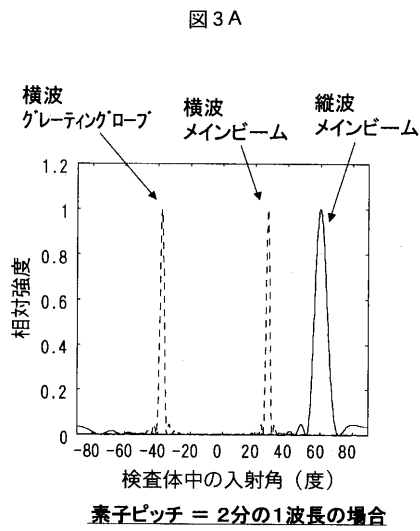
【図1】



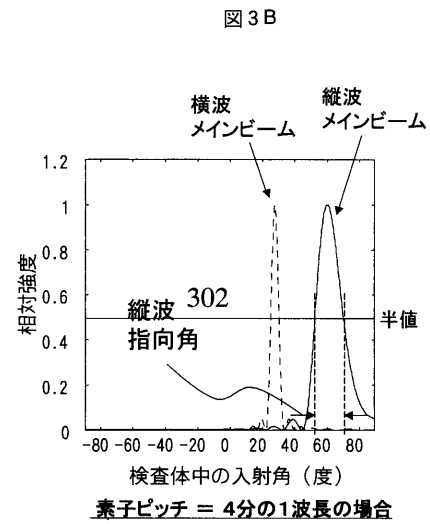
【図2】



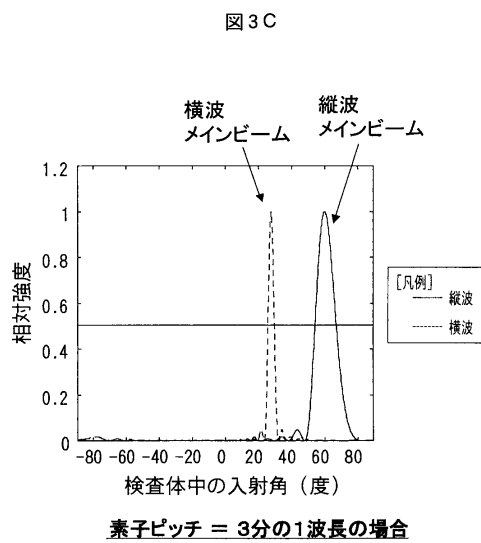
【図 3 A】



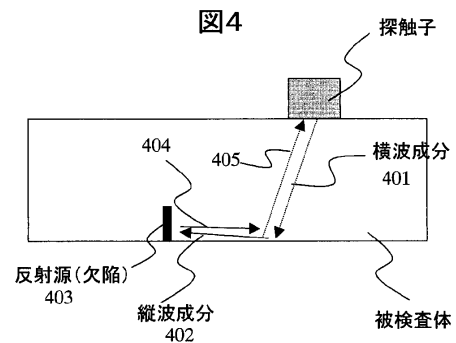
【図 3 B】



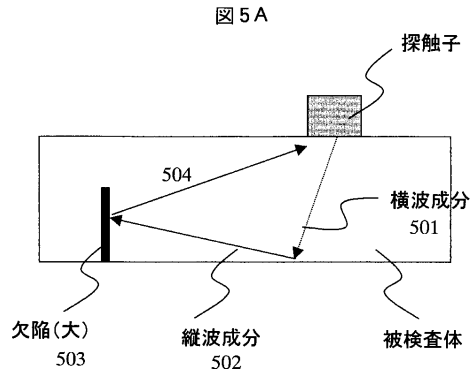
【図 3 C】



【図 4】



【図 5 A】



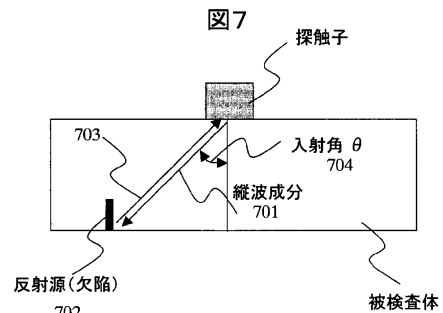
【図 6】

図 6

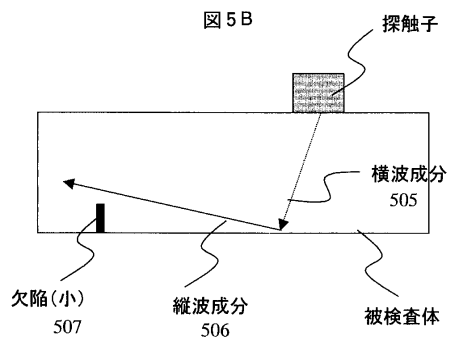
物質	縦波音速 V	横波音速 V_s	音速比 V/V_s
アルミニウム	6260	3080	2.03
鉄	5850	3230	1.81
銅	4700	2260	2.08
ニッケル	5630	2960	1.90
石英ガラス	5570	3515	1.58
ステンレス鋼302	5660	3120	1.81
塩化ビニール	2300	1100	2.09

※ 縦波及び横波音速値は「改訂 超音波探傷法」より引用

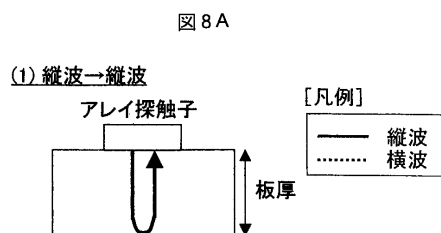
【図 7】



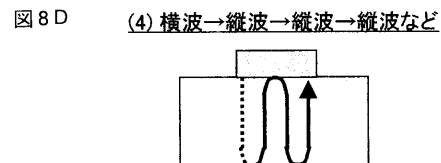
【図 5 B】



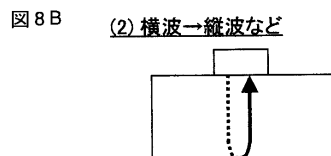
【図 8 A】



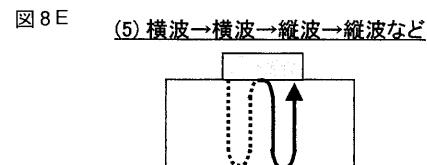
【図 8 D】



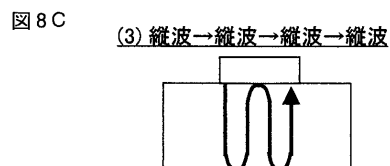
【図 8 B】



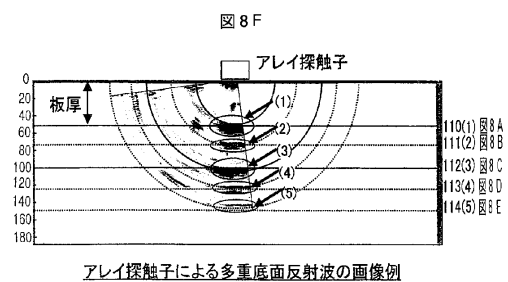
【図 8 E】



【図 8 C】

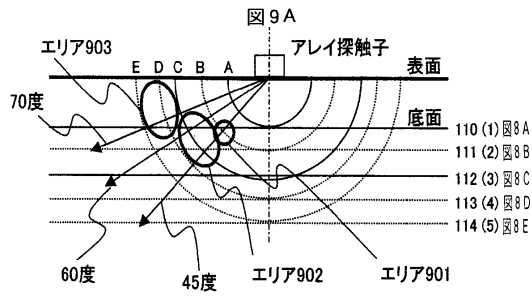


【図 8 F】

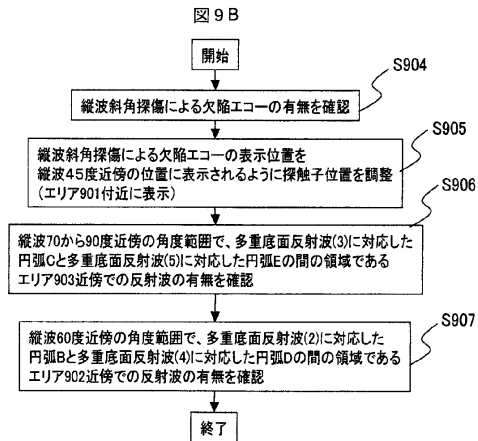


アレイ探触子による多重底面反射波の画像例

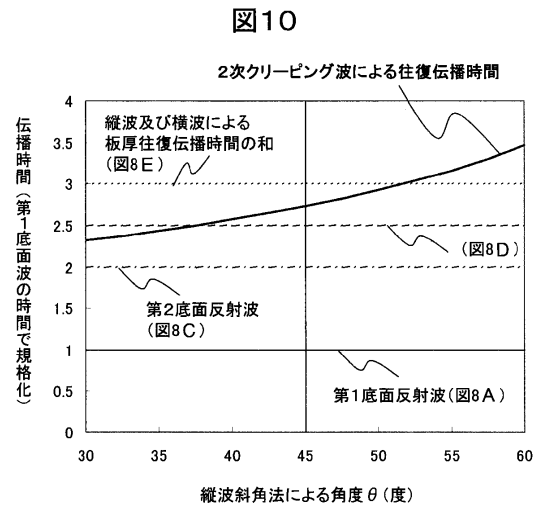
【図 9 A】



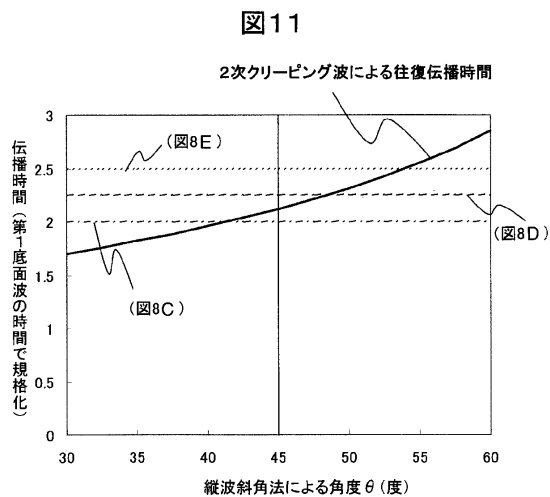
【図 9 B】



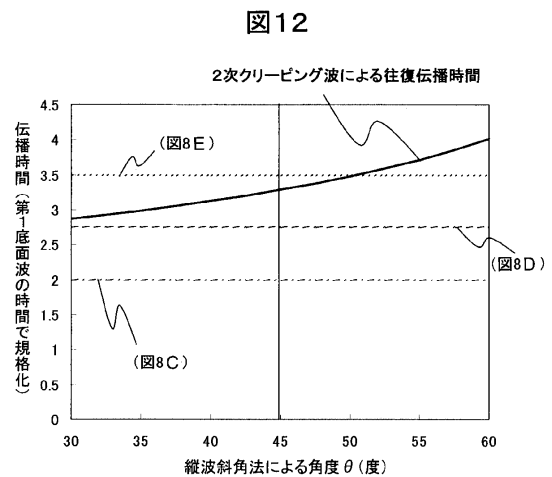
【図 10】



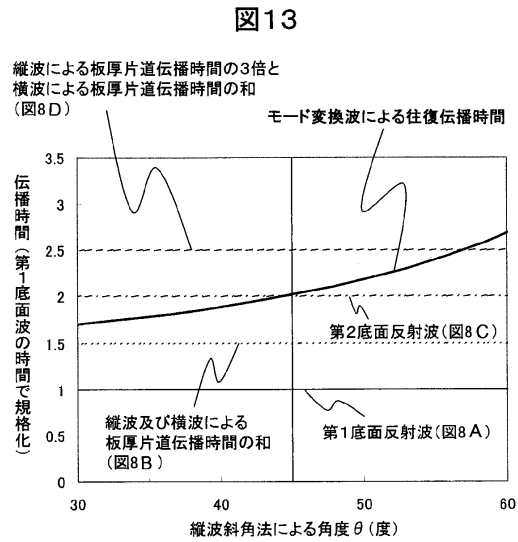
【図 11】



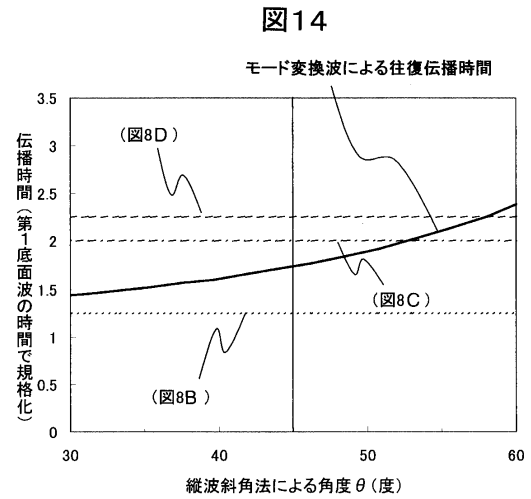
【図 12】



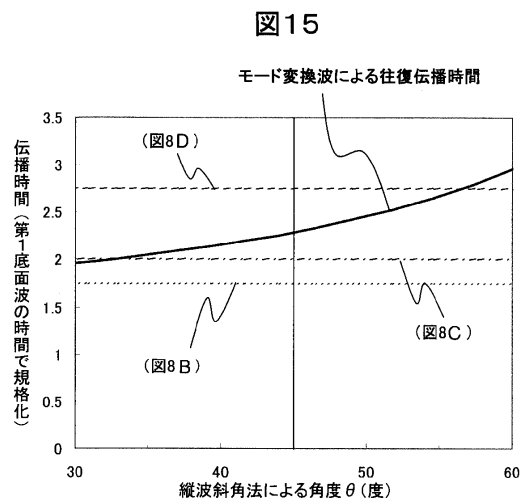
【図 13】



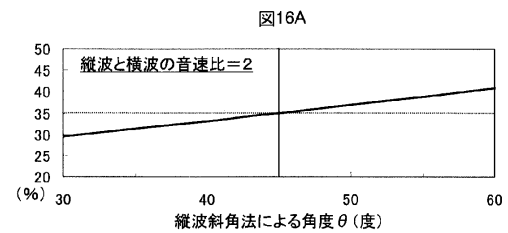
【図 14】



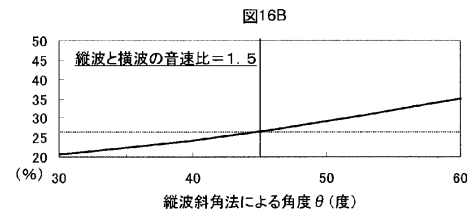
【図 15】



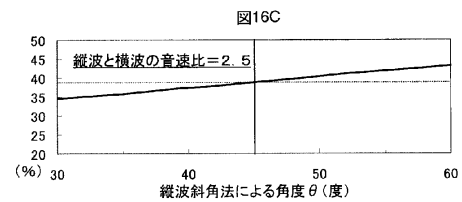
【図 16 A】



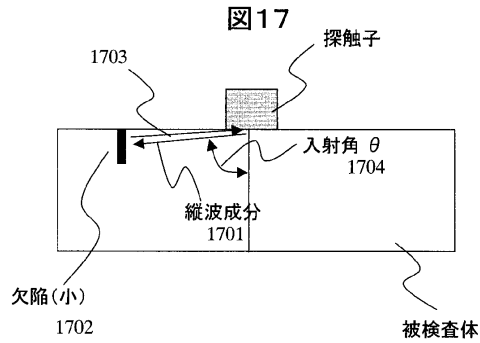
【図 16 B】



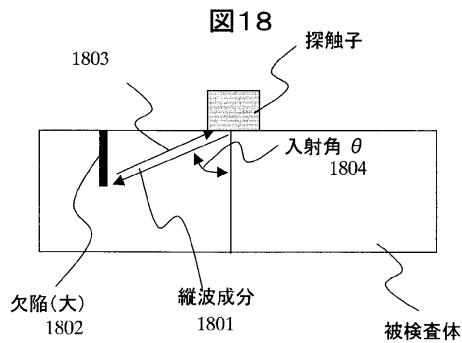
【図 16 C】



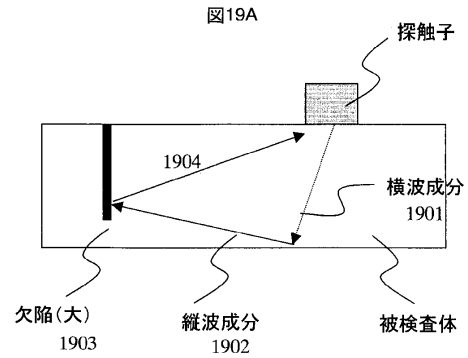
【図 17】



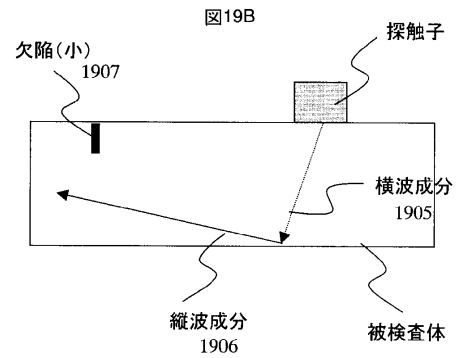
【図 18】



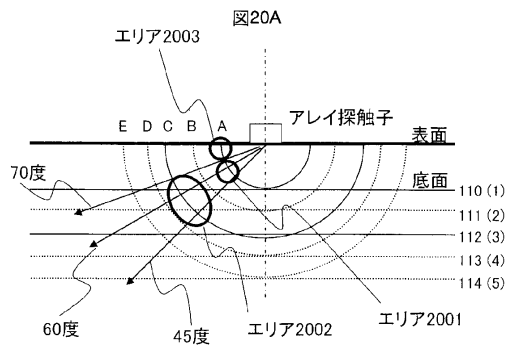
【図 19 A】



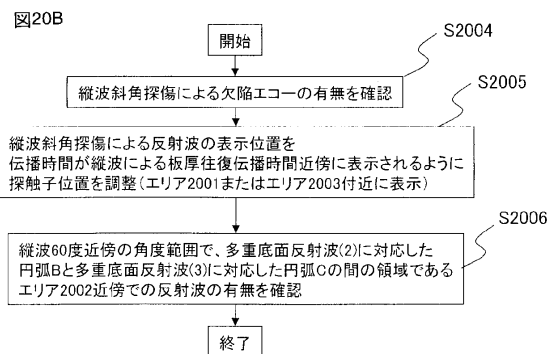
【図 19 B】



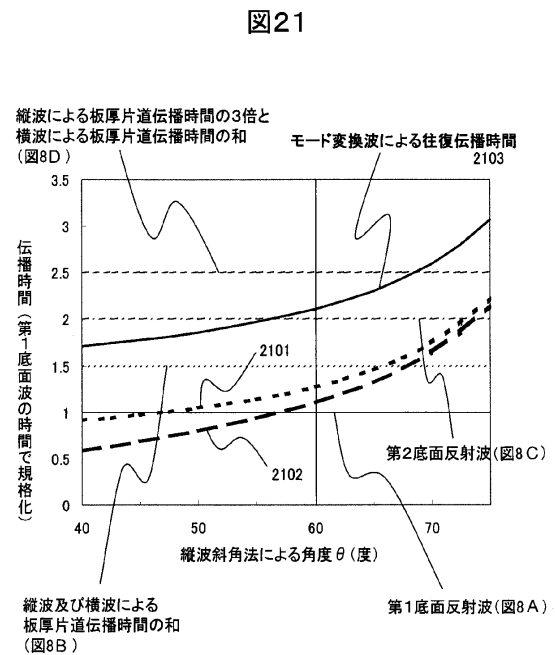
【図 20 A】



【図 20 B】

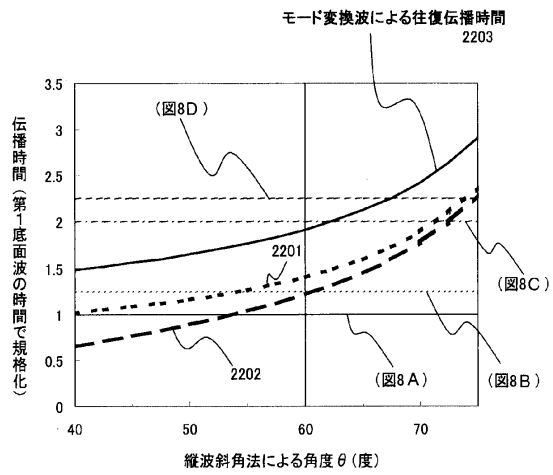


【図 21】



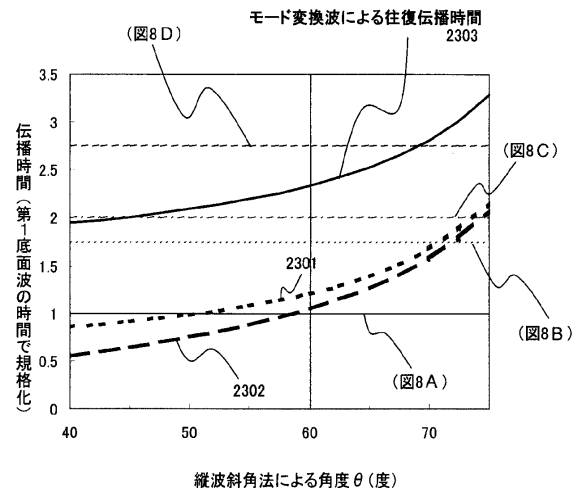
【図 2 2】

図22

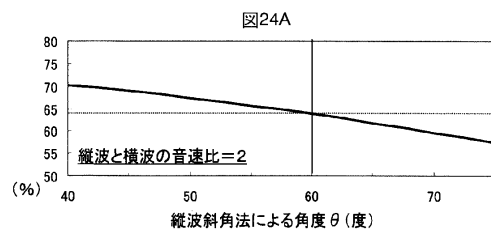


【図 2 3】

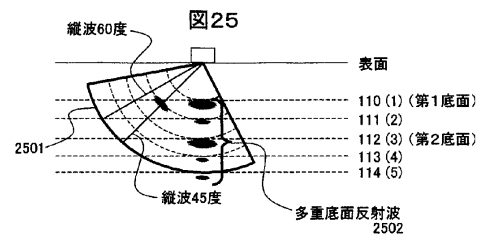
図23



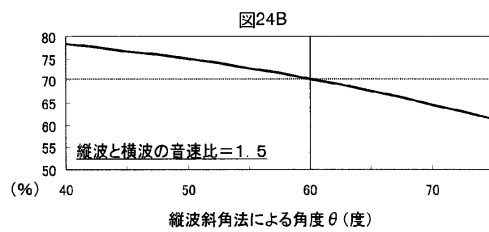
【図 2 4 A】



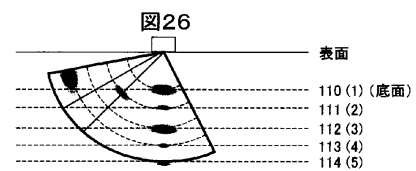
【図 2 5】



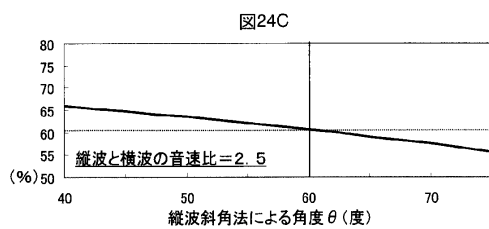
【図 2 4 B】



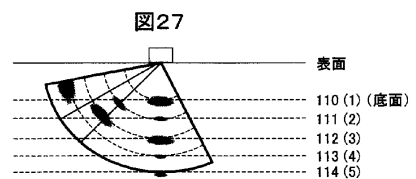
【図 2 6】



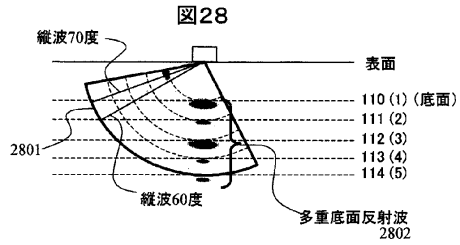
【図 2 4 C】



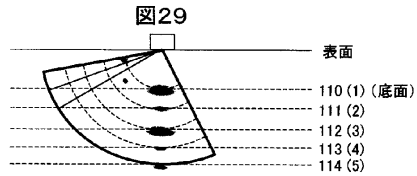
【図 2 7】



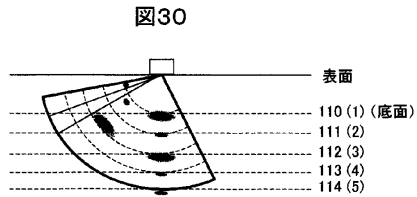
【図 28】



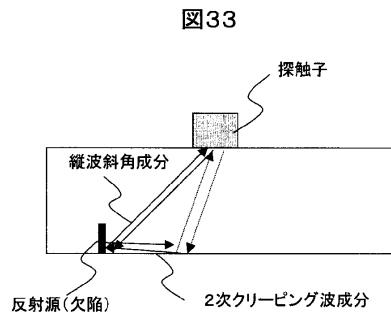
【図 29】



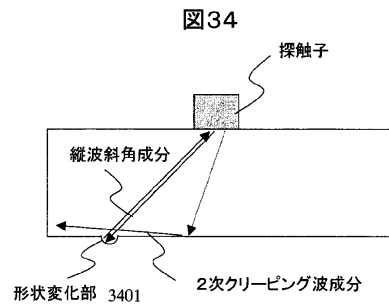
【図 30】



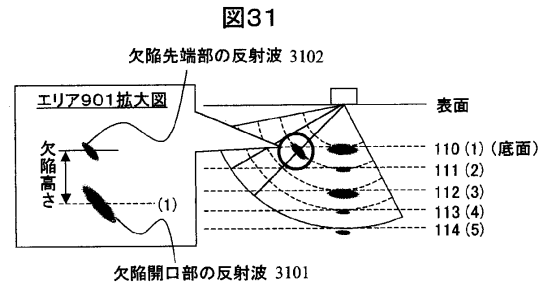
【図 33】



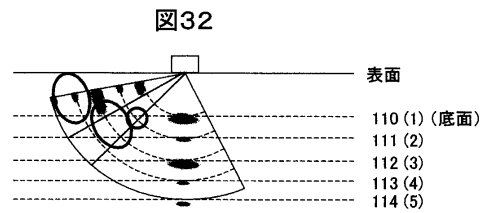
【図 34】



【図 31】



【図 32】



フロントページの続き

- (72)発明者 小池 正浩
茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株式会社 日立製作所 電力・電機開発研究所内
- (72)発明者 藤間 正博
茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株式会社 日立製作所 電力・電機開発研究所内
- (72)発明者 武捨 義則
茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株式会社 日立製作所 電力・電機開発研究所内
- (72)発明者 三木 将裕
茨城県日立市大みか町七丁目2番1号 株式会社 日立製作所 電力・電機開発研究所内

審査官 遠藤 孝徳

- (56)参考文献 米国特許第4363115 (US, A)
特開平11-295277 (JP, A)
特開平8-201352 (JP, A)
特開昭61-286747 (JP, A)
特開2000-146921 (JP, A)
特開2001-255308 (JP, A)
特表昭60-501874 (JP, A)
特許第3242864 (JP, B2)
日本学術振興会製鋼第19委員会編, 「超音波探傷法」, 日本, 日刊工業新聞社, 1974年
7月30日, 改訂新版, p. 265 - 268

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N 29/00 - 29/52
A61B 8/00 - 8/14
G01B 17/00 - 17/08
JSTPlus (JDreamII)
JST7580 (JDreamII)