

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6111325号
(P6111325)

(45) 発行日 平成29年4月5日(2017.4.5)

(24) 登録日 平成29年3月17日(2017.3.17)

(51) Int.Cl. F I
 GO 1 N 29/52 (2006.01) GO 1 N 29/52
 GO 1 N 29/06 (2006.01) GO 1 N 29/06

請求項の数 11 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2015-511038 (P2015-511038)	(73) 特許権者	000005108
(86) (22) 出願日	平成25年4月12日 (2013.4.12)		株式会社日立製作所
(86) 国際出願番号	PCT/JP2013/061006		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(87) 国際公開番号	W02014/167698	(74) 代理人	110000350
(87) 国際公開日	平成26年10月16日 (2014.10.16)		ポレール特許業務法人
審査請求日	平成27年9月24日 (2015.9.24)	(72) 発明者	溝田 裕久
			日本国東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
		(72) 発明者	永島 良昭
			日本国東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
		(72) 発明者	中畑 和之
			日本国愛媛県松山市文京町3 愛媛大学内
		審査官	比嘉 翔一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超音波検査方法および装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検査体を超音波を用いて検査する超音波検査方法において、
 収録した超音波波形から第一の探傷画像を作成するステップと、
 前記第一の探傷画像から有意な反射信号を検出するステップと、
 前記有意な反射信号の位置から各超音波送信位置までのそれぞれの超音波の、前記被検査体の持つ音響異方性の情報を含む伝搬時間を求める第二の伝搬解析を実施するステップと、

前記伝搬時間より各超音波送信位置における遅延時間情報を求めるステップと、
 前記遅延時間情報及び収録した超音波波形を時間反転した波形を入力として、前記被検査体への超音波の伝搬を解析する第一の伝搬解析モデルを作成するステップと、
 前記第一の伝搬解析モデル上で伝搬解析を実施した結果から第二の探傷画像を作成するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

【請求項2】

請求項1に記載の超音波検査方法において、
 前記第一の探傷画像を作成するステップは、
 収録した超音波波形を時間反転した波形を入力として、前記被検査体への超音波の伝搬を解析する第三の伝搬解析モデルを作成するステップと、
 前記第三の伝搬解析モデル上で伝搬解析した結果を出力するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

10

20

【請求項3】

請求項1又は2に記載の超音波検査方法において、
 前記第一の探傷画像を作成するステップは、
 数値解析アルゴリズムAを選択するステップと、
 収録した超音波波形を時間反転した波形を入力として、前記被検査体への超音波の伝搬を解析する第一の伝搬解析モデルを作成するステップと、
 前記第一の伝搬解析モデル上で前記数値解析アルゴリズムAを用いて伝搬解析して結果を出力するステップを有し、
 前記第二の伝搬解析を実施するステップは、
 前記数値解析アルゴリズムA以外の数値解析アルゴリズムを選択することが可能なステップと、
 前記有意な反射信号の位置から各超音波送信位置までのそれぞれの超音波の、前記被検査体の持つ音響異方性の情報を含む伝搬時間を求める第二の伝搬解析モデルを作成するステップと、
 前記数値解析アルゴリズムA以外の数値解析アルゴリズムを用いて第二の伝搬解析を実施するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

10

【請求項4】

請求項1に記載の超音波検査方法において、
 前記第一の探傷画像を作成するステップは、
 開口合成アルゴリズムを選択するステップと、
 収録した超音波波形を用いて開口合成処理により結果を出力するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

20

【請求項5】

請求項1から4のいずれか1項に記載の超音波検査方法において、
 前記有意な反射信号の位置は、あらかじめ有意な反射信号が検出されると想定される位置であることを特徴とする超音波検査方法。

【請求項6】

請求項1から5のいずれか1項に記載の超音波検査方法において、
 前記被検査体上にセンサを初期位置に設置するステップと、
 モデルを作成するステップを有し、
 前記モデルを作成するステップは、
 前記センサ及び前記被検査体の位置関係を取得するステップと、
 前記被検査体の解析領域を設定するステップと、
 前記被検査体の材料データを設定するステップと、
 前記センサの構造及びウェッジの解析領域を設定するステップと、
 前記センサの構造及び前記ウェッジの材料データを設定するステップとを有することを特徴とする超音波検査方法。

30

【請求項7】

請求項6に記載の超音波検査方法において、
 前記モデルを作成するステップは、
 溶接境界情報を設定するステップと、
 溶接部の材料データを設定するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

40

【請求項8】

請求項7に記載の超音波検査方法において、
 前記溶接境界情報を設定するステップは、
 表面波を用いて前記センサの中心位置と溶接部境界位置を決定するステップを有することを特徴とする超音波検査方法。

【請求項9】

被検査体を超音波を用いて検査する超音波検査装置において、
 解析器に、数値解析アルゴリズムを保持する記憶部と、

50

前記数値解析アルゴリズムを用いて、所定の反射信号の位置から各超音波送信位置までのそれぞれの超音波の、前記被検査体の持つ音響異方性の情報を含む伝搬時間を解析する順伝搬解析部と、

前記数値解析アルゴリズムを用いて、前記伝搬時間より求めた各超音波送信位置における遅延時間情報及び収録した超音波波形を時間反転した波形を入力として、前記被検査体への超音波の伝搬を解析する逆伝搬解析部と、

順又は逆伝搬解析する際に解析領域と解析条件を作成するモデル作成部と、

前記逆伝搬解析した結果を評価し、再度逆伝搬解析を実施するか判断する解析結果評価装置を具備することを特徴とする超音波検査装置。

【請求項 10】

10

請求項 9 に記載の超音波検査装置において、

制御部に、解析アルゴリズムを選択する演算選択装置を具備し、

前記解析器に、解析アルゴリズムとして複数の数値解析アルゴリズムを保持する記憶部を具備することを特徴とする超音波検査装置。

【請求項 11】

請求項 9 又は 10 に記載の超音波検査装置において、

前記記憶部に、開口合成アルゴリズムを保持し、

前記解析器に、収録した超音波波形を用いて開口合成処理を実施する開口合成処理部と

、前記開口合成処理した結果を評価し、逆伝搬解析を実施するか判断する合成結果評価部を具備することを特徴とする超音波検査装置。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、超音波検査方法および装置に関わり、特に、欠陥評価が困難とされる非均質な被検体や音響異方性を有する被検体を検査するに好適な超音波検査方法および装置に関する。

【背景技術】

【0002】

構造物の健全性評価における代表的な非破壊検査方法の一つとして、超音波検査が用いられている。超音波検査は、超音波センサ内部に備わる電気機械変換効率を持つ圧電素子（以下、素子）に電圧を与えることで超音波を発振し、この振動を検査対象物中に伝搬させ、超音波が物質の境界面などで反射する性質を利用し、その一部の反射波による振動を再び素子により電圧に変換し、収録、グラフ化、或いは画像化して検査する方法である。

30

近年、超音波検査手法の一つであるフェーズドアレイ（Phased Array 以下、PA）法や開口合成（Synthetic Aperture 以下、SA）法の適用拡大がなされている。

【0003】

PA法は、超音波センサ内部に配列された各素子を励振させるために与えるパルス電圧のタイミング（遅延）制御により、集束超音波ビームの走査が可能となり、複数の反射源を可視化する手法である。強い集束超音波によりSN比が良く、複雑な波形処理が不要であるため高速に画像化することができるが、遅延回路や多くの増幅器を必要とし、高価で可搬性が悪い。

40

【0004】

SA法は、超音波センサ内部に配列された一部の素子を用いて広いビームを電子走査して送信し、全ての素子で受信することで多数の経路で超音波を受信した波形をサンプリング後、波形毎に波源の存在し得る楕円体を求め、楕円体上に振幅値を重ね合わせることで、同じく複数の反射源を画像化する手法である。波形収録した後、PCで処理するため、PA法用の装置と比べて遅延回路や多くの増幅器を必要とせず、可搬性に優れた装置を実現できるが、一般に拡散超音波を用いるためSN比が悪く、さらに、複雑な波形処理が必要となるため高速化の工夫が必要となる。

50

【 0 0 0 5 】

どちらの手法も、殆ど超音波の音速やエネルギーの伝搬方向は一定という仮定の下で画像化しているため、均一等方性材料の検査に対しては、画像上の反射源位置と実際の反射源位置は良く一致する。しかし、一度溶けた金属が柱状結晶化することにより音響異方性を有する材料（以下、異方性材料と呼ぶ）では、音速やエネルギーの伝搬方向が変化するため、等方性を仮定して出力した画像上の反射源位置と実際の反射源位置で差異が生じ、測定精度が低下する。

【 0 0 0 6 】

この対策として、P A法のように素子に与える電気パルスのタイミングを制御することによって、物理的に超音波を集束させて検査する方法においては、予め異方性材料の性状を、理論値や文献値、断面計測などによってモデル化し、作成したモデル上でレイトレース法を用いて伝搬経路や伝搬時間を求め、高精度の検査結果画像を構成する手法が知られている（非特許文献1）。

10

【 0 0 0 7 】

また、S A法のように波形サンプリング方式によって計測された波形データを処理し、波形強度を平面・空間に重ね合わせる方法においても、予め異方性材料の性状を、理論値や文献値、断面計測などによってモデル化し、波形毎に適切な位置に波形強度情報を与え、それら強度を重ね合わせることで高精度の検査結果画像を構成する手法が開発されている（特許文献1）。

【 0 0 0 8 】

さらに近年、全波形サンプリング処理方式により収録した波形から必要な波形を取り出して処理し、処理した波形を時間反転して荷重条件を作成し、数値解析することにより、欠陥を画像化する手法が知られている。以下、波形を時間反転して数値解析して画像を再構成する手法を逆伝搬解析法と呼ぶこととする。数値解析アルゴリズムには、動弾性有限積分法や有限要素法など適用可能である。逆伝搬解析法を用いれば、被検体性状情報を含んだモデル上（解析領域）で逆伝搬解析することにより、複雑な被検体でも高精度で欠陥を評価できる利点がある（非特許文献2）。

20

【 0 0 0 9 】

時間反転をシミュレーション以外に応用した例としては、超音波で送受信を実施し、受信した波形を時間反転して処理し、処理した情報から作成したパルス電圧パターンを再び素子に与え、この操作を繰り返し実施することで高精度の超音波検査を実施するという手法がある（非特許文献3、4）。

30

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 0 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 6 7 1 9 6 9 3 号明細書

【 非特許文献 】

【 0 0 1 1 】

【 非特許文献 1 】 S. Pudovikov, A. Bulavinov, M. Kroning, 「Ultrasonic inspectability of austenitic stainless steel and dissimilar metal weld joints」

40

【 非特許文献 2 】 中畑和之・木本和志、「超音波アレイセンサを用いた非均質材料中の欠陥映像化の試み」、第60回理論応用力学講演会、平成23年3月

【 非特許文献 3 】 Mathias Fink, 「Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic Principles」、IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 39, NO.5, SEPTEMBER 1992

【 非特許文献 4 】 Najet Chakroun, Mathias A. Fink, and Francois Wu, 「Time Reversal Processing in Ultrasonic Nondestructive Testing」、IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 42, NO.6, NOVEMBER 1995

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

50

【 0 0 1 2 】

溶接部のように非均質で音響異方性を有する箇所を特に対象とし、センサを走査して検査を実施する場合、高精度な検査画像を出力するためには、準備を含めた検査時間が膨大になるという問題があった。

【 0 0 1 3 】

PA法においてはセンサ設置位置と音響異方性部分の相対位置が変化するたびに伝搬経路や伝搬時間が異なるため、各測定点における設定した全焦点の遅延時間パターンを予め準備し、適宜、遅延時間を読みこみ画像化する必要がある。このため、検査時間が膨大になるという問題があった。

【 0 0 1 4 】

また、SA法や特許文献1、非特許文献1に記された方法においても、センサを走査して検査を実施する場合には、同じく、センサ設置位置と音響異方性部分の相対位置が変化するたびに伝搬経路や伝搬時間が異なるため、各測定点における出力画像の全ピクセルにおける伝搬時間のシミュレーション(Reverse Phase Matching)を予め準備し、適宜画像化する必要がある。このため、やはり検査時間が膨大になるという問題があった。

【 0 0 1 5 】

非特許文献2に記された逆伝搬解析法による高精度画像化技術は、欠陥位置と被検体性状が大凡分かっていることを前提とし、逐次解析して画像を再構成するため、高精度の画像を即時には出力できないという問題があった。

【 0 0 1 6 】

非特許文献3や非特許文献4に記された時間反転法による高精度画像化技術は、繰り返し送受信するうちに発散する場合もあり、高精度な検査を実施できない問題があった。

【 0 0 1 7 】

そこで本発明は、非均質で音響異方性を有する材料においても、欠陥位置を高精度に、かつ、検査時間を短縮することが可能な超音波検査方法およ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 1 8 】

このような課題を解決するために本発明の超音波検査方法は、収録した超音波波形から第一の探傷画像を作成するステップと、収録した超音波波形から求めた荷重条件を含む逆伝搬解析モデルを作成するステップと、前記逆伝搬解析モデル上で逆伝搬解析を実施した結果から第二の探傷画像を作成するステップと、を有することを特徴とする超音波検査方法である。

【発明の効果】

【 0 0 1 9 】

本発明によれば、被検体の超音波検査において、被検体が非均質で音響異方性を有する材料においても、欠陥位置を高精度に、かつ、検査時間を短縮して実施することが可能な超音波検査方法および装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 0 】

【図1】数値解析アルゴリズムを用いた検査装置の構成図

【図2】数値解析アルゴリズムを用いた検査装置による検査方法を示すフロー図

【図3】検査方法の説明を示す補助図

【図4】数値解析アルゴリズムを切り替える検査装置の構成図

【図5】数値解析アルゴリズムを切り替える検査装置による検査方法を示すフロー図

【図6】開口合成処理を併用した本発明の検査装置の構成図

【図7】開口合成処理を併用した本発明の検査装置による検査方法を示すフロー図

【図8】本発明を用いた検査方法を示すフロー図

【図9】モデル作成方法を示すフロー図

【図10】モデル作成の概念図

10

20

30

40

50

【図 1 1】詳細モデルの作成方法を示すフロー図

【図 1 2】詳細モデル作成の概念図

【図 1 3】溶接境界の説明図

【図 1 4】表面波の合成方法の説明図

【図 1 5】荷重条件の説明図

【図 1 6】逆伝搬解析の説明図

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、本発明の実施形態について図面を用いて説明する。

【実施例 1】

10

【0022】

図 1 に本発明の超音波検査装置 1 を示す。基本の装置構成要素は、センサ 2、探傷器 3、制御器 4・解析器 9 (PC)、表示器 15 (ディスプレイ) の 4 つで構成されている。超音波を発振するセンサ 2 としてアレイセンサを用いる。探傷器 3、制御器 4 では、探傷器 3 を制御器 4 で制御することで、選択的にアレイセンサの各素子にパルス電圧を与えて超音波を発振することができ、かつ、選択的に反射波を受信して波形データ収録することができる。

【0023】

探傷器 3 にはパルサ・レシーバを備え、制御器 4 からの信号を受信してセンサに電圧を与え超音波を送信し、センサで受信した超音波を電圧へ変換して受信する。

20

【0024】

制御器 4 には、駆動機構 17 よりセンサの位置情報を取得する為の位置検出部 5 を有する。また制御部 6 からの信号により使用する素子を選択する使用素子選択部 7 を有し、受信した信号を解析器 9 へと送信する信号処理部 8 を有する。

【0025】

解析器 9 には、記憶部 10、モデル作成部 11、順伝搬解析部 12、逆伝搬解析部 13、解析結果評価部 14 がある。本実施例においては、特に記憶部 10 に数値解析アルゴリズムとしては、1 種類のみ有する場合について述べる。

【0026】

記憶部 10 は、数値解析を実施するアルゴリズムの他、収録波形データ、センサ 2 および素子位置、素子と被検体の間のウェッジ (シュー又はくさび) や水などの接触媒体、被検体の形状と、被検体を構成する材料データ (密度、スティフネス係数、粒径分布、等) を保有する。保有する数値解析アルゴリズムとしては、有限積分法や有限要素法など波動方程式を取り扱うことができる様々なアルゴリズムが挙げられるうち、一種類となる。

30

【0027】

モデル作成部 11 は、超音波の伝搬現象を数値解析する際に必要な解析領域を定義する機能を有する。すなわち、解析領域を定義するため、センサ構造、ウェッジなどの接触媒体、被検体などの形状・性状を入力情報として境界条件を作成し、解析領域をメッシュに分割するような機能や、入力波形を処理して荷重条件を作成する機能を有する。

【0028】

40

順伝搬解析部 12 は、例えば、モデル作成部により作成した解析領域上に波源 (荷重条件) を与えたモデルで伝搬解析を実施し、波源が素子位置にたどりついた時間を求める機能を有する。処理のアルゴリズムは様々な例が挙げられ、記憶部 10 に保有する数値解析アルゴリズムを用いて順伝搬解析を実施する。

【0029】

逆伝搬解析部 13 は、例えば、モデル作成部 11 により作成したモデル上において、収録した波形を荷重条件として、数値計算する機能を有する。ここでの数値計算には、有限積分法や有限要素法など波動方程式を取り扱うことができる様々なアルゴリズムが挙げられ、同じく記憶部 10 に保有する数値解析アルゴリズムを用いて順伝搬解析を実施する。特に、非均質で異方性を有する被検査体に対しては、有限要素法のアルゴリズムが好適で

50

ある。

【 0 0 3 0 】

解析結果評価部 1 4 には、逆伝搬解析により再構成された画像を評価し、被検体が健全な状態においては反射源が無い場所に、反射源が存在するかを判断する機能を有する。

【 0 0 3 1 】

表示器 1 5 における表示部 1 6 では解析結果を表示する。

【 0 0 3 2 】

図 1 の装置構成により検査を実施するに好適な検査方法を、図 2 と図 3 を用いて示す。ここでは、簡単のため、センサ 2 は被検体上で固定されているものとする。

【 0 0 3 3 】

S 0 0 0 で、検査を開始する。

【 0 0 3 4 】

S 0 0 1 で、波形を収録する。波形の収録時間（波形の全長）を T、アレイセンサを構成する素子数を N として、素子に 1 から N までの番号を付けたとする。全波形サンプリング方式なら、番号 J (1 J N) の素子で超音波を送信し、番号 K (1 K N) の素子で超音波受信するため、素子番号の組み合わせ (J , K) の N × N 個の全組み合わせによる波形収録を実施する。この時の収録波形を $\phi_{JK}(t)$ とする。また、S A 法で用いられるようなサンプリング方式なら、送信時には N 素子全てを用いて同時に超音波を送信し、受信時には各素子で受信する N 個の波形収録を実施する。この時の収録波形を $\phi_K(t)$ とする。波形収録は、全波形サンプリング方式でも良いし、サンプリング方式でも良い。例えば、全波形サンプリング方式で収録した波形から、サンプリング方式で収録した波形を合成することが可能である。これは、数式 1 の関係を有するからである。

【 0 0 3 5 】

【数 1】

$$\phi_K(t) = \sum_{1 \leq J \leq N} \phi_{JK}(t)$$

【 0 0 3 6 】

例えば、アレイセンサが 3 素子で構成されている場合、サンプリング方式による波形と全波形サンプリング方式による波形は、 $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{21} + \phi_{31}$ となる。全波形サンプリング方式は、サンプリング方式と比べて情報量が多いため、当然、波形処理の自由度が高いのが特徴である。以下は簡単のため、サンプリング方式で収録した波形を用いた場合に限定して説明する。

【 0 0 3 7 】

S 0 0 2 で、記憶部 1 0 に予めインプットしているセンサ仕様、ウェッジ仕様、被検体仕様などを用い、収録波形を荷重情報として逆伝搬解析を実施する解析領域を作成し、逆伝搬解析モデルとする。ここで、荷重情報は、S 0 0 1 における収録波形を時間反転し、数式 2 として作成したものである。

【 0 0 3 8 】

【数 2】

$$I_K(t) = \alpha \cdot \phi_K(T - t)$$

【 0 0 3 9 】

は、例えば、素子面積を解析領域のメッシュ単位に分割して荷重条件とするための定数や、レーダーや超音波による画像化技術で一般に用いられる、素子位置 K によって変化するような重みづけするための定数である。作成した荷重情報 $I_K(t)$ は、各素子位置に相当する解析領域に与える。ここで、解析領域は、ウェッジや被検体の材質や形状などから境界条件を作成、解析領域を決定してメッシュに分割したものである。この段階では、被検体の溶接部の溶接境界や音響異方性を考慮せず、音響的に等方性を仮定した解析領域を設定する。

【 0 0 4 0 】

10

20

30

40

50

S 0 0 3 で、記憶部 1 0 に保有する数値解析アルゴリズムにより、作成した逆伝搬解析モデルで逆伝搬解析を実施する。

【 0 0 4 1 】

ここで、荷重条件と逆伝搬解析について詳細を説明する。図 1 5 を用いて荷重条件について説明する。ある素子 A で $A(t)$ の波形を収録したとする。この収録波形を時間反転させて、定数を加味する。これにより荷重条件が得られる。逆伝搬解析では、この得られた荷重条件 $I_A(t)$ が $A(t)$ の波形を収録した素子に与えられたとして解析を行なう。

【 0 0 4 2 】

図 1 6 を用いて逆伝搬解析の詳細について示す。図 1 5 で求めた荷重条件を各素子において求め、この荷重条件が各素子に与えられた場合の超音波の伝搬の様子を、記憶部 1 0 に保有する数値解析アルゴリズムを用いて数値解析すると、図 1 6 のような画像として描写される。図 1 6 (a) にはある時刻 t での様子を示す。荷重情報 $I_A(t)$ が素子 A に与えられた場合、ある時刻 t では素子 A を中心に図 1 6 (a) のように波形が伝わる。ここで、解析した情報は、実試験での伝搬をより忠実に反映している。

10

【 0 0 4 3 】

その後、時刻 $t (= t + t)$ が経過すると、波形が伝搬して図 1 6 (b) に示すような画像となる。ここで素子 B から波形が伝わる様子が分かる。この素子 B で入力される波形は、素子 B で観測された波形から求めた荷重条件 $I_B(t)$ である。そして、時刻 $2t (= t + 2t)$ が経過すると図 1 6 (c) のように波が伝わる。ここで、素子 A 及び素子 B から伝わる波によって箇所 A 3 0 では波形の重ね合わせが生じて、画像としては波形が濃くなる。なお、解析器での処理は波形に対して処理がされているが、画像上ではこの波形の高さ（振幅）を複数のレベルに分けて濃淡で表すようにしている。

20

【 0 0 4 4 】

このような処理を波形の収録時間 T 分、全ての素子に対して実施することで、最終的には検査体の欠陥を画像化することが可能となる。これらの処理は実際に素子に波形を入力するのではなく、解析器 9 で処理をする。なお、処理は波形の収録時間 T 分全てではなく、予め欠陥の発生しそうな位置関係が分かっている場合、必要な時間分のみ抽出して処理するようにしても構わない。

【 0 0 4 5 】

S 0 0 4 で、解析結果（例えば画像）を出力する。

30

【 0 0 4 6 】

S 0 0 5 で、解析結果を評価し、有意な信号 S が検出されるか評価を実施し、有意な信号 S が検出された場合、には S 0 0 6 のステップへ進む。

【 0 0 4 7 】

S 0 0 6 で、再解析が必要か判定する。再解析が必要と判定された場合には S 0 0 7 のステップへ進む。

【 0 0 4 8 】

S 0 0 7 で、例えば音響異方性を有する被検体においては、音響異方性の情報を含む解析領域を作成する。また、S 0 0 5 において有意な信号 S 中の場所 SX に、例えば、点音源を模擬した荷重条件を付与する。点音源を模擬した荷重条件を付与する場所 SX としては、例えば、有意な信号 S 中、最も信号強度が強かった場所となる。

40

【 0 0 4 9 】

S 0 0 8 で、順伝搬解析を実施し、点音源を模擬した荷重条件を付与した場所 SX から各素子位置までの伝搬時間を求める。ここで求める伝搬時間は被検体の持つ音響異方性の情報を含む伝搬時間である。例えば、接触媒質、ウェッジ、母材及び溶接部での超音波の伝搬速度の違いも付与したものである。なお、図 3 において有意な信号 S は被検体外に表示されているため、ここでの音響異方性情報としては、母材における音響異方性情報、又は最も近い部位における音響異方性情報を与えるようにする。

【 0 0 5 0 】

50

S 0 0 9で、S 0 0 8で求めた伝搬時間より遅延時間 d_k を算出する。遅延時間の一例としては、点音源を模擬した場所 S_X より、最も遠い、すなわち、波形の伝わる伝搬時間が最もかかる素子位置での伝搬時間を基準として、この基準の伝搬時間と各素子位置に波形が伝わるまでの伝搬時間の差分をとって、各素子位置での遅延時間と定義する。S 0 0 9において作成した荷重条件を算出した遅延時間 d_k を用いて、新たな荷重条件 $I_K(t) \cdot D(d_k)$ を作成する。ここで、関数 D は遅延時間を与える関数とした。

【0051】

S 0 1 0で記憶部10に保有する数値解析アルゴリズムにより、被検体性状を含む解析領域上で荷重条件 $I_K(t) \cdot D(d_k)$ を各素子位置に与えて逆伝搬解析を実施する。ここでの処理は、S 0 0 3での逆伝搬解析に遅延時間 $D(d_k)$ を加味した点が異なっている。

10

【0052】

S 0 1 1で、解析結果を出力し、S 0 1 2で、検査を終了する。図3に示すように、被検体を等方性で近似し、遅延時間を加味しないで逆伝搬解析により探傷結果を画像化した場合に比べて、被検体の詳細情報と遅延時間を加味することで、正しい位置で高精度な欠陥表示が実現している。被検体の詳細情報を加味し、遅延時間を加味しない処理の場合も考えられるが、この場合は、順伝搬解析が不要な分だけ処理時間が早くなり、遅延時間を加味せず被検体を等方性で近似した場合と比べると精度は高いが、被検体の詳細情報と遅延時間を加味する場合と比べると集束効果が得られないため精度は若干低下する。

【0053】

20

ここで、S 0 0 5で、有意な信号が無い場合、または、S 0 0 6で再解析の必要性が無いと判断された場合も、S 0 1 2で検査を終了する。また、図2中、S 0 1 3として、S 0 1 1の解析結果の出力後に再度S 0 0 7に戻ることによって、複数の有意な信号が検出された場合や、画像をさらに高精度化したい場合に対応することが可能となる。

【0054】

このような処理を行うことで、音響異方性を加味した高精度な探傷結果を得られるため、欠陥位置を高精度に求めることが可能となる。高速だが低精度のS 0 0 5の処理における粗い画像化結果と、S 0 1 0の処理での高精度の検査とを併用することで、欠陥位置を高精度に、かつ、短時間で検査することができる。

【実施例2】

30

【0055】

図4に、記憶部10に数値解析アルゴリズムを2つ以上有する場合の装置構成を示す。数値解析アルゴリズムには、等方性として作成したモデル上において高速に解析できるが、音響異方性として作成したモデル上においては高速に解析することが困難なアルゴリズムや、等方性・音響異方性に関わらず解析可能であるが、解析速度が相対的に遅いアルゴリズム、また、波動現象を取り扱えるアルゴリズムと取り扱えないアルゴリズムがある。そこで、図1の装置構成に加え、記憶部10に2種以上の数値解析アルゴリズムをもち、解析結果評価部14によって数値解析アルゴリズムを変更して数値解析を実施するための演算選択部18が制御器4に必要となる。

【0056】

40

例えば、等方性として作成したモデル上において高速に解析できるアルゴリズムには動弾性有限積分法、等方性・音響異方性に関わらず解析可能なアルゴリズムには有限要素法がある。また、動弾性有限積分法や有限要素法は波動方程式を解くため、波動現象を取り扱えるが、取り扱えないアルゴリズムとして、例えば幾何光学的な伝搬経路を求めて、伝搬時間や遅延時間を算出できるレイトレース法がある。

【0057】

図4の装置構成を用いて、検査を実施するのに好適な検査方法を図5に示す。ここでも、簡単のため、センサは被検体上で固定されているものとする。

【0058】

S 1 0 0からS 1 0 2は、S 0 0 0からS 0 0 2と同じである。S 1 0 3で、記憶部1

50

0 に保有する数値解析アルゴリズムにより、作成した逆伝搬解析モデル上で逆伝搬解析を実施する（ここで逆伝搬解析を実施するアルゴリズムをアルゴリズム A とする。）。

【0059】

S104 から S106 は、S004 から S006 と同じである。S106 で、再解析が必要とされた場合、S107 でアルゴリズム A を他のアルゴリズム、例えば異方性材料の解析が可能なアルゴリズム B に変える必要があるかを判別する。このようにすることで、記憶部 10 に新規開発した数値解析アルゴリズムを記憶させるだけで、装置の改良が図れる。例えばアルゴリズム A は、高速に等方性材料における解析を実施できるが、異方性材料における解析は困難である場合、S107 でアルゴリズムが再選択必要と判断し、S108 で、異方性材料における解析が可能な別のアルゴリズム B を選択する。

10

【0060】

S109 で、S008 と同様に S105 において検出された信号の場所 SX に、点音源を模擬した荷重条件を付与する。

【0061】

S110 で、アルゴリズム B により、順伝搬解析を実施し、点音源を模擬した荷重条件を付与した位置から各素子位置までの伝搬時間を求める。

【0062】

S111 で、求めた伝搬時間より遅延時間 d_k を算出する。S002 において作成した荷重条件を算出した遅延時間 d_k を用いて、新たな荷重条件 $I_k(t) \cdot D(d_k)$ を作成する。作成した新たな荷重条件を各素子位置に与える。

20

【0063】

S112 で、アルゴリズム B により、被検体性状を含む解析領域上で逆伝搬解析を実施する。

【0064】

S113 で、解析結果を出力し、S114 で、検査を終了する。

【0065】

S105 で、有意な信号が無い場合、または、S106 で再解析の必要性が無いと判断された場合も、S114 で検査を終了する。図 5 中、S115 として、S113 の解析結果の出力後に再度 S109 に戻ることによって、複数の有意な信号が検出された場合や、画像をさらに高精度化したい場合に対応することが可能となる。

30

【0066】

ここで、順伝搬解析に用いたアルゴリズム B には、アルゴリズム A でも B でもないアルゴリズム C を用いても良い。例えば、アルゴリズム A には動弾性有限積分法、アルゴリズム B には有限要素法、アルゴリズム C にはレイトレースを用いると良い。レイトレース法を選択した場合は、場所 SX を起点とし、各素子までのレイトレース法による幾何光学的な伝搬時間を求めて遅延時間を算出する。

【0067】

実施例 2 では記憶部 10 に複数のアルゴリズムを有するため、検査体の材質に最適なアルゴリズムを選択することで、高速に、かつ高精度に検査が可能となる。

【実施例 3】

40

【0068】

図 6 に、図 1 や図 4 に示した装置構成に加え、記憶部 10 に開口合成処理を実施する合成処理アルゴリズムと、実際に合成を行なう合成処理部 19 と、開口合成処理結果を評価するための処理結果評価部 20 を具備する場合の装置構成を示す。開口合成処理を実施することにより、等方性材料であるとの仮定の下、高速に画像化できる。

【0069】

図 6 の装置構成を用いて、検査を実施するのに好適な検査方法を図 7 に示す。ここでも、簡単のため、センサ 2 は被検体上で固定されているものとする。

【0070】

S200 から S201 は、S000 から S001 と同じである。S202 で、記憶部 1

50

0 中、開口合成アルゴリズムが演算選択部 18 で選択される。

【0071】

S203 で、収録波形を開口合成処理する。

【0072】

S204 で、開口合成処理による結果、例えば画像を出力し、S205 で、処理結果評価部 20 により、有意な信号 S が検出されるか評価を実施し、有意な信号 S が検出された場合、S206 で、解析が必要か判定する。解析が必要と判定された場合、演算選択部 18 により記憶部中、数値解析アルゴリズムが選択され、S207 では、S008 と同様に、S205 において検出された信号の場所 SX に、点音源を模擬した重条件を付与する。以下、S208 から S212 は、S008 から S012 と同じである。

10

【0073】

S205 で、有意な信号 S が無い場合、または、S206 で再解析の必要性が無いと判断された場合も、S212 で検査を終了する。また、S213 として、S211 の解析結果の出力後に再度 S207 に戻ることによって、複数の有意な信号が検出された場合、画像をさらに高精度化したい場合に対応することが可能となる。

【0074】

本実施例では、開口合成処理を実施することにより、等方性材料であるとの仮定の下、高速に画像化できる。

【実施例 4】

【0075】

20

以上は簡単のため、センサを固定した場合を想定して記載したものである。実際の超音波検査は、センサを被検体上で移動させて実施することが多い。センサを移動させて検査する場合の検査フローについて図 8 に示す。

【0076】

S300 で、センサを被検体上に設置し、検査を開始する。

【0077】

S301 では、センサは初期位置にある。

【0078】

S302 で、制御器からの命令により、超音波の送受信を開始し、S303 で、S001、S101、S201 に相当するステップとなる波形収録を実施する。

30

【0079】

S304 で、S004、S104、S204 に相当する画像を出力する。

【0080】

S305 で、前記画像上に有意な信号が無いか判別し、有意な信号が無い場合は、S307 で、検査すべき全領域を検査し終わったか判定し、検査完了の場合、S309 で、検査を終了する。

【0081】

S305 で有意な信号があった場合は S306 で、S007 - S011、S109 - S113、S207 - S211 に相当する被検体の詳細情報を含んだモデルでの数値解析を実施し、画像化する。S306 のステップは、S303 において実施した収録波形データがあれば、検査中、終了後を問わず実施できる。

40

【0082】

S307 において未完了の場合は S308 で、制御器からの命令により、センサの走査軌道・走査ピッチに従ってセンサは移動し、全領域を検査するまで S302 - 307 を繰り返す。

【0083】

本実施例では、センサを被検体上で移動させて実施するため、広い検査範囲をカバーすることが可能である。

【実施例 5】

【0084】

50

以上、発明を実施するための実施例 1 - 4 において、図 3 における有意な信号 S を評価し、順伝搬解析において、場所 S X の荷重条件あるいは、レイトレース法の起点 S X を決定する代わりに、予め欠陥が予測される場合は、この予め欠陥が予測される場所を S X とすればよい。

【 0 0 8 5 】

本実施例では起点 S X を決定する必要が無いいため、より高速に検査が実施できる。

【実施例 6】

【 0 0 8 6 】

センサを被検体上で移動させて本発明を実施するには、モデルを簡単にかつ精度良く作成する必要がある。モデル作成のために記憶部 1 0 には、被検体の詳細な形状データや材料データ、センサ走査軌道、センサ走査ピッチ等を保持させておく。

【 0 0 8 7 】

被検体に対し、等方性材料を仮定した検査を実施する場合のモデルの作成方法を、図 9 と図 1 0 に示す。

【 0 0 8 8 】

S 4 0 0 で、モデル作成を開始する。S 4 0 1 で、センサの素子・ウェッジと被検体の位置関係を取得する。S 4 0 2 で、被検体の形状データを用いて、解析を実施する 2 次元あるいは 3 次元領域を設定する。S 4 0 3 で、被検体の材料データを領域に設定する。S 4 0 4 で、例えば、収録波形から作成した荷重条件を付与するための素子位置や、センサ構造としてバックング（吸収境界）を考慮した解析領域、ウェッジの形状などから解析領域を設定する。S 4 0 5 で、バックングやウェッジなどの材料データを付与し、モデルを作成すると良い。

【 0 0 8 9 】

次に、溶接部などの非均質で音響異方性を有する場合を想定した、詳細モデルの作成方法について、図 1 1 と図 1 2 を用いて説明する。S 4 0 0 - 4 0 5 までは同じであるが、S 4 0 6 で、記憶部 1 0 から、溶接部の境界情報を設定する。

【 0 0 9 0 】

S 4 0 7 で、記憶部 1 0 から溶接部の詳細な材料データを読み出して付与することにより、溶接部を模擬したモデルを作成することができる。

【 0 0 9 1 】

一般に溶接部の材料データとしては、一度溶けた金属が固まるときに結晶化するため、各位置・領域における平均的な結晶成長方向、また、結晶化した金属種類に相当するステイフネス定数や密度を保持すると良い。

【 0 0 9 2 】

本実施例では予めモデルを有してしなくても、簡単な方法でモデルが作成できるようになるため、検査対象の汎用性を高めることが可能となる。

【実施例 7】

【 0 0 9 3 】

本実施例では、特に、溶接部が研磨されて肉眼で確認されにくい場合や、溶接部の精確な位置が不明な場合を想定した場合を説明する。S 4 0 6 で溶接部が肉眼で確認されにくい場合や、溶接部の位置が不明な場合、溶接部の境界情報を設定するための方法について図 1 3 と図 1 4 を用いて説明する。

【 0 0 9 4 】

溶接境界を判定するためには、S 0 0 1、S 1 0 1、S 1 0 2 で収録した波形に遅延時間を与えて、表面波が強調されるように波形を合成し、溶接線を検出すればよい。表面波を強調するには、全波形サンプリング方式による収録波形を用いるとよい。図 1 4 に示すように、隣り合う素子から発せられた超音波が、ウェッジ内を經由して被検体表面で表面波となり反射源に到達、反射源で反射されて再び被検体表面からウェッジを伝搬して素子に到達した場合の伝搬時間差 D_L は往復で、数式 2 のように表せる。

【 0 0 9 5 】

【数 3】

$$D_L = 2P \left(\frac{1}{\alpha \cdot v_s \cdot \cos \theta} - \frac{\tan \theta}{v_w} \right)$$

【0096】

ここで、 θ はウェッジの傾き、 v_w はウェッジ内の縦波音速、 v_s は被検体内の横波音速であり、 α は横波と表面波の音速の関係上、0.9から0.95までの値をとる。ウェッジが無い場合、 $\alpha = 0$ を代入する。

【0097】

例えば、この時間差 D_L を用いて、全波形サンプリング方式で収録した波形のうち、同一の素子で送受信をして収録した波形 $\phi_{ii}(t) (1 \leq i \leq N)$ に遅延時間を与え、

【0098】

【数 4】

$$\phi_s = \sum \phi_{ii}(t) \cdot D((i-1)d_k)$$

【0099】

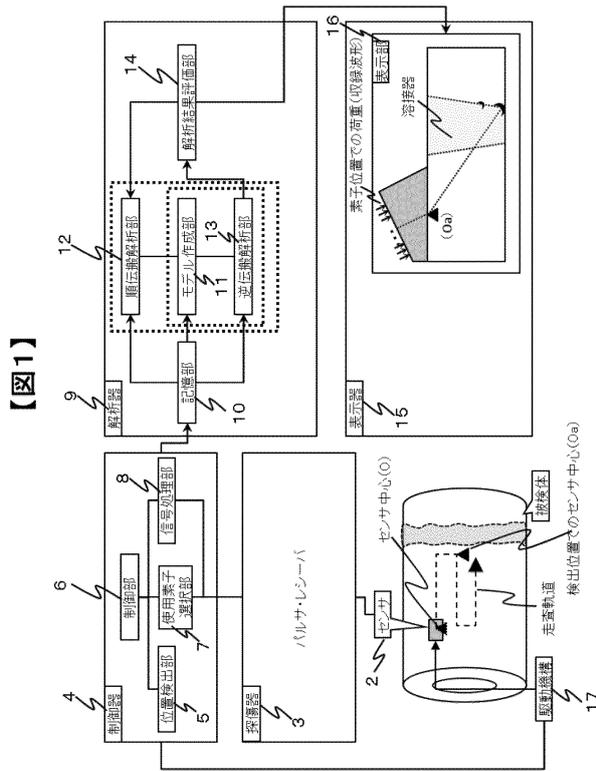
と合算した合成波形 ϕ_s は、表面波成分を強めた波形となる。合成波形 ϕ_s に出現する反射源からの信号により、センサ2と被検体表面21の反射源（溶接線）の位置関係を求めることができる。この位置関係の情報を用いて、溶接部の詳細なモデルを作成することで、溶接部が研磨されて肉眼で確認されにくい場合や、溶接部の精確な位置が不明な場合においてもS406で、溶接部の境界情報を設定することが可能となる。

【符号の説明】

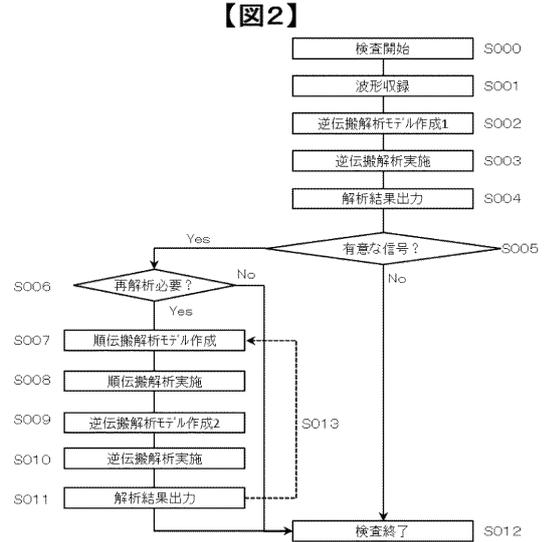
【0100】

- 1・・・超音波検査装置
- 2・・・センサ
- 3・・・探傷器
- 4・・・制御器
- 5・・・位置検出部
- 6・・・制御部
- 7・・・使用素子選択部 30
- 8・・・信号処理部
- 9・・・解析器
- 10・・・記憶部
- 11・・・モデル作成部
- 12・・・順伝搬解析部
- 13・・・逆伝搬解析部
- 14・・・解析結果評価部
- 15・・・表示器
- 16・・・表示部
- 17・・・駆動機構 40
- 18・・・演算選択部
- 19・・・合成処理部
- 20・・・処理結果評価部
- 21・・・被検体表面
- 30・・・箇所A

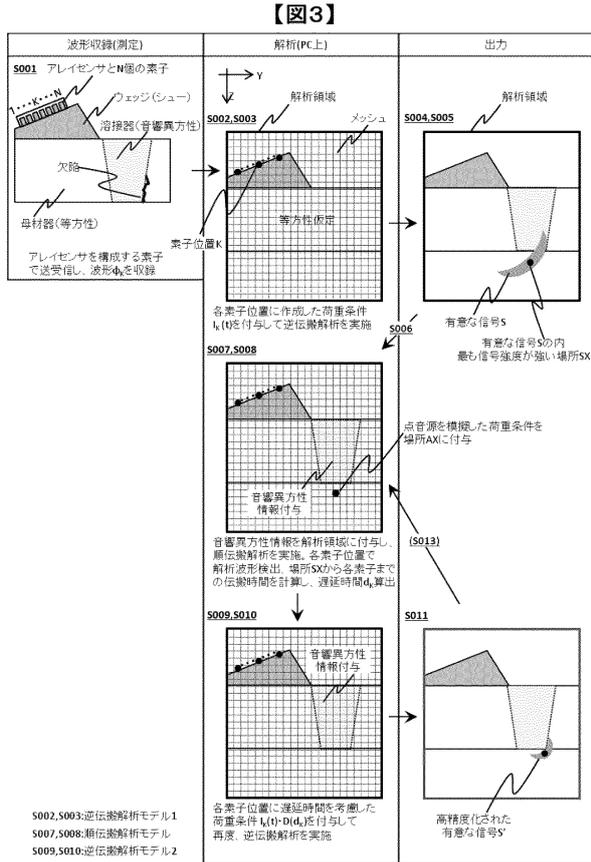
【図1】



【図2】

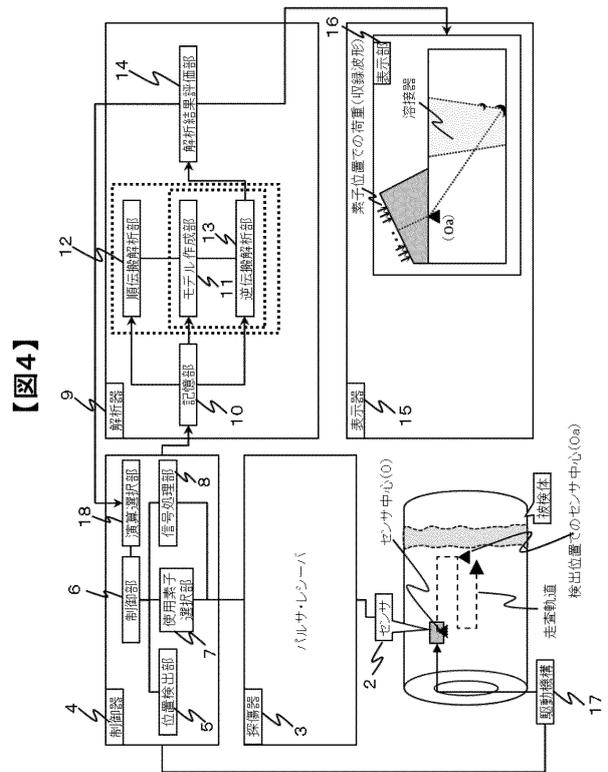


【図3】



S002, S003: 逆伝搬解析モデル1
 S007, S008: 順伝搬解析モデル
 S009, S010: 逆伝搬解析モデル2

【図4】



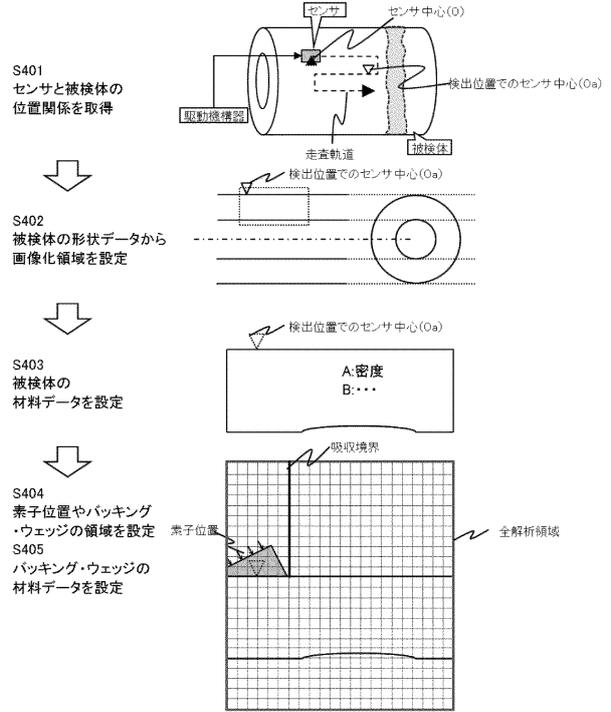
【図9】

【図9】



【図10】

【図10】



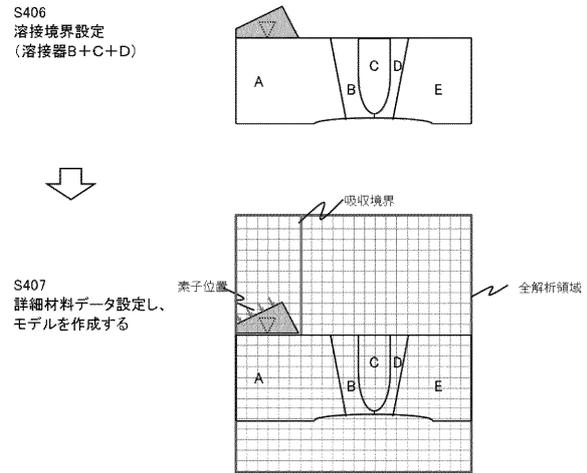
【図11】

【図11】



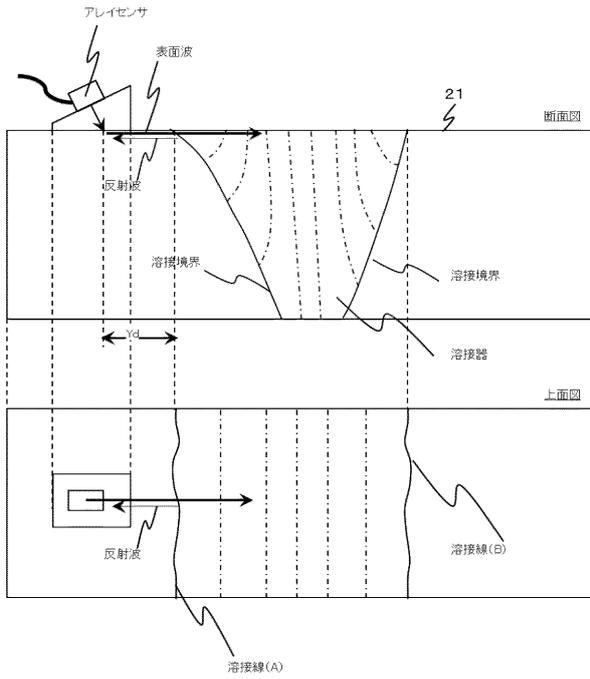
【図12】

【図12】



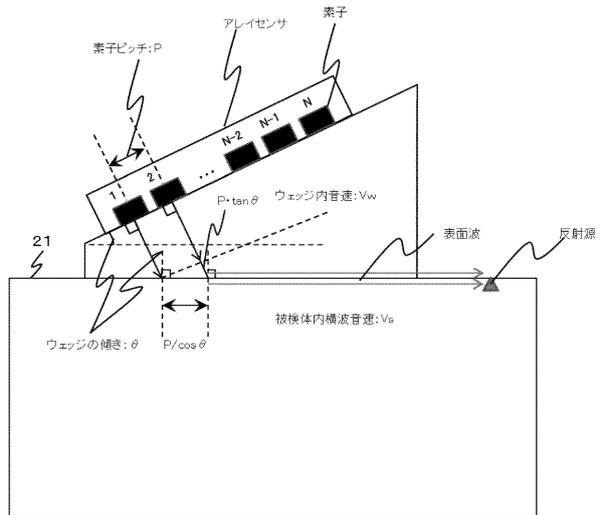
【図13】

【図13】



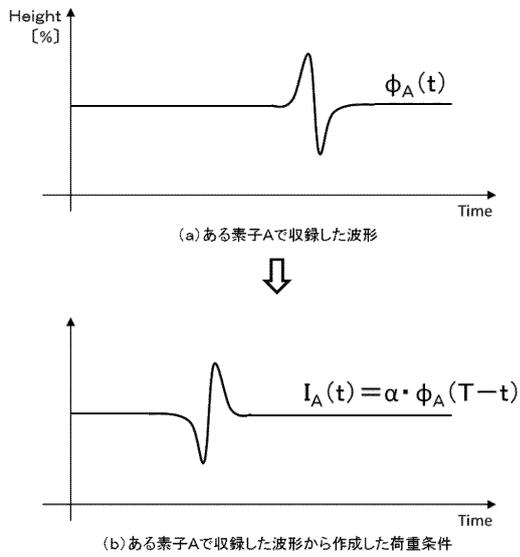
【図14】

【図14】



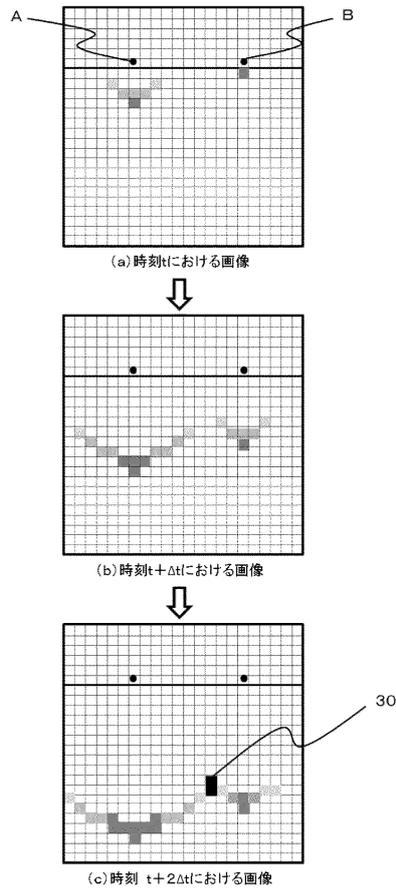
【図15】

【図15】



【図16】

【図16】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平08-282587(JP,A)

中畑和之,外,イメージベースシミュレーションを援用した時間反転法による固体内欠陥の映像化の試み,信学技報,2011年6月,P.1-6

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

G01N 29/00-29/52

JSTPlus(JDreamIII)