

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7133012号

(P7133012)

(45)発行日 令和4年9月7日(2022.9.7)

(24)登録日 令和4年8月30日(2022.8.30)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 B 17/02 (2006.01)

G 0 1 B

17/02

Z

請求項の数 4 (全19頁)

(21)出願番号	特願2020-519985(P2020-519985)	(73)特許権者	506124619
(86)(22)出願日	平成30年10月4日(2018.10.4)		フレクシム フレクシブレ インドゥスト
(65)公表番号	特表2020-537129(P2020-537129 A)		リーメステヒニーク ゲーエムペーハー
(43)公表日	令和2年12月17日(2020.12.17)		ドイツ連邦共和国 1 2 6 8 1 ベルリン
(86)国際出願番号	PCT/EP2018/077002	(74)代理人	ボックスベルガー シュトラーセ 4
(87)国際公開番号	WO2019/072678		100080816
(87)国際公開日	平成31年4月18日(2019.4.18)	(74)代理人	弁理士 加藤 朝道
審査請求日	令和2年11月26日(2020.11.26)		100098648
(31)優先権主張番号	17195986.9	(72)発明者	弁理士 内田 潔人
(32)優先日	平成29年10月11日(2017.10.11)		エバート、スヴェン
(33)優先権主張国・地域又は機関	欧州特許庁(EP)		ドイツ連邦共和国 2 2 0 8 1 ハンブル
		審査官	ク グルックシュトラーセ 2 6 ベー
			山 崎 和子

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 それぞれ他の値を事前に知ることなく超音波を用いて単層又は多層のサンプルにおける層厚と音波速度を測定するための方法及び測定装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも2つの異なる音響経路(S_1 、 S_2)でサンプル(1)を通して走行する超音波信号の走行時間差(t_1 、 t_2)を測定することにより、超音波を用いて単層又は多層のサンプル(1)における層の層厚(w)と音速(c)を測定するための方法であって、

それらの音響経路(S_1 、 S_2)は、同一層内では同じ音速(c)をもって異なる角度(θ_1 、 θ_2)で進行し、

それらの音響経路(S_1 、 S_2)は、単層又は多層のサンプル(1)の表面上に、少なくとも2つの音響変換器(3、4、5、6、8、13、14、15)を備えた少なくとも1つの連結体(2)が配設されていることにより生成され、それらの音響変換器は、超音波信号を2つの異なる音響経路で連結体(2)を通してサンプル(1)内に送出し、また受信し、これらの超音波信号は、それぞれ、サンプル(1)内の多重反射により発生する一連のエコーから成り、

これらのエコーは、それぞれ、サンプル(1)内で異なる所定数の音響経路(S_1 、 S_2)を走行したものであり、そして、

走行時間差(t_1 、 t_2)は、相次ぐエコーの互いの時間的な間隔であり、層厚(w)と、層内の音速(c)の計算は、以下の方程式、即ち、

10

$$c = K_{\alpha_1} K_{\alpha_2} \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2}{K_{\alpha_1} \Delta t_1^2 - K_{\alpha_2}^2 \Delta t_2^2}}$$

$$w = \frac{c \Delta t_1}{2} \sqrt{1 - \frac{c^2}{K_{\alpha_1}^2}}$$

10

を用いて行われ、ここで、

c は、サンプル (1) の 1 つの層内の音速であり、

w は、サンプル (1) の 1 つの層の層厚であり、

t_1 は、サンプル (1) 内の一方の音響経路 (S_1) を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、

t_2 は、サンプル (1) 内の他方の音響経路 (S_2) を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、

K_1 、 K_2 は、音響変換器 (3、4、5、6、8、13、14、15) のセンサ定数であり、センサ定数 (K_i) は、

20

$$K_{\alpha_i} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_i}$$

を介して定義され、ここで、

$i = \{ 1, 2 \}$ であり、

c は、連結体 (2) 内の音速であり、

i は、連結体 (2) 内の垂線に対する音響ビームの角度である

こと、

を特徴とする方法。

【請求項 2】

一方の走行時間差 (t_1) は、1つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として決定され、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器 (3) から、サンプル表面の垂線に対して所定の角度 (α_1) で、少なくとも n 回及び $n + 1$ 回、サンプル (1) の測定すべき層を通り、 n 回及び $n + 1$ 回の後壁反射を介して対応の音響変換器 (3、6) に戻るようにサンプル (1) を通って走行したものであること、及び、

他方の走行時間差 (t_2) は、1つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として決定され、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器 (8、4) から、サンプル表面の垂線に対して所定の角度 (α_2) で、少なくとも n 回及び $n + 1$ 回、サンプル (1) の測定すべき層を通り、 n 回及び $n + 1$ 回の後壁反射を介して対応の音響変換器 (8、4、5) に戻るようにサンプル (1) を通って走行したものであること

40

を特徴とする、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

複数のピエゾ素子 (301、601、801、131、141) を含んだ音響変換器 (3、6、8、13、14、15) のアクティブ音響変換器面の個々のピエゾ素子 (301、601、801、131、141) のスイッチオンとスイッチオフにより、サンプル (1) を所定の音響経路 (S_1 、 S_2) で通過して対応の音響変換器 (6、8、13、14

50

、15)に当たる信号部分が選択されること

を特徴とする、請求項1に記載の方法。

【請求項4】

少なくとも二層のサンプル(1)では、音響変換器(3、6、15)のアクティブ音響変換器面の個々の圧電素子(301、601)のスイッチオンとスイッチオフにより、個々の各層について、層厚(w)と音速(c)が決定されること

を特徴とする、請求項3に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

本発明は、内面部又は背面部にアクセスできない、管、容器、又は板(以下、サンプル(検査対象)と称する)の壁厚の測定に関する。更に本発明は、これらのサンプルの内側コーティング(被覆)又は裏側ライニング(裏張)の層厚の測定に関する。ピッチキャッチ及びパルスエコー構成による超音波送受信機を用いた特殊な測定装置が開示され、並びにサンプル内の音速(音波速度)を事前に知ることなく壁厚を決定するための対応の方法が開示される。

【0002】

内面側にアクセスしないで壁厚を測定する必要性は、例えば、壁厚が未知の既存の管上に流量センサが縛り付けられるクランプオン式超音波流量測定において生じる。しかしまた、例えば、容器の圧縮強度を決定するための非破壊試験においても、内部空間にアクセスしないで壁厚を測定することが必要である。

【0003】

クランプオン式超音波流量測定の精度は、本質的に管内径の不確実性により影響される。管の外径は、巻尺を用いて簡単且つ正確に測定することができる。外径から内径を計算するためには、管の壁厚が既知でなくてはならない。壁厚決定における誤差は、最終的に容積流の測定誤差に現れることになる。従って壁厚決定は、できるだけ精密に行われなくてはならない。クランプオン式流量測定では(サンプルに対して)手を加えることはない。壁厚又は内径が機械的にマイクロメータねじ又はノギスを用いて測定されることはめったにないと言える。

【0004】

パルスエコー法において1つの超音波壁厚測定器(WDM)を用いた壁厚の測定、選択的に1つの音響変換器要素(送信機と受信機は同じ要素)か又は2つの音響変換器要素(ピッチキャッチ構成)を用いた壁厚の測定が、従来技術に対応する。この方法では、超音波パルスがサンプル表面に対して垂直(直角)にサンプル内に送信される。このパルスは、サンプル(パイプ壁部又は容器壁部、プレート)内で何回か反射される。各エコーは、超音波壁厚測定器の受信機により記録される。そしてエコーシーケンス内のパルス間隔から、及びサンプルの音速の情報を用い、壁厚を決定することができる。十分に正確な結果を得るためには、音速が事前に既知でなくてはならない。通常の場合では、大まかな材料の評価(推定)と、表形式の値だけをもとにして、音速が評価される。鋼製サンプルの場合では、様々な鋼種類の音速がばらついていることにより、評価値は、本当の値から2%ほどはずれることがある。温度に起因した管壁音速のずれは、全く考慮されない(100の温度差は、ほぼ1%の音速誤差をもたらす)。鋳鉄やプラスチックのような、鋼とは異なる材料では、評価誤差は、遥かに大きくなる可能性がある。音速の誤った評価は、直接的に壁厚の測定誤差として現れる。クランプオン式流量測定におけるこの測定不確実性を観察すると、大きな管(例えばDN1000、25mmの壁厚)では、管壁厚の2%の誤り評価は、0.2%の流量測定誤差をもたらす。小さい厚壁の管(例えば4" SCH 120)では、流量測定の誤差は、1%にも増加する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

10

20

30

40

50

【文献】米国特許第 6 8 8 3 3 7 6 号明細書

米国特許出願公開第 2 0 0 6 / 0 1 9 1 3 4 2 号明細書

米国特許第 4 3 9 8 4 2 1 号明細書

米国特許第 6 0 7 0 4 6 6 号明細書

米国特許第 5 3 4 9 8 6 0 号明細書

米国特許第 6 0 3 5 7 1 7 号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

上記特許文献 1 から、管の音速を知ることなく未知の管壁厚を測定するための方法が公知である。この方法は、ここで説明する本発明と異なり、液浸透過法を用いる。この方法は、測定すべき管が水で満たされ、水槽内に沈められなくてはならないことを前提としている。ある設備内の既存の容器又は管を当該設備の解体を伴わずに測定することに対し、この方法は適していない。

10

【0007】

従来の壁厚測定器 (WDM) をコーティング又はライニングされた管上で或いは多層システムのために使用すると、一般的に個々の各層からのエコーシーケンス (エコー列) が重なり合い、それによりこれらのエコーシーケンスは、もはや、壁厚決定のために容易に評価することはできない。個々の層に特殊な層厚状況と音速状況がある場合には、確かにエコーシーケンスを評価することができるが (例えば厚い鋼管壁上の薄いプラスチックコーティング)、個々の層の音速を事前に知らなければ、従来技術により個々の層厚を決定することはできない。

20

【0008】

隠れた層や、或いは多層システムの測定について、上記特許文献 2 及び上記特許文献 3 は、超音波変換器から成る様々な測定装置を記載している。記載されたそれらの測定装置は、サンプルが同時に縦波と表面波で検査されるように設計されている。引用された両方のケースにおいて、層厚を決定するためには、使用される波の種類の音速が既知でなくてはならない。上記特許文献 4 は、様々な金属のみから成る多層システムの測定に関する。傾斜した別々の音響変換器が横波を発生させ、オプションの測定装置が縦波を発生させる。この方法を用いて層厚を決定するためには、個々の層内の音速が既知でなくてはならない。同じことが、上記特許文献 5 による、コーティングにより隠れた層の決定、並びに上記特許文献 6 に記載された、管壁厚及びコーティング厚を測定するための方法にも当てはまる。

30

【0009】

本発明の課題は、サンプルの壁厚 (例えば、管壁、容器壁、又は板) を、このサンプルの音速を知っていること (音速知識) に依存せずに測定することである。また更なる課題は、多層システム (例えばコーティング又はライニングを有する管壁) の個々の層の厚さを、それらの音速を事前に知ることなく測定することにある。

【課題を解決するための手段】

【0010】

40

以下、サンプル (例えば、管壁、容器壁、又は板) の音速を知っていることに依存せずに壁厚を測定することを可能にする、方法と測定装置について説明する。このことは、管の壁厚と内径の測定不確実性を減少させ、従ってクランプオン式超音波流量測定器の測定不確実性を減少させる。本方法により、多層システム (例えばコーティング又はライニングを有する管壁) の個々の層厚を、それらの音速を事前に知ることなく測定することができる。

即ち本発明の第 1 の視点により、

少なくとも 2 つの異なる音響経路でサンプルを通して走行する超音波信号の走行時間差を測定することにより、超音波を用いて単層又は多層のサンプルにおける層の層厚と音速を測定するための方法であって、

50

それらの音響経路は、同一層内では同じ音速をもって異なる角度で進行し、
 それらの音響経路は、単層又は多層のサンプルの表面上に、少なくとも2つの音響変換器を備えた少なくとも1つの連結体が配設されていることにより生成され、それらの音響変換器は、超音波信号を2つの異なる音響経路で連結体を通してサンプル内に送出し、また受信し、これらの超音波信号は、それぞれ、サンプル内の多重反射により発生する一連のエコーから成り、
 これらのエコーは、それぞれ、サンプル内で異なる所定数の音響経路を走行したものであり、そして、
 走行時間差は、相次ぐエコーの互いの時間的な間隔であり、層厚と、層内の音速の計算は、以下の方程式、即ち、

10

$$c = K_{\alpha_1} K_{\alpha_2} \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2}{K_{\alpha_1} \Delta t_1^2 - K_{\alpha_2} \Delta t_2^2}}$$

$$w = \frac{c \Delta t_1}{2} \sqrt{1 - \frac{c^2}{K_{\alpha_1}^2}}$$

20

を用いて行われ、ここで、
 c は、サンプルの1つの層内の音速であり、
 w は、サンプルの1つの層の層厚であり、
 Δt_1 は、サンプル内の一方の音響経路を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、
 Δt_2 は、サンプル内の他方の音響経路を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、
 K_{α_1} 、 K_{α_2} は、音響変換器のセンサ定数であり、センサ定数は、

30

$$K_{\alpha_i} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_i}$$

を介して定義され、ここで、
 $i = \{1, 2\}$ であり、
 c_{α} は、連結体内の音速であり、
 α_i は、連結体内の垂線に対する音響ビームの角度であること、
 を特徴とする方法が提供される。

40

更に本発明の第2の視点により、
 超音波を用いて単層又は多層のサンプルの層厚と音速を測定するための測定装置であって、
 単層又は多層のサンプルの表面上には、少なくとも2つの音響変換器を備えた少なくとも1つの連結体が配設され、それらの音響変換器は、規定の角度で前記連結体上に配設されており、それにより超音波が、所定の入射角で前記連結体を通してサンプル内に達し、サンプルの1つの層内で少なくとも2つの音響経路を通過し、そこから対応の音響変換器に向かって所定の角度で反射されること、
 を特徴とする測定装置が提供される。

【発明を実施するための形態】

50

【 0 0 1 1 】

本発明において、以下の形態が可能である。

(形態 1)

少なくとも 2 つの異なる音響経路でサンプルを通して走行する超音波信号の走行時間差を測定することにより、超音波を用いて単層又は多層のサンプルにおける層の層厚と音速を測定するための方法であって、

それらの音響経路は、同一層内では同じ音速をもって異なる角度で進行し、

それらの音響経路は、単層又は多層のサンプルの表面上に、少なくとも 2 つの音響変換器を備えた少なくとも 1 つの連結体が配設されていることにより生成され、それらの音響変換器は、超音波信号を 2 つの異なる音響経路で連結体を通してサンプル内に送出し、また受信し、これらの超音波信号は、それぞれ、サンプル内の多重反射により発生する一連のエコーから成り、

これらのエコーは、それぞれ、サンプル内で異なる所定数の音響経路を走行したものであり、そして、

走行時間差は、相次ぐエコーの互いの時間的な間隔であり、層厚と、層内の音速の計算は、以下の方程式、即ち、

$$c = K_{\alpha_1} K_{\alpha_2} \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2}{K_{\alpha_1} \Delta t_1^2 - K_{\alpha_2}^2 \Delta t_2^2}}$$

$$w = \frac{c \Delta t_1}{2} \sqrt{1 - \frac{c^2}{K_{\alpha_1}^2}}$$

を用いて行われ、ここで、

c は、サンプルの 1 つの層内の音速であり、

w は、サンプルの 1 つの層の層厚であり、

Δt_1 は、サンプル内の一方の音響経路を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、

Δt_2 は、サンプル内の他方の音響経路を介した超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、

K_{α_1} 、 K_{α_2} は、音響変換器のセンサ定数であり、センサ定数は、

$$K_{\alpha_i} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_i}$$

を介して定義され、ここで、

$i = \{ 1, 2 \}$ であり、

c_{α} は、連結体内の音速であり、

α_i は、連結体内の垂線に対する音響ビームの角度であること。

(形態 2)

一方の走行時間差は、1 つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として決定され、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器から、サンプル表面の垂線に対して所定の角度で、少なくとも n 回及び $n + 1$ 回、サンプルの測定すべき層を通り、 n 回及び $n + 1$ 回の後壁反射を介して対応

の音響変換器に戻るようにサンプルを通して走行したものであること、及び、
他方の走行時間差は、1つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として決定され、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器から、サンプル表面の垂線に対して所定の角度で、少なくとも n 回及び $n + 1$ 回、サンプルの測定すべき層を通り、 n 回及び $n + 1$ 回の後壁反射を介して対応の音響変換器に戻るようにサンプルを通して走行したものであること、が好ましい。

(形態3)

複数の piezo 素子を含んだ音響変換器のアクティブ音響変換器面の個々の piezo 素子のスイッチオンとスイッチオフにより、サンプルを所定の音響経路で通過して対応の音響変換器に当たる信号部分が選択されること、が好ましい。

10

(形態4)

少なくとも二層のサンプルでは、音響変換器のアクティブ音響変換器面の個々の piezo 素子のスイッチオンとスイッチオフにより、個々の各層について、層厚と音速が決定されること、が好ましい。

(形態5)

超音波を用いて単層又は多層のサンプルの層厚と音速を測定するための測定装置であって、

単層又は多層のサンプルの表面上には、少なくとも2つの音響変換器を備えた少なくとも1つの連結体が配設され、それらの音響変換器は、規定の角度で前記連結体上に配設されており、それにより超音波が、所定の入射角で前記連結体を通してサンプル内に達し、サンプルの1つの層内で少なくとも2つの音響経路を通過し、そこから対応の音響変換器に向かって所定の角度で反射されること。

20

(形態6)

前記連結体は、その基本形状において直方体であり、その上部のデッキ面は、長手方向に関して傾斜した側縁部を有すること、が好ましい。

(形態7)

サンプルの上に又はサンプルの層の上に反射器が配設されており、それにより送信された超音波信号は、少なくとも2回、音響経路でサンプルを通過し、また対応の音響変換器により受信されること、が好ましい。

(形態8)

30

少なくとも2つの音響変換器が、規定の角度で連結体上に配設され、1つの音響変換器が、サンプル表面に対して垂直方向に配設されていること、が好ましい。

(形態9)

クランプオン式流量センサの形式の少なくとも2つの音響変換器と、超音波壁厚測定器の形式の1つの音響変換器とが配設されていること、が好ましい。

(形態10)

それぞれ2つの音響変換器から成る2つの送信機受信機対が、所定の角度で連結体上に、第1の送信機受信機対が、サンプル表面に対し、第2の送信機受信機対の角度とは異なる角度を有するように、配設されていること、が好ましい。

(形態11)

40

音響変換器は、1つ又は複数の piezo 素子を備えた音響変換器アレイから成ること、が好ましい。

(形態12)

複数の piezo 素子を備えた音響変換器のアクティブ音響変換器面は、個々の piezo 素子のスイッチオンとスイッチオフにより決定されること、が好ましい。

尚、本願の特許請求の範囲に付記された図面参照符号は、専ら本発明の理解の容易化のためのものであり、図示の形態への限定を意図するものではないことを付言する。

【0012】

本発明により、超音波を用いた単層又は多層のサンプルにおける少なくとも1つの層の層厚と音速の測定が、少なくとも2つの異なる音響経路でサンプルを通して走行する超音

50

波信号について走行時間差を測定することにより行われる。この際、それらの音響経路は、サンプルの同一層内では同じ音速をもって異なる角度で進行する。それらの音響経路は、単層又は多層のサンプルの表面上に、少なくとも2つの音響変換器（音響トランスデューサ）を備えた少なくとも1つの連結体（Koppelkoerper）が配設されていることにより生成される。それらの音響変換器は、超音波信号を2つの異なる音響経路で連結体を通してサンプル内に送出し、反射した超音波信号をまた受信する。これらの超音波信号は、それぞれ、サンプル内の多重反射により発生する一連のエコー（エコーシーケンス）から成る。これらのエコーは、それぞれ、サンプル内で異なる所定数の音響経路を走行する。走行時間差は、相次ぐエコーの互いの時間的な間隔であり、この際、層厚と、層内の音速の計算は、後続段落で記載の数式（1.1）及び（1.2）を用いて行われ、これらの数式については、実施例の説明において、更に詳細に説明される。（尚、音響経路とは、超音波信号が、サンプル内への進入から、後壁反射を介し、同サンプルから出ていくまでの経路を表す。同サンプルから出ていくところで、音響経路は、連結体に戻る経路と、サンプルを歩いていく更なる音響経路に分かれる。走行時間差の測定には、少なくとも2つの相次ぐ信号が必要である。）

10

【0013】

異なる入射角を有する測定装置により、サンプル内の異なる走行時間が、エコーシーケンス内のパルス間隔の測定により決定される。第1の走行時間差は、1つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として算出され、この際、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器から、サンプル表面の垂線に対して第1の角度で、少なくとも n 回及び $n+1$ 回、サンプルを通り、 n 回及び $n+1$ 回の後壁反射を介して音響変換器に戻るように、即ちサンプルの測定すべき層を通り、 n 回及び $n+1$ 回の後壁反射を介して音響変換器に戻るようにサンプルを歩いて走行したものである。第2の走行時間差も、1つのエコーシーケンスの自己相関関数の一番目の副極大の位置として同様に算出されるが、そのエコーシーケンスは、複数の超音波信号から成り、これらの超音波信号は、音響変換器から、サンプル表面の垂線に対して第2の角度で、少なくとも n 回及び $n+1$ 回、サンプルの測定すべき層を通り、 n 回及び $n+1$ 回の後壁反射を介して音響変換器に戻るようにサンプルを歩いて走行したものである。

20

【0014】

本方法の更なる一実施形態では、複数の圧電素子（圧電素子）を含んだ音響変換器のアクティブ音響変換器面の個々の圧電素子のスイッチオンとスイッチオフにより、送信される超音波信号は、少なくとも2回、サンプルを両方の音響経路で通過し、音響変換器により他方で受信される。

30

【0015】

少なくとも二層のサンプルでは、音響変換器のアクティブ音響変換器面の個々の圧電素子のスイッチオンとスイッチオフにより、個々の各層について、層厚と音速が決定される。サンプルの上側の層が下側の層よりも小さい音響インピーダンスを有すると、特に有利である。

【0016】

単層又は多層のサンプルの厚さと音速を測定するための本発明による測定装置は、超音波を用いてその測定が行われ、上記の方法を利用することができる。サンプルの表面上には、少なくとも2つの音響変換器を備えた連結体が配設される。それらの音響変換器は、規定の角度で連結体上に配設されており、それにより超音波が、所定の入射角で連結体を通してサンプル内に達し、サンプルの1つの層内で少なくとも2つの音響経路を通過し、そこから少なくとも2つの音響変換器に戻るように反射される。

40

【0017】

連結体は、その基本形状において直方体であり、その上部のデッキ面は、長手方向に関して傾斜した側縁部を有する。

【0018】

更なる一実施形態では、サンプルの上に又はサンプルの個々の層の上に反射器（リフレ

50

クタ)が配設されており、それにより送信された超音波信号は、少なくとも2回、音響経路でサンプルを通過し、音響変換器により他方で受信される。

【0019】

更なる一実施形態では、少なくとも2つの音響変換器が、規定の角度で連結体上に配設され、1つの音響変換器が、サンプル表面に対して垂直方向に配設されている。

【0020】

更なる一実施形態では、クランプオン式流量センサの形式の少なくとも2つの音響変換器と、超音波壁厚測定器の形式の1つの音響変換器とが配設されている。

【0021】

更なる一実施形態では、それぞれ2つの音響変換器から成る2つの送信機受信機対(送信機受信機ペア)が、異なる角度で連結体上に配設されており、それにより第1の送信機受信機対は、サンプル表面に対し、第2の送信機受信機対の角度とは異なった角度を有する。

10

【0022】

音響変換器は、一実施形態では、1つ又は複数のピエゾ素子を備えた音響変換器アレイから成る。音響変換器のアクティブ音響変換器面は、個々のピエゾ素子のスイッチオンとスイッチオフにより規定されることが可能である。

【0023】

本発明において開示された方法は、サンプルの音速が未知の場合、又は既知だが不確実である場合において、従来技術で可能であるよりも、より正確な壁厚測定をもたらしてくれる。

20

【0024】

このことに関し、本発明は、複数の測定装置を提示し、それにより所定の多層システムではエコーシーケンスの重なり合いを回避することができ、従って個々の層厚をこれらの層の個々の音速を事前に知ることなく(即ち、未知の場合でも)測定することができる。

【0025】

以下、複数の実施例に基づき、本発明を説明する。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】一サンプルの音速と壁厚を決定するための測定装置の第1実施例を示す図である。

30

【図2】一サンプルの音速と壁厚を決定するための測定装置の第2実施例を示す図である。

【図3】一サンプルの音速と壁厚を決定するための測定装置の第3実施例を示す図である。

【図4】一サンプルの音速と壁厚を決定するための測定装置の第4実施例を示す図である。

【図5】一多層システムの層厚決定のための測定装置の一実施例を示す図である。

【図6a】サンプル表面の垂線に対する所定の角度のものと傾斜測定によるエコーシーケンスを示す図である。

【図6b】一鋼製板における垂直測定のエコーシーケンスを示す図である。

【図7a】図6aのエコーシーケンスの1つの自己相関関数を示す図である。

【図7b】図6bのエコーシーケンスの1つの自己相関関数を示す図である。

【実施例】

40

【0027】

図1、図2、図3、図4は、サンプル1の音速(音波速度)と層厚を決定するための測定装置の可能な実施例(複数)を示している。上側のデッキ面202と、その長手方向に関して傾斜した側縁部203、204、205、206とを備えた直方体を基本形状とする連結体2が、サンプル(検査対象)1の表面上に載置されている。連結体2の連結面201は、適切な(例えば液状の)連結材を用いてサンプル1と音響的に連結(カップル)される。図面において、同じ装置には、同じ参照符号が使われる。

【0028】

連結体2上には、複数の音響変換器(音響トランスデューサ)が配設されている。基本的に全ての音響変換器は、音響変換器アレイとして構成されていることが可能であり、つ

50

まりそれらの音響変換器は、1つ又は複数の圧電素子（圧電素子）から構成可能であり、それによりアクティブ音響変換器面（音響変換器の能動的に変化可能な作用面）を圧電素子のスイッチオンとスイッチオフにより変化することができる。それらの音響変換器は、サンプル表面に対して異なる角度で配向されており、それにより、送信された超音波信号は、少なくとも2回、サンプル1を音響経路（サウンドパス） S_1 及び S_2 で通過し、音響変換器（対応の音響変換器）により他方で受信される。

【0029】

図1では、超音波が、音響変換器3からは入射角 θ_1 で連結体2を通して音響変換器6に導かれ、音響変換器4からは入射角 θ_2 で音響変換器5に導かれることが示され、それにより超音波は、送信機から受信機への経路において、サンプル1内を音響経路 S_1 ないし S_2 で少なくとも1回通過する。図1において音響変換器3は、第1の長手方向側縁部203上に送信機として配設されており、第1の長手方向側縁部203の反対側にある第2の長手方向側縁部206上に受信機として配設された音響変換器6と接続されており、この際、超音波は、音響経路 S_1 上を進行する。音響変換器4は、送信機として第1の長手方向側縁部204上にあり、第1の長手方向側縁部204の反対側にある第2の長手方向側縁部205上に受信機として配設された音響変換器5に対し、音響経路 S_2 を介して接続されている。

【0030】

図2では、2つの音響変換器3、4のみが、連結体2のそれぞれの第1の長手方向側縁部203、204上に配設されている。これらの音響変換器3、4から入射角 θ_1 、 θ_2 で送信された超音波信号は、連結体2の第2の長手方向側縁部205、206上に配設された反射器7により他方ではね返されるため、同じ音響変換器3、4により他方で受信される。

【0031】

図3は、送信された超音波信号の音速を知ることなくサンプル1の層厚を決定するために必要な複数の音響経路を示している。連結体2は、この実施例では2つの長手方向側縁部203、206を有し、これらの長手方向側縁部203、206上に音響変換器3、6が配設されている。音響変換器3の圧電素子301と音響変換器6の圧電素子601は、アクティブ状態にある。音響変換器3から1つの超音波パルスが送信され、この超音波パルスは、音響経路10に従い、入射角 θ_1 で連結体2を通してサンプル1（の表面）において反射し、それから受信機6に達する。その超音波パルスの一部分は、サンプル1内に透過され、そこで内面部において角度 θ_1 で反射され、それから受信機6に導かれる（音響経路11）。サンプル1内の更なる（2度目の）反射により、遅延した更なる超音波パルスが受信器6に達する（例として音響経路12により示されている。即ち音響経路10では $n=0$ （サンプル1で0回通過）であり、音響経路11では $n=1$ （サンプル1を1回通過）であり、音響経路12では $n=2$ （サンプル1を2回通過）である。）。音響変換器3、6から成るこの「傾斜装置」（ないし傾斜配置）に加え、連結体2において連結面201と平行に延在する上側のデッキ面202上には、音響変換器8が「垂直装置」として配設されている。それに対応する音響経路9は、サンプル1に対して垂直に延在し、ここでは破線として描かれている。音響変換器8からは、1つの超音波パルスが連結体2を通してサンプル1内に透過される。この超音波パルスは、サンプル1内で何回も反射され、エコーシーケンスとして音響変換器8に戻り着き、音響変換器8は、このエコーシーケンスを受信機として記録する。

【0032】

図4は、サンプル1内の音速を事前に知ることなくサンプル1の壁厚を決定するために、2つの連結体2を用いた音響変換器13として従来のクランプオン式流量センサと、音響変換器14として追加的に配設された従来の超音波壁厚測定器とを有する測定装置を示している。この際、1つ又は複数の圧電素子131を有する音響変換器13は、図3に示された「傾斜装置」を構成し、1つ又は複数の圧電素子141を有する別個の音響変換器14は「垂直装置」を構成する。クランプオン式流量センサ（音響変換器13）は、

サンプル 1 内で、超音波壁厚測定器（音響変換器 1 4）と同じ種類の波動を励起しなくてはならない。典型的なクランプオン式流量センサ（音響変換器 1 3）は、鋼製サンプル内に横波を発生させ、従って横波用の超音波壁厚測定器が使用されなくてはならない。それに対し、図 4 の測定装置がプラスチック製サンプル上に使用されるのであれば、クランプオン式流量センサは、サンプル 1 内に縦波を発生させ、従って縦波用の超音波壁厚測定器が使用されなくてはならない。

【 0 0 3 3 】

図 5 は、一多層システムの層厚を決定するための測定装置を示している。図示されたサンプル 1 は、異なる材料の 2 つの層 1 6、1 7 から成る。 piezo 素子 3 0 1 を備えた音響変換器 3 と、piezo 素子 6 0 1 を備えた音響変換器 6 とが、図 3 におけるように（傾斜配置として）配設されている。図 3 と異なり、図 5 では X 印の付いていない個々の piezo 素子 3 0 1、6 0 1 は、スイッチオフされている。音響変換器 3、6 は、X 印でマークされた piezo 素子 3 0 1、6 0 1 がアクティブ状態であるように稼働される。このことは、音響変換器 3、6 の音響変換器面の減少、並びに左方への音響経路 1 8 のシフトをもたらす。下側の層 1 7 を通る必然的に励起された音響経路 1 9 が、スイッチオフされている受信機 6 の piezo 素子 6 0 1 に当たる（入射する）ことが見てとれる。個々の piezo 素子 3 0 1、6 0 1 のスイッチオンとスイッチオフの例示の方法を用いることにより、多層サンプルの場合の「傾斜配置」におけるエコーシーケンスの重なり合いを回避することができる。

【 0 0 3 4 】

図 6 a は、一例として、サンプル表面の垂線に対して 15° の入射角 θ_1 での傾斜測定のエコーシーケンスを示し、図 6 b は、4 mm の鋼製板における垂直測定のエコーシーケンスを示している。図示されたそれらのエコーシーケンスは、プラスチックから構成されている連結体 2 を備えた図 3 による測定装置を用いて記録されたものである。

【 0 0 3 5 】

図 7 a と図 7 b は、先にウインドウ表示された図 6 a と図 6 b の例示のエコーシーケンスの自己相関関数を示している。垂直線（破線）でマークされた副極大は、それぞれのエコーシーケンスにおける測定された時間的なパルスシーケンス間隔を表している。

【 0 0 3 6 】

サンプル 1 の層厚 w と音速（音波速度） c を決定するための方法は、異なる音響経路 S_1 及び S_2 でサンプル 1 を通って走行した 2 つの超音波信号の走行時間測定に基づく。音響経路 S_1 及び S_2 は、これらが、サンプル表面に対する角度と、長さにおいて異なり、それに対して超音波の音速が両方の音響経路 S_1 及び S_2 において同じであることにより特徴付けられている。サンプル 1 内の音響経路 S_1 及び S_2 は、様々な測定装置を介して実現可能である。サンプル 1 を介した音響経路 S_1 及び S_2 での信号の走行時間測定の実現、並びにサンプル 1 に対する測定装置の片側の連結（Kopplung）は、様々な測定装置において共通である。

【 0 0 3 7 】

サンプル表面の垂線に対して異なる入射角 θ_1 及び θ_2 を有する 2 つの送受信変換器対 3、6 及び 4、5 を用いることにより、角度 θ_1 及び θ_2 を有する（サンプル 1 内の）音響経路 S_1 及び S_2 を実現することができる（図 1 を参照）。しかしこのことは、具体化の唯一の可能性を表しているわけではない。送信機と受信機の対は必須ではなく、超音波信号が音響経路 S_1 ないし S_2 を介してサンプル 1 を通過した後に反射器 7 により再び音響変換器に戻るよう案内されるのであれば（図 2 を参照）、超音波信号の送信及び受信は、唯一の要素を用いて実現することもできる。また図 3 は、先に図示した測定装置の 1 つの組み合わせを示している。即ち送信機 3 と受信機 6 は、ピッチキャッチ構成を介して角度 θ_1 でサンプル 1 を斜めに進行する音響経路 S_1 を実現しており、それに対して音響変換器 8 は、送信機及び受信機として同等に作動し、垂直（ $\theta_2 = 0$ ）にサンプル 1 を通って進行する音響経路 S_2 を実現している。結局のところ、これらの音響変換器は、音響経路 S_1 ないし S_2 の実現のためには、共通の連結体 2 上に取り付けられなくてはならないというわけではない。音響経路 S_1 ないし S_2 の実現は、別個の連結体ユニットによっ

ても可能である（図 4 を参照）。即ち音響経路 S_2 は、2 つの別個のクランプオン式流量センサ 13 を介して実現され（ピッチキャッチ（投射 入射）構成）、音響経路 S_1 は、サンプル表面に対して垂直に配向された音響変換器 14 を介して実現される。

【 0 0 3 8 】

送信音響変換器 3、4 から連結体 2 を介してサンプル 1 内に透過される超音波信号は、音響経路 S_1 ないし S_2 を少なくとも 1 回通過する（図 1 を参照）。サンプル 1 から超音波信号が出ていくときに超音波信号は、2 つの部分に分割される。即ち一方の部分は、連結体 2 内に透過されて受信音響変換器 5 ないし 6 に導かれ、他方の部分は、反射（表面反射）されてサンプル 1 内に戻り、追加の音響経路 S_1^* ないし S_2^* を通過する（図 1 を参照）。従って S_1^* ないし S_2^* は、 S_1 ないし S_2 に対して平行移動され且つそれにより同じ長さ及びサンプル表面の垂線に対して同じ角度をも有する、サンプル 1 内の音響経路である。音響経路 S_1^* ないし S_2^* でサンプル 1 を通過した超音波信号は、連結体 2 とサンプル 1 の間の境界層において再び透過部分（受信音響変換器 5 ないし 6 に導かれる）と反射部分（ S_1 ないし S_2 に対して平行移動された経路でサンプル 1 内を進行する）に分割される。

10

【 0 0 3 9 】

以下では、 S_1 ないし S_2 と同じ長さ、及びサンプル表面に対して S_1 ないし S_2 と同じ角度を有するが、サンプル 1 内では、連結体 2 とサンプル 1 の境界層での反射に基づき S_1 ないし S_2 に対して平行移動されているサンプル 1 内の全ての音響経路も、 S_1 ないし S_2 と称するものとする。

20

【 0 0 4 0 】

サンプル 1 内の前述の多重反射により、受信される超音波信号は、サンプル 1 内で異なる所定数の音響経路 S_1 ないし S_2 を走行した複数の信号部分の重なり合いから成る。それにより個々の信号部分は、受信音響変換器において異なる到着時間を有する。前述の信号部分の重なり合いは、エコーシーケンス（エコー列）と称される。即ち時間的に 1 番目の信号部分は、一回も音響経路 S_1 ないし S_2 を走行してなく（サンプル表面において反射されて受信機に導かれた）、時間的に 2 番目の信号部分は、一回だけ、音響経路 S_1 ないし S_2 を走行しており、それ以後の信号部分は、複数回、 S_1 ないし S_2 の長さの音響経路を走行したものである。

【 0 0 4 1 】

30

音響経路 S_1 ないし S_2 でのサンプル 1 の各通過により、受信機におけるそれぞれの信号部分の到着時間は、走行時間差 t_1 ないし t_2 だけ遅延する。従って受信機 5 ないし 6 では、エコーシーケンスの形式の超音波信号が得られる。音響経路 S_1 ないし S_2 を介した超音波信号内の到着する信号部分の時間的な間隔（「エコーシーケンス間隔」）は、走行時間差 t_1 ないし t_2 である。走行時間差 t_1 ないし t_2 は、サンプル 1 の 1 つの層の層厚 w 、サンプル 1 の 1 つの層内の音速 c 、連結体 2 内の音速 c 、及び入射角 θ_1 ないし θ_2 により決定されている。音響経路 S_1 ないし S_2 自体は、層厚 w を介し、及び入射角 θ_1 ないし θ_2 に関する屈折の法則を介して決定される。それらの角度は、測定装置の構成から既知である。結局のところ、測定量である走行時間差 t_1 ないし t_2 に依存し、両方の未知数である層厚 w と音速 c のために 2 つの方程式を立てることができる。

40

【 0 0 4 2 】

$$c = K_{\alpha_1} K_{\alpha_2} \sqrt{\frac{\Delta t_1^2 - \Delta t_2^2}{K_{\alpha_1} \Delta t_1^2 - K_{\alpha_2} \Delta t_2^2}}$$

$$w = \frac{c \Delta t_1}{2} \sqrt{1 - \frac{c^2}{K_{\alpha_1}^2}} \quad (1.1)$$

10

【 0 0 4 3 】

この際、簡略化された以下の表記が使われている。

【 0 0 4 4 】

$$K_{\alpha_1} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_1}$$

$$K_{\alpha_2} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_2} \quad (1.2)$$

20

【 0 0 4 5 】

この際、 K_{α_1} ないし K_{α_2} は、連結体 2 内に角度 α_1 ないし α_2 を有する測定装置における音響変換器のセンサ定数であり、 Δt_1 は、音響経路 S_1 を介する超音波信号内のエコーの時間的な間隔であり、 Δt_2 は、音響経路 S_2 を介する超音波信号内のエコーの時間的な間隔である。

【 0 0 4 6 】

センサ定数 K_{α_i} は、以下のように定義されている。

30

【 0 0 4 7 】

$$K_{\alpha_i} = \frac{c_{\alpha}}{\sin \alpha_i}$$

【 0 0 4 8 】

この際、 $i = \{ 1, 2 \}$ であり、 c_{α} は、連結体 2 内の音速であり、 α_i は、連結体 2 内の垂線に対する音響ビームの角度である。

40

【 0 0 4 9 】

次に、図 3 に例示した測定装置に基づき、それぞれ他の値を事前に知ることなくサンプル 1 の層厚 w とサンプル 1 内の音速 c を決定するための方法及び数式について、より詳細に説明する。超音波信号は、送信用の音響変換器 3 ないし 8 により、連結体 2 及び適切な連結材を介し、部分的にサンプル 1 内に透過される。超音波の一部分は、サンプル表面において受信用の音響変換器 6 ないし 8 に向かって反射される。サンプル 1 内で超音波信号は、後壁（サンプル 1 の裏面）において少なくとも 1 回反射され、それから連結体 2 を通って受信用の音響変換器に戻るよう導かれる。（サンプル面に対し）斜め配置の測定装置では、音響経路 10、11 が、受信機 6 において時間的に相前後して連続する 2 つの超音波信号をもたらす、音響経路 S_1 のためのエコーシーケンスを形成する。このエコーシ

50

ーケンスに基づき、走行時間差 t_1 が 2 つのパルスの間の時間的な間隔から決定される。垂直方向の測定装置では、超音波信号は、音響経路 9 においてサンプル 1 内で複数回反射され、音響経路 S_2 を複数回通過する。従って音響変換器 8 における受信信号も、2 つのパルスの間の時間的な間隔 t_2 を有するエコーシーケンスを表す。

【0050】

例えば piezo 素子 801、301、601 が音響変換器 8、3、6 として載置されている連結体 2 は、例えばポリフェニレンスルファイド、ポリエーテルエーテルケトン、又はポリフェニルスルホンから成ることができる。しかし高められた作動温度をカバーするためには、鋼製連結体を用いるバリエーションも考えられる。1 つの piezo 素子 801 から成る音響変換器 8 は、サンプル表面の垂線に対して 0° の角度で配向されており、即ちサンプル表面と平行（垂直測定）に連結体 2 上に取り付けられている。それぞれ所定の面部内の 1 つ又は複数の piezo 素子 301 ないし 601 から成る他の 2 つの音響変換器 3、6 は、サンプル表面に対してゼロとは異なる角度で連結体 2 上に載置されており、例えば、鋼製サンプル内に縦波を励起するためにはプラスチック連結体上に 16° の角度で、又は鋼製サンプル内に横波を励起するためには 40° の角度で取り付けられている（傾斜測定）。

【0051】

サンプル 1 内の音速が両方の音響経路 S_1 ないし S_2 で同じであるためには、傾斜装置の角度が、できるだけ所定の第 1 の臨界角より下になくなくてはならない。傾斜測定の角度が所定の第 1 の臨界角以上にあるが、所定の第 2 の臨界角未満にある場合、本方法を実行するためには、横波用の垂直音響変換器が垂直測定のために使用されなくてはならない。このケースは、クランプオン式流量センサ 13 と、鋼材から成るサンプル 1 とを用いた、図 4 に図示された実施例に関する。

【0052】

次に、垂直方向の測定装置と傾斜した測定装置とを用いた実施例の特殊なケースのための数式が開示される。

【0053】

$$c = K_\alpha \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta t_\beta}{\Delta t_{\text{Senkrecht}}} \right)^2}$$

$$w = \frac{c \Delta t_{\text{Senkrecht}}}{2} \quad (1.3)$$

【0054】

サンプル 1 内の音速 c を決定するために、前述の測定装置を用いて（「傾斜測定」と「垂直測定」）走行時間差 t_1 及び $t_{\text{Senkrecht}}$ が決定される。（1.3）の方程式を用い、これらの 2 つの測定値に基づき、サンプル 1 内の音速 c と層厚 w を決定することができる。数式（1.3）は、 $\alpha = 0$ 及び $t_2 = t_{\text{Senkrecht}}$ による、数式（1.1）の特殊なケースとして得られる（この際「Senkrecht」は「垂直」を意味する。）。

【0055】

$t_{\text{Senkrecht}}$ は、音響経路 S_2 （図 3）上の走行時間差であり、送信機 8 からサンプル表面に対して垂直に、 n 回及び $n+1$ 回、サンプル 1 を通り（サンプル 1 内の n 回及び $n+1$ 回の後壁反射を介して）受信機 8 に戻るように走行した超音波信号の間のエコーシーケンス間隔に対応する。垂直測定の場合には、送信機と受信機は、同じ音響変換器である。傾斜測定の場合には、送信機 3 と受信機 6 は、異なる音響変換器である。

【 0 0 5 6 】

t_1 は、音響経路 S_1 (図 3) 上の走行時間差であり、送信機 3 からサンプル表面の垂線に対して角度 θ_1 で、 n 回及び $n + 1$ 回、サンプル 1 を通り (n 回及び $n + 1$ 回の後壁反射を介してサンプル 1 を通って) 受信機 6 に戻るように走行した超音波信号の間のエコーシーケンス間隔に対応する。音響経路 10、11 は、 $n \geq 0$ のときの超音波信号の走行状況を表している。

【 0 0 5 7 】

エコーシーケンス間隔は、記録されたエコーシーケンスから自己相関関数を用いて決定される。図 6 b は、4 mm の厚さの鋼製板における垂直測定のエコーシーケンスを示している。このエコーシーケンスに自己相関関数を適用すると、自己相関関数において、0 のところの絶対的な極大の他に、一番目の相対的な極大 (以下、一番目の副極大と称する) が生じる。図 7 b の例 (4 mm の鋼製板) では、 $1.322 \mu s$ の垂直測定のエコーシーケンス間隔が得られる。

10

【 0 0 5 8 】

図 6 a の例における傾斜測定のエコーシーケンスは、明らかなパルスシーケンスとしては認識できない。しかしそれでもこのエコーシーケンスの自己相関関数では、一番目の副極大の位置が評価可能である。この副極大が明確には際立っていない場合には、傾斜測定からのエコーシーケンス間隔は垂直測定でのエコーシーケンス間隔よりも小さいという条件を利用することができる。この条件を用いることにより、傾斜測定のエコーシーケンスの自己相関関数において正しい副極大が評価される。本実施例では、 $1.049 \mu s$ の傾斜測定のエコーシーケンス間隔が検出される。これらの両方の値を計算式 (1.3) に取り入れると、音速 c は $5996 m/s$ となり、層厚 w は $3.963 mm$ となる。

20

【 0 0 5 9 】

多層システムにおける個々の層厚 w を決定するためには、サンプル 1 の個々の各層 16、17 (図 5) が前述の方法を用いて測定される。個々の層 16、17 からの走行時間を評価できるようにするためには、個々のピエゾ素子 301、601 のスイッチオンとスイッチオフによりエコーシーケンスの重なり合いが回避される。図 5 には、例として、1 つの 2 層システムの層厚 w と音速 c を測定するための測定装置が示されている。傾斜装置は、音響変換器対 (音響変換器ペア) 15 から成り、これらの音響変換器自体は、スイッチオンスイッチオフ可能な個々のピエゾ素子 301 ないし 601 から成る。図 5 においてアクティブ状態の要素は、X 印でマークされている。まずサンプル 1 の上側の層 16 が測定される。サンプル 1 の下側の層 17 を少なくとも 1 回通過する信号部分は、これらの信号部分が受信音響変換器のインアクティブ状態の要素だけに当たり、従って無効とされるように (図面において) 右の方にずらされる。従って受信機で記録されるエコーシーケンスは、連結体 2 とサンプル 1 の上側の層 16 からの信号部分だけを含んでいる。図 5 からは、このエコーシーケンスは、層 16 を 1 度も通過していない、1 回通過した、及び 2 回通過した信号部分から構成されることも見てとれる。このエコーシーケンスから走行時間差 t_1 が決定される。

30

【 0 0 6 0 】

図 5 の音響変換器 8 を用いた垂直測定からのエコーシーケンスは、両方の層 16、17 内の音響経路を走行した信号部分から成る。このエコーシーケンスは、走行時間差 $t_{senkrecht}$ を評価するために層 16 又は層 17 からの信号部分だけが考慮されるような形式でウィンドウ設定される。層 16 の評価について、このことは、例えばエコーシーケンスの最初の両方のパルスだけが評価のために使用されることにより可能である。

40

【 0 0 6 1 】

それに応じ、数式 (1.3) を用いてサンプル 1 の上側の層 16 の層厚 w と音速 c を決定することができる。

【 0 0 6 2 】

サンプル 1 の下側の層 17 を測定するためには、音響変換器対 15 の受信機において更に右側に位置するピエゾ要素 (X 印なしで図示されているもの) がアクティブ状態にされ

50

、先にアクティブ状態にされていたピエゾ要素（×印で図示されているもの）がスイッチオフされる。それにより下側の層 17 内の多重反射から成るエコーシーケンスが記録され（エコーシーケンスは、少なくとも 1 回、層 17 を斜めに通過した信号部分から成る）、時間的なパルスシーケンス間隔が層 17 内の多重反射に基づいて評価される。しかしこのことは、上側の層 16 からの他のエコーが受信音響変換器面の変化により大部分において無効とされ得るか、又は上側の層 16 内の多重反射が下側の層 17 内よりも強く減衰される場合にのみ達成される。更に上側の層 16 からのエコーの時間的な位置を予測し且つ従って下側の層 17 のための時間的なパルスシーケンス間隔の評価から取り除くために、先に獲得された上側の層 16 の層厚の情報を利用することもできる。

【0063】

図 5 の垂直測定からのエコーシーケンスは、少なくとも 1 回垂直に下側の層 17 を通って走行した下側の層 17 からの信号部分のみが走行時間差 $t_{\text{senkrecht}}$ を評価するために考慮されるような形式でウィンドウ設定される。つまり例えばエコーシーケンスの最初の両方のパルスは考慮されないままで、3 番目及び更なる後続のパルスだけを走行時間差の決定のために使用することができる。

【符号の説明】

【0064】

1	サンプル	
2	連結体	
	201	連結面
	202	連結体 2 のデッキ面
	203、204、205、206	縦方向の側方エッジ部
3	音響変換器	
	301	ピエゾ素子
4	音響変換器	
5	音響変換器	
6	音響変換器	
	601	ピエゾ素子
7	反射器	
8	音響変換器	
	801	ピエゾ素子
9	音響経路	
10	音響経路	
11	音響経路	
12	音響経路	
13	音響変換器（クランプオン式流量センサ）	
	131	ピエゾ素子
14	音響変換器（超音波壁厚測定器）	
	141	ピエゾ素子
15	音響変換器	
16	サンプル 1 の上側の層	
17	サンプル 1 の下側の層	
18	音響経路	
19	音響経路	
	1、2	連結体 2 内の垂線に対する音響ビームの角度
	1、2	サンプル 1 内の垂線に対する音響ビームの角度
S_1 、 S_2		サンプルの 1 つの層内の音響経路
S_1^* 、 S_2^*		サンプルの 1 つの層内の音響経路、 S_1 、 S_2 に対して平行移動されたもの
t_1 、 t_2		音響経路 S_1 、 S_2 上の超音波の走行時間差

10

20

30

40

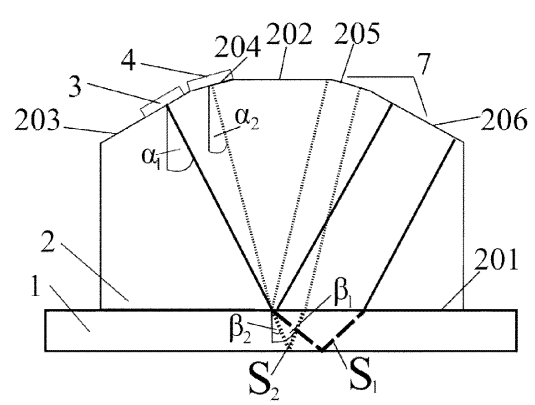
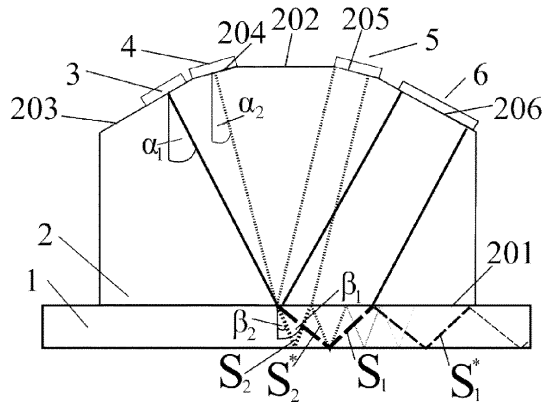
50

t Senkrecht	垂直測定時の音響経路 S ₁ 上の走行時間差
c	サンプル 1 内の音速
c	連結体 2 内の音速
w	層厚
K ₁ 、K ₂	連結体 2 内に角度 θ ₁ ないし θ ₂ を有する測定装置のセンサ定数

【図面】

【 図 1 】

【 図 2 】

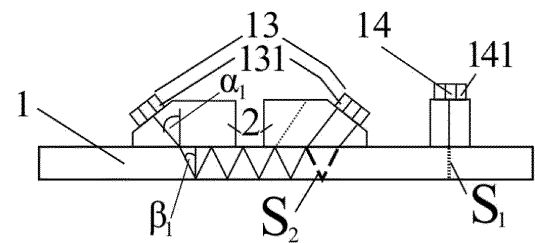
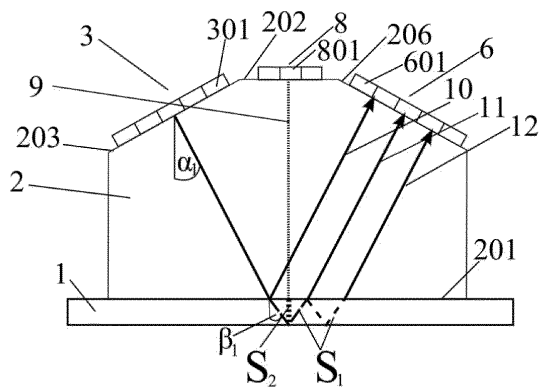


10

20

【 図 3 】

【 図 4 】

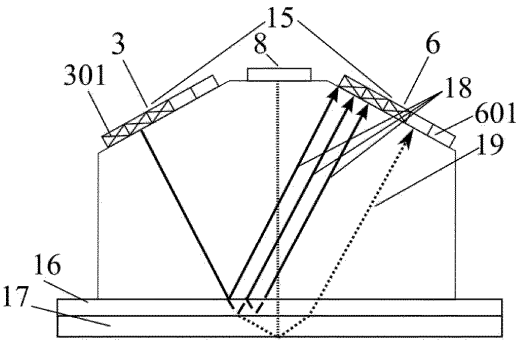


30

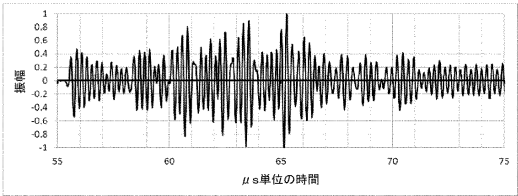
40

50

【図 5】

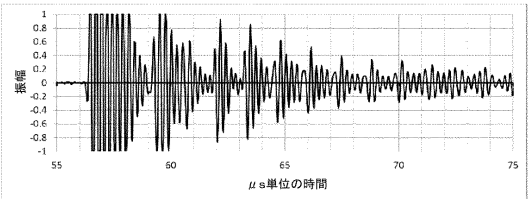


【図 6 a】

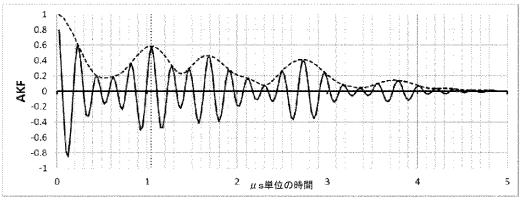


10

【図 6 b】

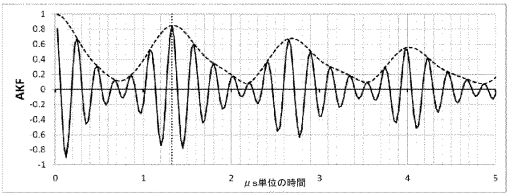


【図 7 a】



20

【図 7 b】



30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 独国特許出願公開第 1 0 2 0 1 0 0 3 7 9 8 1 (D E , A 1)
米国特許第 0 4 3 9 8 4 2 1 (U S , A)
米国特許出願公開第 2 0 0 6 / 0 1 9 1 3 4 2 (U S , A 1)
米国特許第 0 4 4 1 3 5 1 7 (U S , A)
西独国特許出願公開第 0 3 4 4 1 8 9 4 (D E , A 1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
- G 0 1 B 1 7 / 0 0 - 1 7 / 0 8
G 0 1 G 1 5 / 0 0 - 1 7 / 0 8
G 0 1 H 1 / 0 0 - 1 7 / 0 0