

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6764886号  
(P6764886)

(45) 発行日 令和2年10月7日(2020.10.7)

(24) 登録日 令和2年9月16日(2020.9.16)

(51) Int.Cl. F I  
**GO 1 N 29/04 (2006.01)** GO 1 N 29/04  
**GO 1 N 29/34 (2006.01)** GO 1 N 29/34

請求項の数 8 (全 19 頁)

(21) 出願番号	特願2018-17186 (P2018-17186)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成30年2月2日(2018.2.2)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2019-132796 (P2019-132796A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	令和1年8月8日(2019.8.8)	(74) 代理人	100083806
審査請求日	令和2年2月21日(2020.2.21)		弁理士 三好 秀和
		(74) 代理人	100129230
			弁理士 工藤 理恵
		(72) 発明者	庄司 正成
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	岡 宗一
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日 本電信電話株式会社内
		審査官	佐藤 仁美

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プローブ設置方法および送信プローブの駆動方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

長尺部材に、前記長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、前記ガイド波が前記長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブを設置するプローブ設置方法であって、

前記受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第1の信号となるガイド波と、前記第1の信号のノイズである第2の信号となるガイド波とを含み、前記第2の信号となるガイド波は、前記長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、

前記送信プローブによって送信されるガイド波は、前記長尺部材の特定の周面位置において、前記第2の信号となるガイド波の前記特定方向の変位がゼロとなるように形成され、

前記プローブ設置方法は、

前記長尺部材の周面に、前記ガイド波を送信する前記送信プローブを設置するステップと、

前記長尺部材の周面の、前記第2の信号となるガイド波の前記特定方向の変位がゼロとなる位置に、前記受信プローブを設置するステップ

を備えることを特徴とするプローブ設置方法。

【請求項2】

前記送信プローブは、前記長尺部材の周面に、前記送信プローブの位置と前記長尺部材

10

20

の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与える

ことを特徴とする請求項 1 に記載のプローブ設置方法。

【請求項 3】

前記長尺部材は、長さ方向の中心軸に対して軸対称かつ、前記中心軸に垂直に形成される複数の断面の各形状が同一に形成される

ことを特徴とする請求項 1 に記載のプローブ設置方法。

【請求項 4】

前記受信プローブは、前記第 2 の信号となるガイド波の、前記特定方向の変位がゼロとなる前記特定の周面位置に設置され、

前記特定方向は、前記特定の周面位置と前記長尺部材の中心軸とを通る平面に平行な方向である

ことを特徴とする請求項 1 に記載のプローブ設置方法。

【請求項 5】

前記送信プローブが設置される位置を通り、前記長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に交わる直線と、前記受信プローブが設置される位置を通り、前記長さ方向の中心軸に垂直に交わる直線とがなす角  $\theta$  は、式 (1) で特定される

【数 1】

$$\theta = \frac{1}{n} \left( \frac{\pi}{2} + l\pi \right)$$

$n$  : 1 以上の整数であり、第 2 の信号の変位の周方向分布の節の数の  $1/2$  に対応

$l$  : 整数

・・・式 (1)

ことを特徴とする請求項 1 に記載のプローブ設置方法。

【請求項 6】

前記送信プローブは、複数のプローブからなり、前記複数のプローブは、前記長尺部材の長さ方向の中心軸を通る少なくとも 1 つの平面に関して、面对称な位置関係となるように配置され、

前記複数の送信プローブは、前記平面に対して、面对称となる変位または変位振動を、前記長尺部材に与えるように駆動される

ことを特徴とする請求項 1 に記載のプローブ設置方法。

【請求項 7】

長尺部材の周面に設置される送信プローブの駆動方法であって、

前記長尺部材の周面に、前記長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、前記ガイド波が前記長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブが設置され、

前記受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第 1 の信号となるガイド波と、前記第 1 の信号のノイズである第 2 の信号となるガイド波を含み、前記第 2 の信号となるガイド波は、前記長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、

前記送信プローブによって送信されるガイド波は、前記長尺部材の特定の周面位置において、前記第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成され、

前記受信プローブは、前記長尺部材の周面の、前記第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に設置され、

前記送信プローブの駆動方法は、

前記送信プローブが、前記長尺部材の周面に、前記送信プローブの位置と前記長尺部材の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与えるように駆動するステップ

を備えることを特徴とする送信プローブの駆動方法。

10

20

30

40

50

## 【請求項 8】

長尺部材の周面に設置される送信プローブの駆動方法であって、

前記長尺部材の周面に、前記長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、前記ガイド波が前記長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブが設置され、

前記受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第 1 の信号となるガイド波と、前記第 1 の信号のノイズである第 2 の信号となるガイド波を含み、前記第 2 の信号となるガイド波は、前記長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、

前記送信プローブによって送信されるガイド波は、前記長尺部材の特定の周面位置において、前記第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成され、

前記送信プローブは、複数のプローブからなり、前記複数のプローブは、前記長尺部材の長さ方向の中心軸を通る少なくとも 1 つの平面に関して、面対称な位置関係となるように配置され、

前記受信プローブは、前記長尺部材の周面の、前記第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に設置され、

前記送信プローブの駆動方法は、

前記複数の送信プローブが、前記平面に対して、面対称となる変位または変位振動を、前記長尺部材に与えるように駆動するステップ

を備えることを特徴とする送信プローブの駆動方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブとガイド波を受信する受信プローブを設置するプローブ設置方法および送信プローブの駆動方法に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、パイプライン、各種配管や各種機械の構成部材、建築建設部材等の長尺部材に関して、例えば亀裂、摩耗、腐食、変形、材料特性変化などに起因して断面積、断面形状や物理特性の変化が生じた欠陥部位がある場合、その欠陥が生じた箇所を効率的に検出、検査する手段として、弾性波パルス反射法が提案されている（例えば、非特許文献 1 ないし 3 参照）。弾性波パルス反射法は、長尺部材の軸線方向に進行する弾性波（一般に超音波周波数領域のガイド波）を送信し、形状等が変化した部分から反射された弾性波（以下、「エコー波」とも表記する）を受信する。欠陥の存在、位置、程度等を検出する弾性波を送信してから反射されたエコー波を受信するまでの時間と波の伝搬速度とに基づいて、欠陥までの距離が評価される。またエコー波の振幅や継続時間によって欠陥の程度が、評価される。

## 【0003】

長尺部材を長手方向に伝搬する弾性波は、一般的にガイド波と呼ばれる。このガイド波の特徴として、その波のモードが多数存在する多モード性と音速に周波数依存性のある分散性が知られている。弾性波パルス反射法では、対象の長尺部材を伝播し得る複数のガイド波のモードのうちの特定の一つまたは複数のモードを用いる。

## 【先行技術文献】

## 【非特許文献】

## 【0004】

【非特許文献 1】 亀山俊平、その他、ガイド波探傷システム、（社）日本非破壊検査協会、非破壊検査、第 5 2 巻、第 1 2 号、6 7 2 - 6 7 8 頁、平成 1 5 年 1 2 月 1 日発行

【非特許文献 2】 永島良昭、その他、ガイド波を用いた配管減肉検査技術、日本工業出版株式会社、配管技術、1 9 - 2 4 頁、2 0 0 8 年 6 月号

10

20

30

40

50

【非特許文献3】林高弘、その他、ガイド波非軸対称モードの抽出、(社)日本非破壊検査協会、非破壊検査、第53巻、第4号、223-229頁、平成16年4月発行

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

弾性波パルス反射法においては、複数のガイド波のモードのうち特定の一定または複数のモードを用いるが、複数のガイド波のモードのうち、弾性波パルス反射法では利用しないモードが存在する場合がある。弾性波パルス反射法では用いないモードの存在は、エコー波受信信号に影響を与えてSN比を低下させる場合がある。また、ガイド波の送信の際には所望の特定モードのみを生成し送信できたとしても、波の進行にともなう散乱または反射の過程で、利用しないモードが生成(モード変換)され、エコー波受信信号に影響を与えてSN比を低下させる場合もある。

10

【0006】

従って本発明の目的は、ガイド波の受信におけるSN比を向上させるプローブ設置方法および送信プローブの駆動方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上記課題を解決するために、本発明の第1の特徴は、長尺部材に、長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、ガイド波が長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブを設置するプローブ設置方法に関する。本発明の第1の特徴に係るプローブ設置方法において、受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第1の信号となるガイド波と、第1の信号のノイズである第2の信号となるガイド波とを含み、第2の信号となるガイド波は、長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、送信プローブによって送信されるガイド波は、長尺部材の特定の周面位置において、第2の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成される。本発明の第1の特徴に係るプローブ設置方法は、長尺部材の周面に、ガイド波を送信する送信プローブを設置するステップと、長尺部材の周面の、第2の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に、受信プローブを設置するステップを備える。

20

【0008】

ここで送信プローブは、長尺部材の周面に、送信プローブの位置と長尺部材の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与えても良い。

30

【0009】

また長尺部材は、長さ方向の中心軸に対して軸対称かつ、中心軸に垂直に形成される複数の断面の各形状が同一に形成されても良い。

【0010】

また受信プローブは、第2の信号となるガイド波の、特定方向の変位がゼロとなる前記特定の周面位置に設置され、特定方向は、前記特定の周面位置と長尺部材の中心軸とを通る平面に平行な方向であっても良い。

【0011】

また送信プローブが設置される位置を通り、長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に交わる直線と、受信プローブが設置される位置を通り、長さ方向の中心軸に垂直に交わる直線とがなす角は、式(1)で特定されても良い。

40

## 【数 1】

$$\theta = \frac{1}{n} \left( \frac{\pi}{2} + l\pi \right)$$

n : 1 以上の整数であり、第 2 の波の変位の周方向分布の節の数の 1 / 2 に対応

l : 整数

・・・式 (1)

## 【0012】

また送信プローブは、複数のプローブからなり、複数のプローブは、長尺部材の長さ方向の中心軸を通る少なくとも 1 つの平面に関して、面対称な位置関係となるように配置され、複数の送信プローブは、前記平面に対して、面対称となる変位または変位振動を、長尺部材に与えるように駆動されても良い。

10

## 【0013】

本発明の第 2 の特徴は、長尺部材の周面に設置される送信プローブの駆動方法に関する。本発明の第 2 の特徴に係る送信プローブの駆動方法において、長尺部材の周面に、長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、ガイド波が長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブが設置され、受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第 1 の信号となるガイド波と、第 1 の信号のノイズである第 2 の信号となるガイド波を含み、第 2 の信号となるガイド波は、長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、送信プローブによって送信されるガイド波は、長尺部材の特定の周面位置において、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成され、受信プローブは、長尺部材の周面の、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に設置される。本発明の第 2 の特徴に係る送信プローブの駆動方法は、送信プローブが、長尺部材の周面に、送信プローブの位置と長尺部材の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与えるように駆動するステップを備える。

20

## 【0014】

本発明の第 3 の特徴は、長尺部材の周面に設置される送信プローブの駆動方法に関する。本発明の第 3 の特徴に係る送信プローブの駆動方法において、長尺部材の周面に、長尺部材の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブと、ガイド波が長尺部材の所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブが設置され、受信プローブによって受信されるガイド波は、所望の第 1 の信号となるガイド波と、第 1 の信号のノイズである第 2 の信号となるガイド波を含み、第 2 の信号となるガイド波は、長尺部材の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持ち、送信プローブによって送信されるガイド波は、長尺部材の特定の周面位置において、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成され、送信プローブは、複数のプローブからなり、複数のプローブは、長尺部材の長さ方向の中心軸を通る少なくとも 1 つの平面に関して、面対称な位置関係となるように配置され、受信プローブは、長尺部材の周面の、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に設置される。本発明の第 3 の特徴に係る送信プローブの駆動方法は、複数の送信プローブが、前記平面に対して、面対称となる変位または変位振動を、長尺部材に与えるように駆動するステップを備える。

30

40

## 【発明の効果】

## 【0015】

本発明によれば、ガイド波の受信における S/N 比を向上させるプローブ設置方法および送信プローブの駆動方法を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0016】

【図 1】本発明の実施の形態に係る送信プローブおよび受信プローブの設置方法を説明する図であって、図 1 ( a ) は、長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に切った断面図であっ

50

て、図1(b)は、長尺部材の斜視図である。

【図2】本発明の実施の形態に係る座標系を説明する図である。

【図3】所定の長尺部材についてのガイド波FモードとLモードの位相速度と群速度の分散曲線を説明する図である。

【図4】適用例1における送信プローブおよび受信プローブの設置方法を説明する図であって、図4(a)は、長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に切った断面図であって、図4(b)は、長尺部材の斜視図である。

【図5】適用例2および3における送信プローブおよび受信プローブの設置方法を説明する図であって、図5(a)は、長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に切った断面図であって、図5(b)は、長尺部材の斜視図である。

【図6】適用例4における送信プローブおよび受信プローブの設置方法を説明する図であって、図6(a)は、長尺部材の長さ方向の中心軸に垂直に切った断面図であって、図6(b)は、長尺部材の斜視図である。

【図7】所定の長尺部材についてのガイド波FモードとLモードの群速度の分散曲線を説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

次に、図面を参照して、本発明の実施の形態を説明する。以下の図面の記載において、同一または類似の部分には同一または類似の符号を付している。

【0018】

本発明の実施の形態は、図2に示す円筒座標系で説明される。図2(a)に示すように、長尺部材3の長さ方向の中心軸をz軸とする。図2(b)に示すように、動径をr、所定位置と動径とがなす角を $\theta$ とする。また本発明の実施の形態において、長尺部材の断面の径(円柱中実ロッドの直径または円筒形パイプの外径)は、 $2a$ で表現される。

【0019】

(プローブ設置方法)

図1を参照して、本発明の実施の形態において、長尺部材3に、長尺部材3の長手方向に進行するガイド波を送信する送信プローブ1と、長尺部材3の欠陥が生じた所定箇所から反射されたガイド波を受信する受信プローブ2を設置するプローブ設置方法を説明する。ガイド波を送信する送信プローブ1と、ガイド波を受信する受信プローブ2は、長尺部材3の周面に当接して設置される。

【0020】

送信プローブ1は、長尺部材3の周面に設置され、ガイド波を送信する。長尺部材3においてガイド波を送信する方法として、プローブ(トランスデューサ)として圧電素子探触子(アレ)を用いる方法、電磁超音波プローブ(ElectroMagnetic Acoustic Transducer: EMAT)を用いる方法、磁歪センサを用いる方法、レーザーを利用するレーザー超音波法等が知られているが、本発明の実施の形態において、ガイド波を送信する方法はどのようなものであっても構わない。

【0021】

受信プローブ2は、長尺部材3の周面に設置され、ガイド波を受信する。長尺部材3においてガイド波を受信する方法として、圧電素子探触子を用いる方法、電磁超音波プローブを用いる方法、磁歪センサを用いる方法、レーザー超音波法等が知られているが、本発明の実施の形態において、ガイド波を受信する方法はどのようなものであっても構わない。

【0022】

受信プローブ2は、送信プローブ1から送信されて長尺部材3の所定箇所で反射された結果生じたガイド波(エコー波とも称される場合がある)を受信する。受信プローブ2はさらに、送信プローブ1から送信されて直接受信プローブ2に到達したガイド波の他、送信プローブ1から長尺部材3の軸の前後方向に送信された後に反射、散乱等の過程を経て、受信プローブ2に到達するガイド波を受信する場合もある。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 2 3 】

送信プローブ 1 によって送信されるガイド波は、長尺部材 3 の材料特性の変化や形状変化の検出に用いる波である。受信プローブ 2 によって受信されるガイド波は、所望の第 1 の信号となるガイド波と、第 1 の信号のノイズである第 2 の信号となるガイド波を含む。第 2 の信号となるガイド波は、長尺部材 3 の周面における特定方向の変位の周方向分布において節を持つ。周方向の分布とは、長尺部材 3 の中心軸に垂直な断面における周面上位置の分布である。送信プローブ 1 によって送信されるガイド波は、長尺部材 3 の特定の周面位置において、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなるように形成される。ここで特定方向は、特定の周面位置と長尺部材 3 の中心軸とを通る平面に平行な方向である。言い換えると、特定方向は、図 2 に示す円筒座標系において、成分がゼロであるベクトルで表現される方向である。

10

## 【 0 0 2 4 】

本発明の実施の形態において第 2 の信号は、ガイド波 F モードの信号である。第 1 の信号は、ガイド波 L モード、F モードのうちのいずれでもよいが、本発明の実施の形態において、第 1 の信号が、その変位の分布が長さ方向の中心軸に対して軸対称で、周方向分布に節のない L モードである場合を説明する。長尺部材 3 の材料特性または形状の変化の検出に用いるために、第 1 の信号が用いられ、第 2 の信号は、第 1 の信号に対するノイズとなる。

## 【 0 0 2 5 】

一般に受信プローブ 2 が受信するガイド波は、所望の第 1 の信号を形成するガイド波と、第 1 の信号のノイズとなる第 2 の信号となるガイド波とを含み得るので、本発明の実施の形態は、受信プローブ 2 による第 1 の信号の検出において、ノイズとなる第 2 の信号の影響が少なくなるような、送信プローブ 1 の設置と駆動、および受信プローブ 2 の設置の方法を提案する。

20

## 【 0 0 2 6 】

長尺部材 3 は、長さ方向（長手方向）の中心軸に対して対称かつ、中心軸に垂直に形成される複数の断面の各形状が同一に形成される。長尺部材 3 は、円柱中実ロッド、円筒形パイプ等である。

## 【 0 0 2 7 】

このような長尺部材 3 の周面に、送信プローブ 1 および受信プローブ 2 を設置する際、本発明の実施の形態に係るプローブ設置方法は、長尺部材 3 の周面に、ガイド波を送信する送信プローブ 1 を設置するステップと、長尺部材 3 の周面の、第 2 の信号となるガイド波の特定方向の変位がゼロとなる位置に、受信プローブ 2 を設置するステップとを備える。ここで、送信プローブ 1 は、長尺部材 3 の周面に、送信プローブ 1 の位置と長尺部材 3 の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与える。送信プローブ 1 の位置と長尺部材 3 の中心軸とを含む平面に平行な方向とは、図 2 に示す円筒座標系において、成分がゼロであるベクトルで表現される方向である。

30

## 【 0 0 2 8 】

本発明の実施の形態において、送信プローブ 1 はガイド波を送信し、ガイド波は長尺部材 3 の軸方向に進行する。ガイド波が進行する方向の長尺部材 3 に、例えば亀裂、摩耗、腐食、変形、材料特性変化などに起因して断面積、断面形状や物理特性の変化が生じた欠陥部位がある場合、その欠陥が生じた箇所ガイド波が反射されてエコー波が発生する。受信プローブ 2 がエコー波を検出することにより、欠陥の存在と場所に関する情報が特定される。

40

## 【 0 0 2 9 】

なお、図示しないが、送信プローブ 1 によるガイド波の送信、受信プローブ 2 によるガイド波の受信および解析を行う測定装置を備えても良い。測定装置は、CPU、メモリ、送信プローブ 1 および受信プローブ 2 とのインタフェースを備える。測定装置は、送信プローブ 1 からガイド波を送信し、受信プローブ 2 で受信したエコー波を解析する。測定装置は、欠陥の存在、位置、程度等を検出するガイド波を送信してから反射されたエコー波

50

を受信するまでの時間と波の伝搬速度とに基づいて、プローブ位置から欠陥までの距離を評価する。また測定装置は、エコー波の振幅や継続時間によって欠陥の程度や状態を、評価する。

【0030】

本発明の実施の形態において、受信プローブ2は、第2の信号となるガイド波の、特定方向の変位がゼロとなる周面上の位置に設置される。ここで特定方向とは、受信プローブ2が設置される位置と長尺部材3の中心軸(z軸)とを通る平面に平行な方向である。長尺部材3の周面位置と、長尺部材3の中心軸とを通る平面に平行な方向とは、図2に示す円筒座標系において、成分がゼロであるベクトルで表現される方向である。より具体的には、送信プローブ1が設置される位置を通り、長尺部材3の長さ方向の中心軸(z軸)に垂直に交わる直線と、受信プローブ2が設置される位置を通り、長さ方向の中心軸(z軸)に垂直に交わる直線とがなす角 $\theta$ は、式(1)で特定される。

【0031】

【数1】

$$\theta = \frac{1}{n} \left( \frac{\pi}{2} + l\pi \right)$$

n : 1以上の整数であり、第2の波の変位の周方向分布の節の数の1/2に対応

l : 整数

・・・式(1)

【0032】

式(1)は、送信プローブ1の座標を0とした場合の、受信プローブ2の座標である。

【0033】

送信プローブ1が、図1に示すように、 $(r, \phi, z) = (a, 0, 0)$ の位置に配設された場合、受信プローブ2は、例えば、 $(r, \phi, z) = (a, \pi/2, L)$ の位置に配設される。これにより、受信プローブ2は、所望の第1の信号を形成するガイド波の変位を選択的に検出することが可能になる。

【0034】

式(1)において、 $n = 1$ かつ $l = 0$ の場合、 $\theta$ は、 $\pi/2$ (90度)になるが、この場合のプローブ設置方法について具体的に説明する。

【0035】

図1において、長尺部材3の周面の1箇所に送信プローブ1が設置される。さらに、送信プローブ1が設置された位置からz方向(軸方向)に距離L離れ、送信プローブ1とは周方向に $\pi/2$ (90度)ずれた位置に、受信プローブ2が設置される。図1に示す例において、長尺部材3は、スチール製円柱中実ロッドである。

【0036】

長尺部材3に存在し得るガイド波のモードとその特性は、長尺部材3の形状、物理的材料特性とその置かれた環境によって定められる。例えば、空气中または真空中に置かれた直径13mmの長尺部材3(スチール製円柱ロッド)に存在し得るガイド波のモードとその特性は、図3に示す位相速度と群速度の分散曲線により特定される。図3(a)および(b)は、真空中の直径13mmの長尺部材3(スチール製円柱ロッド)のガイド波Lモード、Fモードの位相速度と群速度の分散曲線を示す。バルク波縦波音速5900m/s、バルク波横波音速3200m/s、スチールの密度7860kg/m<sup>3</sup>の条件下で、分散曲線が算出された。

【0037】

本発明の実施の形態において、送信プローブ1が、送信プローブ1の位置とz軸とを通る平面に平行な方向の120kHz程度以下の所定の周波数の変位振動(成分はゼロである方向の変位振動)を、長尺部材3の周面の接触位置に与えてガイド波を生成、送信する場合を説明する。この場合、図3(a)および(b)から分かるように、L(0, 1)モード

10

20

30

40

50

と、F(1, 1)モードの2種の波が生成される。L(0, 1)モードと、F(1, 1)モードの2種の波は、それぞれ長尺部材3の前後方向(±z方向)に送信される。なお、本発明の実施の形態において、位相速度と群速度の両方から、ガイド波のモードを特定したが、位相速度と群速度のいずれか一方から、ガイド波のモードを特定しても良い。

【0038】

ここで、各モードの括弧内の引数は、モードを特定する情報である。(n, m)と表記された場合、nは、周方向のモードの次数(周方向の変位分布の節の数の1/2)であり、nが0の場合、軸対称の変位分布を表す。mは、1以上の整数であり、同一のnに対する異なるモードの識別を表現する指標である(非特許文献3参照)。

【0039】

上記条件でガイド波は、L(0, 1)モードとF(1, 1)モードの2種の波を含むところ、L(0, 1)モードの波を、欠陥の検出に用いる波(第1の信号)とする。この場合、F(1, 1)モードの波(第2の信号)が、受信プローブ2によって検出されると、L(0, 1)モードの信号に対するノイズとなり、SN比を低下させる。具体的には、L(0, 1)モードの空間変位(振動)は、長尺部材3の中心軸に対して軸対称であり、かつ軸方向成分と動径方向成分のみを持ち、円周方向成分は常に0である。ここで、L(0, 1)モードの波を用いて長尺部材3の欠陥を検出するので、受信プローブ2は、長尺部材3の周面において、振動の軸方向成分または動径方向成分(軸方向成分と動径方向成分の両方でも良い)を検出することによって、受信プローブ2の位置に到来したL(0, 1)モードの波の受信を行う。ここで受信プローブ2が、L(0, 1)モードの波のほか、F(1, 1)モードの波の対応する成分(軸方向成分または動径方向成分)を、同時にあるいは近い時刻に受信するとノイズとなり、SN比を低下させることとなる。

【0040】

一般にF(n, m)モード(n, mは1以上の整数)の長尺部材3中の位置座標(r, θ, z)の時刻tにおける空間変位を表すベクトル[u(r, θ, z, t)]は、式(2)で特定される。

【0041】

【数2】

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = \begin{pmatrix} u_r(r, \theta, z, t) \\ u_\theta(r, \theta, z, t) \\ u_z(r, \theta, z, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{r, nm}(r) \\ N_{\theta, nm}(r) \\ N_{z, nm}(r) \end{pmatrix} e^{i(n\theta + k_{nm}z - \omega t)} + \begin{pmatrix} N_{r, -nm}(r) \\ N_{\theta, -nm}(r) \\ N_{z, -nm}(r) \end{pmatrix} e^{i(-n\theta + k_{nm}z - \omega t)} \tag{30}$$

$N_{r, \pm nm}(r)$ ,  $N_{\theta, \pm nm}(r)$ ,  $N_{z, \pm nm}(r)$  :

動径方向 (r 方向) についての各変位成分の分布を表す関数

$k_{nm}$  : 長さ方向 (z 方向) への波の伝搬を記述する波数であり、(n, m) で決まるモード

毎に、分散曲線によって周波数との対応関係が定まっている。

( $k_{nm}$  は、実部が正の場合 z 軸の + 方向に進行し、負の場合 z 軸の - 方向に進行する波に対応)

$\omega$  : 角振動数

$i$  : 虚数単位

・・・式(2)

10

20

30

40

50

【 0 0 4 2 】

なお、式 ( 2 ) おける  $\pm n$  の 2 つの項は、円周方向の回転が逆方向 ( 右回り、左回り ) の 2 つの  $F ( n , m )$  モードの波を表現している ( 非特許文献 3 参照 ) 。

【 0 0 4 3 】

本発明の実施の形態で示すように、長尺部材 3 が円柱形状で、長尺部材 3 の周面に設置される送信プローブ 1 が、送信プローブ 1 の位置と  $z$  軸とを通る平面に平行な方向の変位振動を、長尺部材 3 の周面位置 (  $a , 0 , 0$  ) 近傍に与える場合を想定する。この場合、送信プローブ 1 が生成し送信するガイド波の変位分布は、ロッド形状と送信プローブ 1 が長尺部材 3 に与える変位振動の空間的対称性により、送信プローブ 1 の位置と  $z$  軸とを通る平面に対して面对称となる。即ち、その変位分布は、座標  $( r , \theta , z )$  について、送信プローブ 1 の位置 (  $\theta = 0$  ) に対して、動径方向成分 (  $u_r$  ) と軸方向成分 (  $u_z$  ) については対称で、円周方向成分 (  $u_\theta$  ) については反対称でなければならず、式 ( 3 ) が成立する。

10

【 0 0 4 4 】

【数 3】

$$\begin{pmatrix} u_r(r, \theta, z, t) \\ u_\theta(r, \theta, z, t) \\ u_z(r, \theta, z, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_r(r, -\theta, z, t) \\ -u_\theta(r, -\theta, z, t) \\ u_z(r, -\theta, z, t) \end{pmatrix} \quad \dots \text{式 (3)}$$

【 0 0 4 5 】

式 ( 3 ) に式 ( 2 ) を適用することにより、式 ( 4 ) が得られる。

20

【 0 0 4 6 】

【数 4】

$$\begin{pmatrix} N_{r, nm}(r) \\ N_{\theta, nm}(r) \\ N_{z, nm}(r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{r, -nm}(r) \\ -N_{\theta, -nm}(r) \\ N_{z, -nm}(r) \end{pmatrix} \quad \dots \text{式 (4)}$$

【 0 0 4 7 】

式 ( 2 ) に式 ( 4 ) を適用することにより、式 ( 5 ) が得られる。

【 0 0 4 8 】

【数 5】

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = \begin{pmatrix} N_{r, nm}(r)e^{in\theta} + N_{r, -nm}(r)e^{-in\theta} \\ N_{\theta, nm}(r)e^{in\theta} + N_{\theta, -nm}(r)e^{-in\theta} \\ N_{z, nm}(r)e^{in\theta} + N_{z, -nm}(r)e^{-in\theta} \end{pmatrix} e^{i(k_{nm}z - \omega t)} = 2 \begin{pmatrix} N_{r, nm}(r) \cos n\theta \\ iN_{\theta, nm}(r) \sin n\theta \\ N_{z, nm}(r) \cos n\theta \end{pmatrix} e^{i(k_{nm}z - \omega t)}$$

... 式 (5)

【 0 0 4 9 】

ここで、 $F ( 1 , 1 )$  モードについては、 $n = 1 , m = 1$  であるので、式 ( 6 ) が得られる。

40

【 0 0 5 0 】

【数 6】

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = \begin{pmatrix} u_r(r, \theta, z, t) \\ u_\theta(r, \theta, z, t) \\ u_z(r, \theta, z, t) \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} N_{r, 11}(r) \cos \theta \\ iN_{\theta, 11}(r) \sin \theta \\ N_{z, 11}(r) \cos \theta \end{pmatrix} e^{i(k_{11}z - \omega t)} \quad \dots \text{式 (6)}$$

【 0 0 5 1 】

式 ( 6 ) から、式 ( 7 ) の位置では、 $r$  座標、 $z$  座標、時刻  $t$  に関わらず、変位の動径

50

方向成分  $u_r(r, \theta, z, t)$  と、軸方向成分  $u_z(r, \theta, z, t)$  とが、0 であることが分かる。

【0052】

【数7】

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2} \quad \dots \text{式(7)}$$

【0053】

従って、図1に示したように、式(7)を満たす周面位置  $(a, \pi/2, L)$  に設置された受信プローブ2により、設置位置近傍の動径方向または軸方向の変位を検出する場合、その検出する実効的な面積がある程度小さければ（理想的には  $\pi/2$  方向について点接触であれば）、 $F(1, 1)$  モードの変位は常に0となる。従って、受信プローブ2が受信する信号は、 $L(0, 1)$  モードのみとなり、ノイズである  $F(1, 1)$  モードの信号の受信が抑制されてSN比が向上できる。なお、式(7)に示す受信プローブ2の位置では、 $F(1, 1)$  モードの変位の動径方向と軸方向成分がともに常に0となるため、受信プローブ2が検出するガイド波の変位の方向は、受信プローブ2の位置とz軸とを通る平面に平行な任意の方向で良い。

10

【0054】

なお、受信プローブ2が受信する  $F(1, 1)$  モードの波は、送信プローブ1から送信されて受信プローブ2に直接到達するものばかりではなく、送信プローブ1から長尺部材3の前後方向（±z方向）に送信された後に反射、散乱等の過程を経て受信プローブ2の位置に到達するものについても、反射、散乱によって  $F(1, 1)$  モードのガイド波について式(6)の変位分布が保持される限り、同様にその受信信号を抑制することができる。

20

【0055】

このように、一般に  $F(n, m)$  モードの空間変位は、式(5)となるので、式(8)の位置に受信プローブ2を設置して、動径方向または軸方向の空間変位を検出することにより、ノイズとなる  $F(n, m)$  モードの受信信号を抑制することができる。

【0056】

【数8】

$$\theta = \frac{1}{n} \left( \frac{\pi}{2} + l\pi \right) \quad \dots \text{式(8)}$$

$l$ : 整数

次に、適用例1ないし4を説明する。

【0057】

(適用例1)

図4は、スチール製円柱中実ロッドの長尺部材3aの周面において、長尺部材3aの中心軸（z軸）に軸対称な2箇所、それぞれ送信プローブ1を配設し、送信プローブ1から軸方向に、距離L離れた位置に、受信プローブ2を配設した図を示す。

40

【0058】

送信プローブ1は、複数の送信プローブ（第1の送信プローブ1aおよび第2の送信プローブ1b）からなる。第1の送信プローブ1aおよび第2の送信プローブ1bは、長尺部材3の長さ方向の中心軸（z軸）を通る少なくとも1つの平面に対して、面对称な位置関係となるように配置されている。具体的には、2つの送信プローブは、プローブ位置とz軸とを通る平面に対して面对称に配置されている。第1の送信プローブ1aおよび第2の送信プローブ1bは、この平面に対して、面对称となる変位または変位振動を、長尺部材3に与えるように駆動される。具体的には、第1の送信プローブ1aと第2の送信プローブ1bとは、ロッド周面に、それぞれの送信プローブ位置と長尺部材3の中心軸とを含む平面に平行な方向の変位または変位振動を与える。換言すると、第1の送信プローブ1

50

a および第2の送信プローブ1 bは、長尺部材3の周面に、成分がゼロであるベクトルの方向の変位または変位振動を与える。なお、2つの送信プローブが与える変位振動の方向は、成分がゼロであるベクトルの方向である限り、それぞれ別々の任意の方向で良い。

【0059】

受信プローブ2は、送信プローブ1から軸方向に距離L離れた位置に、送信プローブ1が長尺部材3に与える変位に関するz軸を通る対称平面の座標と  $\theta/2$  (90度)異なる座標の位置に設置される。

【0060】

第1の送信プローブ1 aおよび第2の送信プローブ1 bの長尺部材3 aにおける設置位置(送信プローブ1の長尺部材3 aの接地面の中心)が、それぞれ、 $(r, \theta, z) = (a, 0, 0)$  および  $(a, \theta, 0)$  の場合、受信プローブ2の長尺部材3 aにおける設置位置(受信プローブ2の長尺部材3 aの接地面の中心)は、 $(r, \theta, z) = (a, \theta/2, L)$  または  $(a, -\theta/2, L)$  となる。

【0061】

第1の送信プローブ1 aおよび第2の送信プローブ1 bにより、それぞれの設置位置の長尺部材3 aの周面に成分がゼロである方向(r成分またはz成分の少なくとも一方がゼロではないベクトルの方向であり、送信プローブ1 aと送信プローブ1 bとで異なる方向でも良い)の60 kHzの変位振動を与える。この場合、長尺部材3 aに与えられる変位振動は、第1の送信プローブ1 aおよび第2の送信プローブ1 bと長尺部材3 aの中心軸(z軸)を通る平面に関して面对称となる。図3に示す位相速度と群速度の分散曲線から分かるように、第1の送信プローブ1 aおよび第2の送信プローブ1 bから、それぞれ、60 kHzのL(0, 1)モードとF(1, 1)モードのガイド波が生成され、全てのガイド波が長尺部材3 aの前後方向( $\pm z$ 方向)に送信される。

【0062】

長尺部材3 aの欠陥等の検出にはL(0, 1)モードを利用し、F(1, 1)モードは不要な(ノイズとなる)モードである例を説明する。円柱ロッド形状及び与えられる変位振動の空間的対称性より、送信されるF(1, 1)モードは、式(6)を満たす。従って、受信プローブ2を、図4の様に  $\theta/2$  の位置に配置し、その位置(近傍)の変位の動径方向または軸方向成分を検出、受信することにより、F(1, 1)モードの受信を抑制し、L(0, 1)モード受信信号のSN比を向上することができる。

【0063】

この例の場合、第1の送信プローブ1 aおよび第2の送信プローブ1 bにより与える変位振動の方向及び振幅を、成分がゼロの方向で長尺部材3の中心軸について軸対称(例えば、z軸方向あるいは動径r方向の同一位相、同一振幅の変位振動)とすれば、理想的にはF(1, 1)モードは生成されないため、送信プローブ1は、L(0, 1)モードのみを生成し、送信することができる。

【0064】

しかしながら、2つの送信プローブ1を同一位相、同一振幅で駆動したとしても、現実には2つの送信プローブ1の特性に差異があったり、送信プローブ1の長尺部材3 aの周面への設置条件に差異があったりする場合、2つの送信プローブ1が生成する変位振動に理想値からの差が生じ、これによって、F(1, 1)モードの波も生成され、送信される場合がある。ここで、設置条件の差異とは、例えば、送信プローブ1の位置の誤差やプローブ向きの誤差、送信プローブ1の押しつけ具合の差、長尺部材3 aの周面の凹凸の差、接触媒質の状態の差などである。この場合、生成されたF(1, 1)モードが直接、あるいは、反射、散乱の過程を経て受信プローブに到達すると、受信プローブに検出され信号振幅を生じる。従って、F(1, 1)モードは、ノイズの原因となり、SN比を低下させる。

【0065】

しかしながら、円柱ロッド形状及び与えられる変位振動の空間的対称性より、送信され

10

20

30

40

50

る F ( 1 , 1 ) モードは、式 ( 6 ) を満たす。従って、受信プローブ 2 を、図 4 の様に  
 = / 2 の位置に配置し、その位置 ( 近傍 ) の変位の動径方向または軸方向成分を検出、  
 受信することにより、F ( 1 , 1 ) モードの受信を抑制し、L ( 0 , 1 ) モード受信信号  
 の S N 比を向上することができる。

【 0 0 6 6 】

( 適用例 2 )

図 5 は、スチール製円柱中実ロッドの長尺部材 3 a の周面において、送信プローブ 1 を  
 配設し、送信プローブ 1 から軸方向に、距離 L 離れた位置であって、長尺部材 3 a の中心  
 軸 ( z 軸 ) に軸対称な周面位置 2 箇所 ( それぞれ受信プローブ 2 ( 第 1 の受信プローブ  
 2 a および第 2 の受信プローブ 2 b ) を配設した図を示す。受信プローブ 2 は、送信プロ  
 ーブ 1 と z 座標が L 異なり、座標が ± / 2 ( ± 9 0 度 ) 異なる位置に設置される。

10

【 0 0 6 7 】

送信プローブ 1 の長尺部材 3 a における設置位置 ( 送信プローブ 1 の長尺部材 3 a の接  
 地面の中心 ) が、( r , , z ) = ( a , 0 , 0 ) の場合、受信プローブ 2 の長尺部材 3  
 a における設置位置 ( 受信プローブ 2 の長尺部材 3 a の接地面の中心 ) は、( r , , z  
 ) = ( a , / 2 , L ) および ( a , - / 2 , L ) となる。

【 0 0 6 8 】

送信プローブ 1 により、その位置の長尺部材 3 a の周面に軸方向 ( z 方向 ) または動径  
 方向 ( r 方向 ) の 60 k H z の変位振動を与える。この場合、図 3 に示す位相速度と群速度の  
 分散曲線から、送信プローブ 1 から、60 k H z の L ( 0 , 1 ) モードと F ( 1 , 1 ) モード  
 のガイド波が生成され、それぞれが長尺部材 3 a の前後方向 ( ± z 方向 ) に送信される。

20

【 0 0 6 9 】

長尺部材 3 a の欠陥等の検出には L ( 0 , 1 ) モードを利用し、F ( 1 , 1 ) モードは  
 不要な ( ノイズとなる ) モードである例を説明する。この例の場合、長尺部材 3 a の形状  
 及び与える変位振動の空間的対称性から、F ( 1 , 1 ) は、式 ( 6 ) の変位分布を持つ。  
 従って、長尺部材 3 a の中心軸に対称な位置 ( 座標として、が異なる位置 ) に設置され  
 れた同一の受信特性を持つ 2 つの受信プローブ 2 を用いた場合、設置位置付近の軸方向 ( z  
 方向 ) または動径方向 ( r 方向 ) の変位検出による受信信号については、F ( 1 , 1 )  
 モードが存在したとしても、2 つの受信プローブ 2 の受信信号の和をとることによって、  
 理想的には、F ( 1 , 1 ) モードの信号を相殺して 0 とすることができる。具体的に示す  
 と、F ( 1 , 1 ) モードの特定方向変位の検出による受信信号は、式 ( 6 ) の対応する方  
 向の変位に比例すると考えられるので、2 つの受信プローブ 2 の座標を、 = , +  
 とした場合、例えば、動径方向変位を検出する 2 つの受信プローブの受信信号の和は、  
 式 ( 9 ) に示す通り常に 0 となる。

30

【 0 0 7 0 】

【 数 9 】

$$2\{N_{r,11}(a) \cos \alpha + N_{r,11}(a) \cos(\alpha + \pi)\} e^{i(k_{r1}z - \omega t)} = 0 \quad \cdot \cdot \cdot \text{式 (9)}$$

【 0 0 7 1 】

この結果、2 つの受信プローブ 2 は、軸対称な変位分布を持つ L ( 0 , 1 ) モードのみ  
 の信号を取得することができる。

40

【 0 0 7 2 】

ここで、2 つの受信プローブ 2 の特性の個体差、または受信プローブ 2 の長尺部材 3 a  
 の周面への設置条件に差異があったりする場合、F ( 1 , 1 ) モードに対する 2 つの受信  
 プローブ 2 の受信信号に理想値からの差が生じ、これによって、両者の和をとっても F ( 1 , 1 )  
 モードの信号を完全には相殺できずに、結果として S N 比を低下させる場合がある。  
 ここで、設置条件の差異とは、例えば、受信プローブ 2 の位置の誤差、プローブ向き  
 の誤差、受信プローブ 2 の押しつけ具合の差、長尺部材 3 a の周面の凹凸の差、接触媒質  
 の状態の差などである。

【 0 0 7 3 】

50

しかしながら、図5のように、 $F(1, 1)$ モードの振幅が常に0となる  $\theta = \pm \pi/2$  の位置に、受信プローブ2を配置して信号を受信することによって、 $F(1, 1)$ モードの受信信号を劇的に低減し、SN比を向上させることが可能になる。

【0074】

なお、受信プローブ2を  $\theta = \pm \pi/2$  の位置に設置した場合であっても、受信プローブ2の位置の誤差、プローブ向きの誤差、長尺部材3aの周面の凹凸の差、接触媒質の状態の差等によって、 $F(1, 1)$ モードの受信信号を完全に0にできない場合もあり得る。しかしながら、式(6)より明らかなように $F(1, 1)$ モードの動径方向、軸方向の変位は、 $\theta = \pm \pi/2$ 以外の位置より  $\theta = \pm \pi/2$ (付近)の位置の方が原理的に小さい。従って、 $\theta = \pm \pi/2$ の位置に受信プローブ2を設置することにより、他の位置に設置した場合と比べてSN比の向上が期待できる。

10

【0075】

(適用例3)

適用例3において、図5と同様に、長尺部材3aの周面において、送信プローブ1を配設し、送信プローブ1から軸方向に、距離L離れた位置であって、長尺部材3aの中心軸(z軸)に軸対称な周面位置2箇所、それぞれ受信プローブ2(第1の受信プローブ2aおよび第2の受信プローブ2b)を配設した場合を説明する。適用例2においては、送信プローブ1から、60kHzの $L(0, 1)$ モードと $F(1, 1)$ モードのガイド波が生成される場合を説明したが、適用例3では、送信プローブ1により、200kHzのz方向の変位振動を部材表面に与えることによって、200kHzの $L(0, 1)$ モードと $F(1, 1)$ モードと $F(1, 2)$ モードの3種類のガイド波が生成され送信される場合を説明する。

20

【0076】

長尺部材3aの欠陥等の検出には $L(0, 1)$ モードを利用し、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードは不要な(ノイズとなる)モードである例を説明する。送信されるFモード変位分布は、長尺部材3aの形状および長尺部材3aに与える変位振動の空間的対称性から、 $F(1, 1)$ モードについては、式(6)の変位分布を持ち、 $F(1, 2)$ モードについては、式(10)の変位分布を持つ。

【0077】

【数10】

$$\mathbf{u}(r, \theta, z, t) = \begin{pmatrix} u_r(r, \theta, z, t) \\ u_\theta(r, \theta, z, t) \\ u_z(r, \theta, z, t) \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} N_{r,12}(r) \cos \theta \\ iN_{\theta,12}(r) \sin \theta \\ N_{z,12}(r) \cos \theta \end{pmatrix} e^{i(k_{12}z - \omega t)} \quad \dots \text{式(10)}$$

30

【0078】

式(6)および式(10)からわかるように、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードの軸方向(z方向)または動径方向(r方向)変位分布は、 $\theta$ の変化に対して符号が反転する。従って、長尺部材3aの中心軸に対称な位置(座標として  $\theta$  が異なる位置)に同一の受信特性を持つ2つの受信プローブ2が設置される場合、軸方向(z方向)または動径方向(r方向)の変位検出における受信信号について、それらの和をとることによって、理想的には各Fモードの信号に関してそれぞれ相殺して0とすることができる。この結果、2つの受信プローブ2を用いれば、軸対称な変位分布を持つ $L(0, 1)$ モードの信号のみを取得することができる。

40

【0079】

ここで、2つの受信プローブ2の特性の個体差、または受信プローブ2の長尺部材3aの周面への設置条件に差異がある場合、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードに対する2つの受信プローブ2の受信信号の振幅や位相に理想値からの差が生じ、これによって、両者の和をとっても完全には相殺できずに、結果としてSN比を低下させる場合がある。ここで、設置条件の差異とは、例えば、受信プローブ2の位置の誤差、プローブ向きの誤差、受信プローブ2の押しつけ具合の差、長尺部材3aの周面の凹凸の差、接触媒質の状態の差などである。

50

## 【0080】

しかしながら、図5のように、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードの振幅が常に0となる  $\pm r/2$  の位置に、受信プローブ2を配置して信号を受信することによって、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードの受信信号を劇的に低減し、SN比を向上させることが可能になる。

## 【0081】

なお、受信プローブ2を  $\pm r/2$  の位置に設置した場合であっても、受信プローブ2の位置の誤差、プローブ向きの誤差、長尺部材3aの周面の凹凸の差、接触媒質の状態の差等によって、 $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードの受信信号を完全に0にできない場合もあり得る。しかしながら、式(6)および式(10)より明らかなように  $F(1, 1)$ モードおよび $F(1, 2)$ モードの動径方向、軸方向の変位は、 $\pm r/2$  以外の位置より  $\pm r/2$  (付近)の位置の方が原理的に小さい。従って、 $\pm r/2$  の位置に受信プローブ2を設置することにより、他の位置に設置した場合と比べてSN比の向上が期待できる。

## 【0082】

(適用例4)

図6は、スチール製円筒形パイプである長尺部材3bの周面(外周面)において、送信プローブ1を配設し、送信プローブ1から軸方向に、距離L離れた位置であって、長尺部材3bの中心軸に対称な2箇所、それぞれ受信プローブ2(第1の受信プローブ2aおよび第2の受信プローブ2b)を配設した図を示す。図6に示す送信プローブ1、受信プローブ2の設置位置は、図5と同様であるが、図5において長尺部材3aは、円柱中実ロッドであるのに対し、図6において長尺部材3bは、円筒形パイプである点が異なる。

## 【0083】

図7に、真空中における外径87mm、内径76mmのスチール製円筒形パイプのガイド波  $L(0, 1)$ モードおよび $F(1, 1)$ モードの群速度分散曲線を示す。図6のパイプが外径87mm ( $a=43.5\text{mm}$ )、内径76mmのスチール製円筒形パイプである場合、図7の群速度分散曲線からわかるように、送信プローブ1により、その設置位置の長尺部材3bの周面に対して軸方向(z方向)に10kHzの変位振動を与えると、10kHzの  $L(0, 1)$ モードおよび $F(1, 1)$ モードのガイド波が生成され、それぞれが長尺部材3bの前後方向( $\pm z$ 方向)に送信される。

## 【0084】

長尺部材3bの欠陥等の検出には  $L(0, 1)$ モードを利用し、 $F(1, 1)$ モードは不要な(ノイズとなる)モードである例を説明する。この例の場合、送信プローブ1が送信する  $F(1, 1)$ モードは、長尺部材3bの形状と、送信プローブ1がパイプ周面に与える変位振動の空間的対称性から、パイプの内 ( $38\text{mm} < r < 43.5\text{mm}$ ) において、式(6)の変位分布を持つ。従って、長尺部材3bの中心軸に軸対称な位置(座標として、 $r$ が異なる位置)に設置された2つの同一の受信特性を持つ受信プローブ2は、設置位置付近の軸方向(z方向)または動径方向(r方向)の変位検出による受信信号において、 $F(1, 1)$ モードが存在したとしても、2つの受信プローブ2の受信信号の和をとることによって、理想的には、 $F(1, 1)$ モード信号を相殺して0とすることができる。具体的に示すと、 $F(1, 1)$ モードの特定方向変位の検出による受信信号は、式(6)の対応する方向の変位に比例すると考えられるので、2つの受信プローブ2の座標を、 $(r, \theta) = (r, \theta) + (r, \theta)$  とした場合、例えば、動径方向変位を検出する2つの受信プローブの受信信号の和は、式(9)に示す通り常に0となる。

## 【0085】

この結果、2つの受信プローブ2は、軸対称な変位分布を持つ  $L(0, 1)$ モードの信号のみを取得することができる。

## 【0086】

ここで、2つの受信プローブ2の特性の個体差、または受信プローブ2の長尺部材3aの周面への設置条件に差異があったりする場合、2つの受信プローブ2が座標のみ異

10

20

30

40

50

なる位置に設置されていたとしても、F(1, 1)モードに対する受信信号の振幅や位相に理想値からの差が生じ、これによって、両者の信号の和をとっても完全には相殺できずに、結果としてSN比を低下させる場合がある。ここで、設置条件の差異とは、例えば、受信プローブ2の位置の誤差、向きの誤差、受信プローブ2の押しつけ具合の差、長尺部材3bの周面の凹凸の差、接触媒質の状態の差などである。

【0087】

しかしながら、図6のように、F(1, 1)モードの動径方向および軸方向の変位が常に0となる  $\pm \pi/2$  の位置に、受信プローブ2を配置して信号を受信することによって、F(1, 1)モードの受信信号を劇的に低減し、SN比を向上させることが可能になる。

10

【0088】

(第1の変形例)

本発明の実施の形態において、長尺部材3が、長さ方向の中心軸に対して軸対称かつ、中心軸に垂直に形成される複数の断面の各形状が同一に形成される円柱中空ロッド、円筒形パイプ等である場合を説明したが、これに限らない。長尺部材3は、特定の周面位置において、第2の信号となるガイド波の特定の成分の変位がゼロとなるように形成されていけば良い。

【0089】

(第2の変形例)

本発明の実施の形態においては、材料特性の変化等の欠陥の検出に用いる第1の信号(所望の信号)が、 $\theta$ 方向に節のないLモードであって、第2の信号(ノイズ)が、 $\theta + \pi/2$ 方向に節のあるFモードである場合を説明したが、第2の変形例では、第1の信号が、 $\theta + \pi/2$ 方向に節のあるFモードである場合を説明する。

20

【0090】

所望のFモードの変位がゼロではない振幅を持つ位置に、ノイズとなるFモードの変位が常にゼロである位置を合わせるように、送信プローブ1の設置、駆動及び受信プローブ2の設置を行うことにより、SN比を向上させることができる。ここで、所望のFモードの変位の周面方向の節の数は、ノイズとなるFモードの変位の周面方向の節の数とは異なる。

【0091】

(その他の実施の形態)

上記のように、本発明の実施の形態とその変形例1ないし2によって記載したが、この開示の一部をなす論述および図面はこの発明を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例および運用技術が明らかとなる。

30

【0092】

本発明はここでは記載していない様々な実施の形態等を含むことは勿論である。従って、本発明の技術的範囲は上記の説明から妥当な特許請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ定められるものである。

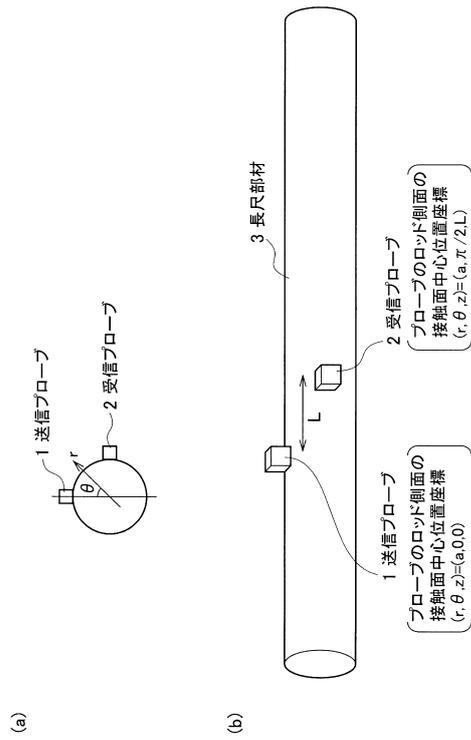
【符号の説明】

40

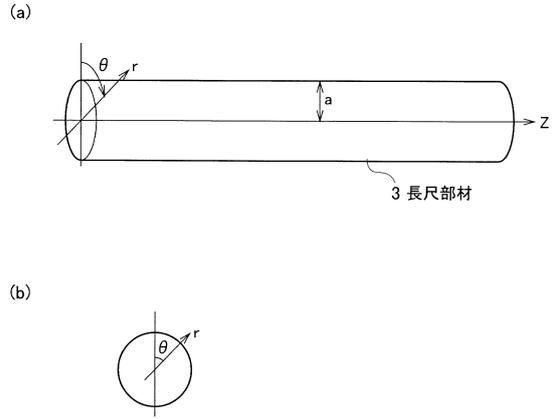
【0093】

- 1 送信プローブ
- 2 受信プローブ
- 3 長尺部材

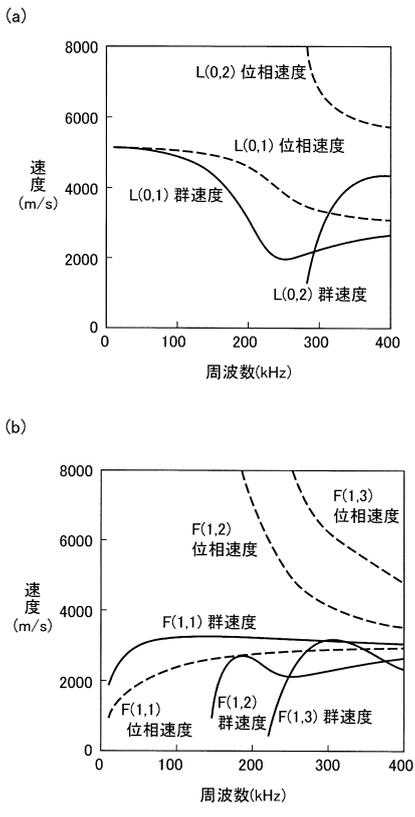
【図1】



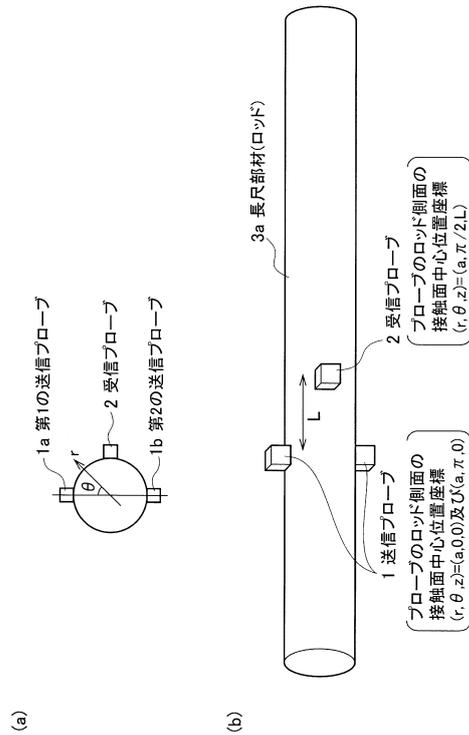
【図2】



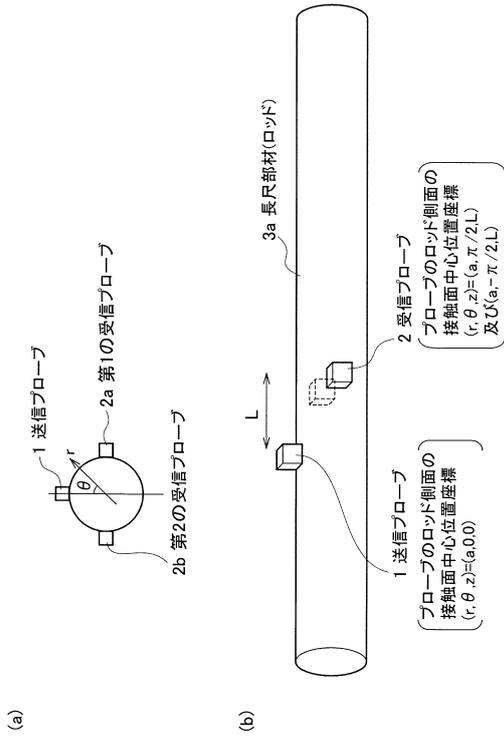
【図3】



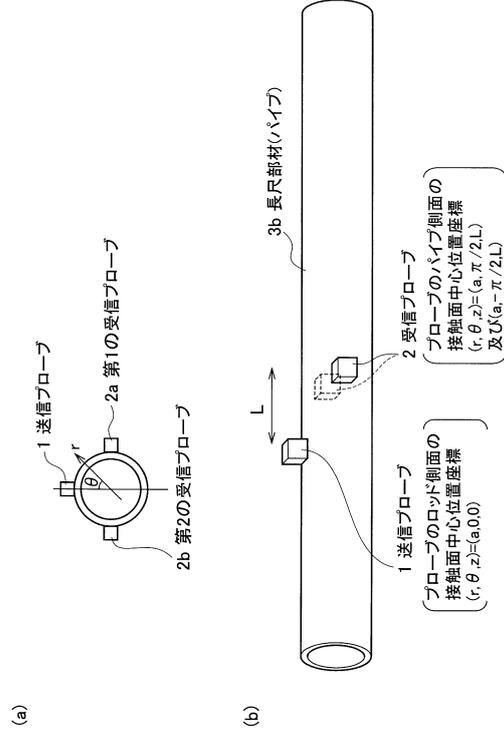
【図4】



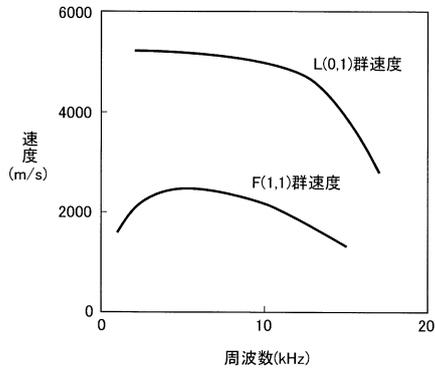
【図5】



【図6】



【図7】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2013-088118(JP,A)  
特開2007-107885(JP,A)  
特開2009-109390(JP,A)  
米国特許出願公開第2014/0202249(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

IPC  
G01N 29/00 - 29/52