

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第3669706号
(P3669706)

(45) 発行日 平成17年7月13日(2005.7.13)

(24) 登録日 平成17年4月22日(2005.4.22)

(51) Int.Cl.⁷
GO 1 N 29/04
GO 1 N 29/08

F I
GO 1 N 29/04 5 O 4
GO 1 N 29/08 5 O 2

請求項の数 14 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願平8-527603	(73) 特許権者	サウスウエスト リサーチ インスティテュート
(86) (22) 出願日	平成8年2月20日(1996.2.20)		アメリカ合衆国 78284 テキサス州
(65) 公表番号	特表平11-502020		, サン アントニオ, キュールブラ ロー
(43) 公表日	平成11年2月16日(1999.2.16)		ド 6220, ピー. オー. ドロウアー
(86) 国際出願番号	PCT/US1996/002255		28510
(87) 国際公開番号	W01996/028727	(74) 代理人	弁理士 浅村 皓
(87) 国際公開日	平成8年9月19日(1996.9.19)		
審査請求日	平成14年10月22日(2002.10.22)	(74) 代理人	弁理士 浅村 肇
(31) 優先権主張番号	08/401,170		
(32) 優先日	平成7年3月9日(1995.3.9)	(74) 代理人	弁理士 森 徹
(33) 優先権主張国	米国(US)	(74) 代理人	弁理士 吉田 裕
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 磁気歪センサーを用いたパイプ及びチューブの非破壊評価

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

周囲及び長さを有しているパイプ及びチューブのごとき強磁性の円筒状シェル構造体を検査してひび、クラック及び他の異常を検出してその位置を探す方法にして、前記シェル構造体の表面に近接し且つ該円筒状シェルの前記長さに沿って向けられた第1の区域に第1の直線化DC磁界を確立する工程と、前記第1の磁界に、磁気歪効果の結果として前記シェル構造体の容積を通して一次機械波を発生させるのに十分な変動を生じさせる工程と、前記シェル構造体の表面に近接し且つ該円筒状シェルの前記長さに沿って向けられた第2の区域に第2の直線化DC磁界を確立する工程と、前記一次機械波及び複数個の二次機械波が前記シェル構造体の容積を通る結果としての前記第2の磁界の変動を検出する工程であって、前記第2の磁界の変動は前記機械波の前記第2の磁界の前記通過の結果として生ずる逆の磁気歪効果によるものであり、前記複数個の二次機械波は前記シェル構造体における前記ひび、クラック及び他の異常により発生され且つ反射されたものである前記第2の磁界の変動を検出する工程と、前記二次機械波を示す前記第2の磁界の前記検出された変動を分析するとともに、前記検出された変動を、前記円筒状シェル構造体における前記ひび、クラック及び他の異常を示すとして知られている変化のパターンに相関させる工程と、を有している方法。

【請求項2】

請求の範囲第1項の方法において、第1の直線化DC磁界を確立する前記工程は、前記シェル構造体の表面に近接して前記第1の位置に永久磁石あるいは電磁石を位置決めすることと、前記永久磁石あるいは前記電磁石の極を前記磁界が前記シェル構造体の前記長さに沿って向うように方向づけすることとを有している方法。

【請求項3】

請求の範囲第1項の方法において、前記シェル構造体の長さに沿って向けられた前記第1の磁界に変動を生じさせる前記工程は、前記シェル構造体の表面に近接した前記第1の位置に隣接して電磁コイルを置くことと、前記電磁コイルを通る電流を変化させて前記シェル構造体の容積内に電磁歪効果を生成することとを有している方法。

【請求項4】

請求の範囲第1項の方法において、第2の直線化DC磁界を確立する前記工程は、前記シェル構造体の表面に近接して前記第2の位置に永久磁石あるいは電磁石を位置決めすることと、前記永久磁石あるいは前記電磁石の極を前記磁界が前記シェル構造体の前記長さに沿って向うように方向づけすることとを有している方法。

【請求項5】

請求の範囲第1項の方法において、前記シェル構造体の長さに沿って向けられた前記第2の磁界での変動を検出する前記工程は、前記シェル構造体の表面に近接して、前記第2の位置に電磁検出コイルを置くことと、前記シェル構造体の容積内の逆電磁歪効果により生じせしめられる前記電磁コイルに誘導される電圧の変動を検出することとを有している方法。

【請求項6】

パイプ及びチューブのごとき周部と長さとを有している強磁性円筒状シェル構造体を検査してひび、クラック及び他の異常を検出してその位置を探索するための装置にして、前記シェル構造体の表面に近接した、第1の位置に隣接して位置決めされた、あるいは、該第1の位置を囲んでいる少なくとも1つのターンでなる伝送コイルと、前記伝送コイルに隣接した第1の直線化DC磁石であって、該第1のDC磁石は前記シェル構造体の容積内に前記円筒状シェルの前記長さに沿って向けられた第1のリニア磁界を作り出す前記第1の直線化DC磁石と、前記第1の磁界に変動を作り出すのに十分な電流を前記伝送コイルに供給することができる信号発生器及びパワーアンプと、前記シェル構造体の表面に近接して且つ前記円筒状シェルの前記長さに沿って向けられた第2の区域に隣接して位置決めされた、あるいは、該第2の区域を囲んでいる少なくとも1つのターンでなる検出コイルと、前記検出コイルに隣接した第2の直線化DC磁石であって、該第2のDCバイアス磁石は前記シェル構造体の容積内に第2のリニア磁界を作り出す前記第2の直線化DC磁石と、前記検出コイル内の電流を増幅し、且つ、フィルタ掛けするための信号コンディショナであって、前記増幅され且つフィルタ掛けされた電流は前記第2の磁界での変動を示す信号である前記信号コンディショナと、前記信号を表示し、且つ、テスト操作者が前記信号を解釈するのを可能にし、もって、前記第2の磁界での前記変動を解釈する表示手段と、を有しており、

前記第1の磁界の前記変動は前記円筒状シェル構造体の容積内に電磁歪効果を誘導し、前記シェル構造体内に一次機械波を発生させ、前記第2の磁界での前記変動は前記シェル構造体内の二次機械波により生じせしめられる逆の電磁歪効果から結果として生じ、前記二次機械波は、前記一次機械波が前記シェル構造体内の前記ひび、クラック及び他の異常から反射される結果として生じさせており、前記信号の前記解釈は前記ひび、クラック及び他の異常の劣化位置及び劣化程度を確認することを含んでいる方法。

【請求項7】

請求の範囲第6項の装置にして、次の表示及び解釈のために前記信号を受領し、且つ、記

10

20

30

40

50

憶することが可能な記録手段を更に有している装置。

【請求項 8】

請求の範囲第 6 項の装置において、前記伝送コイルは前記構造体の外周囲を囲んでいる装置。

【請求項 9】

請求の範囲第 8 項の装置において、前記伝送コイルは第 1 及び第 2 の噛み合わせ可能な端部を備えた取り外し可能な導体列を有しており、該導体列は、前記第 1 及び第 2 の噛み合わせ可能な端部を接続解除することにより、また、前記構造体を囲んだ後、前記噛み合わせ可能な端部を接続して 1 つの導体コイルを構成することにより前記円筒状シェル構造体を囲むことができるようになっている装置。

10

【請求項 10】

請求の範囲第 6 項の装置において、前記伝送コイルは前記構造体の内部周囲内に含まれている装置。

【請求項 11】

請求の範囲第 10 項の装置において、前記伝送コイルはボビンと、該ボビンの回りに巻かれた導体とを有しており、前記ボビンは前記構造体内に挿入され得るよう寸法決めされている装置。

【請求項 12】

請求の範囲第 6 項の装置において、前記第 1 の DC 磁石は、接続され得る第 1 及び第 2 端部を備えた取り外し可能な磁気モジュール列を含み、この磁気モジュール列は、前記第 1 及び第 2 端部の接続を解除することによって前記円筒状シェル構造体を取り囲むようにすることが可能であり、かように前記円筒状シェル構造体を取り囲んだ後に、前記第 1 及び第 2 端部を接続して、前記円筒状シェル構造体のまわりに連続した円を形成し、これら磁気モジュールは前記円筒状シェル構造体内に別個の静的磁界を発生させるようになっている装置。

20

【請求項 13】

請求の範囲第 12 項の装置において、前記磁気モジュール列は別個の永久磁石を有している装置。

【請求項 14】

請求の範囲第 12 項の装置において、前記磁気モジュール列は一連の電磁コイルを有している装置。

30

【発明の詳細な説明】

発明の背景

この出願は、1992 年 11 月 6 日に提出された同時係属出願シリアル番号第 07 / 973, 152 号及び 1993 年 3 月 16 日に提出された同時係属出願シリアル番号第 08 / 033, 256 号の一部継続出願である。

1. 発明の分野

本発明は、パイプ、チューブ及び他の円筒状シェル構造体のキズやひび割れに対する非破壊試験 (NDT) に関する。より具体的には、本発明は、磁気歪的に発生される機械波を用い、またキズから反射した機械波を磁気歪的に検出してパイプ、チューブ及び他の円筒状シェル構造体におけるキズを検出する非破壊評価 (NDE) システム及び方法に関する。

40

2. 従来技術の説明

パイプ、チューブ及び他の円筒状シェル構造体は、発電設備、パイプライン及び石油産業を含むさまざまな産業界において重要な構成要素である。パイプラインの破損並びにこれらの産業に関連した他のこのような導管の破損は、しばしば、悲惨なものとなり、作動収益の損失、広範囲の構造的損害、環境汚染、不測のプラント停止、また、最悪の場合、生命の損失にもつながる。それ故、かようなパイプ、チューブ及び導管等の検査は、これら産業界の各々におけるシステムの維持管理上の主要部分である。

現在、超音波、渦流、X 線、及び、漏れ磁束を用いた様々な検査技術が、かようなパイプ

50

ライン、チューブ及び導管の検査に用いられている。一般に、これらの技術は、例えば、個々の溶接区域の検査のごとき局部的検査には充分適合している。しかしながら、長いパイプあるいはチューブ（例えば、石油化学処理プラントの熱絶縁または被覆されたパイプ）のどこかで欠陥が生じたような場合、あるいは、（例えば、蒸気発生器やボイラーのように）検査されるべきパイプの数が多い場合、これらの技術のいずれかを用いた検査は極めて時間がかかり、また、費用もかかる。このような場合、グループ全体の総合的な条件を示すものとして、サンプルとしてパイプの選定された部分に付いてのみ検査が極めてしばしば行われている。このことは、システムの安全性並びに信頼性を保証するのに満足のゆくものであるかも知れないが満足のゆかないものであるかも知れず、単に、破損の危険性を、わずかだけ、減少しているだけである。

10

現在の方法の一例として、一般に数百マイルにわたって延びているガスパイプラインは、時として、漏れ磁束ピグ（pig）を用いて腐食が検査されている。しかし、かような方法も完全ではない。何故なら、漏れ磁束法を用いたガスパイプラインのクラック検出は、それほど感度のよいものではないからである。小さなクラックを検出するのに十分に敏感であるとされている超音波技術は、変換器の接触媒質を必要とするのでパイプラインに適用するのはしばしば困難である。磁気歪センサーの技術により、在来のNDE技術の上述した欠点の多くは取り除かれ、また、検査の効率をかなり改良することができる。磁気歪センサーシステムを用いることに由来する本発明の顕著な特徴は、パイプ断面の100%を検査できる能力、1つの場所からパイプの長い部分（100フィート以上）を検査できる能力、パイプの外径面及び内径面の双方のキズを検出できる能力、接触媒質なしで作動できる能力、及び、低い検査費用で作動できる能力が含まれている。

20

磁気歪センサーは、パイプの外径部から、あるいは、特定の場合には、パイプの内径部に対して、適用することができる。通常、磁気歪センサーは、強磁性の材料でなるパイプ、チューブ、及び他の円筒状シェル構造体に最も簡単に適用される。しかし、多くの非鉄パイプ、チューブ等（例えば、インコネル蒸気発生器のチューブ）の場合、ニッケルのごとき磁化可能な材料でなる薄い層を、センサーが置かれるべき限定された区域のパイプあるいはチューブにメッキにより形成（plating）するか、あるいは、そのパイプあるいはチューブに接合することにより、磁気歪センサーを依然として利用することができる。このように、磁気歪による波の発生及び検出に関する方法は鉄製及び非鉄製のパイプ、チューブ及び円筒状シェル構造体の双方に関連して用いることができる。

30

出願人の同時係属出願特許出願シリアル番号第07/973,152号及び第08/033,256号には、ケーブル及びロープのごとき長い、中実の円柱状構造体に磁気歪的に発生された波、及び、磁気歪的に検出された波を利用する様々な方法が極めて詳細に記載されている。パイプ、チューブ等のごとき中空円筒状構造体は特定の幾何学的特性及び波の伝わり特性を示しており、その特定の幾何学的特性及び波の伝わり特性は、磁気歪非破壊評価に関連された方法及び装置の変更を必要としている。今まで、中空円筒状シェル構造体の磁気歪分析に適切な方法及び装置に対する開発努力はほとんどなされていなかった。

磁気歪効果に関しての背景

磁気歪効果は強磁性材料に特有の特性である。磁気歪効果は磁化のパラツキによってもたらされる物理的寸法変化の現象を言及している。

40

磁気歪センサーへの応用においては、機械波の発生及び検出は、代表的には、パルス状態の電流を、強磁性の材料に隣接した発信（transmitting）コイルに導入することにより達成される。発信コイルの近くに置かれている材料内での磁化の変化により、その材料の長さは、適用されたフィールドに対して平行な方向に局所的に変化される。磁気歪の効果であるこの急激な局部的寸法変化は、材料内を音速度で移送する機械波を発生させる。機械波が、材料の端部からあるいは材料の欠陥部から反射され戻され、多くの点で発信コイルと似ている検出コイルに到達すると、その機械波により、逆の磁気歪効果の結果として検出コイルに磁束変化が生じる。この磁束変化により、機械波の大きさに比例する電圧が検出コイル内に誘導される。

50

NDE 応用例で磁気歪効果を利用する利点には、磁気歪センサーの感受性および耐久性がよいこと、センサー / 材料接触媒質 (couplant) がなくなることと、関係する機械波の範囲が長いこと、実現が容易であること、さらにセンサー及びシステム電子機器の双方の費用が安いことが含まれる。

発明の開示

それ故、本発明の目的は、強磁性の及び非強磁性のパイプ、チューブ及びその他の円筒状シェル構造体を非破壊評価して腐食ピット及びクラックのごとき材料のキズを検出する装置及び方法を提供することである。

本発明の別の目的は、磁気歪効果を利用してクラック及び破壊を進行する機械波を検出して強磁性の及び非強磁性のパイプ、チューブ、その他の円筒状シェル構造体を受動的にモ

10

ニタリングするための装置及び方法を提供することである。
従って、本発明は、磁気歪効果を利用して、強磁性の、及び、非強磁性の円筒状シェル構造に機械波を発生させ、そして、その機械波を検出するための装置及び方法を提供する。円筒状シェル構造の壁にこれら機械波を発生させ、且つ、検出するためのセンサーは概ね 2 つの素子からなっている、即ち、a) 所定の巻き数、長さ、及び直径の電導コイル、および b) DC バイアス磁界を提供するための手段である。バイアス磁界は、電気エネルギーを機械エネルギーへまたはその逆へ変換する効率を高め、また、電気信号と機械波との波長数を同じにするべく適用されている。

本発明の 1 つの適用例としては、図 1 に示されているごとく、検査状態にある筒状構造体をコイルで取り巻き、そして、パルス状態の電流でコイルを付勢させてパイプあるいはチューブの円筒状シェル壁内に (磁気歪効果により) 機械波を誘導し、且つ、伝達することが含まれている。機械波は、パルス状態の電流の期間中の、伝達コイルに隣接した空間内に置かれた強磁性材料内の磁化の変化の結果として生ずる。磁化のこの変化により、強磁性材料内の限定された区域の寸法が変化し、その結果、円筒状壁に沿って両方向に同時に伝波する音響上の、あるいは、超音波の周波数の機械波を発生させる。この機械的波がパイプあるいはチューブの端から、あるいは、波の伝波を妨げまたは反射するひびあるいは他の異常のあるパイプあるいはチューブ内の区域から反射され、戻されると、機械波は検出コイルに戻され、そこで、機械波は磁気歪効果の逆の結果として磁束の変化を発生させる。この変化する磁束により、反射された機械波の大きさに比例する電圧が検出コイルに誘導される。

20

30

本発明において DC バイアス磁界を提供するために、電磁石あるいは永久磁石のいずれを用いてもよい。外側からパイプあるいはチューブを検査するためのセンサーの設置を容易にするため、本発明は、速やかに装着可能であるとともに取り外し可能な外部コイルを利用している。その外部コイルは所定数で所定長さの電気導体でなるリボン式ケーブルからなっており、そのリボン式ケーブルは接続ピンで終わっている。リボン式ケーブルの個々の導体は、接続用ピンが係合される際、リボンが連続した 1 つの導体コイルを形成するように配列されている。この形式のコイルはセンサーコイルとして、また、DC バイアス磁界を提供するコイルとして用いることができる。永久磁石を用いて DC バイアス磁界を提供する際、パイプの周部の回りに配備されるそれぞれの磁気モジュールの列は、図 2 a に示されるようになっていることが好ましい。取扱いを容易にするために、これらの磁気モ

40

ジュールは、それらの磁気出力をオン / オフできるよう設計されている。
本発明の方法には、検出された信号を増幅し、処理し、表示し、且つ、分析して問題となっている欠陥を識別し、区別し、そして、記載することが含まれている。特定のパイプあるいはチューブ構造体での既知の異常及びキズに対して実験的な適用を充分行うことにより、かようなパイプあるいはチューブ内で通常見られる異常、クラック、腐食等の特性を確認するための適切なデータベース及び情報ベースラインが確立される。

本発明の装置及び方法は、また、受動モードで適用されてパイプ、チューブ等におけるクラックの序々なる成長により発せられる機械波をモニターしてもよい。かような受動モードでの適用は、検出された機械波の放出 (emission) についての情報を記録することができ、あるいは、特定のレベルを越える機械波の放出が生じたことに付いてのアラームを伝

50

達することができる長期間モニター手段として作用する。

本発明の装置及び方法を適用することができる構造体の幾何学的形状は概ね限定されないが、本発明の以下の説明は細長い円筒状構造要素の N E D に最も効果的に役立つものである。

【図面の簡単な説明】

図 1 は、チューブ、パイプ、あるいは、他の円筒状シェル構造体内での機械波の検出に、また、活性(active)磁気歪の発生に適した本発明のテスト装置の概略図である。

図 2 a は、円筒状シェル構造体のまわりに円周方向に配備された本発明の D C バイアス磁気モジュールの列の斜視図である。

図 2 b は、円筒状シェル構造体の外面の回りの導電性コイルを確立するためのリボン式ケーブル手段の斜視図である。 10

図 2 c は、円筒状シェル構造体の内面内に導電性コイルを確立するためのボビンに巻かれた手段の斜視図である。

図 3 は、確認可能な欠陥を含む長い溶接されたガスパイプ部分に対して本発明の装置を用いて得られる出力信号の一般的なグラフによる図である。

図 4 は、欠陥を誘導する前の長さ 22 フィートの鋼製の壁付きパイプに対して本発明の装置を用いて得られる出力信号のグラフによる図である。

図 5 は、パイプに中位のレベルの欠陥を導入した後の図 4 と同じパイプ構造体に対して本発明の装置を用いて得られる出力信号のグラフによる図である。

図 6 は、図 4 及び図 5 と同じパイプ構造体を用いているが、高いレベルの欠陥を有しているパイプに対して本発明の装置を用いて得られる出力信号のグラフによる図である。 20

好適実施例の詳細な説明

先ず、図 1 を参照して、本発明の方法をインプリメンテーション（実施）するのに適当なテスト装置の構成を詳細に記載すると、テスト装置は円筒状シェル構造体の外側から円筒状シェル構造体内に機械波を発生させ、且つ、その機械波を検出している。本発明のこの能動的なテスト実施例においては、伝送素子 10 及び検出素子 12 の双方が必要とされている。伝送素子 10 及び検出素子 12 の特定構造について、図 2 b 及び図 2 c を参照して以下により具体的に述べる。

初試験パイプ 14 に対して直接機械的に結合される必要はないけれども、素子 10 及び 12 は強磁性のチューブ、パイプ、あるいは、他の円筒状シェル構造体 14 に隣接して配備されなければならない。伝送及び検出素子 10 及び 12 は強磁性材料から数センチメートル以上の距離のところで作動することができるようになっている。再び注意すべきは、金属製バンドあるいは被覆のごとき強磁性材料を、パイプあるいはチューブ 14 に機械的接触状態に位置決めし、次いで、本発明の素子 10 及び 12 を強磁性材料に隣接して置くことにより、非強磁性パイプ、チューブ等のテストをすることができるということである。機械波がこうして取り付けられた強磁性材料とパイプあるいはチューブ 14 との間を伝播する限り、適切な分析及び評価を実施することができる。 30

評価中のパイプ 14 に隣接して位置決めされた伝送素子 10 は主に伝送コイル 16 とバイアス磁石 18 とで構成されている。パルスあるいはトーンバースト発生器 20 はパワー増幅器 22 を介して伝送コイル 16 に接続されているとともに、評価中の材料 14 内に機械波 15 を生じさせるのに適切な信号を発する。 40

本発明の装置の検出素子 12 は、伝送素子 10 とよく似た形状になっており、また、主に検出コイル 24 とバイアス磁石 26 とで構成されており、検出コイル 24 は評価中のパイプ試片 14 に隣接している。機械波 15 の通過に应答して検出コイル 24 により発生される信号は信号プリアンプ 28 及び A / D コンバータ 29 によって調子が整えられる。次いで、デジタル信号がマイクロプロセッサ 30 に提示され、その信号は、後のレビュー及び分析のために、関連された表示手段 32 に直接表示することができ、あるいは、メモリ 34 に記憶することができる。

円筒状シェルを伝播する機械波はバラツキを示す。即ち、波の異なる周波数成分は異なる速度で伝播する。その結果、周波数成分の幅広い範囲を含む機械式パルスはある時間にわ 50

たって分散する。この分散により、欠陥から反射される信号の検出に干渉する多くの望ま
しからざる信号が作られる。この問題は、信号周波数電流のトーンバースト (tone burst)
で伝送コイル 10 を付勢することにより最小化することができる。加えて、伝送コイル 1
0 により異なる波モードが生成されることを低減させるために、バイアス磁石 18 により
作られる DC バイアス磁界はパイプ 14 の周囲の回りで比較的均一であるべきである。こ
れは、図 2 a に関連して記載するようなバイアス磁気モジュールの配列を用いることによ
りなすことができる。

バイアス磁石 18 及び 26 は、例えば、十分な残留磁化が検査中の材料 14 に残っている
ような場合には、いつも必要というわけではない。このことは、鑄鉄あるいは鋼のパイプ
のごとき高い鉄系パイプ構造体の場合にしばしばいえることである。加えて、図 1 に示さ
れたバイアス磁石 18 及び 26 は概略を表わすことを意図されたものであり、実際は、永
久磁石及び / または電磁石を、種々の形態に構成することにより構造化される。

円筒状シェルの内径部からその円筒状シェルを検査するための構成は、上述した外側から
検査するためのものと非常に似かよっている。この内径部検査の場合、伝送及び検出コ
イルはプラスチックボビンの回りに巻かれており、そのプラスチックボビンの直径は円筒状
シェルの内径よりもわずかに小さくなっている。この場合のバイアス磁石モジュールは円
筒状シェルの内径面の回りに位置決めされている。

材料内で機械波を発生することと検出することを組み合わせたものに適用された本発明の
方法は、テストに基づいて分析を実施することに、概ね、関わっている。好適実施例での
欠陥の検出は、基本的に、パルス - エコー技術に基づいている。パイプあるいは円筒状構
造体 14 の場合の欠陥検出及び分析は、パイプ内の欠陥から反射される機械波 15 を識別
することによりなされる。これらの反射波は、入射する波が欠陥と出会う際の音響 (acous
tic) インピーダンスの変化から生ずるものである。" ピッチキャッチ (pitch-catch) "
あるいは " 透過探傷 " のごときパルス - エコー以外の検査技術は、パイプ状態の非破壊評
価において欠陥の検出にも用いることができる。

機械波 15 の伝送及び検出の双方は、超音波のごとき他の NDE 技術に通常必要とされる
水あるいは油のごとき接触媒質を用いることなく、なされる。センサー 12 は、素子とパ
イプの表面との間の、時として、数センチメートルよりも多いかなりの間隙で作動するこ
とができる。加えて、適切なシステム電子機器を用いた場合、機械波 15 の伝送及び検出双
方を単一の磁気歪素子を用いて行うことが可能である。

伝送磁気歪素子 10 は 2 つの基本となる構成要素からなる、即ち、a) 可変磁界を生成す
るための手段と、b) パイプの壁を静的に磁化するための手段とである。同様に、検出磁
気歪センサー素子 12 は概ね 2 つの基本となる構成要素からなる、即ち、a) 機械波によ
りパイプの壁に生じる磁化の変化を検出するための手段と、b) パイプの壁を静的に磁化
するための手段とである。伝送及び検出素子 10 及び 12 の双方に対して、伝送素子 10
では誘導コイル 16、センサー素子 12 では誘導コイル 24 が用いられていて可変磁界を
生成しているとともに、材料 14 における磁化の変化を検出している。検出素子 12 は、
ある場合、ホール効果プローブのごとき他の形式の磁化感知装置に基づいていてもよい。
パイプの壁 36 を静的に磁化するために、素子 10 では永久磁石 18、素子 12 では永久
磁石 26 が用いられており、また、場合に応じて、伝送コイル 16 あるいは検出コイル 1
8 と直接磁氣的に関連するのに適した形態に物理的に置かれている。物理的には、永久磁
石 18 及び 26 は、磁束を生成し、あるいは、検出するための手段と組み合わされている
か、あるいは、その手段から分離されているかのいずれかであり得る。永久磁石 18 及び
26 の代わりに、電磁石あるいは材料 14 における残留磁化のいずれかを用いることがで
きる。残留磁化は、磁石 (永久磁石、あるいは、電磁石) を用いて材料 14 を磁化し、次
いで、磁石を取り除くことにより、パイプの壁 36 に確立することができる。伝送及び検
出素子とともに磁石 (永久磁石、あるいは、電磁石) を装着する必要がないので、ある場
合には、好ましい方法である。

材料 14 を磁化された状態に保つ理由は 2 つある。即ち、a) 電気エネルギーから機械エ
ネルギーへの、あるいは、その逆への伝送コイル 10 及び検出コイル 12 の変換効率を高

10

20

30

40

50

めることと、b) 磁気歪素子 10 及び 12 の周波数応答性を直線化させることである。材料 14 を除磁する場合、検出された信号の周波数は機械波 15 の周波数の 2 倍となり、あるいは、発生された機械波の周波数は適用された電流の周波数の 2 倍となる。

磁気歪伝送器及び検出器を用いて、3つの異なる波モードをパイプに発生し、且つ、検出することができる。これらの波モードは、一般に、長手方向、捻り、及び、たわみと呼ぶことができる。欠陥の検出及び分析に対して、最も重要な波モードは、長手方向波及び捻り波である。一般に、長手方向波は、円周方向に向けられたクラック、及び、摩耗によりパイプの壁が薄くなるのを検出するために、最も良く、用いられ、一方、捻り波は、長手方向に向けられたクラック、及び、壁が薄くなることを検出するために、最も良く、用いられている。図 1 に記載されたセンサーの形態は長手方向波モードの発生及び検出に、最も良く、合致されている。欠陥のある検出に干渉する他の波モードを同時に発生させることなく、純粋な捻り波モードを発生させることが困難なので、捻り波はあまり利用されない。

10

さて、図 2 a - 図 2 c を参照して、本発明の方法およびシステムのインプリメンテーションに適合したバイアス磁石の形態及び磁気歪センサーコイルの構造的特性について、詳細に説明する。図 2 a はパイプ 14 の外面の回りに円周方向に位置決めされた永久磁石 18 の配列を示している。配列 18 は個々の磁気モジュール 18 a、18 b、... 18 n で構成されており、また、パイプ 14 の外径に従って寸法（長さ）が可変である。磁気モジュール配列 18 は、いくつかのモジュールを、パイプを囲繞している円周方向バンドに組み込むことができるよう構成されている。

20

この円筒状シェルの壁内にバイアス磁界を作り出す方法は、内部及び外部双方のセンサーコイルの形態に関連して用いるのに適している。例えば、「ピグ (pig)」から埋蔵されたパイプラインを検査する場合、円筒状シェル構造体の内面上に直接 DC バイアス磁界を確立することが必要となるが、図 2 a に示された構成は、同様の構造的並びに機能的態様の内部円周方向配列体に挿入するために、寸法が低減され、向きが逆転されていてもよい。パイプラインに沿って横断する「ピグ」を用いて埋蔵されたパイプラインを検査することに本発明を適用するためには、「ピグ」の運動から生ずる DC バイアス磁界の変動を最小にするためバイアス磁石モジュール 18 はワイヤブラシの配列体を備える必要があるかもしれない。かようなワイヤブラシ構造体は磁束の漏れを検査するのに日常的に用いられていて同じ目的を達成している。

30

図 2 b は、センサーが調べられるべきパイプの外面上で用いられようとする際、本発明のインプリメンテーションに適した磁気歪センサーコイルを、詳細に、示している。この磁気歪センサーコイルのための構造形態の目的は、異なる寸法のパイプ直径に対して容易に適應することである。リボン式ケーブルセンサー 40 は一連の電導体 50 a - 50 n で構成されており、一連の電導体 50 a - 50 n は、代表的には、絶縁されているとともに、平坦なリボンの態様をなして共に鋳型されている。導体 50 a - 50 n はコネクター 42 及び 44 の 2 点で終端されており、コネクター 42 及び 44 は通常の態様をなして再び合体している。しかし、導体 50 a - 50 n は、1つの導体経路が複数個の短い個々の導体閉回路を介して作られるようにコネクター 42 及び 44 内の 1つの接続点だけオフセットされている。

40

この構成は、図 1 に関連して上述した形式の包囲コイルとして用いるのに適している端子 46 及び 48 を備えた導体コイルを作り出す。予期される通り、この構造体の多数の標準寸法のリボン式ケーブルコイルを様々な直径のチューブおよびパイプに対して利用することができる。パイプの外径面との直接接触は必要とされないもので、特定の長さのリボン式ケーブルのコイルセンサーは、値の中位の範囲にわたる直径を有しているパイプに関連して用いることができる。長さが増大するこの形式の 3つあるいは 4つのリボン式ケーブルコイルセンサーを、直径が 25 . 4 mm あるいは 50 . 8 mm (1 あるいは 2 インチ) から直径が 304 mm あるいは 406 mm (12 あるいは 16 インチ) 以上のパイプの範囲を網羅するよう利用することができる。いずれの場合でも、図 2 b に示されたセンサー構造体は、さもなくば容認できないパイプの外周囲の回りに閉コイルを確立するための安価な

50

機構を提供する。

理解されるべきは、ある状態では、円筒状シェル構造体は開かれた一端を有していて、かくて、多数のコイル導体構造体のいずれのものへの適用ができるようになっている。しかし、多くの場合、予期されるべきは、円筒状シェル構造体あるいはパイプが閉コイルの導体を取り付ける能力を制限する極めて長い寸法を有していることである。図 2 b に開示された構造体はこの問題を解決するよう意図されている。

図 2 c は、パイプあるいは円筒状シェル構造体の内部に挿入されるよう、また、パイプの内面に隣接して位置決めされるよう設計されたコイル導体構造体を開示している。ボビン 5 2 は、調査状態にあるパイプの内径に近い、しかし、それよりも小さい直径を有するように寸法決めされている。図 2 b に示されたコイル導体構造体と違って、パイプの内部で磁気歪コイルセンサーを用いることにより、検査のためのパイプの終端へ直接アクセスすることが必要とされる。それ故、図 2 c に示されたボビン 5 2 の目的は、實際上パイプ 1 4 の内面近くに複数個の電導コイル 5 0 a - 5 0 n を位置決めすることと、パイプ 1 4 内への及びパイプ 1 4 からのボビンコイル 5 2 の簡単な運動を許すことである。図 2 b に示されたコイル構造体と同様に、図 2 c のコイルは導体 5 4 及び 5 6 で終端している。コイルの外側にあるパイプの壁に対するコイルの電磁的結合を助長するために、好ましくは、ボビン 5 2 は積層鋼あるいはフェライトで作られている。次いで、ボビン 5 2 及びパイプの壁は小さな磁気回路を構成し、この磁気回路はボビン 5 2 あるいはパイプの壁 1 4 のいずれかにおける磁化の変化に関連させ、コイルが可変磁界をパイプ 1 4 に適用するか、あるいは、パイプ壁 1 4 の磁化変化を検出するかのいずれかを許す。

さて、図 3 - 図 6 を参照して、本発明の方法及び装置を使用することにより代表的に得られるデータの形式について詳細に記載する。図の各々は、本発明の方法及びシステムを利用して得られた信号のグラフ的なプロットであり、検出された磁気歪センサー信号のボルトでの振幅は垂直、即ち、「y」軸線にプロットされ、ミリ秒での時間値は水平、即ち、「x」軸線にプロットされている。

最初に、図 3 を参照して本発明の代表的な信号成分を一般的に記す。図 3 において、信号 1 0 0 は 6 つの異なる成分からなっており、この 6 つの異なる成分は、機械波の円筒状シェル構造体内の通路内での出来事(events)として識別することができる。図 3 に示された信号（及び図 4 - 図 6 に示された信号）は図 1 に関して開示されたものとほとんど同じように構成されたシステムで得られたものであり、機械波を発生させるためのコイルと機械波を検出するためのコイルとの間には距離がある。かくて、図 3 に示されているごとく、最初のパルス 1 0 2 には第 2 の通過信号 1 0 4 が直ちに追従し、その第 2 の通過信号 1 0 4 の、最初のパルス 1 0 2 からの分離は発生及び検出コイルの位置を示している。同様の一对の欠陥信号 1 0 6 がその後につき、それらの双方は同じ欠陥を示している。第 1 の欠陥信号は、欠陥から反射される波がその戻りトリップ時に収容コイルを通過する際に作られる。第 2 の欠陥信号は、パイプのセンサー端部からの反射後、送出トリップ時、収容コイルを 2 回目に波が通過する際、作られる。最後に、場合次第で、端部反射信号あるいはガース(girth)溶接信号 1 0 8 はパイプに対する調査の望ましい窓の端を示している。ここでも、2 つの端部反射信号が存在している。何故なら、同じ波が 2 回検出されているからであり、一回目は戻りトリップ時であり、2 回目はパイプのセンサー端部から反射後の送出トリップ時である。

図 4 - 図 6 は、特定実験データを表示しているが、センサーが置かれているために、図 4 - 図 6 に組み合わせられている信号構成要素 1 0 2 及び 1 0 4 を除いて、図 3 に概ね記載されている上述した信号構成要素の各々を一般に示している。従って、図 4 に示された最初のパルス 1 0 2 は図 3 の分離成分 1 0 4 として示されている端部反射信号構成要素を含んでいる。

図 4 - 図 6 に示されているグラフ表示は、ここに記載された磁気歪センサー技術を用いて 6 - 5 / 8 インチの外径(OD)の鋼パイプ腐食形欠陥の検出可能性を示す実験データに基づいている。利用されたパイプは、長さ 22 フィートで、壁厚 0.188 インチであった。伝送磁気歪センサーを、パイプの一端から約 2 インチのところに置き、100 kHz

10

20

30

40

50

のトーンバーストで励起した。検出磁気歪センサーを伝送センサーから約43インチのところに置いた。

パイプの欠陥を誘導する前に得られたデータは図4にグラフで示されている。ここで再び、最初のパルス102及び2つの端部反射信号108が示されている。上述した通り、最初のパルス102は、パイプの遠い方の端部に向かってトリップ中に波が検出センサーを通過する際適用されるトーンバースト及び検出された信号を含んでいる。端部反射信号108の最初のもは、パイプの遠い方の端部からの反射後、入射波の戻りトリップ時に検出されるものである。端部反射信号108の第2のもは、パイプのセンサー端部からの反射後、戻り波が別の巡回トリップをなす際検出されるものである。かくて、2つの信号は、検出センサーからパイプのセンサー端部までの巡回トリップ時間により分離されている(この場合、約0.45ミリ秒)。 10

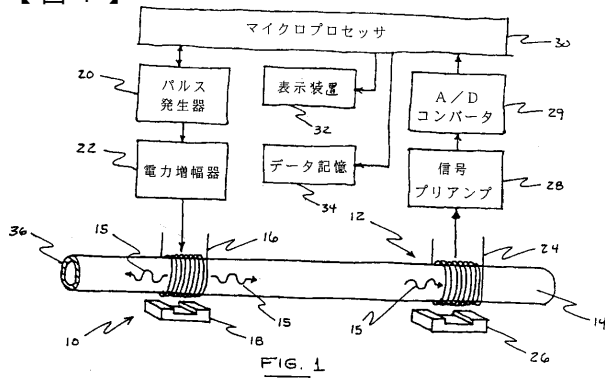
図5及び図6は、直径0.5インチの穴が、パイプのセンサー端部から約148インチ(あるいは、検出センサーから103インチ)の点でパイプの外径上に生じせしめられた後に取り込まれた信号データを示している。穴の深さは、図5に示されたデータの場合、約0.058インチであり、図6に示されたデータの場合、0.092インチであった。生じせしめられた欠陥は2つの欠陥信号106の形をした容易に認められる信号を作り出す。何故なら、波は、先にも述べた通り、2回検出されるからである。図5及び図6間に開示された欠陥信号106の振幅の差からも明らかな通り、欠陥信号の振幅は穴の深さの増大とともに増大する。実験的に証明されたことだが、断面がパイプの全断面の0.25%と小さい穴は、本発明の機器及びシステムを用いて検出することができる。 20

図4 - 図6で得られた信号は、図1に示されたものと同じ態様で外部に置かれたコイルを用いてなされたものであった。同様の信号特性は、内側に置かれたコイル及びDCバイアス磁石形態の様々な構成の双方を用いていることから、明らかである。

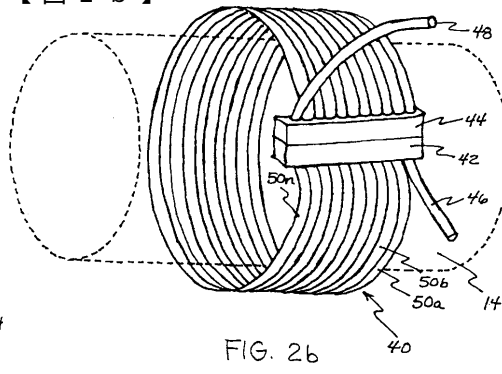
また、注意すべきは、検出素子における誘導コイルが、機械波の磁気歪検出に干渉するはぐれた電磁波を拾い上げることができる。この電磁干渉(EMI)を低減させるために、本発明では2つの解決策を用いている。第1のものは、パイプの壁に発生される機械波の半波長により分離される検出素子に2つの誘導コイルを用いることである。次いで、これら2つのコイルからの出力は、入力のうち一方を反転させるとともに2つの入力信号を加える差分信号アンプに入力される。次いで、EMI信号は互いに打ち消し合おうとし、一方、機械波による信号は互いに加えられる。この結果、検出された機械波信号のS/N比がかなり改良される。別のフィルタリング解決策を、信号平均化法により用いることができる。EMI信号は伝送コイルの付勢のタイミングと同期していないので、平均法もS/N比をかなり高める。 30

本発明の好適実施例の多数の応用例を確認してきたけれども、予期される通り、当業者は、本発明に関連した手順に一致したやり方で上記したこれらの方法の各々及び各装置の更に別の適用例を確認するであろう。予期される通り、細長い円筒状材料の遠隔非破壊評価が必要とされ、また、強磁性物質が存在するか、あるいは、少しだけ、あるいは、逆効果を伴うことなく導入され得るいかなる環境にも本発明は応用例を有する。

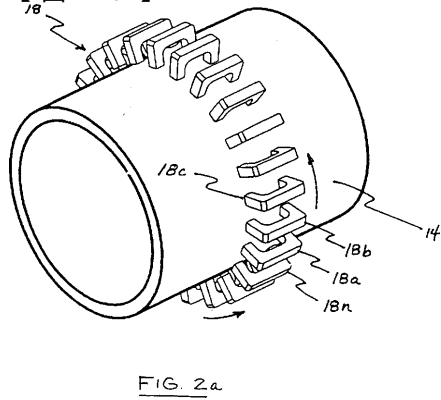
【図 1】



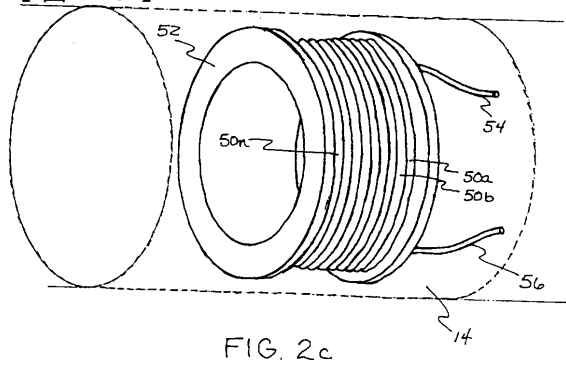
【図 2 b】



【図 2 a】



【図 2 c】



【図 3】

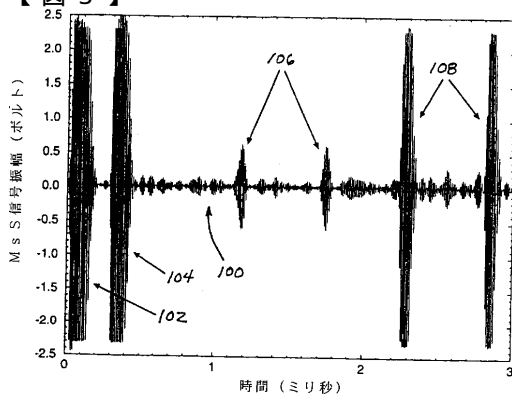


FIG. 3

【図 4】

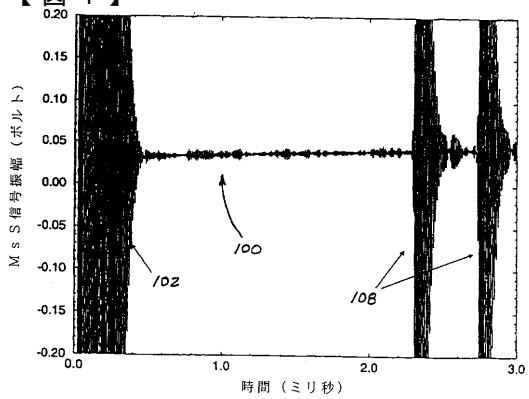


FIG. 4

【図 5】

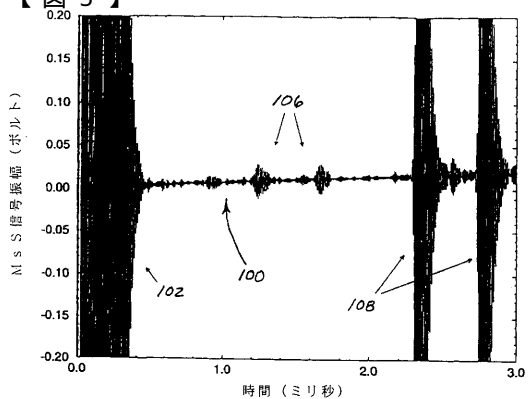


FIG. 5

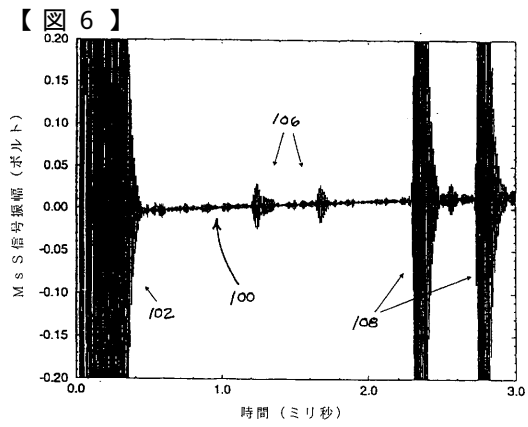


FIG. 6

フロントページの続き

(72)発明者 クウン、ヘゲオン

アメリカ合衆国 7 8 2 4 5 テキサス州サン アントニオ, フロスト ファイアー 1 0 3 0

(72)発明者 テラー, セシル エム., ザ セカンド

アメリカ合衆国 7 8 7 3 4 テキサス州オースチン, レイクウェイ ブルバード 2 2 0 1, ナンバー 3 4

審査官 横井 亜矢子

(56)参考文献 特開平 0 5 - 0 2 3 3 1 6 (J P , A)

特開平 0 2 - 0 6 5 8 4 4 (J P , A)

特開昭 5 5 - 1 0 9 9 6 0 (J P , A)

特開昭 6 3 - 1 7 3 9 5 7 (J P , A)

特開昭 5 6 - 0 5 5 8 5 1 (J P , A)

実開平 0 6 - 0 5 6 7 6 8 (J P , U)

米国特許第 0 4 3 0 7 6 1 6 (U S , A)

米国特許第 0 4 2 8 9 0 3 0 (U S , A)

英国特許出願公開第 0 2 2 0 2 6 3 0 (G B , A)

特開昭 5 5 - 0 2 3 4 2 3 (J P , A)

特開平 0 6 - 1 0 9 7 0 8 (J P , A)

特開平 0 5 - 2 7 3 1 8 1 (J P , A)

特開昭 5 7 - 0 3 5 7 4 4 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B 名)

G01N 29/00 - 29/28

G01N 27/72 - 27/90