

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420021

研究課題名(和文) 配管減肉での超音波ガイド波の伝搬挙動解明と減肉形状推定法の提案

研究課題名(英文) Understanding of propagation phenomena of guided waves at various defects and estimation of defect shapes

研究代表者

西野 秀郎 (Nishino, Hideo)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：50316890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超音波ガイド波の減肉部での波動伝搬現象の観察とモデル計算による現象解明を通じ、検出信号から減肉形状を推定する新たな逆問題方法の提案を行う。具体的には4つ実施した。(1)軸対称減肉におけるガイド波の反射数学モデルの妥当性検証と検出信号からの欠陥サイズの同定。(2)非軸対称減において発生する円周SH板波の挙動検証と実計測への応用。(3)センサ下部不感帯の解消を目的とした計測法の提案。(4)検出重要部であるエルボ部における効果的な方法の提案。

研究成果の概要(英文)：In this paper, novel approaches for estimating the defect shapes in piping using the defect signals of the guided waves were presented. To accomplish the aim of the research, minute observations of the propagation phenomena of the guided waves were carried out. The four approaches were as follows: (1) validation of the mathematical model of reflection at axisymmetric defects and novel method for estimation the defect shape, (2) verification of resonant phenomena of circumferential SH wave at non-axisymmetric defect and its application, (3) new method for narrowing the dead zone in the guided-wave-sensor, (4) suggestion for the efficient defect detection at an elbow part.

研究分野：超音波計測

キーワード：非破壊検査 超音波 計測

1. 研究開始当初の背景

化学・発電プラントや製鉄所等において、ガスや液体物の輸送には、莫大な数の配管が利用されている。これらを安心安全に維持し、製造物を安定供給するには、配管の減肉や劣化の早期発見が必須である。さらに作業員の負傷や死亡に至る配管破断事故等の未然防止は、社会的要請でもある。配管の欠陥検出には、超音波や X 線による方法が有用だが、一度の検査範囲が狭く(超音波で一カ所あたり数 cm² の範囲)非効率な点が問題である。例えば原発 1 基で配管総延長 120 km(経済産業省調べ)と言われる配管の全数検査は、事実上不可能である。本件の超音波ガイド波(以下、ガイド波)は、配管の長手方向に長距離伝搬する超音波で、一度の送受信で広い範囲の欠陥検出を効率的に実施できる。広域検査性の高さから、管軸位置の同定法が規格化(日本非破壊検査協会規格 NDIS2427)され、実検査に利用されているほどのポテンシャルを有している。一方でガイド波は、(1)欠陥サインングなどの定量性に乏しい、(2)エルボ部等では、伝搬挙動が複雑でそれらの解明と複雑部での効果的な欠陥検出方法の提案が求まられている。上記の改善が本研究でのテーマである。

既往の研究では、欠陥形状やガイド波周波数が異なると反射率が異なることは知られているが、減肉形状と反射率の関係は学術的に不明である。これらの関係が解明できれば検出信号から欠陥形状の推定が可能となる。本研究では、軸対称欠陥と、非軸対称欠陥でのガイド波での挙動を観察、得られた情報を考察することで定量計測法を提案することを目的としている。

加えて重要なのは減肉が多く発生するエルボ部等複雑部での検出の効率化である。本研究では、エルボを伝搬するガイド波のエネルギー密度の偏在度合いをシミュレーションで確認することで、高感度な欠陥検出方法を提示できた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超音波ガイド波を用いたプラント配管の非破壊検査方法の高度化である。超音波ガイド波は、配管の長手方向に長距離伝搬する超音波で、効率的な配管検査が可能である。しかし伝搬挙動の複雑さから、現在は減肉の管軸位置の同定に留まっている。

本研究では、超音波ガイド波の減肉部での波動伝搬現象の観察とモデル計算による現象解明を通じ、検出信号から減肉形状を推定する新たな逆問題方法の提案を行う。加えて、最も腐食や減肉の多い箇所である配管エルボ部での効率的な欠陥検出方法の提案を行う。具体的には以下 3 点である。

(1) 軸対称な欠陥に対して、その反射率の数学モデルを示し、周波数別に欠陥反射率が異なることを示す。同じ欠陥でも周波数によ

って反射率が異なることから、多周波の反射率から逆に欠陥形状を推定する方法を示し、実験的に検証した。

(2) 非軸対称欠陥では、軸方向伝搬ガイド波である T(0,1)モードが、円周 SH 板波にモード変化する。これが特定の周波数において周方向に定在波を発生させることで共鳴が観察される。この現象の理論的な予測をし、この現象から欠陥の重要な情報を得る方法を示す。より危険度の高い偏在減肉の検知法等を示した。

(3) ガイド波で欠陥の定量を行う際には、センサを固定し、減肉前後の差分計測をすることが有効である。一方でセンサ設置部は計測の不感帯となるため、別の手法で検査する必要があった。これを解消するため、ガイド波センサ直下に発生する円周 Lamb 波の共鳴を利用する方法を提案する。共鳴周波数は肉厚により変化するため、共鳴周波数の測定により肉厚を推定する方法を示した。

(4) 配管減肉が最も多く発生する部位は、エルボ部である。一方でガイド波のエルボ部伝搬では、波動エネルギー密度が場所により異なり、その程度は周波数により異なる。エネルギー密度が高い領域に存在する欠陥ではその感度が高いことを示し、高感度なエルボ部での欠陥検出方法を示した。

3. 研究の方法

(1) 軸対称欠陥の反射率と欠陥形状の推定
ガイド波の欠陥での反射係数は、これまで一般に特性音響インピーダンスによって記述されることが示されて来ている。本研究では、軸方向に分布を有する場合に拡張したモデルに対して、軸対称でテーパ状の欠陥に対して実験的に検証し、モデルの妥当性を検証した。さらに配管内部に軸対称の欠陥を作製し、その軸方向幅 w と深さ d を代表値として推定する方法として前記モデルを利用する方法を提案し検証した。結果として、多周波を用いることで減肉の軸方向幅と深さの推定が可能であることを示した。

(2) 非軸対称減肉での挙動と評価

非軸対称減肉でのガイド波の挙動は、複雑で解明すべき点が多い。本研究では、非軸対称減肉において発生する円周 SH 板波の共鳴現象に着目し、より多くの欠陥の情報を修得することを目的に、その伝搬挙動の観察を行った。そもそもこの伝搬挙動が円周 SH 板波に起因することを理論的に示した。また本現象が、非軸対称欠陥の存在エビデンスとなることを示した。

(3) センサ下部不感帯領域での減肉評価
ガイド波用の圧電式リング型センサでは、複数のセンサが周方向に等間隔に設置されており、周方向に振動変位を与えることで軸方向伝搬ガイド波である T(0,1)mode を励起している。この周方向の振動変位は、同時に円周方向伝搬の Lamb 波(円周 Lamb 波)を励起する。この円周 Lamb 波は特定の周波数で共

鳴し検出される。通常は検査に不要な信号として排除される物であるが、これを検知することでセンサ直下の肉厚検査が可能であり、これを検証した。不感帯領域の狭域化に寄与できる。

(4) 配管エルボ部での欠陥の高感度検出

発電設備における配管で最も減肉が発生する部位はエルボである。ガイド波の伝搬挙動は複雑で、その検出感度の把握とそれに基づいた合理的な検出方法が求められている。ここでは、エルボ部位別に検出感度が異なることを実験的に示し、その理由を数値シミュレーションによって解明した。その結果から、最適な減肉検査手法の提案を行った。直管部と同等以上の検出感度でエルボ部の検査が可能であることを示す。

4. 研究成果

(1) 軸対称欠陥の反射率と欠陥形状の推定

ここでの目的は、軸対称な欠陥を対象にして、欠陥形状と反射係数の関係を数学モデルの検証を通じて明らかにすることと、その数学モデルを用いて欠陥形状の推定を行うことである。

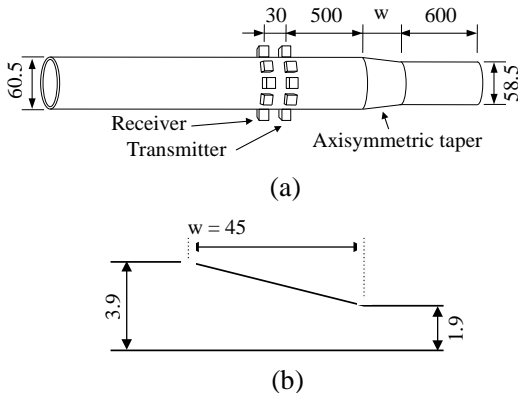


図1 実験配置図(a)とテーパプロフィール(b)

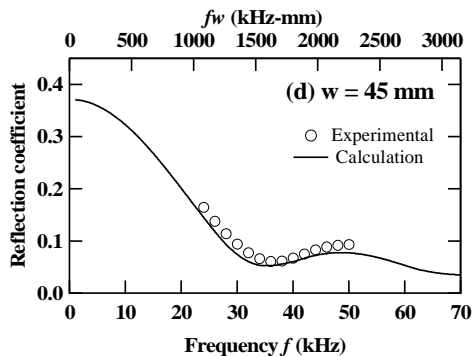


図2 周波数によるテーパ減肉の反射率 実験とモデル計算

数学モデルの詳細は公表雑誌論文[1]に示した。ここでは、欠陥反射率の実験値と計算値の比較結果を示す。図1に実験配置図と欠陥形状の一例を示す。図に示す様に、軸対称でテーパ状の減肉形状である。Transmitterから励起された $T(0,1)$ modeガイド波が

ド波が減肉部で反射し、Receiverにて受信される。図2に周波数別の減肉反射率として実験値と計算値を示した。両者が非常に良く一致していることが確認できた。これにより軸対称であれば減肉形状から検出信号が計算により推定できることを示せた。

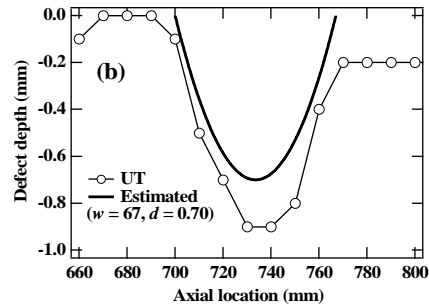


図3 従来 UT とガイド波による減肉定量結果

一方、実応用のためには得られた信号から減肉形状を推定することが必要である。本研究では、減肉形状を円弧状であると仮定し、管軸方向長さ L と肉厚方向深さ D の2つのパラメータで減肉の概略を推定する方法を提案した。この方法では、想定される L と D の全組合せに関する周波数別のモデル計算値を実験値と比較し最も近い反射率が得られた L と D を欠陥概略サイズとするものである。図3に UT 計測の結果と本方法による減肉サイズを示す。両者がよく一致していることがわかる。本手法を用いることでガイド波による減肉の定量化の可能性を示すことが出来た。

(2) 非軸対称減肉での挙動と評価

非軸対称の減肉においては、反射や波動の回り込み・回折等が3次元的に発生し、挙動が複雑になる。既往の研究において、軸方向伝搬の $T(0,1)$ modeガイド波が、周方向に横波音速程度で伝搬する波束が発生する興味深い現象が報告されていた。この波動は、円周ガイド波と推定され、円周 SH 板波もしくは円周 Lamb 波のいずれかであると筆者は考えた。この円周ガイド波は、特定の周波数において円周方向において定在波を発生させ、共鳴することをシミュレーションで明らか

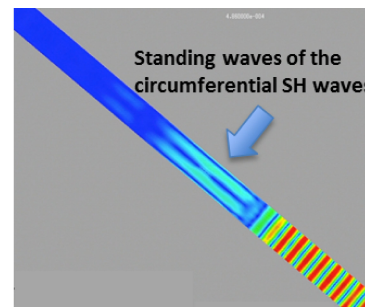


図4 共鳴を示すシミュレーション画像

にした。図4に共鳴を示すシミュレーション画像を示す。矢印で示された管軸に閉口な縦

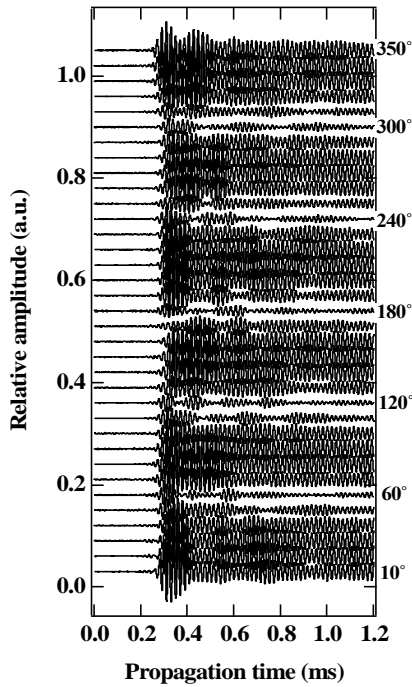


図5 欠陥部位の円周方向位置の軸方向変動 60°毎に振動のない節が確認でき定在波と推定される。

筋が定在波を示している。図5には 53 kHz で共鳴発生時の軸方向振動変位を円周位置別に示した RF 時間波形であり、実験的にも共鳴が確認された。共鳴周波数は上記の円周 SH 板波もしくは円周 Lamb 波により異なる。理論的に求めた共鳴周波数を表1に示した。

表1 共鳴の理論計算値

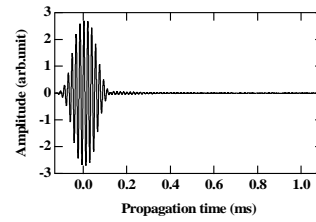
Angular wave number	C-Lamb wave		C-SH wave
	CL ₁ mode	CL ₂ mode	CSH _n mode
2	3.2	68.2	35.1
3	9.1	96.2	52.7
4	16.9	-	70.3

実験とシミュレーションから求めた共鳴周波数との比較より、発生する円周ガイド波は、円周 SH 板波であることが示された。既往の研究において実験的に得られた共鳴周波数が示されており、その値と筆者らの理論値が良く一致していることを確認している。

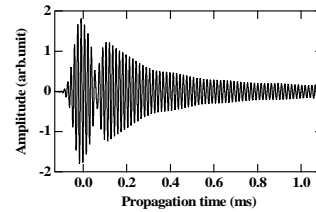
この共鳴周波数を用いることで、局在した減肉であることを認知できることを示している。一般に同じ断面欠損率であれば偏在している減肉では最少肉厚が少なく破断の恐れが大きい。本手法により効率的に検知が可能であることを示した。

(3) センサ下部不感帯領域での減肉評価

圧電式リング型センサ下部で、特定周波数において円周 Lamb 波が共鳴する現象を用いて肉厚を測定する方法を提案検証した。図6に欠陥無し配管において圧電式リング型センサを駆動した時に得られる 55 kHz と 65 kHz の波形を示した。65 kHz で見られる減衰



(a)



(b)

図6 センサ下にて円周 Lamb 波の共鳴が無い場合 55 kHz (a)と有る場合 65 kHz (b)

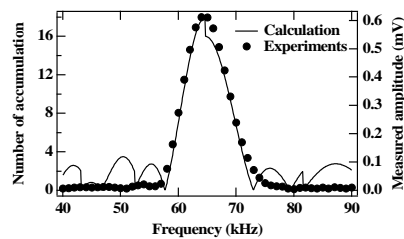


図7 円周 Lamb 波の共鳴特性

波形が円周 Lamb 波による共鳴信号である。図7に共鳴特性を示す。●が実験値を示し、実線は計算値である。共鳴周波数を測定することで、50A 配管において最大 1.5%の誤差で測定できることを示している。本手法によれば、通常のガイド波計測における不感帯領域を狭域化できる。

(4) 配管エルボ部での欠陥の高感度検出

50A-sche40 配管のエルボ部 1 2 箇所人工減肉を導入し、得られた検出感度を直管での検出感度で正規化した結果を図8に示す。

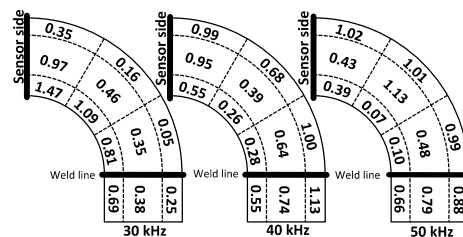


図8 エルボ部に導入した人工欠陥の検出感度直管での感度で正規化

周波数は 30, 40, 50 kHz の3通りである。30 kHz ではエルボ腹側部で、50 kHz ではエルボ背側部で感度が高いことが分かった。適切な周波数を用いることで、高感度で減肉検出が可能であることを示した。図9には、数値シミュレーションで得られたエルボ部を伝搬するガイド波のエネルギー密度を示す。白いほ

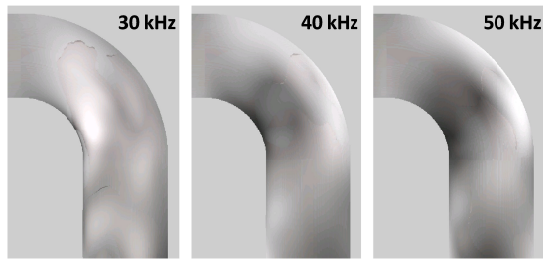


図9 周波数別の波動エネルギー密度
明るいほど高密度を示す。

ど密度が高いことを示す。エネルギー密度が高い領域と検出感度の高い領域が一致していることが確認できた。この事実は、波動エネルギー密度が高い領域に減肉があれば、反射するエネルギーも必然的に多く、減肉反射率が向上したと解釈できる。実応用においては、事前に数値シミュレーションによる周波数別の分布を計算しておくことで、適切な計測が出来ることを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) Hideo Nishino, Kodai Iwata, and Masashi Ishikawa, Wall thickness measurement using resonant phenomena of circumferential guided waves generated by plural transducer elements located evenly on girth, Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) in press.
- (2) Toshihiro Yamamoto, Takashi Furukawa and Hideo Nishino, Frequency dependence of the defect sensitivity of guided wave testing for efficient defect detection at pipe elbows, Materials Transactions 57, pp.397-403, 2016. DOI:10.2320/matertrans.M2015319
- (3) Hideo Nishino, An Investigation of reflection coefficients of the T(0,1) mode guided waves at axisymmetric defects and Inverse problem analyses for estimations of defect shapes, Materials Transactions 56, pp.120-128, 2015. DOI:10.2320/matertrans.M2014331

〔学会発表〕(計7件)

- (1) 石井 誠吾, 西野 秀郎, 古川 隆, 山本 敏弘, T(0,1) モードガイド波の軸方向欠陥における反射挙動, 日本機械学会 2015 年年次大会講演概要集, J0420202 頁, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学, 北海道札幌市
- (2) Yamamoto Toshihiro, Furukawa Takashi and Hideo Nishino, Influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at an elbow part, Proceedings of 11th International Conference on

Nondestructive Evaluation, 9th May 2015. (Jeju, Korea)

- (3) 岩田 昂大, 森田 圭一, 西野 秀郎, ガイド波用圧電式トランスデューサで励起される円周 Lamb 波の共鳴を利用した肉厚測定法, 第 22 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 65~68 頁, 2015 年 1 月 29 日, 非破壊検査協会亀戸センター, 東京都江東区
- (4) 石井 誠吾, 西野 秀郎, 山本 敏弘, 古川 敬, 軸方向欠陥における T(0,1) mode ガイド波の反射挙動, 第 22 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 73~76 頁, 2015 年 1 月 29 日, 非破壊検査協会亀戸センター, 東京都江東区
- (5) Hideo Nishino, Saygo Ishii and Takashi Furukawa, Resonance of the circumferential shear horizontal wave converted from the T(0,1) mode guided wave at an axial notch, 超音波エレクトロニクスシンポジウム講演論文集, pp.187--188, 3rd Dec. 2014, 明治大学, 東京都中央区
- (6) 岩田 昂大, 森田 圭一, 西野 秀郎, 円周方向に等間隔に設置された圧電式トランスデューサで励起される円周 Lamb 波の共鳴を利用した肉厚測定法, 日本機械学会 2014 年年次大会講演論文集, J0420201 頁, 2014 年 9 月 8 日, 東京電機大学, 東京都足立区
- (7) Hideo Nishino, Saygo Ishii and Takashi Furukawa, Resonant phenomena of circumferential SH waves converted from T(0,1) mode guided waves at non-axisymmetric defects, E-book of Abstracts, Review of Progress on Quantitative nondestructive Evaluations, p.168, 20th Jul. 2014. (Boise MD, USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野 秀郎 (Nishino Hideo)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授

研究者番号：50316890