

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18920

研究課題名（和文）非接触計測による周方向ガイド波共振を利用した配管の高効率非破壊評価

研究課題名（英文）Efficient nondestructive evaluation for a pipe using circumferential guided wave resonance with non-contact measurements

研究代表者

林 高弘（Hayashi, Takahiro）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30324479

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：円筒の周方向を伝搬する弾性波の共振を利用することで、円筒の裏側にある減肉の検出を目的として本研究を開始した。円筒試験体に、変調をかけたレーザー光を照射して、その周波数に対応する弾性波を励振させ、円周方向に伝搬するガイド波の明瞭な共振を計測した。この共振パターンは裏に減肉がある箇所において途切れるという実験結果を得た。このことは、このガイド波の周方向共振の計測がパイプの裏側の減肉の検出への適用可能性を示している。

また、この周方向の共振ガイド波を、分散曲線による理論検討と数値計算および実験により詳細に解析し、円筒溝部で弾性波が把捉されることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

円筒の周方向にガイド波が共振することを見出し、円筒（配管）裏面の減肉検査に利用できることを示した。さらに、円筒に溝部が存在する場合には、その円周ガイド波のエネルギーが溝部に把捉されるという新現象を、理論解析および数値計算、非接触計測による実験により詳細に示し、高感度センサなど配管検査以外の広い用途があることを実証した。

研究成果の概要（英文）：This study starts for the purpose of detecting the wall thinning on the back side of a pipe using the elastic waves propagating in the circumferential direction of the pipe. Laser beam modulated and irradiated to the pipe specimens excited the elastic wave at the modulation frequency. Moreover, distinct resonance of the circumferential guided wave was measured, and the resonant patterns were broken at the defective area of a pipe, which shows the applicability of the circumferential guided wave to the detection of wall thinning.

Moreover, analyzing the resonant circumference guided wave with theoretical dispersion curves, calculation, and experiments proved that elastic wave is trapped at the groove of a pipe.

研究分野：非破壊材料評価

キーワード：弾性波 ガイド波 非接触計測 レーザ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

発電プラントや石油化学プラントなどには無数の配管があり、老朽化が進むにつれて維持管理が難しくなっている。申請者は、薄板構造に沿って伝搬する弾性波(ガイド波、図1)を用いた非破壊評価手法について研究してきた。その中で、レーザ照射によって薄板状材料中に発生させたガイド波の伝搬特性を利用した損傷画像化手法(E-Camera¹⁾)を開発し、枝分かれ管のような複雑な形状の薄板状材料であっても、損傷画像が得られることを示した(図1)。このE-Cameraでは、ガイド波の励振にファイバレーザを用い、外部から変調信号を与えてレーザ出力に変調をかけることで、周波数制御された狭帯域波の励振を可能にした。これにより、レーザの最大パルス出力を低減して対象物表面に傷をつけるリスクを抑えながら周波数領域における信号レベルの向上を実現した。また、発生させるガイド波の周波数を制御できるので、異なる周波数による画像の取得やチャープ波利用による損傷画像の鮮明化を可能としている。

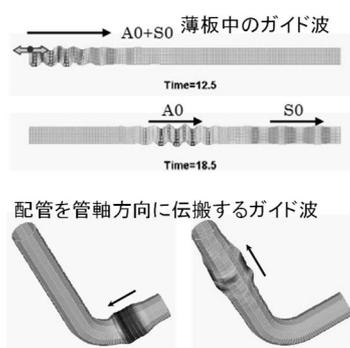


図1 ガイド波の例
薄板状材料の長手方向に沿って伝搬する波動モードの総称。

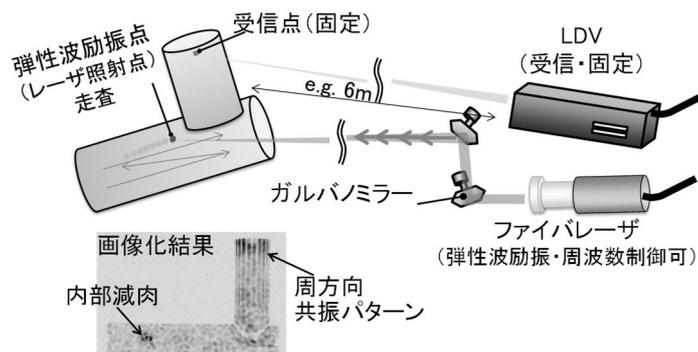


図2 申請者が開発したE-Cameraの概要図
レーザを照射できる対向面直下の損傷を画像化できる。
この研究中に計測された周方向ガイド波の共振を
本提案課題に用いる。

2. 研究の目的

このE-Cameraでは、ガイド波の検出にレーザドップラー振動計(LDV)を利用することで、遠隔(例えば6mとか10mなど)からの計測が可能である。しかし画像化できる面は、レーザを照射できる裸管の対向面のみであり、保温材で覆われている場合や配管の反対側の評価を行うことはできない。そこで、本研究では円周方向に周回して伝搬するガイド波(以下、周方向ガイド波)を利用して、保温材で覆われた配管や反対面の損傷検出を行う。

3. 研究の方法

本研究では当初、上述の目的に沿って、以下に示す(1)の研究方法によりパイプ裏面の欠陥検出に関する研究成果を出しており、その後、周方向ガイド波の共振現象を詳細に解析し、センサへの適用に関する研究を(2)の方法により行った。

(1) 周方向ガイド波を利用した円管裏面の欠陥検出:

図3は、本研究で用いた実験装置の概要図である。ファイバレーザ装置より、出力されるレーザ光は外部信号によって振幅変調されており、その変調周波数に対応する周波数の弾性波が試験体となる円管に発生させることができる。円管中に発生した超音波振動は、ある別の表面地点の固定点でレーザドップラー振動計を用いて非接触で計測した。

さらに、弾性波励振用のレーザ光を走査しながら振動を計測することで、様々なレーザ照射点に対する振動エネルギー分布を取得できるようにし、共振周波数に対する円管の共振パターンを取得した。

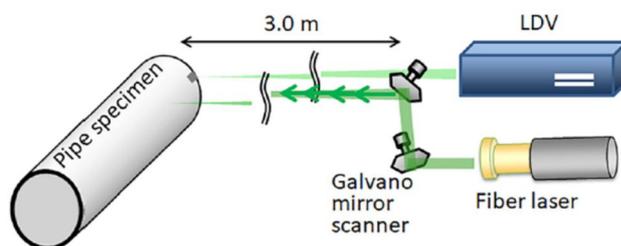


図3 実験の概要図^{1),2)}

(2) 円管溝部における周方向ガイド波のエネルギートラップ現象の解明:

円管を伝搬するガイド波の理論分散曲線を算出し、それに基づき周方向ガイド波の共振現象を解析した。その結果、円管周方向に作成した溝部において周方向ガイド波のエネルギーがトラップされることが示された。そこで、(1)円管裏面の欠陥検出とは別に、この現象を利用した高感度センサへの応用展開を検討した。

4. 研究成果

(1) 周方向ガイド波を利用した円管裏面の欠陥検出:

図4は、図3のような実験システムで円周ガイド波を計測した際の周波数スペクトルである。レーザ変調の周波数を変化させた場合に計測された波形の周波数スペクトルピーク値を、変調周波数を変化させながら計測した結果である。(a)がレーザ照射点から円周方向の位置にサポートがない場合であり、サポート位置に腹が現れるような共振モード(この場合偶数次のモード)も現れている。一方、(b)はレーザ照射点から円周方向の位置にサポートがある場合であり、サポート位置に腹が現れるような共振モード(偶数次モード)の振幅が低下していることが分かる。すなわち、円周ガイド波の共振周波数は周方向の異物の影響を大きく受け、振動状態が変化することが分かる。

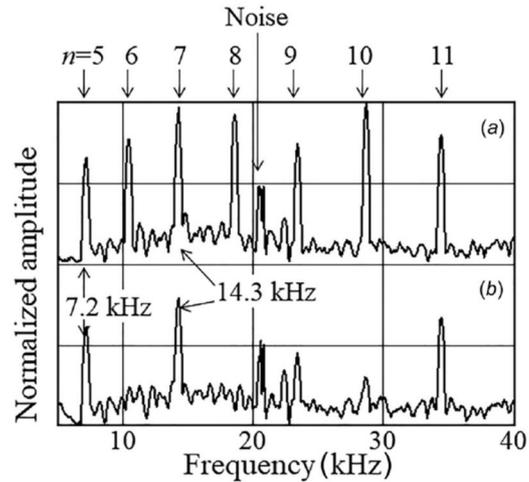


図4 円周ガイド波の共振周波数

(a)レーザ照射点から周方向にサポートがない場合、(b)サポートがある場合

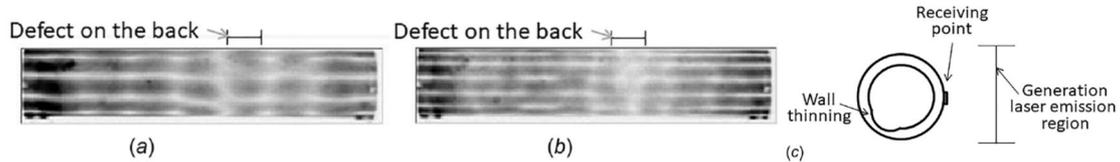


図5 振幅分布図

(a) 7.2 kHz, (b) 14.3 kHz, (c) 円筒断面とレーザ照射領域

(2) 円管溝部における周方向ガイド波のエネルギートラップ現象の解明:

円周ガイド波の共振周波数はガイド波の理論分散曲線より予測が可能であり、上述の実験における共振周波数も理論分散曲線から予測された周波数に非常によく一致していた。さらに、理論分散曲線からは、円筒周方向に厚みの薄い溝部があると、溝部においてのみ周方向にガイド波が伝搬して共振し、溝部以外にはエネルギーが漏洩しないような周波数が存在することが示された。図6は、半解析的有限要素法³⁾により、溝部が局部的に共振するモードの周波数と振動分布を表した計算結果である。色は、面外方向変位を示しており、それぞれ溝部において共振していることが分かる。図中の n は円周方向次数を表し、共振状態における周方向の節・腹の数を示す。この周方向分布次数は、理論分散曲線から予測され、半解析的有限要素法による計算結果と一致している。

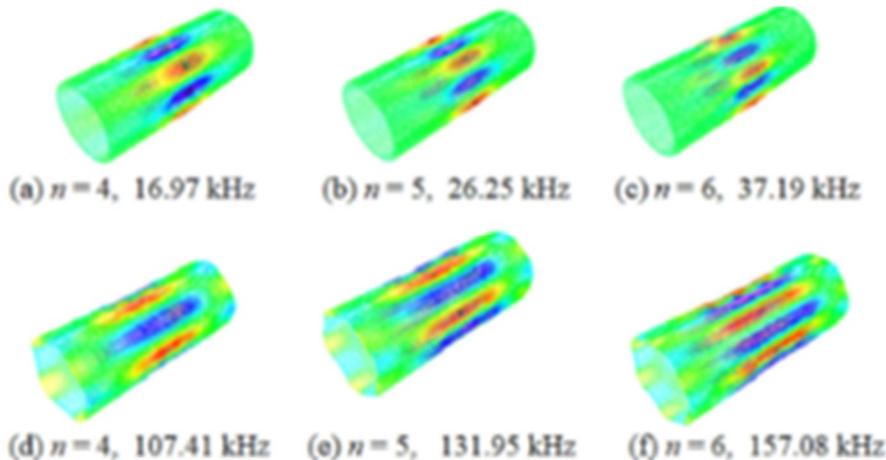


図6 半解析的有限要素法により求めた溝部の局所共振周波数と振動分布

図7は、レーザ照射により円筒に面外振動を発生させ、レーザドップラー振動計によりその振動を計測した実験結果である。円筒や溝部のサイズは図7(a)に示す通りであり、上述の数値計算に仕様したサイズとしている。図7(b)は、図7(a)に示すような位置に弾性波発生用レーザと受信用レーザを設定した場合に、弾性波励振用レーザ光の変調周波数を変化させながら波形を計測して、その周波数スペクトルピーク値をプロットしたものである。明瞭な周波数スペクトルピークが見られ、それらは理論分散曲線から予測した溝部の局所共振周波数と上述により計算した共振周波数に非常に良い一致を示した。そのうち、17.06 kHz、26.32 kHz、37.22 kHzの変調周波数に固定して、弾性波発生用のレーザ光を走査しながら、その振幅分布を取得したところ、図7(c)のような分布図が見られた。黒が振幅が大きいことを示し、白が小さいことを示している。すなわち、これらの周波数の場合に、溝部で非常に振幅の大きな共振現象が起こっており、その分布は図6の数値計算により求めた分布とほぼ一致していたことが示された。

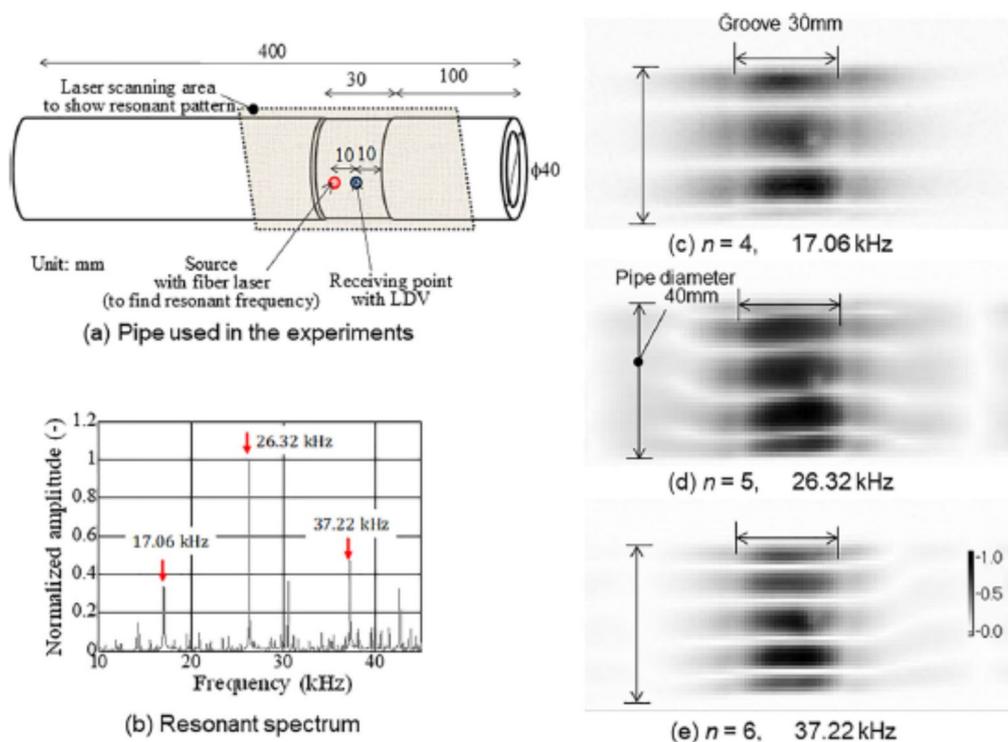


図7 円筒溝部におけるエネルギートラップに関する実験結果

以上より円筒の溝部において、周方向ガイド波が共振し、溝部の外へ漏洩しないようなエネルギートラップが起こっていることが示された。円筒内部にある特定の物質を吸着するような物質を塗布しておくこと、内部に流す気体や液体に含まれる成分によって共振周波数が変化することが予想される。この現象を利用して高感度のセンサへの利用が期待される。

<引用文献>

- 1) T. Hayashi, Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 153 (2017) 26–31.
- 2) T. Hayashi, K. Ishihara, Generation of narrowband elastic waves with a fiber laser and its application to the imaging of defects in a plate, *Ultrasonics*. 77 (2017) 47–53.
- 3) T. Hayashi, W.-J. Song, J.L. Rose, Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example, *Ultrasonics*. 41 (2003) 175–183.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hayashi Takahiro	4. 巻 146
2. 論文標題 Energy trapping of circumferential resonant modes at a thin-walled groove in a hollow cylinder	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 EL376 ~ EL380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/1.5129561	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Takahiro	4. 巻 140
2. 論文標題 Detection of a Defect on the Back of a Pipe by Noncontact Remote Measurements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Pressure Vessel Technology	6. 最初と最後の頁 061401-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4041433	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 林高弘
2. 発表標題 円筒薄肉溝中の周方向共振現象について
3. 学会等名 日本機械学会 年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林高弘
2. 発表標題 パイプ周方向溝における超音波エネルギートラップ
3. 学会等名 電子情報通信学会 超音波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 棚原誉雄, 林高弘
2. 発表標題 周方向共振を利用したパイプの非接触非破壊評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成30年度秋季講演大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関