

令和元年6月18日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05979

研究課題名(和文) 超音波ガイド波により配管50メートル範囲を漏れなく効率的に検査する方法の確立

研究課題名(英文) Efficient inspection for piping in 50 meter long using a ultrasonic guided wave

研究代表者

西野 秀郎 (NISHINO, Hideo)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授

研究者番号：50316890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本手法では、欠陥近傍に非接触手法などの移動が容易な受信センサを設置することで、従来からのガイド波手法をさらに効率的な方法に拡張することを目的に行った。結果として5.5メートルの定尺100A鋼配管10本分程度まで検査可能であることを実験的に明らかにした。10本分の配管伝搬後においても、検出感度は半分程度になるものの、センサを欠陥位置近傍におくことで、検査可能であることを示すことが出来た。一方、検査可能性は、欠陥での反射率に依存する。本研究では、ガイド波の基礎に立ち返り、SH板波とLamb波による反射メカニズムの解明研究を行なっている。反射率と欠陥形状の関連の一部を解明することが出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：ガイド波は効率的な検査手法であるが、減肉サイズと検出信号に明瞭な相関関係がなく、検査定量性が低いことが問題であった。ここでは欠陥反射における数学モデルを提唱しモード変換を伴う反射メカニズムを解明し査読付き論文として掲載を果たしている。

社会的意義：本研究は、産業インフラや社会インフラに無数に存在する重要な構造物である中空丸棒を、効率的に計測できる超音波ガイド波による検査技術をさらに効率化するための研究を取り扱ったものである。結果として、5.5メートル程度の検査の実現可能性を示すことができている。一方で、移動性の優れたガイド波検出装置の開発が課題である。

研究成果の概要(英文)：Purpose of this research is to improve the guided wave method of the defect inspection much more efficiently by locating noncontact-scanning-type receivers near defects. It was confirmed that the method was able to detect the defect located 55-meter apart from guided wave transmitter. In above case, the amplitudes of the defect signals were observed around half compared to the normal case but it was easy to discriminate them because the receivers were located near the defects. In addition to above, the mechanism of the reflection at the defect (discontinuity in piping) was investigated by means of the mathematical model proposed by ourselves and the experimental results. The mathematical model shows well the phenomena of the experimental results.

研究分野：超音波非破壊検査

キーワード：非破壊検査 超音波 ガイド波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の超音波による配管の減肉測定では、総延長が数 10 km にも及ぶ広範囲な検査領域を、送受波面積が数 cm^2 の超音波センサによる点計測の集合で面計測する必要があり、結果として検査位置がまばらで、欠陥を見逃す可能性を秘めている。本研究で用いるガイド波は[1]、管全体が振動し管軸方向に伝わる超音波で、欠陥での反射波を送信センサに併設した受信センサで検出することで欠陥を検出します。管全体が振動し欠陥反射波をとらえる事から漏れなく、かつ広範囲を検査できる優れた方法です。これまでも、ガイド波による欠陥の定量[2-3]やエルボ等の形状複雑部での波動現象の理解と欠陥検出[4]等、ガイド波の励起検出効率を向上させる方法[5,6]が提案されている。一方ガイド波を用いた欠陥の有効検査距離は、欠陥反射波の拡散減衰の影響や欠陥反射率の問題から 5 m 程度と規格で決められている。検査距離の増加が出来ればガイド波計測の効率性をさらに向上させることが可能となる。

2. 研究の目的

ガイド波の欠陥検出可能距離を向上させるため、2つの具体的な研究目的を設定した。

(1) 受信センサの欠陥位置近傍設置による検出感度の向上：

レーザー超音波法や電磁超音波法、あるいは一般的な小型の探触子は、比較的容易に試験体上で移動スキャン可能である。これらの特徴を利用し、配管上で検出センサを移動させながら検出することを考える。ガイド波の送信センサを固定し、受信センサを走査しながら信号を検出することで、結果的に欠陥近傍での信号取得が可能となる。ここでは、欠陥近傍にセンサを設置した場合で、どの程度検査性能が向上するのかを実験的に明らかにした。溶接線での信号低下分も考慮することとした。

(2) 欠陥形状と反射信号の関係性の取得（反射メカニズムの解明）：

ガイド波の欠陥での反射は、欠陥形状により強く依存している。欠陥深さと欠陥信号に全く相関は認められない。欠陥信号を感度良く検出するためにはメカニズムの解明が欠かせない。ここでは反射の数学モデルを作成し、実験と比較することで数学モデルの妥当性を評価した。妥当性の評価から数学モデルの示すメカニズムが概ね正しいことを示すことを目的としている。

3. 研究の方法

以下に各目的に対応して研究方法を示す。

(1) 受信センサの欠陥位置近傍設置による検出感度の向上：

溶接線透過率の測定：長距離伝搬のガイド波を扱う場合、多数の定尺配管を伝搬することになる。溶接線は減衰要因となるため計測する。

長距離伝搬後のガイド波振幅の低下に伴う検出感度の挙動解明：漸増減肉を形成し、配管 1 本分から溶接部を含む配管 10 本までの伝搬を考慮した減肉検出実験を行なった。検出感度を評価し伝搬距離と検出可能性を評価した。

(2) 欠陥形状と反射信号の関係性の取得（反射メカニズムの解明）：

ガイド波の欠陥での反射は、断面積の変化による特性音響インピーダンスの変化により決定されると言われており、減肉深さと反射信号振幅値に単純な相関関係は存在しない。SH 系のガイド波では、これらの基礎となる原理から欠陥での反射特性は考察されているが、Lamb 波系ガイド波ではその関係を明瞭に示されていない。メカニズムの理解が進めば、効率的な検査手法の開発も可能になると考えられる。ここでは欠陥による配管断面積により欠陥反射が決定される数学モデルを提案作成し、矩形状欠陥での実験と比較した。数学

モデルの示すメカニズムの妥当性を確認した。

4. 研究成果

(1) 受信センサの欠陥位置近傍設置による検出感度の向上：

溶接線透過率の測定：突き合わせ溶接部を有する 50A スケジュール 40 配管(外径 114.3 mm, 肉厚 3.9 mm)に T(0,1) mode ガイド波を励起し, 透過率推定を試みた。実際には, 溶接線での反射率を計測し計算により透過率の推定を行った。図 1 に得られた RF 時間波形を示した。左の大きな波束が打ち出し波を示し, 右が溶接線での反射波である。溶接線反射率は 4.89% であり, ここから透過率は 99.9%と求まった。この値と伝搬減衰を考慮し, 長距離位置に存在する欠陥検出感度の評価を行った。

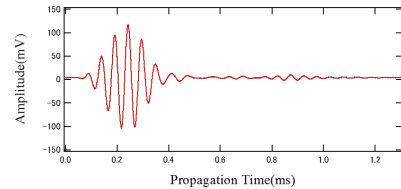


図 1 溶接線反射 RF 波形

長距離伝搬後のガイド波振幅の低下に伴う検出感

度の挙動解明：減肉検出感度の実験を行なった。配管は 50A スケジュール 40 配管(外径 114.3 mm, 肉厚 3.9 mm)を用いた。欠陥は直径 19 mm のボールエンドミルで 0.1 mm ステップで 2 mm まで漸増させて実験した。伝搬距離は, 送信センサで励起される T(0,1) mode ガイド波の振幅値を制御することで伝搬距離に換算して実験を行なった。減衰率は概ね定尺 5.5 m あたり 10%減であることを考慮し, 定尺本数あたり入力電圧値を 100, 90, 81, 80, 72, 65, 58, 53, 47, 42 の比で減衰するように設定している。図 2 に 50 kHz における実験結果を示した。溶接線 0 から 10 本までの結果で, 減肉サイズに対する検出信号値を示している。減肉サイズの増加に伴い信号振幅値が大きくなることが確認できた。また, 溶接線本数が 0 本と 10 本では, 最小で 50%の減少, 最大で 75%

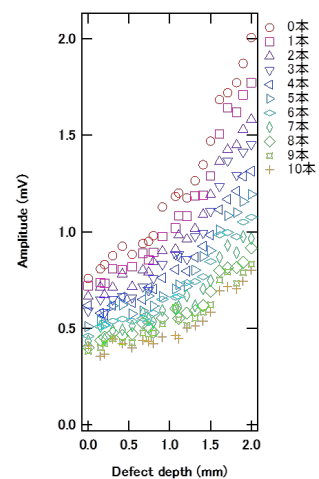


図 2 減肉深さに対する検出信号(配管溶接部 0 本から 10 本までの比較)

程度の減少が確認できたが, どの条件でも検出を確認できた。通常の突き合わせ溶接であれば欠陥近傍に受信センサを設置することで, 十分な感度で減肉を検出できる可能性を示すことが出来た。

(2) 欠陥形状と反射信号の関係性の取得(反射メカニズムの解明): 図 3 に減肉での反射メカニズムの概要を示した。減肉は減肉が増加する Initial region と Last region から構成される。著者らによれば, ガイド波の反射は断面積の変化部により発生する。モード変換の生じない単一モードガイド波においては, 従ってガイド波反射率は, 断面積の変化量から理論計算によって決定される。しかしガイド波は一般に多モードであり, 減肉部でモード変換を伴った反射・透過現象が発現する。モード変換比率は理論的に計算することが不可能である。本研究では, モード変換比を実験的に求め, 加えて減肉形状に依存する位相の干渉を加味する数学モデルを作成し提案した。式(1)に典型的なガイド波である Lamb 波の反射数学モデルを示す。

$$R = |r_{AA} - r_{AAAA} \exp(2ik_A L) - (r_{ASAA} + r_{AASA}) \exp\{i(k_S + k_A)L\} - r_{ASSA} \exp(2ik_S L)| \quad (1)$$

ここに r_{AA} , r_{AAAA} , r_{ASAA} , r_{AASA} , r_{ASSA} は,モード変換を伴う各モードの個別反射率を示している。実測で求めた個別反射率を図3に示した。図4に示す減肉長さ L と減肉深さ t が漸増する人口欠陥を用いて減肉での反射率の測定を行なった結果を図5に示した。図5 (a),(b),(c)は 周波数 30 kHz, 40 kHz, 50 kHz の結果でドットが実験値を示す。また各図の実線は数学モデルでの予想値を示している。数学モデルには,欠陥でガイド波が散乱し,再度ガイド波として成長し検出されることを内包したモデルを示している。実験と数学モデルがとてもよく一致していることを示すことができた。本件は本研究における最大の学術的成果である。ガイド波が欠陥など非連続部位で散乱し再びガイド波として視聴するには 1.3 波長程度が必要であることを示すことができた。

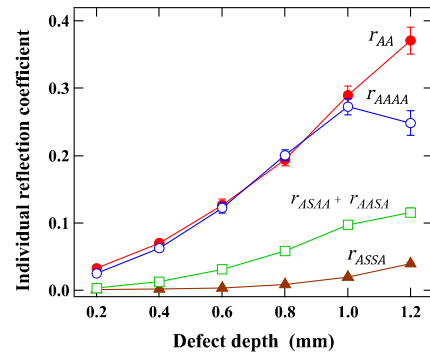


図3 減肉深さに対する個別反射率実測値

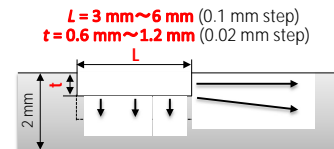


図4 実験で用いた減肉形状

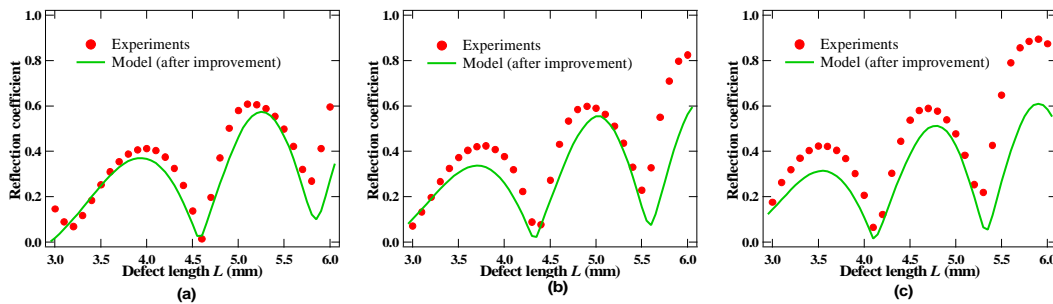


図5 実験で求めた反射率と数学モデルで算出した反射率

<引用文献>

[1] [Hideo Nishino](#), Takashina Sunao, Takemoto Mikio and Ono Kanji : Modal analysis of cylindrical guided wave and applications, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.40, No.1A, pp.364-370, 2001

[2] [Hideo Nishino](#), Ishii Saygo and Furukawa Takashi : Resonant phenomena of circumferential SH waves converted from T(0,1) mode guided waves at non-axisymmetric defects, 41th annual review of progress in quantitative nondestructive evaluation, Vol.34, pp.221--226, 2015.

[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, Vol.56, No.1, pp.120--128, 2015.

[4] [Hideo Nishino](#), Toshiro Tanaka, Saori Katashima and Kenichi Yoshida, "An experimental investigation of mode conversions of the T(0,1) mode guided wave propagating in an elbow pipe", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, (2011) pp.046601(1-7).

[5] [Hideo Nishino](#), Keiji Ogura, Toshiro Tanaka and Kenichi Yoshida, "Highly sensitive detection of defect in piping using Multireflecting Guided wave Energy Trapping (MGET) method": Japanese J. Appl. Phys., Vol. 49 (2010) pp.066602(1-7).

[6] [Hideo Nishino](#), Keiji Ogura, Toyokazu Komatsu and Kenichi Yoshida, "Defect detection of a pipe using guided wave generated by an efficient transduction method with a reflector", Japanese J. Appl. Phys., Vol.48 (2009) 094501(1-7).

5 . 主な発表論文

[雑誌論文] (計 1 件)

Junya Ishihara, Masashi Ishikawa, and Hideo Nishino, A mathematical model of the Lamb wave reflection at a two-dimensional rectangular notch, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SGGB08 (2019). (査読あり)

[学会発表] (計 3 件)

Junya Ishihara, Masashi Ishikawa, and Hideo Nishino, A mathematical model of the Lamb wave reflection at a two dimensional rectangular notch, Ultrasonic electronics 2018 (2018)

Junya Ishihara, Masashi Ishikawa, and Hideo Nishino, A two dimensional reflection model of the SH plate wave and the Lamb wave at rectangular notches, The 6-th Japan-US International symposium (2018)

石原準也, 石川真志, 西野秀郎, SH 板波と Lamb 波の 2 次元矩形形状欠陥における反射数学モデルの構築と検証, 2018 年日本機械学会年次大会, (2018)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。