

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月1日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760427

研究課題名（和文）

漏洩ガイド波計測による鋼板表面きずの超音波非破壊評価

研究課題名（英文）Ultrasonic nondestructive testing for surface-breaking crack on steel plates using leaky Lamb waves

研究代表者

木本 和志 (Kazushi Kimoto)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：30323827

研究成果の概要（和文）：

本研究は、水中に置かれた薄板を伝播するラム波に起因して発生する漏洩波を用いて、鋼板表面きずの検出を行う超音波非破壊評価の開発を目指して基礎的な研究を行ったものである。具体的には、漏洩波およびラム波の伝播解析プログラムの開発を行い、それを用いて漏洩波からガイド波モードを特定する方法、きず位置を同定する手法の提案を行った。また、今後実験的に、提案手法の有用性を検証していくために、ハイドロフォンおよびマニピュレータから構成される漏洩波の高密度計測システムの構築を行った。

研究成果の概要（英文）：

This study is concerned with a development of ultrasonic non-destructive method for characterization of surface-breaking cracks on a steel plate using leaky Lamb waves, which is a kind of acoustic waves generated by guided-waves traveling in a fluid-loaded solid. To begin with, a simulation code was developed to analyze generation and propagation mechanisms of the leaky waves. A numerical inverse technique to identify surface-breaking crack was then proposed in conjunction with a guided wave mode-separation technique. Finally, a high-precision and resolution leaky wave measurement system was developed for future experimental validation of the proposed technique,

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・維持管理工学

キーワード：超音波探傷、非破壊検査、逆解析、ガイド波

1. 研究開始当初の背景

経年劣化した鋼構造物の維持管理にあたり、き裂等のきずを非破壊的に検出・評価できる手法が求められている。超音波を使った

探傷技術をそのような手法とするためには定量的かつ信頼性の高い検査およびデータ処理方法を提案する必要があり、具体的には被検査材を伝播する超音波のモードに適した計測手法と、数値シミュレーションをベ-

スにした波形データの逆解析技術を確立することが不可欠である。薄板中を伝播する弾性波の一種であるガイド波は、長距離を大きな減衰を起こすことなく伝播させることができることから、ロングレンジの超音波検査法として期待がもたれている。しかしながら、ガイド波の計測技術と波動解析技術には年々着実な進歩がみられるものの、計測波形を使った逆解析手法や、逆解析のための計測条件の最適化については未だ有効な方法が示されていない。そこで、本研究では、ガイド波の数値シミュレーションをベースとして、逆解析理論と計測手法の両者について検討を行うことが、ガイド波、特に漏洩波の高度な利用を行うために必要と判断し、そのための基礎的研究に着手した。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の通り。

- (1) 空気結合、水浸法、接触法の全ての状況に対応できる、超音波伝播散乱解析の数値シミュレーションプログラムを作成すること。これにより、高周波の漏洩ラム波を含めたガイド波の伝播、散乱挙動を解析、可視化できるようにすること。
- (2) 数値シミュレーションおよび計測波形から、ガイド波のモードを同定する波形処理方法を提案すること。同様に、漏洩ラム波のアレイ観測データから、板材内部のガイド波モードを逆推定し、その結果を用いて、き裂散乱波の抽出と、き裂位置を特定するための逆解析手法を提案すること。
- (3) 上記の数値シミュレーション手法と、逆解析手法の有効性を検討するための、超音波計測システムを構築すること。具体的には、水深超音波計測システムにより、非接触かつ高密度な計測と、水中への漏洩ガイド波の観測が可能システムを構築すること。

3. 研究の方法

前項に示した三つの目的を達成するための具体的な方法は以下の通り。

- (1) 水浸法や空気結合超音波法による超音波の送受信をシミュレートするためには、流体-固体二相系における動弾性問題を数値的に解析する必要がある。また、通常、超音波の波長は、検出するきず寸法と少なくとも同程度に小さく選ぶ必要があり、検出すべききず寸法自体は検査領域に対して非常に小さいため、結果とし

て大規模な波動解析を行う必要が生じる。また、数値シミュレーションに用いる解析モデルは、きず形状や領域形状を種々の物に対して繰り返し行う必要があるため、数値シミュレーションの実施にあたっては、幾何形状モデルや物性の設定まで効率よく行うことができるプログラムが必要である。そこで、本研究では FDTD 法を用いた波動解析プログラムを作成し、き裂等の領域を、ボクセルデータとして定義することで、簡便にガイド波および漏洩波の散乱解析を可能とするシミュレーション環境の構築を行う。

- (2) ガイド波の伝播挙動は非常に複雑であり、アレイ超音波探傷装置の標準的なデータ可視化手法である、開口合成法や B、C スコープ表示のような画像化ではき裂位置を鮮明に示すことは困難である。そこで、本研究では、時間反転収束法のアイデアを用いて、散乱波のデータからき裂位置を使用する波長程度の分解能で同定する逆解析法の提案を行う。時間反転集束法は、波動場の時間反転に関する不変性を利用し、散乱源を同定する方法で、これまで非均質材料における超音波ビーム収束の技法として用いられてきたものだが、本研究ではこの方法を、超音波伝播シミュレーション上で再現することで、散乱源の可視化技術として用いる。
- (3) 逆解析を行うためには、精密な超音波計測が必要となり、市販の水浸探触子を使ったシステムでは十分な空間解像度で、計測を行うことができない。そのため、素子径が 0.5mm 程度のニードル型ハイドロフォンを用いて、点計測に近い条件で超音波計測を行う。さらに、計測位置の正確な決定と、高密度な計測を行うために、ハイドロフォンは 0.05mm 程度のステップで制御が可能なアクチュエーターに取り付けて位置の移動を行い、散乱波動場の時空間的な変化を精密に計測する。これにより、ガイド波モードの同定においても、十分な波数までデータを取得することができ、高精度なモード同定を行うことが可能となる。

4. 研究成果

以上の方法によって行った研究の成果を項目毎に述べると、次のようになる。

- (1) 水中に沈められた鋼板を、水-固体-水領域としてモデル化し、弾性波の伝播解析を行うことができるシミュレーションコードを開発した。このコードでは、き裂や空洞の領域を、最小限の幾何学的なパ

ラメータとして入力することで、モデル作成と解析が可能であり、シミュレーション条件を繰り返し変更しながらの計算を、効率よく行うことができる。なお、入射波は単一素子のセンサーだけでなく、アレイセンサーの各素子に遅延時間を設定してビーム合成を行うようなケースにも対応ができるものである。さらに、きずを模擬した空洞は、内部が液体で満たされた液体介在物としてもモデル化が可能である。また、入射波と散乱波を分離して表示することができ、計測する波動成分とその逆解析への有用性の検討にも適したものとなっている。

- (2) 計測したガイド波をモード毎に分離する方法を開発し、その結果を用いてき裂位置を同定する逆解析法の開発を行った。この方法では、板材表面（片側）で計測したアレイデータを理論的に予想される分散曲線にフィッティングすることで、伝播型のガイド波モードを、伝播方向毎に抽出する。さらに、低次のガイド波モードだけを用いて、き裂の画像を合成することができること、その結果、片面探傷のデータを用いた場合でも、表面き裂の存在位置と大きさに関する情報を散乱波から抽出できることが示すことができた。ただし、水浸法による計測データからガイド波モードを同定するためには、水中で観測される漏洩波を逆伝播させ、板表面の振動成分に引き戻してから、今回用いた手法を適用する必要があるが、この点は、未検討の課題として残った。
- (3) xy軸スキャナにニードル型ハイドロフォンを取り付けて機械的にスキャンニングすることで、高密度な漏洩波観測を可能とするシステムの構築を行った。このシステムでは、素子径が小さく指向性の弱いハイドロフォンを用いること、受信は水浸法により行うが、送信には接触型の超音波探触子を試験片に固定することの二点において、従来の水浸超音波探傷試験のセットアップと異なる。このようにすることで、被検査材に入射される超音波の強度を上げることができ、計測信号のS/N比を向上させる。さらに、小径の受信ハイドロフォンを用いることで、サブmmピッチでの高密度な漏洩波計測を効率よく行うことを可能とすることができた。高密度、多点計測は、散乱波や漏洩波に含まれる高波数成分の検出を可能とするため、これにより、信頼性の高いガイド波モードの同定の可能につながると考えられる。今後は、本研究で開発した、シミュレーションコードと、提案した時間

反転集束法に基づく逆解析法、ハイドロフォンレシーバを用いた水浸計測システムを連携させて利用し、各種計測パラメータの最適化や、逆解析手法の性能に関する実験的検討を行うことが課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- (1) 中畑和之、木本和志: イメージベースシミュレーションを援用した時間反転法による固体内欠陥の映像化の試み、平成 23 年度第 1 回アコースティックイメージング研究会, AI-2011-01WEBライブラリ公開
https://www.e-kenkyu.com/asj_library, (2011).

〔学会発表〕（計3件）

- (1) 中畑和之、木本和志、廣瀬壮一: リアルタイム波動伝搬シミュレータを援用した時間反転法による欠陥の映像化、日本非破壊検査協会、2012 年度秋季講演大会、2012 年 10 月 23 日、アルカディア市ヶ谷。
- (2) 仁科直也、木本和志: ガイド波を使った表面き裂の映像化に関する数値解析的研究、第 63 回土木学会中国支部 研究発表会、講演概要集(CD-ROM) I-13、2011 年 5 月 21 日、岡山大学。
- (3) 仁科直也、木本和志: 差分法を用いた薄板中欠陥による漏洩ラム波の散乱解析、日本非破壊検査協会平成 23 年度春季講演大会、2011 年 5 月 25 日、アルカディア市ヶ谷

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 件）

○取得状況（計 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木本 和志 (Kimoto Kazushi)
岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授
研究者番号: 30323827

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：