

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06237

研究課題名(和文)ガイド波によるワイヤロープの非破壊評価

研究課題名(英文)Non-destructive Evaluation of Wire-ropes by Using Guided Waves

研究代表者

杉浦 壽彦(Sugiura, Toshihiko)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：70265932

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文):ワイヤロープの非破壊評価手法確立のために、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、長距離伝播時の動力学的な挙動の解明を目指した。まず、累積的高調波について、非線形連成と減衰の効果を考慮し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析によりその挙動を解明し、数値解析および実験によりこれを検証した。つぎに、材質や厚さの異なる領域に入射するガイド波のモード変換の理論解析と実験により、振動形態や伝播速度の変化を確認した。さらに、電磁超音波探触子EMATについて、ガイド波入力モードの選択的励振を解析で明らかにし、その結果を有限要素解析と実験により検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワイヤロープの劣化や断線等の同定のために、点計測型の漏洩磁束法や目視検査より、効率的かつ高精度に検出し得る非破壊評価手法の確立が求められている。長大構造物内を遠距離伝播する超音波ガイド波は、全面検査手法として高効率化と高精度化が期待できる。また、初期の疲労き裂や微小なき裂を検出しうる高精度な非線形超音波の利用も期待される。近年、それらの両長所を有した累積的高調波(非線形ガイド波)が注目されているが、その長距離伝播の挙動解明は十分なされていない。本研究での挙動解明により、非線形ガイド波によるワイヤロープの高効率かつ高精度な非破壊評価手法の確立に寄与しうる。

研究成果の概要(英文): In order to establish a non-destructive evaluation method for wire ropes, we focused on nonlinear guided waves including cumulative harmonics and aimed to clarify the dynamic behavior during long-distance propagation. First, considering the effects of nonlinear coupling and damping, the behavior of cumulative harmonics was clarified by theoretical analysis using orthogonality of propagation modes and multiscale method, and verified by numerical analysis and experiments. Next, changes in the vibration mode and propagation velocity were confirmed by theoretical analysis and experiments of mode conversion of guided waves incident on regions of different materials and thickness. Furthermore, for the electromagnetic acoustic transducer EMAT, selective excitation of guided wave input modes was clarified by analysis, and the results were verified by finite element analysis and experiments.

研究分野：振動・波動, 超音波応用

キーワード：振動学 超音波 非破壊評価 ガイド波 ワイヤロープ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、日本国内の各種インフラ設備の経年劣化による種々の事故の発生が問題化しており、構造安全性への関心が高まっている。そのなかで、送電ケーブル、吊橋、鉄道架線、クレーン、エレベータなどで用いられるワイヤロープに対しては、劣化や断線等を検出し、同定するための非破壊検査手法として、漏洩磁束法や目視検査が用いられている。しかし、これらは点計測のため、コストや検査時間に難があり、またヒューマンエラーの危険をも孕んでいる。事故を防ぐには、劣化や断線等をより高精度に検出し得る非破壊評価手法の確立が望ましい。

ところで、超音波の一種であるガイド波による非破壊評価が注目されている。ガイド波は、パイプライン、鉄道レールなどの長大構造物に対して長手方向と直交する断面内で共振しながら、長手方向に伝播する波であり、一度に広い領域の計測が可能であることから、長大構造物に対してガイド波による非破壊評価を用いれば、メンテナンスの効率化、低コスト化が期待できる。また、初期段階の疲労き裂や微小なき裂を検出する高精度な非破壊検査法として、非線形超音波を利用した探傷法も期待されている。近年、ガイド波法と非線形超音波法の両メリットを有した非破壊検査法として、累積的高調波と呼ばれる非線形ガイド波による検査法が注目されている。しかし、ガイド波の特徴である長距離伝播を考慮した非線形ガイド波の挙動解明に関する研究は十分なされていない。

本研究者は、これまでに圧電型の超音波探触子や電磁超音波探触子を用いた超音波探傷や閉じたき裂検出のための非線形超音波のほか、ガイド波による薄板構造物の欠陥同定や接合評価などの研究を進めてきた。その際、複雑な構造のワイヤロープにガイド波を試しに送信してみたところ、予想に反して受信信号が有意に得られたため、その伝播メカニズムを解明すれば、ワイヤロープの非破壊評価に有効な活用が期待できると考え、数年前よりその研究に取り組み出した。これまでに、電磁超音波探触子によるガイド波送受信実験による検討を進めるほか、ワイヤ素線のらせん形状がガイド波伝播に与える影響等についての解析的検討も進めてきた。また、並行して、ガイド波伝播の効率的な数値解析手法として知られる半解析的有限要素解析や有限要素解析のワイヤロープへの適用検討も進めてきた。

2. 研究の目的

このように、ワイヤロープに対しては、劣化や断線等をより高効率かつ高精度に検出し得る非破壊評価手法の確立が望ましい。その候補として、近年、ガイド波法と非線形超音波法の両メリットを有した累積的高調波と呼ばれる非線形ガイド波による検査法が注目されている。しかし、ガイド波の特徴である長距離伝播を考慮した非線形ガイド波の挙動解明に関する研究は十分なされていない。そこで、本研究では、ガイド波によるワイヤロープの非破壊評価手法確立のために、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析により、ガイド波が長距離を伝播する際の動力学的な挙動を明らかにし、数値解析と実験からこれを検証することを目的とした。

3. 研究の方法

初年度は、累積的高調波について、非線形連成と減衰の効果を考慮し、伝播モード直交性と多重尺度法を用いた解析により、長距離を伝播するガイド波の複雑な動力学的挙動の一部を解明し、その結果を数値解析（有限要素法や半解析的有限要素法）により検証した。

2年目はこれを実験により検証した。実験で用いた基本的なガイド波送受信システムの構成は、波形発生器 アンプ 送信用超音波探触子 検査対象試料 受信用超音波探触子 プリアンプ オシロスコープ、から成る。超音波探触子については、市販の圧電型超音波探触子を使用するほか、各種ガイド波モード用の電磁超音波探触子 EMAT（永久磁石とコイルによる構成）を製作して使用した。また、劣化や断線等に起因する非線形性に伴う問題として、材質や厚さの異なる領域に入射するガイド波のモード変換の理論解析と実験（厚さが変化する金属板での伝播実験）も実施し、振動形態や伝播速度の変化について調べた。

最終年度は、ガイド波の応用上重要な入力モードの選択的励振に有利とされる電磁超音波探触子 EMAT について、モードの選択的励振の解析を実施して、その可能性を調べ、さらに有限要素解析と実験により検証した。

4. 研究成果

ガイド波によるワイヤロープの非破壊評価手法確立を目指して、累積的高調波を含む非線形ガイド波に着目し、伝播モードの直交性と多重尺度法を用いた理論解析により、ガイド波が長距離を伝播する際の複雑な動力学的挙動の一部を解明できたほか、その検証実験を行い、さらに材質や厚さの異なる領域に入射した際のガイド波のモード変換に関する理論解析やその実験計測も実施した。

具体的には、初年度において、累積的高調波（内部共振的ガイド波）について、非線形連成の効果と減衰の効果を考慮したうえで、伝播モード直交性と多重尺度法を用いてその伝播挙動を解析し、ガイド波が長距離を伝播する際の複雑な動力学的挙動の一部を解明できたほか、有限要素法や半解析的有限要素法によりその検証もできた。これらの解析結果について、2年目以降は、検証実験を行い、良好な一致を得た。実験では、伝播に伴う内部共振による2次高調波モードの発生を EMAT により検出でき、その振幅の成長減衰の挙動が理論予測と一致することを確認でき

た．さらに材質や厚さの異なる領域に入射したガイド波のモード変換に関する理論解析の基礎として，EMAT により発生するガイド波の各モードの振幅評価および異なる材料に入射したガイド波の透過振幅評価の解析的手法を提案し，その結果を分析し，有限要素解析と実験により検証して，良好な一致を得た．また，厚さが変化する金属板での伝播実験を実施し，伝播とともに振動形態や伝播速度が変化するなどの結果も得た．

以上のように本研究で得られた非線形ガイド波伝播の挙動解明の成果は，今後，非線形ガイド波によるワイヤロープの高効率かつ高精度な非破壊評価手法の確立に寄与しうると期待される．

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 Kosuke Kanda and Toshihiko Sugiura	4. 巻 82
2. 論文標題 Analysis of damped guided waves using the method of multiple scales	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Wave Motion	6. 最初と最後の頁 86 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.wavemoti.2018.07.007	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 Kosuke Kanda and Toshihiko Sugiura	4. 巻 77
2. 論文標題 Analysis of guided waves with a nonlinear boundary condition caused by internal resonance using the method of multiple scales	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 WAVE MOTION	6. 最初と最後の頁 28 ~ 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.wavemoti.2017.10.006	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 喜多村健司、杉浦壽彦
2. 発表標題 送信条件を考慮した過渡解析によるLamb波伝播モードの振幅評価
3. 学会等名 日本保全学会 第16回学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Kitamura, Toshihiko Sugiura
2. 発表標題 Transient amplitude analysis of Lamb wave mode generated by EMATs
3. 学会等名 15th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials (ISNDCM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鶴田恭平, 杉浦壽彦
2. 発表標題 厚さが変化する板中を伝播するガイド波の挙動解析
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirokazu Enomoto, Kenji Kitamura, Toshihiko Sugiura
2. 発表標題 Transient amplitude analysis of Lamb waves generated by a low-frequency EMAT
3. 学会等名 20th World Conference on Non-Destructive Testing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Kitamura, Kosuke Kanda, Toshihiko Sugiura
2. 発表標題 Detection of second harmonic guided waves using electromagnetic acoustic transducers
3. 学会等名 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 喜多村健司, 神田昂亮, 杉浦壽彦
2. 発表標題 電磁超音波探触子(EMAT)を用いた累積的高調波の検出
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosuke Kanda and Toshihiko Sugiura
2. 発表標題 Nonlinear Effects of Cumulative Guided Waves Caused by Internal Resonance under Nonlinear Boundary Conditions
3. 学会等名 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神田昂亮, 杉浦壽彦
2. 発表標題 多重尺度法を用いた非線形境界条件によるオートパラメトリック励振的非線形ガイド波の理論解析
3. 学会等名 日本機械学会 機械力学・計測制御部門 Dynamics & Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 神田昂亮, 杉浦壽彦
2. 発表標題 オートパラメトリック励振的非線形ガイド波の安定性
3. 学会等名 平成29年度 日本非破壊検査協会 秋季講演大会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----