

令和元年5月21日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06395

研究課題名(和文) 電磁・超音波混合方式のリモート式非接触非破壊検査による早期欠陥検出技術

研究課題名(英文) Early detection technique based on remote non-contacting non-destructive testing combining electromagnetic and ultrasonic methods

研究代表者

廿日出 好 (Hatsukade, Yoshimi)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：90339713

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)：本研究では、直接検査を行うことが困難な配管や格納庫等の構造物に発生した欠陥を、磁歪と電磁波で発生させたガイド波をベースとして、非接触かつリモートで早期発見するための新技術の研究・開発を行った。金属構造物に電磁波により超音波ガイド波を発生させ、振動に由来する磁気信号を超高感度SQUID磁気センサで計測、欠陥の有無や場所を早期検出・同定する電磁・超音波混合方式の新しい非破壊検査技術を開発した。SQUID磁気センサを利用することで、従来技術よりも高感度かつ1桁遠距離までガイド波を検出できる可能性を示した。また配管の全周検査が可能となり、欠陥の軸方向位置だけでなく、周方向位置の推定も可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、電磁現象を応用して非接触で超音波ガイド波を配管などの長距離構造物に発生させ、これを磁気に変換して超高感度磁気センサSQUIDで計測する新しい非破壊検査技術を開発した。これにより、より微小な欠陥を遠距離までリモート・非接触で早期検出できる可能性を示した。このように本研究は高い学術的意義を有するだけでなく、本技術を現場で適用できるように発展させていけば、発電所やパイプライン、橋梁などの長距離構造物の検査を、使用中に高速で全体検査できる可能性を示しており、社会的意義も高い研究成果を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed and investigated novel ultrasonic guided wave testing technique for early detection of defects in pipes and board structures, which person can not easily access, based on magnetic striction and electromagnetic fields. While applying electromagnetic field on target such as metallic and/or ferromagnetic pipe in order to generate ultrasonic guided waves which propagate on the pipe in long distance, we utilized extremely high-sensitive SQUID magnetic sensor to receive magnetic signal induced by the guided wave. By using the SQUID sensor, we realized higher sensitive and longer distance testing compared to the conventional method using induction coils and piezo sensors. Also it enables us to conduct all-round inspection of a pipe, resulting in capability to localize not only axial position of a defect on the pipe, but also circumferential position of the defect.

研究分野：計測工学

キーワード：超音波ガイド波 SQUID磁気センサ 磁歪 電磁波 配管 非破壊検査

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故や川内原子力発電所の再稼働など、原子力発電所の安全に関する注目度の高さは言をまたない。原子力発電所のように過酷な環境で使用される配管や格納庫は人がアクセスできない箇所が多く、このような箇所に発生する減肉やひび割れなどの欠陥は早期検出が困難である。このような対象に対して、建設時にスマートセンサを導入して欠陥の発生を常時チェックする方法があるが、現在問題になっている構造物は戦後に建築され、新たなセンサの導入が困難で、延命作業が必要な構造物も多い。このような長期の使用に加え、近年の大地震などの突発的事故や、ゲリラ豪雨など環境もますますシビアになっている。アクセス困難な箇所のリモート式非破壊検査技術は需要が多いが、適用できる技術が超音波検査など一部に限られていた。バルク波を用いた超音波検査は精度・分解能も高く、多くの現場で使用されている検査技術であるが、水やゲルなどを介した接触が必要となり、断熱材が巻かれている場合など、適用できない場合も多い。

金属配管のための新しい検査として、遠距離まで伝搬するガイド波を用いた超音波ガイド波試験技術が開発されており、従来は振動子を用いて振動発生・検出する技術の研究・開発が行われてきたが、振動子は管表面に接触する必要があるため、非接触での検査は実現していなかった。我々は、配管の多くは磁性体であり、ガイド波は配管を伝達し、振動により微小であるが磁気信号が発生するであろうこと、振動を電磁波パルスで誘導すれば、長距離配管の欠陥の早期検出のための非接触・リモート非破壊検査が実現する可能性に思い至り、本研究を開始することになった。

### 2. 研究の目的

過酷な環境で使用されている原子力発電所の配管や格納庫などは、人が容易にアクセスできない部分も多く、予想よりもはるかに早く割れや破断などが発生し、その早期発見は困難である。本研究では、上記のような直接検査を行うことが困難な配管や格納庫等の構造物に発生した欠陥を、非接触かつリモートで早期発見するための新技術を開発する。具体的には、上記構造物に電磁波により超音波ガイド波を発生させ、管の振動に由来する磁気信号を超高感度磁気センサ（SQUID）で計測、欠陥の有無や場所を早期検出・同定する電磁・超音波混合方式の新しい非破壊検査技術の研究・開発する。多くの配管が磁性金属管と考えられるが、アルミなどの非磁性金属管にも対応可能とすれば適用範囲が広がるため、磁化と電磁波を組み合わせた高感度な非接触ガイド波送受信技術を開発する。

### 3. 研究の方法

上記目的で示したように、配管や格納庫等の構造物を対象とし、これにガイド波を誘導、発生した振動由来の磁気信号を検出して、配管等の広範囲にわたる非接触・リモート非破壊検査を実現するため、以下の課題を設定した。

- ①磁性金属管を伝達する振動由来の磁気信号のリモート検出検証実験
  - ②誘導コイルを用いた電磁波により振動を発生させる機構の開発・導入
  - ③欠陥（配管では亀裂、減肉など）や溶接による異常磁気信号の取得と解析ソフトの開発
  - ④非接触振動発生機構の開発・導入、⑤非磁性管の検査技術の検討
- 課題①②を H28、③を H29、④⑤を H30 年度に行い、装置の構築と手法の優位性実証を目標とする。

### 4. 研究成果

平成 28 年度では、上記の研究実施計画・方法に基づき、①磁性金属管を伝達する振動由来の磁気信号のリモート検出検証実験、および②誘導コイルを用いた電磁波により振動を発生させる機構の開発・導入を行った。①では、まず打撃により、次いでアコースティックエミッション（AE）センサにより AE 振動をサンプル間に発生・伝達させ、振動由来の磁気信号が発生・リモートで検出できるかどうかを、SQUID センサで計測を行い調査した。微小な AE 振動に関しては、SQUID（受信器）を設置する管の部分に磁歪効果を持つニッケル薄板を貼り付けることで、振動を磁気信号に変換して、ガイド波を非接触で検出できることを示した（図 1）。②として、送信部にも磁化したニッケル薄板を管一周にわたって貼り付け、コイルを巻きつけた磁歪式送信器を導入した検査装置のプロトタイプを開発した（図 2）。これにより安定して管に T(0, 1)モード超伝導ガイド波を発生させることが出来るようになった。また従来の圧電式受信器と比較して、高感度な SQUID を用いることで、非接触にもかかわらず、より信号雑音比（SN 比）の大きなガイド波計測が可能であることを示した（図 3）。

平成 29 年度では、試料配管に亀裂欠陥などの人工欠陥を導入し、欠陥に由来する磁気信号が計測できるかを実験的に調べた。また、上記の計測のため、ウェーブレット変換による周波数解析機能を有する測定用の LabVIEW プログラムを開発した。このプログラムにより、ガイド波由来の磁気信号の測定だけでなく即時の周波数解析が可能となり、後述する全周計測を行った後に、試料周囲におけるガイド波由来の信号のコンターマップが容易に作成可能となった。

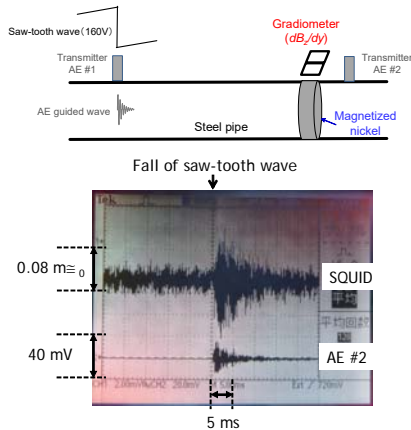


図1 AEを用いて発生させた振動のSQUIDによる計測結果

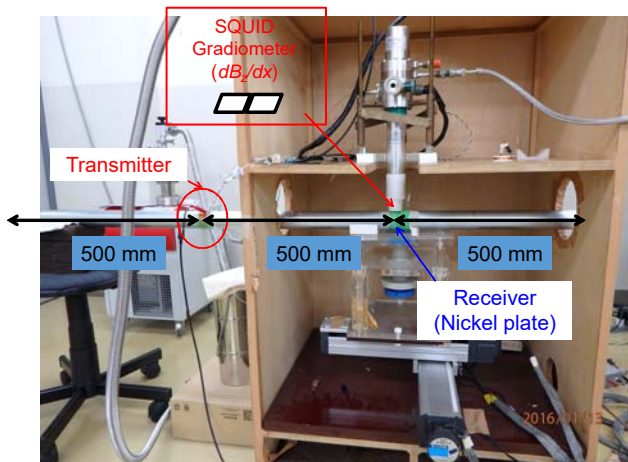


図2 開発したSQUID式ガイド波計測装置

欠陥検出として、アルミ配管に亀裂模擬欠陥を設け、アルミ周囲でSQUID磁気センサの位置を変えながら全周計測を行った。この結果得られた磁場信号のコンターマップを、超音波シミュレータにより得られた超音波分布と比較するとよい一致が得られた(図4)。以上より、欠陥の軸方向位置だけでなく周方向位置の推定を行える可能性が示された。また、欠陥の軸方向位置を変えて全周計測を行うことで、配管を伝搬する $T(0, 1)$ モードガイド波の伝搬経路や広がり等の情報を取得できる可能性を示した。また、測定される欠陥信号の振幅値が欠陥のサイズに比例しており、測定信号から欠陥のサイズ(試料断面における欠陥の占める断面積の割合)が推定できることが示された。

平成30年度では、非接触振動発生機構の開発を行った。これまでは、磁化したニッケル薄板を対象管に貼り付けることで磁歪式ガイド波送受信機構を構成していた。ここでは、対象を磁性配管として、ニッケル管をサンプル管として、管自体を磁化してその磁化を超音波ガイド波発生に用いる方法について検討した。電磁界シミュレータJMAGを用いて、管の一部を周方向に均一に磁化する方法について検討した。その結果、電磁石を2個用いて、管か電磁石を周回させる方法で管内部に均一な残留磁化を発生できることがわかった。これを実験で実証した結果、群速度一定で欠陥検出に有効な $T(0, 1)$ モードガイド波を発生し、S/N改善の余地があるものの、欠陥検出にも適用できる可能性があることを実証した(図5)。本技術は特許出願を行った。また、超音波シミュレータSWAN21を用いて、配管や板材を伝搬するねじれ波の伝搬挙動をシミュレートし、実験結果との比較を行った。この結果、上記で開発した非接触手法で得られた管周囲のガイド波由来磁気信号と、シミュレートしたガイド波伝搬分布は大変良い一致が得られた。これにより、上記手法の有効性を実証した。

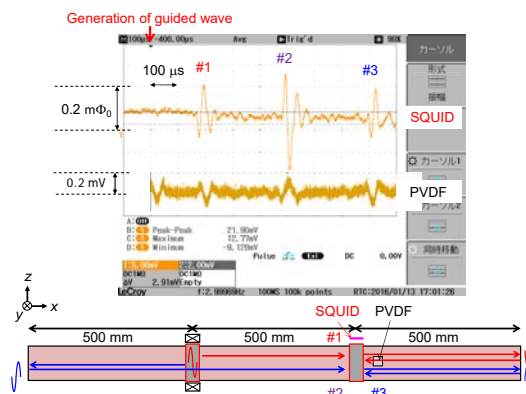


図3 従来技術(接触式)とSQUID(非接触式)でのガイド波計測結果の比較

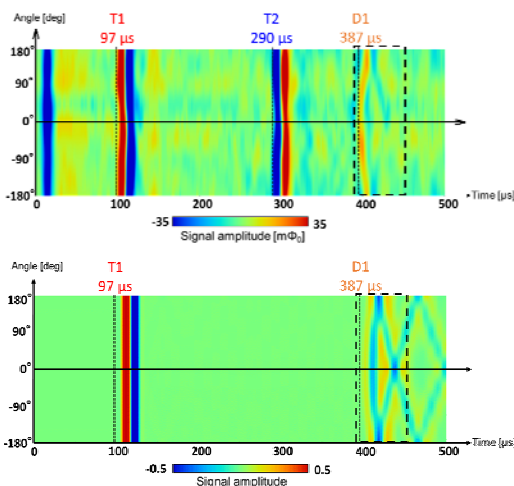


図4 SQUIDを用いた配管周囲でのガイド波全周検査結果(上)。欠陥反射波D1について、超音波シミュレータ(下)とよく一致した。

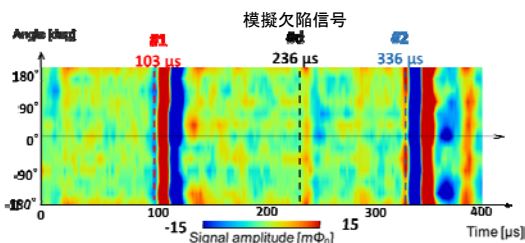


図5 材料の磁化を利用した模擬欠陥信号の測定結果。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- ① **Y. Hatsukade**, N. Masutani, Y. Azuma, K. Sato, T. Yoshida, S. Adachi and K. Tanabe, “All-round Inspection of a Pipe based on Ultrasonic Guided Wave Testing utilizing Magnetostrictive Method and HTS-SQUID Gradiometer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 29, p. 1601505, 2019. DOI: 10.1109/TASC.2019.2904492
- ② N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, S. Kanenega, Y. Azuma, **Y. Hatsukade**, S. Adachi, and K. Tanabe, “Multipoint measurement of T (0, 1) mode guided wave using HTS-SQUID gradiometer”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 28, p. 1602005, 2018. DOI: 10.1109/TASC.2018.2810147
- ③ **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenega, S. Adachi, and K. Tanabe, “HTS-SQUID NDE Technique for Pipes based on Ultrasonic Guided Wave”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, Vol. 871, p. 012072, 2017, doi:10.1088/1742-6596/871/1/012072.
- ④ N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenega, **Y. Hatsukade**, S. Adachi, and K. Tanabe, “Defect Detection of Pipes using Guided Wave and HTS-SQUID”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 査読有, Vol. 871, p. 012074, 2017. doi:10.1088/1742-6596/871/1/012074.
- ⑤ **Y. Hatsukade**, T. Kobayashi, S. Nakaie, N. Masutani and Y. Tanaka, “Novel Remote NDE Technique for Pipes Combining HTS-SQUID and Ultrasonic Guided Wave”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, Vol. 27, p. 1600104, 2017. DOI: 10.1109/TASC.2016.2631421

〔学会発表〕(計 21 件)

- ① 東雄貴, 横内祐紀, 窪田章吾, 寺若友博, **廿日出好**, 「超音波ガイド波と HTS-SQUID を組み合わせたリモート非破壊試験技術の開発 –その 4-」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019
- ② 横内祐紀, 東雄貴, 窪田章吾, 寺若友博, 植田浩史, 金錫範, **廿日出好**, 「完全非接触での SQUID 式超音波ガイド波検査技術の開発 –その 1-」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019
- ③ 東雄貴, 横内祐紀, 窪田章吾, 寺若友博, **廿日出好**, 池田隆, 「高温超伝導 SQUID と磁歪式超音波ガイド波を用いた配管の全周検査実験と解析」, 日本非破壊検査協会 第 26 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2019
- ④ Y. Azuma, Y. Yokouchi, S. Kubota, T. Terawaka, **Y. Hatsukade**, S. Adachi, and K. Tanabe, “Multipoint measurements of a pipe using HTS-SQUID and Magnetostriction-based Ultrasonic Guided Wave”, 31th International Symposium on Superconductivity (ISS2018) 2018
- ⑤ **Y. Hatsukade**, N. Masutani, Y. Azuma, K. Sato, T. Yoshida, S. Adachi and K. Tanabe, “All-round Inspection of a Pipe based on Ultrasonic Guided Wave Testing utilizing Magnetostrictive Method and HTS-SQUID Gradiometer”, Applied Superconductivity Conference 2018 (ASC 2018) 2018
- ⑥ 東雄貴, **廿日出好**, 安達成司, 田辺圭一, 「高温超伝導 SQUID と磁歪式超音波ガイド波を用いた配管の全周検査」, 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会, 2018
- ⑦ **廿日出好**, 「SQUID の基礎と応用」, 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会, 2018, 招待講演発表
- ⑧ 東雄貴, **廿日出好**, 増谷夏輝, 池田隆, 「高温超伝導 SQUID と超音波ガイド波を組合せた配管の全周検査」, 一般社団法人日本非破壊検査協会超音波部門講演会, 2018
- ⑨ **廿日出好**, 増谷夏輝, 東雄貴, 佐藤和哉, 吉田太郎, 「SQUID 磁気センサを用いた配管を伝搬する T(0, 1)モード超音波ガイド波の全周検査」, 第 30 回「電磁力関連のダイナミクス」, 2018
- ⑩ **廿日出好**, 増谷夏輝, 東雄貴, 佐藤和哉, 吉田太郎, 「SQUID 非破壊検査装置を用いた金属配管のリモート・非接触検査実現可能性の検討 –その 4-」, 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会, 2018
- ⑪ **Y. Hatsukade**, N. Masutani, Y. Azuma, K. Sato, and T. Yoshida, “Study on multipoint guided wave measurement technique on pipes using HTS-SQUID NDI system”, 30th International Symposium on Superconductivity (ISS2017), 2017
- ⑫ N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, S. Kanenega, Y. Azuma, **Y. Hatsukade**, S. Adachi, and K. Tanabe, “Multipoint measurement of T (0, 1) mode guided wave using HTS-SQUID gradiometer”, EUCAS2017, 2017
- ⑬ 東雄貴, 増谷夏輝, 佐藤和哉, 吉田太郎, **廿日出好**, 「SQUID 磁気センサを用いた配管の多点計測 –その 1-」, 第 19 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (第 19 回 HISS), 2017
- ⑭ **廿日出好**, 増谷夏輝, 東雄貴, 「高温超伝導 SQUID を用いた超音波ガイド波検査技術の初期検討」, 一般社団法人 日本非破壊検査協会 超音波部門講演会, 2017
- ⑮ 増谷夏輝, 寺西祥汰, 政本健, 兼永翔也, **廿日出好**, 「高温超伝導 SQUID を用いた金属管のリモート非破壊検査手法の開発 –その 4-」, 第 94 回 2017 年度春季低温工学・超伝導

- 学会, 2017
- ⑯ **廿日出好**, 増谷夏輝, 寺西祥汰, 政本健, 兼永翔也, 「SQUID 磁気センサを用いた配管の超音波ガイド波検査技術」, 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD29), 2017
  - ⑰ N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, S. Kanenaga, **Y. Hatsukade**, “Defect detection of pipes using ultrasonic guided wave and HTS-SQUID”, 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016
  - ⑱ **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, S. Kanenaga, “Research on HTS-SQUID NDE technique for pipes based on ultrasonic guided wave”, 29th International Symposium on Superconductivity (ISS2016), 2016
  - ⑲ **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenaga, “Ultrasonic Guided Wave Testing Based on High Sensitive SQUID Magnetic Sensor”, Symposium on Ultrasonic Electronics 2016, 2016.
  - ⑳ **Y. Hatsukade**, T. Kobayashi, S. Nakaie, N. Masutani, Y. Tanaka, “Novel remote NDE technique for pipes combining HTS-SQUID and ultrasonic guided wave”, Applied Superconductivity Conference 2016 (ASC 2016), 2016
  - ㉑ **廿日出好**, 小林奉樹, 中家早紀, 増谷夏輝, 「超高感度磁気センサを用いた超音波ガイド波の非接触検出技術の開発」, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD28), 2016

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：配管磁化方法及び配管検査方法

発明者：廿日出好, 東雄貴, 横内祐紀

権利者：学校法人近畿大学

種類：特許

番号：特願 2018-212575

出願年：2018 年

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：田中 義和

ローマ字氏名：(TANAKA, yoshikazu)

※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。