

研究成果報告書

研 究 題 目		エネルギーハーベストを兼ねた高速道路の早期欠陥検出技術の開発	実 施 年 度
			R2 年度
代 表 研 究 者	所 属	近畿大学 工学部 電子情報工学科	
	氏 名	廿日出 好	印

1. 研究の目的・背景

国民の生活基盤となる高速道路は、近年の重大事故（阪神大震災、笹子トンネル等）もあり、早急な検査技術確立が求められている。現在、目視・打音に加え赤外線サーモグラフィによる調査・点検が行われているが、疲労亀裂等が進展した滞水発生後の検出となる。低コスト・高効率検査の需要から、広範囲検査が可能な超音波ガイド波検査は初期欠陥検出の候補となるが、重量物ではガイド波の減衰は激しく、長距離範囲の高感度検査は困難であった。

研究代表者は、2016～2018 年に「超高感度磁気センサを用いたリモート非接触式配管非破壊検査技術の開発」のテーマで中国電力技術研究財団から助成を受けて、ニッケルを磁歪材料として超音波ガイド波を配管に発生させ、SQUID 磁気センサでガイド波由来磁気信号を直接受信する新技术を開発した。本技術は、従来の磁歪材料であるニッケルを用いて、横波せん断波である $T(0, 1)$ モードの波を発生させて、ガイド波試験により欠陥を広範囲に検出する技術であった。これまでに、高速道の鋼床版と同様に、超音波の減衰が激しい CFRP 板材に適用したところ、1～2m 程度の伝搬により超音波ガイドがノイズレベルまで減衰することがわかっていった。このため、重量物や減衰率の高い材料を検査対象とする場合、減衰の少ない別モードの波の送受信の検討、またはより強度の強い磁歪効果の導入が必要であった。

以上の背景から、本研究の目的は、高速道路の広範囲を一度に検査して、早期欠陥検査を実現する技術の開発とした。検査技術のベースには上記のガイド波試験技術を用いるが、対象となる高速道鋼床版の大きな減衰率に対応するため、大きな磁歪効果を有する FeCo 系新磁歪材料とガイド波信号を読み出す超高感度 SQUID 磁気センサを組み合わせる方式について、検討を行うこととした（図 1）。本装置は、鋼床版に磁石で設置できるスマートセンサ式で、非検査時には磁歪式発電機となりエネルギーハーベストを行う装置である。

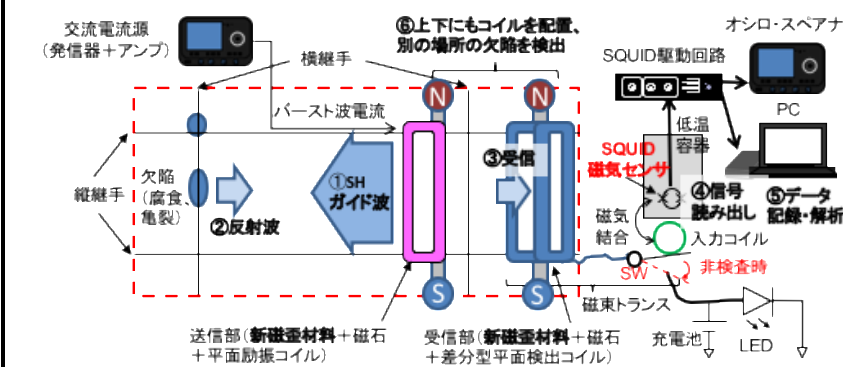


図 1 提案した高速道路鋼床版の磁歪式ガイド波検査装置の概念図。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

以上の装置を開発するため、研究全体の構想は以下の通りとした。

I. 新磁歪材料と SQUID 磁気センサを用いたガイド波送受信機構の開発、評価

II. サンプルへのシステムの適用による欠陥信号計測・解析

III. 磁歪式ガイド波送受信機構の発電性能の評価

本研究では、令和2年度において上記の I～III について研究を進めた。まず、FeCo 系新磁歪材料を導入した。新磁歪材料を、高速道路網床版と同様に減衰の大きな CFRP 板材に貼り付け、永久磁石を配置して磁化した。図1に示すような平面励振コイルを新磁歪材料の上に配置して送信部を構成して励振磁場を与え、板材の T(0, 1)モード波に対応する SH 波を発生させた。同じく磁化した別の新磁歪材料の上に SQUID を配置して受信部を構成し、送信部から発生させた SH 波を測定した。この結果、従来のニッケルを用いた場合より、約2倍の大きさの SH 波が計測され、CFRP 板に設けた貫通欠陥からの反射信号も計測することができた。しかし、SH 波は減衰が大きく、検出範囲は 2 m 弱となった。SH 波を発生する方式では、磁歪材料の磁化と励振磁場の向きが垂直であったが、FeCo 系新磁歪材料は、磁化磁場と励振磁場が平行となった方が、垂直より約3倍強い磁歪効果が現れることがわかった。

そこで、磁場をより効率よく発生・受信できるフェライトコアを用いた電磁石を磁化および励振に用い、新磁歪材料に対する磁化磁場と励振磁場を平行とする、新しいガイド波送受信技術を開発した。この結果、横波せん断波 SH 波と異なる縦波を送受信することができた。図2に、平面コイルを用いた SH 波の信号と、電磁石を用いた縦波の信号を示す。SH 波の信号より、強度が2倍以上で、群速度が約3倍の縦波信号が得られた。なおかつ縦波信号は、SH 波よりも減衰が緩やかで、測定範囲が4、5倍となることがわかった。図3に CFRP 板材における多点計測の結果を示す。板全体におよそ均一なガイド波を発生・受信できることが示された。これらの結果から、本手法は、減衰の大きな構造物に対して、広範囲検査に適するガイド波の送受信が可能であることがわかった。

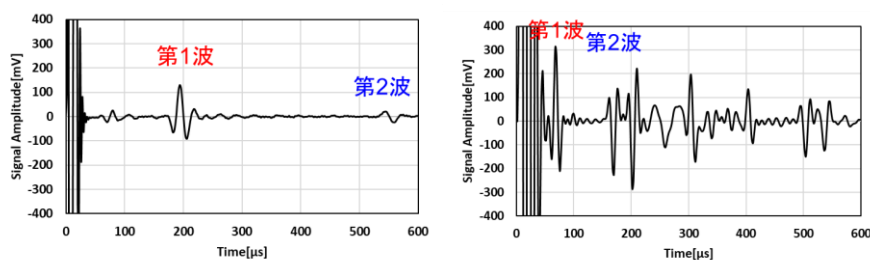


図2 左:CFRP 板を伝搬する SH 波の測定結果。右:新たに提案した縦波の測定結果。縦波の方が強度も大きく、遠方まで伝搬した。

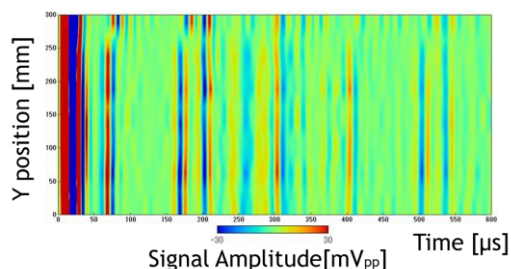


図3 CFRP 板を伝搬する縦波の多点計測結果。超音波試験の”B-scan”に相当する画像で、板をおよそ均一な強度で伝搬する縦波ガイド波分布が計測された。均一な信号分布は、欠陥信号の抽出に適した分布と言える。

電磁石式の検出コイルを SQUID と誘導結合することで、さらに装置の高感度化が実現された。

最後に、上記の新磁歪材料と電磁石を鉄鋼板に配置し、低周波数振動を与えて、磁歪式発電機としての性能を調べた。この結果、最大 600 mV 程度の電圧の発生が確認できた。電磁石を複数個直列に接続して増幅することで、IoT 等の動作に必要な 3.3 V の電圧源として使用できる可能性が示された。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

経費に関しては、申請時の計画では、設備備品として低温真空容器改造、低雑音直流電源、低雑音増幅器、交流発信器など、消耗品費として励振・誘導コイル・電子回路部品、超音波シミュレータである SWAN21 など、その他旅費、管理費を申請し、計 199 万円で申請した。

一方、採択額は 140 万であったため、実績としては、設備備品として、クライオスタット（特注品）改造、低雑音直流電源、低雑音 FET 増幅器評価キットを、消耗品費として SWAN21 GPU 版 9 ヶ月ライセンス、MBT1 U-25spe3/I-50spe 接着品（フェライトコア）などを購入した。この他、書籍、旅費、管理費を合わせて、140 万円の経費を使用することとなった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

今回の研究では、高速道路鋼床版が検査対象であったが、当初、鉄鋼板に FeCo 系新磁歪材料を貼り付け、永久磁石や平面コイルにより磁場を与えた結果、鉄鋼板のほうが FeCo 系新磁歪材料よりも透磁率が高いため磁場を吸収し、FeCo 系新磁歪材料に磁化や励振磁場が与えられず、ガイド波を発生させることができなかった。

そこで、まずは同様に減衰の大きな非磁性材料である CFRP 板を対象として、ガイド波送受信技術の開発を行なった。その後、他研究費で購入した電磁界シミュレータ JMAG を用いて電磁界解析を行なった。今回開発したコアを鉄心にもつ電磁石を用いる場合、1 mm 程度の厚さの空間を鉄板と FeCo 系新磁歪材料に導入することで、電磁石と新磁歪材料に有意な磁路が形成され、鉄板に吸収されることなく、磁場を新磁歪材料に印加できることがわかった（図 4）。現在、空間の代わりに非磁性金属板を入れて磁歪効果を鉄板に伝える方法により、鉄鋼板でも今回のガイド波送受信を実現できるよう実証を進めている。鉄鋼板でのガイド波送受信が実証できれば、鋼床版検査への適用可能性の検討を進めていく予定である。

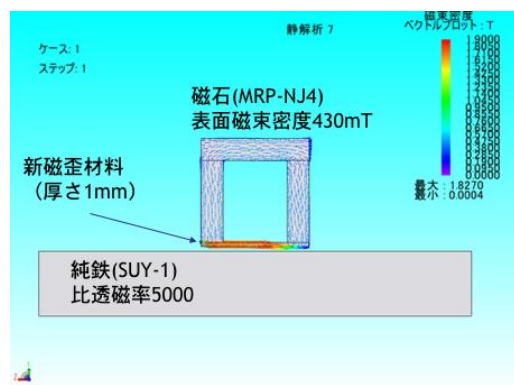
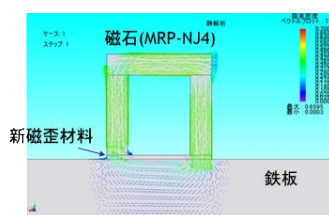


図 4 電磁界シミュレータによる新磁歪材料の磁化の検討。左：鉄板と新磁歪材料の間に空間を設けることで、新磁歪材料を通るように



磁路が形成される。右：鉄板に直接新磁歪材料を貼り付けると、透磁率の高い鉄板に磁束が吸収される。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【国際会議発表】

- [1] Y. Hatsukade, K. Watanabe, S. Masumitsu, and T. Munkhnyam, "Novel Ultrasonic Guided Wave Testing Technique for Carbon-Fiber Reinforced Plastics utilizing Magnetostriction and HTS-SQUID Gradiometer", 33nd International Symposium on Superconductivity (ISS2020), ED1-3, Dec. 1, 2020, Tsukubo (online), Japan, Contributed oral.

【国内会議発表】

- [1] テムレン, 増満 征士, 渡邊敬祐, 孫文旭, 廿日出好, 「FeCo 系新磁歪材料を用いた板材のガイド波試験技術の開発」, 第 33 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム (SEDA33) 論文集 SEAD33-92, pp.301-304, 2021 年 5 月 21 日, Web 講演
- [2] 廿日出好, 東雄貴, 渡邊敬祐, 林泰地, 上本歩樹, 「超伝導 SQUID 磁気センサと超音波ガイド波を用いた CFRP の非破壊試験に関する検討ーその 1ー」, 一般社団法人日本非破壊検査協会 2019 年度 秋季講演大会 講演概要集, 超音波計測・評価技術 (1) - 3, pp.11-12, 2019 年 11 月 12 日, RCC 文化センター, 広島, 口頭発表.
- [3] 廿日出好, 東雄貴, 渡邊敬祐, 「高温超伝導 SQUID を用いた板材のガイド波試験技術 - その 1-」, 第 98 回 2019 年度春季低温工学・超電導学会 講演概要集, 3C-p03, pp.176, 2019 年 5 月 30 日, ノバホール, 茨城, 口頭発表.