研究成果報告書

研　究　題　目		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	実　施　年　度 平成 28-29 年度
代表研究者	所属	近畿大学工学部	
	氏名	廿日出　好　　印	

１．研究の目的・背景

原子力発電所などの過酷な環境で用いられる配管や格納庫は、人がアクセスできない部分が多く、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、早期検出が大変困難である。代表研究者は、1 MHz までの広い測定帯域と半導体センサより 3 桁以上の超高感度を有する高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた非破壊検査の研究を行ってきた。本研究では、上記のようなプローブでの直接アクセスが困難な配管などの構造物に対し、超高感度 SQUID 磁気センサと電磁波による超音波振動を組み合わせたリモート非接触式の非破壊検査技術の開発を提案する。本技術は、超高感度磁気センサの磁気計測をベースとした電磁・超音波混合方式の新技術であり、リモートかつ非接触で従来より広範囲の配管を検査し、減肉やひび割れ等の欠陥をより早期に検出できる可能性をもつことが大きな特徴である。以上の特徴を活かして、①機器の動作停止が不要で、②広い範囲の高速検査可能、③非接触式のため検査作業の簡易化・短時間化、などのメリットを有する新技術を開発し、社会基盤設備の安全性を高めることに貢献することを目指す。

上記の研究の背景で示したように、人の手で直接アクセスが困難な原子力発電所の配管や格納庫などの構造物に発生する欠陥（亀裂や減肉など）をリモートかつ非接触で早期発見する技術として、超高感度な磁気センサを用いて振動由来の磁気信号を計測する、電磁・超音波混合方式の新しい非破壊検査技術の開発がこの研究の目的である。配管に超音波ガイド波すなわち振動を発生させる原理は、1A 未満の電流で効率よくガイド波を発生できる磁歪方式を適用する。ここでは、磁歪効果の大きなニッケルを用いる。ニッケル薄板をあらかじめ管周に会う長さに切り出し、長手方向に磁化して管に貼り付ける。この周りにコイルをリボン上に巻き付け、10～100 kHz のバースト波電流を印加して電磁場を発生させることでニッケルに磁歪効果を生じさせる。これによりニッケルとコイルがガイド波送信器として機能する。ニッケル板と誘導コイルや圧電式超音波プローブを用いた先行研究では T 波や F 波がガイド波として用いられているが、欠陥の検出・位置同定が容易な、群速度一定の T(0, 1)モードガイド波を本研究では選択する。ガイド波の受信には、同様にニッケルを受信部に貼り付け、ガイド波を受信した際に磁気信号に変換する。この磁気信号を SQUID で高感度検出する。

以上より、本研究では、平成 28 年度および 29 年度において、①磁歪式超音波振動発生・磁気検出を行う非破壊検査装置プロトタイプの開発、②欠陥により発生する反射波を計測し信号解析を行えるソフトの開発、③非接触で振動を発生させる超音波発生機構の開発・導入、④種々の欠陥による磁気信号計測・データ蓄積による欠陥信号のデータベース化、を行っていくことを申請時に計画した。これらの研究・開発を行い、特許申請なども行いながら、将来的には実用的なプロトタイプ機の開発、企業への技術移転などを行っていくことが研究の全体構想となる。

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）

平成 28 年度は、上記計画に則して、①プロトタイプ検査装置の開発、②欠陥信号計測、および信号解析ソフトの開発を行った。これまでに、図 1 に示すような、磁歪式送信器で T(0, 1)モードガイド波を発生させ、これを受信部の磁化したニッケルの磁歪効果により磁場に変換し、高温超伝導 SQUID 磁気勾配計で計測するプロトタイプ装置を開発した。試料としてアルミ配管を購入し、人工欠陥を設けて上記装置により計測を行った。その結果、図 2 に示すように、欠陥に由来する反射信号を計測することができた。測定データから、誘導コイルや圧電式超音波プローブに対して、1～2 桁 S/N が優れていることを示した。また、LabVIEW ソフトと DAQ を用いて、SQUID 出力電圧を加算平均して計測・PC に記録するシステムを開発した。本ソフトには、測定データに対して、短時間フーリエ変換およびウェーブレット変換を行い、欠陥信号を解析するモジュールも追加した。

平成 29 年度は、③非接触超音波発生機構の開発、④種々の欠陥による磁気信号計測に関する研究を行った。ここでは、配管の多くが鉄・鉄鋼などの磁性体であり、ニッケルを貼り付けることなく、配管自体の磁歪効果を用いて T(0, 1)モードガイド波を発生させる技術を開発した。ここで、配管の磁化方法を効率よく検討するため、電磁界解析ソフト JMAG を用いて配管の磁化分布をシミュレートし、最適な磁化方法を検討した（特許申請予定）。この手法により、非接触で電磁波を与えた管に T(0, 1)モードガイド波を発生し、振動由来の磁気信号を SQUID で計測することが可能となった。また、欠陥の大きさや位置を変えて欠陥反射波を計測し、管断面における欠陥の欠損率に、反射信号が比例することを示した（図 3）。また、管周囲を全周検査することで、欠陥の軸方向位置だけでなく、周方向位置の推定も行える可能性を示した（図 4）。以上より、当初計画をほぼ達成できたと評価される。

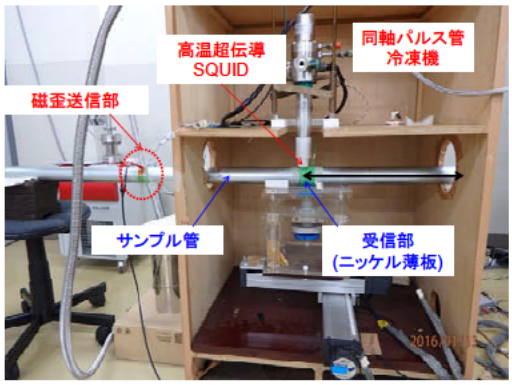

図 1　配管検査装置プロトタイプ

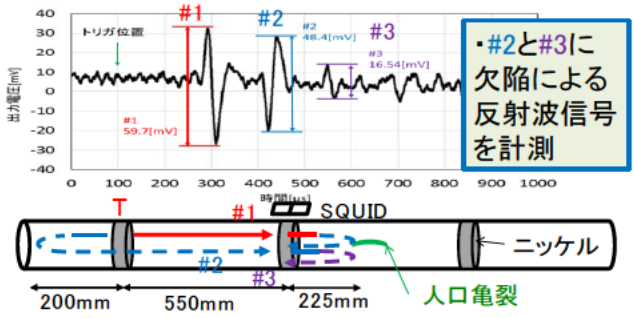

図 2　軸方向亀裂サンプルの測定結果

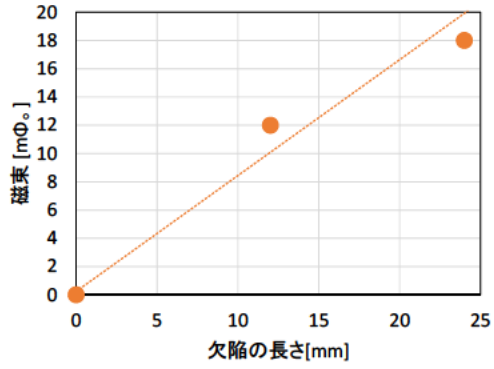

図 3　欠陥の長さと磁気信号強度の関係

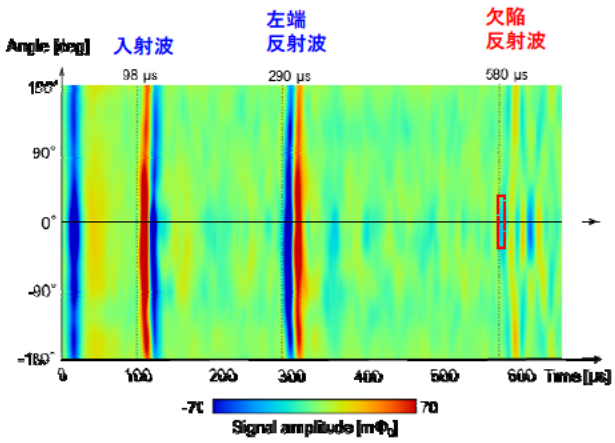

図 4　配管の全周検査結果。点線は欠陥部に相当

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、発信器、電力増幅器、マルチファンクション DAQ など、消耗品費として磁性・非磁性配管、電子部品、解析用ソフトなど、その他印刷費、旅費、管理費を申請し、計 170 万円で申請した。

一方、実績としては、大学経費や科研費など他の予算で発信器等は購入できたため、設備備品として、超音波ガイド波を生じさせるために必須な 1 MHz バイポーラ電源、消耗品費としてアルミパイプ・鉄パイプの磁性・非磁性配管と電子部品を購入した。解析用ソフト（LabVIEW）については別予算で購入したものを使用した。なお、SQUID の故障があり、これを修理するのに、ウェッジツール、SQUID マウント用サファイヤステージ、Al-Si1% TABN-SR Wire が必要となったため、計画にはなかったが、これらを消耗品費で購入した。この他、旅費、管理費を合わせて、予定通り 170 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）

上記２．の通り、予定していた研究計画の凡そを実施できたが、以下のような将来展望が考えられる。まず、対象配管自体を磁化して、非接触で T(0, 1)モード超音波ガイド波を発生させる技術については、SQUID での高感度計測と合わせて特許を申請予定であるが、技術的にはまだブラッシュアップできる部分がある。また、配管以外にも板材や局面を持つもの、別の構造物にも適用可能と考えられるため、電磁界解析によるシミュレーションと実験を合わせて、さらに技術の洗練・展開を行っていく予定である。本研究では、人工欠陥を設けて欠陥反射信号のデータを取得したが、実際の腐食など、現実に問題となっている実欠陥については、今後それらを対象として、ここで開発したシステムを用いて測定を行ってデータベース化を行っていく必要があると考えている。さらにその後と展開として、現場で適用できるような実用的プロトタイプ検査機の開発、企業への技術移転などを行っていくことが、実用化の道筋になると考えられる。

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）

【査読付き国際会議論文】

[1] 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., Vol. 28, No. 4, pp. 1-5, Jun. 2018.

[2] **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenaga, S. Adachi, and K. Tanabe, ”HTS-SQUID NDE Technique for Pipes based on Ultrasonic Guided Wave”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol. 871, p. 012072, Jul., 2017.

[3] N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenaga, **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, Vol. 871, p. 012074, Jul., 2017.

[4] **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., Vol 27, No.4, p. 1600104, Jun., 2017.

【国際会議プロシーディングス】

[1] **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenaga, ”Ultrasonic Guided Wave Testing Based on High Sensitive SQUID Magnetic Sensor”, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 37, 3E2-1, Nov. 2016.

【国際会議発表】

[1] **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) Program & Abstracts, EDP1-8, Dec. 16, 2017, Tokyo, Japan (poster).

[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”, EUCAS2017, 1EP3-24, Sep. 18, 2017, Geneva, Switzerland (Poster).

[3] **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) Program & Abstracts, ED3-3, p.109, Dec. 15, 2016, Tokyo, Japan (Oral).

[4] 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) Program & Abstracts, EDP1-1, p.201, Dec. 15, 2016, Tokyo, Japan (Poster).

[5] **Y. Hatsukade**, N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, and S. Kanenaga, ”Ultrasonic Guided Wave Testing Based on High Sensitive SQUID Magnetic Sensor”, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 37, 3E2-1, Nov. 18, 2016, Pusan, Korea. (Oral)

[6] **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), 2EPo2C-07, Sep. 6, 2016, Denver, Colorado, USA. (Poster)

【国内会議プロシーディングス】

[1] 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，信学技報（IEICE Technical Report），Vol.116，No.410，SCE2017-38，pp.39-43，2018 年 1 月 31 日，東京.

[2] 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　資料，UT-00133，pp..23-28，2017 年 6 月 29 日，広島.

[3] 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）講演論文集，4-2-05，pp.231-234，2017 年 5 月 18 日，岡山.

[4] 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）講演論文集，18B1-4，pp.106-108，2016 年 5 月 18 日，東京.

[5] 廿日出好，増谷夏輝，寺西祥汰，政本健，兼永翔也，「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 3」，電子情報通信学会　超伝導エレクトロニクス研究会，信学技報（IEICE Technical Report），Vol.116，No.410，SCE2016-40，pp. 7-12，2017 年 1 月 19 日，東京.

[6] 増谷夏輝，寺西祥汰，政本健，兼永翔也，廿日出好，「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 2」，電子情報通信学会　超伝導エレクトロニクス研究会，信学技報（IEICE Technical Report），Vol.116，No.175，SCE2016-26，pp. 75-79，2016 年 8 月 9 日，東京.

【国内発表】

[1] 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」，4-2-10，2018 年 5 月 23 日，長野，口頭発表.

[2] **廿日出好，増谷夏輝，東雄貴，佐藤和哉，吉田太郎，安達成司，田辺圭一，「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 3-」，第 65 回応用物理学会春季学術講演会，19p-B303-18，2018 年 3 月 19 日，東京，口頭発表.**

[3] **廿日出好，増谷夏輝，東雄貴，佐藤和哉，吉田太郎，「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 2-」，第 65 回応用物理学会春季学術講演会，19p-B303-17，2018 年 3 月 19 日，早稲田大学，東京，口頭発表.**

[4] 廿日出好，「超音波と磁気センサを組み合わせた配管のリモート・非接触検査技術」，近畿大学工学部研究公開フォーラム 2016、2016 年 10 月 31 日，広島.

[5] 寺西 祥汰，廿日出好，他，「SQUID 磁気センサを用いた配管の超音波ガイド波検査 その 1」，第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム，第 18 回 HISS 論文集，pp.325-327，2016 年 11 月 19 日，山口，ポスター発表.（HISS 優秀研究賞を受賞）

[6] 増谷夏輝，寺西祥汰，政本健，兼永翔也，廿日出好，「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 2」，電子情報通信学会　超伝導エレクトロニクス研究会，信学技報（IEICE Technical Report），Vol.116，No.175，SCE2016-26，pp. 75-79，2016 年 8 月 9 日.