

(200) 電子

高温超伝導 SQUID グラジオメータを用いた

磁性配管の非接触ガイド波送受信技術の開発

Non-contacting Ultrasonic Guided Wave Transceiver for Ferromagnetic Pipes using High-Temperature Superconductor SQUID gradiometer

渡邊 敬祐[†]

林 泰地[†]

上本 歩樹[†]

東 雄貴[†]

廿日出 好[†]

Keisuke Watanabe[†]

Taichi Hayashi[†]

Ibuki Uemoto[†]

Yuki Azuma[†]

Yoshimi Hatsukade[†]

[†]近畿大学 工学部

1 概要

我々は、超高感度な磁気センサである高温超伝導 (High-temperature superconductor: HTS) 超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID) 勾配計 (グラジオメータ) [1]と、ニッケルの磁歪効果を利用した磁歪式超音波ガイド波送受信技術[2]を組み合わせ、配管のリモート欠陥検出技術の開発を行ってきた[3, 4]. これまでの研究では、長手方向に磁化したニッケル薄板をサンプル金属配管の一部に一周貼り付け、これを磁歪式送受信器として用いていた. このため、完全非接触ではなく、コーティングや断熱材などが存在する、直接ニッケル板を貼り付けることができない配管への適用は困難であった. 一方、配管の多くは磁性管であり、管の一部を一周均一に磁化できれば、ニッケルを貼り付けることなく、管の磁化を使ってねじれ横波である T (0, 1)モードガイド波を発生できるのではないかと考えた.

本研究では、まず大きな磁歪効果をもつニッケルのシームレス管を対象とし、ニッケルの磁化特性を導入した電磁界解析を行い、管を1周に渡って均一に磁化する方法を検討した. 次に、開発した手法を用いてニッケル管を磁化し、ニッケルを貼り付ける従来法の T(0, 1)モードガイド波送受信技術を応用し、発生したガイド波を HTS-SQUID グラジオメータを用いて1周に渡って計測することで、開発手法の評価を行った.

2 ニッケルの磁化特性を導入した電磁界解析による磁化方法の検討

まず、実験サンプルとして、純ニッケルのシームレス管を特注で用意した. 管は外径 34 mm, 厚さ 0.5 mm, 長さ 1010 mm である. この管に T(0, 1)モードガイド波を発生させるには、従来法で長手方向に磁化したニッケルを管一周に貼り付ける場合と同様の周方向磁化を管に発生させる必要がある. それには、管の一部を一周均一に磁化し、磁

化磁場を取り去った際に、ニッケルで十分な磁歪効果を得る必要がある. このため十分な大きさの残留磁化を管内に発生させる必要があると考えられる. しかし、管内部に発生する残留磁化を実験的に測定するのは困難と考えられる. そこで、ここでは、使用するニッケルの磁化特性を調査し、それを用いて電磁界解析を行い、管を均一に磁化する手法、および磁化した際の残留磁化強度について検討した.

2.1 ニッケルの磁化特性

前述の純ニッケル管とおよそ同等の特性と考えられる厚さ 0.2 mm の純ニッケル板から 5 mm × 25 mm の小片を切り出し、岡山大学金錫範教授・植田浩准教授の協力のもとでニッケル小片の BHカーブ測定を行った[5]. 測定した B-H カーブを図 1 に示す. 装置の仕様上、磁気飽和が生じない範囲で印加可能な磁場 H は約 12 kA/m であり、その際の残留磁束密度は約 350 mT であった.

2.2 電磁界解析

電磁界解析シミュレータ JMAG[6]を用いて、ニッケル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. JMAG は 3 次元解析が可能な電磁界シミュレータであるが、磁性材料のヒステリシス磁化特性を導入する解析は 2 次元に制限される. このため、図 2(a)に示すような 2 次元モデル

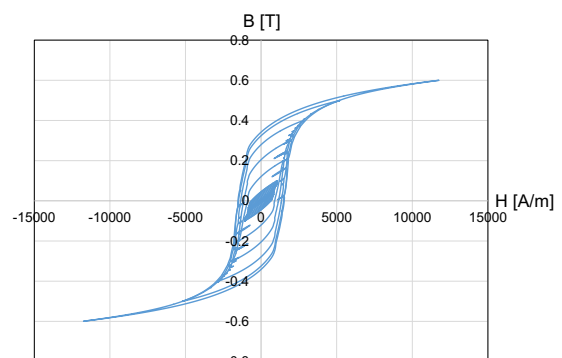


図 1 測定したニッケル小片の BH カーブ

でのニッケル管の磁化を模擬した。図に示すように、磁極が上下逆向きの電磁石のペアをニッケル管両側に設置し、管を回転させることで管の全周磁化を行う方法を試験した。用いた解析方法は2次元過渡解析で、図に示すようにメッシュは自動分割し、要素数 1754、接点数 1168、時間分割は 0.05 s 間隔に設定した。管は用意したニッケル管と同じサイズとし、材料はマニュアルで作成し、磁化特性として、図 2(b)に示す前述の磁化計測結果から得られた BH カーブの一部を手動で解析に導入した。管からそれぞれ 1 mm 離れた場所に配置した 2 個の電磁石は、幅 8 mm、高さ 12 mm に設定し、それぞれコイルを逆向きに 100 回巻いた空芯電磁石とした。解析は以下 3 パターン行った。

- ① 両コイルに 15 A の電流を 0～6 s の間通電し、6.05 s に電流量が 0 A となるように線形減衰させる。管は回転させない。
- ② 両コイルへの電流値は①と同じく 0～6 s で 15 A を通電した後 6.05 s に 0 A とし、0～6 s の間に管を管軸中心に 0.5 rps の速度で 3 回転させる。
- ③ 両コイルへの電流値は、0～2 s で 15 A、2.05～4 s で 10 A、4.05～6 s で 5 A と段階的に減衰させていき、6.05 s に 0 A とする。管は②と同じく、0～6 s の間に等速で 3 回転させる。

解析結果の例を図 3(a)～(c)に示す。同図(a)は①の電流一定で管を回転させなかった場合、(b)は②の電流一定で管を 3 回転させた場合、(c)は③の電流値を段階的に減衰させながら管を 3 回転させた場合である。全て電流を流した後 0 A にした 7 s 時点での磁束密度分布を示している。なお、管がないモデルについてシミュレーションを行った場合、15 A の電流を両電磁石に流した際、発生磁場の最大値は約 7 kA/m であった。解析結果が示すように、管を回転させない図 3(a)の場合、管内の残留磁束密度分布は不均一となり、管上下に最大 27 mT の磁束密度が現れた。一方、管を回転させた同図(b)の場合、管全周に渡って比較的均一に近い周方向のベクトルを有する磁束密度分布が得られ、磁束密度の最小値は約 237 mT、最大値が約 248 mT となった。さらに電流値を段階的に減衰させた同図(c)の場合、磁束密度の最小値は約 245 mT、最大値が約 262 mT と(b)の結果と同等の均一性が得られ、磁束密度強度はわずかながら増大した。

3 実験による手法の評価

上記解析により、電磁石 2 個による磁場中で管を回転させながら磁化すれば、管内部を比較的均一に磁化できることが示された。そこで、実際に図 4 に示す、開閉可能な手錠型ボビンの両側に、解析モデルと同等サイズの 100 回手巻きした空芯

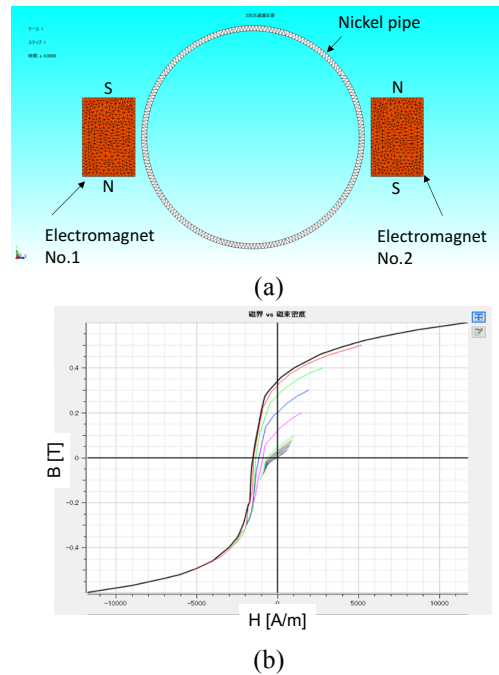


図2 (a)JMAG 解析モデル, (b)導入した BH カーブ

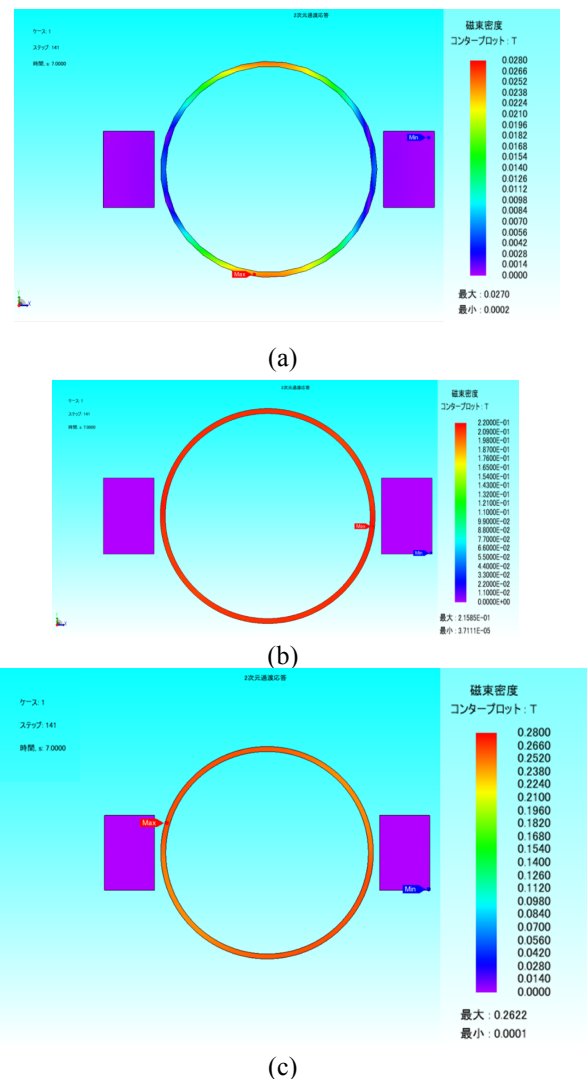


図3 JMAG による解析結果 (a)条件①の結果, (b)条件②の結果, (c)条件③の結果

電磁石を作製した。導線は線径 0.6 mm のエナメル線を使用した。作製した電磁石に 15 A の直流電流を通電し、発生した磁場を、電磁石の外側近傍でホール素子で測定した。この結果、約 78 mT の磁場が測定された。上記 JMAG を用いて、管を設置しない状態で、実験と同様の電流条件で電磁石近傍の同位置の磁束密度を解析した結果、約 88 mT となり、実験結果とおおよそ一致した。

実験は、上記の解析結果を受けて、以下の 2 通りで行った。

- A) 手錠型ボビンの両電磁石が管を挟む状態として、15 A の電流を流しながら、約 6 秒かけて管を 3 回転させた。約 6 秒間の磁場印加後（3 回転終了後）、電流を 0 A にスイッチオフした。
- B) ①と同様の状態に電磁石を設置し、15 A の電流で 2 秒、10 A に切り替えて 2 秒、5 A に切り替えて 2 秒間磁化しながら、管を 2 秒に 1 回回転させた。3 回転終了後、電流をオフした。

T (0, 1)モードガイド波の送受信を行うため、サンプルニッケル管の両側から 350 mm の 2 カ所を、上記方法で磁化した。ニッケル管左側の磁化部に 26 回巻コイルを形成して T(0, 1)モードガイド波の送信部とした。右側の磁化部は受信部とした。ここで用いた実験装置は図 4 に示す通りである。本システムは、HTS-SQUID グラジオメータ（勾配計）、SQUID を冷却する同軸パルス管冷凍機と一体化

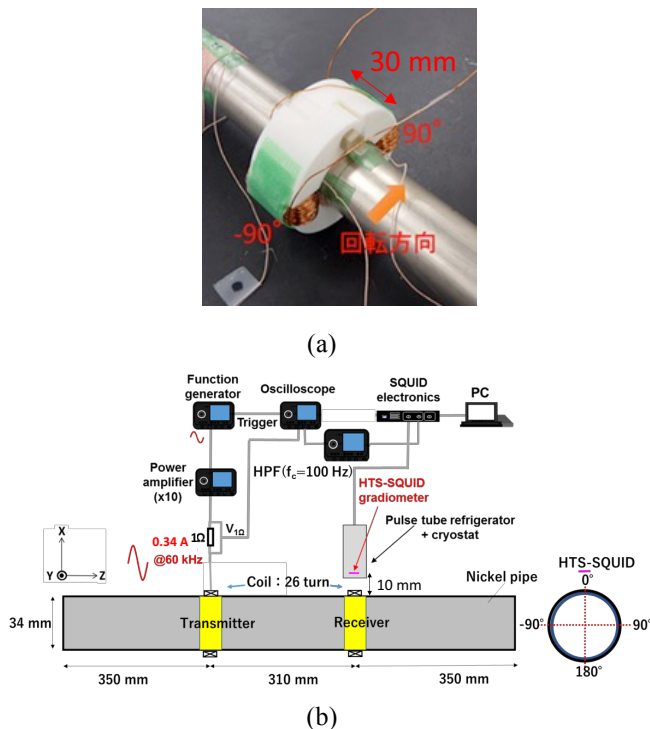


図 4 (a)磁化用コイルとボビン、(b)HTS-SQUID グラジオメータを用いた非接触ガイド波計測装置

されたクライオスタット、SQUID 駆動回路、発信器と電力増幅器、オシロスコープや PC などから構成した。HTS-SQUID グラジオメータは、管のガイド波受信部として磁化した場所の上に、約 10 mm のリフトオフ（管と冷凍機クライオスタット最小距離 8 mm + SQUID とクライオスタット底面間 2 mm）で設置した。グラジオメータは、鉛直方向磁場 B_z の管軸方向勾配 dB_z/dz を測定する向きに配置した。

上記装置を用いて、送信部に振幅 0.34 A、周波数 60 kHz の正弦波バースト波を一定間隔で繰り返し印加してガイド波を発生させ、管を 45°毎に回転させてガイド波由来の磁気信号を SQUID で計測するガイド波全周計測を行った。S/N 向上のため、256 回の加算平均を行ってからデータを PC に記録した。上記 A)と B)の磁化による、それぞれの測定結果を図 5(a), (b)に示す。図のコンターマップは、-180°~+180° までのそれぞれの測定角度で測定した時間波形を角度に応じて配置した二次元磁束密度勾配分布である。どちらの結果でも、およそ全角度に渡って均一に近い入射波#1 が約 103 μ s から、左端での反射波と#1 を発生させた入射波の右端での反射波が重なった#2 が約 336 μ s から、#2 を発生させた左端反射波のさらなる右端反射波#3 が約 570 μ s から計測された。測定結果

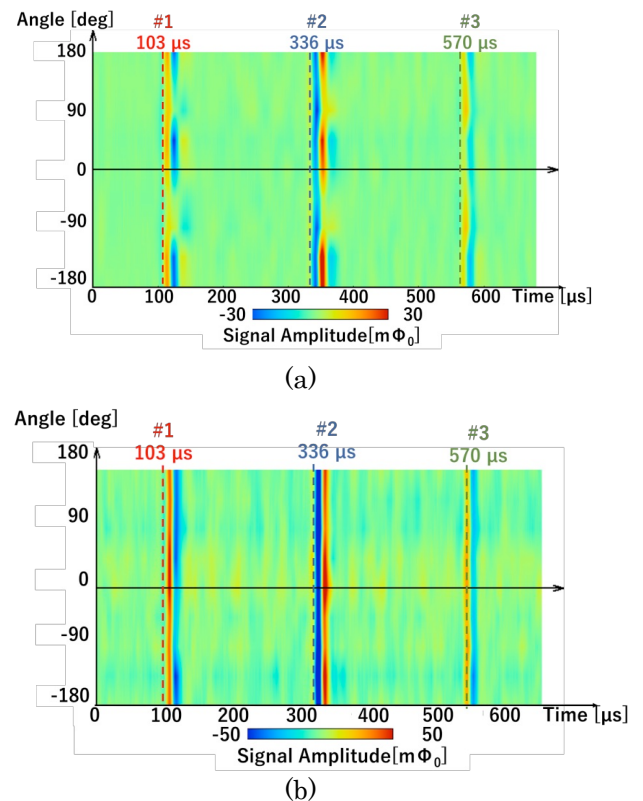


図 5 HTS-SQUID グラジオメータによるニッケル管の全周検査結果 (a)磁化法 A)を用いた場合、(b)磁化法 B)を用いた場合

から、発生したガイド波の群速度は約 3000 mm/ms となり、一般的なニッケルの横波速度 2970 mm/ms とほぼ一致した。両結果を比較すると明らかなように、解析結果でより高い磁束密度強度と高い均一性が得られた B)での磁化方法を用いた図 5(b)に示す結果の方が、より高い均一性を有する磁束密度勾配分布となった。図 5(a)に示す結果では、 $\pm 90^\circ$ 付近で波の前半が大きく後半が小さい、という不均一性が現れており、これは、電磁石の回転を終了させた位置が $\pm 90^\circ$ 付近であったため（電磁石の初期位置も $\pm 90^\circ$ とした）と考えられる。

以上の結果より、上記方法 B)で磁化した場合の方が、送受信部ともに管 1 周に渡ってより均一に磁化されており、比較的均一な T(0, 1)モードガイド波を送受信できている可能性が示唆された。

4 まとめ

本研究では、ニッケル薄板の磁化特性である BH カーブを測定し、そのヒステリシス特性を導入した 2 次元電磁界過渡解析を行い、管を磁場中で回転させ、管を比較的均一に 1 周に渡って磁化する方法を模擬・提案した。本手法を用いて磁化したニッケル管のガイド波全周検査を行い、T(0, 1)モードガイド波が発生していることを確認できた。磁化の際、電流値を段階的に減衰させて磁化することで、より均一性の高い磁化と、ガイド波分布が得られることを示した。段階的な磁場減衰により、ニッケル中でマイナーループが描かれると推測され、これが最終的な磁化分布に影響したのではないかと考えられるが、詳細はまだ不明である。現在解析と実験により検討中である。また、本手法を欠陥検出に適用して手法の評価を行っている。ニッケル以外の鉄系・鉄鋼系配管についても適用を検討していく予定である。

参考文献

- [1] A. Tsukamoto, T. Hato, S. Adachi, M. Motoori, M. Sugisaki, K. Tanabe, “Development of Magnetic Prospecting System with HTS SQUID Gradiometer for Exploration of Metal Resources”, ISEC 2015 Proceedings, SQ-O06, 2016
- [2] 田中義和, 池田隆, 他, 「圧電フィルムを用いたガイド波計測の基礎的研究」, 日本機械学会論文集 (A 編), 72 巻 718 号, pp.951-956, 2006.
- [3] Y. Hatsukade, T. Kobayashi, S. Nakaie and N. Masutani, “Novel Remote NDE Technique for Pipes Combining HTS-SQUID and Ultrasonic Guided Wave”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol.27, issue 4, p.1600104, 2017.
- [4] N. Masutani, S. Teranishi, K. Masamoto, S. Kanenaga and Y. Hatsukade, et al., “Defect

Detection of Pipes using Guided Wave and HTS-SQUID”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, Vol.871, p.012074, 2016.

- [5] D. Miyagi, Y. Yunoki, M. Umabuchi, N. Takahashi, O. Tsukamoto, “Measurement of magnetic properties of Ni-alloy substrate of HTS coated conductor in LN2”, Physica C, Vol.468, Issue 15-20, pp. 1743–1746, 2008.
- [6] JMAG : 電磁界解析ソフトウェア
<https://www.jmag-international.com/jp/>