SQUID を用いた非破壊検査装置の開発

Development of a Non-Destructive Evaluation System Using a SQUID Gradiometer

富田 司・荒川 彰・品田 恵・松田直樹・仲野光一・山田康晴・吉田佳一
(株)島津製作所基盤技術研究所, 京都市中京区西ノ京桑原町1 (☎604-8511)

T. Tomita, A. Arakawa, K. Shinada, N. Matsuda, K. Nakano, Y. Yamada, and Y. Yoshida
Technology Research Laboratory, Shimadzu Corporation, 1 Nishinokyo-Kuwabaracho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511

We developed a non-destructive evaluation system consisting of (1) a SQUID integrated with a gradiometer and (2) a cryostat. Since the cryostat contains a thin vacuum space in order to provide high spatial resolution and reduce background noise, the system was used in an unshielded environment. It was found that the system could detect a change in magnetization due to applied stress in SUS304. Simulated subsurface flaws in an aluminum plate were also detected, using an eddy current technique. These results confirmed that the system has high sensitivity and spatial resolution.

Key words: SQUID, non-destructive evaluation, non-magnetic X-Y stage, unshielded environment, tensile test, martensitic transformation, eddy current, subsurface flaw

1. はじめに

超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device; SQUID) は超高感度の磁気センサであり, 物性測定や生体磁気計測^{1), 2)}などの先端分野に広く用いられている。特に生体磁気計測分野では100チャンネルを超える大規模システムが市販されており, 実際に病院や研究機関などで脳機能の計測, 診断に用いられている。

また近年, 航空機や船舶, 原子力施設や超高層建造物の製造, 保守・点検など高い信頼性と精度を要求される非破壊検査の分野でも SQUID の利用が試みられている^{3), 4)}。

今回我々は, 金属材料の劣化の診断, 欠陥の検出を目的として, SQUID を用いた非破壊検査装置の開発を行った。新たに開発した SQUID 磁気センサを用いることにより, 磁気および電磁シールドルームを用いることなく計測が可能となった。本稿では開発した SQUID 非破壊検査装置の概要を示すとともに, 金属材料の損傷・欠陥の計測結果についても報告する。

2. 非破壊検査装置

2.1 システム構成

今回開発した SQUID 非破壊検査装置の外観を Fig. 1 に, そのシステム構成を Fig. 2 に示す。本装置は非破壊検査用に開発した微小領域計測用 SQUID 磁気センサ, SQUID 駆動回路, 底部の厚さが非常に薄いクライオスタット (液体ヘリウム容器), ステッピング駆動式の非磁性 X-Y ステージおよび制御・解析用コンピュータより構成される。

SQUID 駆動回路として非変調型 FLL (Flux Locked Loop) 回路⁵⁾を採用したことにより, 直流から数十 kHz までの広帯域

計測が可能となった。

また, クライオスタットは真空層とそれを挟む内外の FRP の厚さを薄くすることで, 底部の厚さを 2 mm と従来の 1/10 以下にすることができた。その結果, センサから試料までの距離はセンサの実装のために必要な 0.5 mm と合わせても 2.5 mm と小さくすることができ, 空間分解能の向上に効果があった。なお, 液体ヘリウムの容量は約 2.5 l で, 連続 12 時間の測定が可能である。

非磁性 X-Y ステージは, 可動部分にはすべてアルミニウム・リン青銅・テフロンなどの非磁性材料を用いている。また, ステージが移動してもモータの位置が変化しない特殊な構造を考案することにより, 磁性体を内部に含むステッピングモータを X-Y 軸ともに採用することが可能となり, 磁気的なノイズを発生させることなく自由なステップ幅・速度でのステージ駆動が実現できた。走査範囲は X 軸 300 mm, Y 軸 270 mm で, 最小ステップ幅は 0.01 mm である。搭載可能な試料の最大重量は 14 kg で, 高さは 150 mm である。なお, オプションをつけることにより, さらに高さのある試料の測定も可能となっている。

Fig. 1 Non-destructive evaluation system.

Fig. 2 Schematic illustration of the system.

Fig. 3 Microphotograph of the SQUID gradiometer.

Table 1 Various SQUID pickup coil configurations

Type	Pickup coil	Schematic of pickup coil	Inductance L_p [nH]
1	Concentric 2nd-order gradiometer $\phi 2 \text{ mm} \times 1 \text{ turn}$ $\phi 1 \text{ mm} \times 4 \text{ turns}$		53.9
2	Planar 1st-order gradiometer $\phi 2 \text{ mm} \times 1/2 \text{ turn}$		6.76
3	Two planar 1st-order gradiometers $\phi 2 \text{ mm} \times 1/4 \text{ turn}$		3.38

制御・解析用コンピュータは通常の PC を採用しており、1 台で非磁性 X-Y ステージの制御、SQUID 駆動回路の出力の取り込み、計測結果の解析・表示が可能である。

2.2 SQUID 磁気センサ

微小領域計測用 SQUID 磁気センサの構造を Fig. 3 に示す。微小領域計測用 SQUID 磁気センサは Nb 薄膜により積層された SQUID 素子 (Fig. 3 右端) と、同一基板上に作製された微分検出型のピックアップコイル (Fig. 3 左中央) より構成される。

SQUID 素子は環境磁気雑音を除去するため円形ダブルワッシャータイプとした。またピックアップコイルに直接フィードバック電流をかえす直接帰還方式⁶⁾を採用したことにより、ピックアップコイルに流れる電流が常に零となり、計測磁場への乱れを抑えることができた。

また、微分検出型のピックアップコイルとして Table 1 に示す 3 タイプを作製した⁷⁾。Type 1 は半径の異なる二つのコイルよりなる同心円 2 次微分型のピックアップコイルで、環境磁場雑音のキャンセル効果は高い反面、磁場の絶対量の見積りが困難な欠点を有する。Type 2 は半円状の二つのコイルよりなる 2 分割平面 1 次微分型で、出力が大きく磁場の絶対量の見積りが可能な反面、コイルの配置が点対称ではないことによる不感方向をもっている。それに対して Type 3 は 4 分割平面 1 次微分型の 2 組のコイルよりなり、1/4 円状の対向する二つのコイルより構成されるピックアップコイルが、それぞれ直交する方向に微分の軸をもつように 2 組配置されている。そのため、Type 3 のピックアップコイル全体で見ると Type 2 の欠点であった不感方向をもたず、また二つの SQUID の出

Fig. 4 Pattern of a wire meander sample on a glass epoxy board.

Fig. 5 Magnetic image of the wire meander sample with a current I of 20 mA.

力を解析することにより磁場勾配の方向がわかるという利点も有する。

本論文では Type 1 の同心円 2 次微分型のものを用いている。このピックアップコイルは、 $\phi 2 \text{ mm} \times 1 \text{ turn}$ のコイルと逆向きに巻かれた $\phi 1 \text{ mm} \times 4 \text{ turn}$ のコイルから構成され、検出コイルが xy 平面にあるとき、 $r^2 = x^2 + y^2$ とすると、出力は $\partial^2 B_z / \partial r^2$ で表すことができる。この式から明らかのように、理想的な場合には空間的に一様な磁場のみならず平面方向の 1 次勾配磁場まで除去することが可能である。さらに今回、ピックアップコイルを薄膜上で作製したため、二つのコイルを作製精度良くつくることが可能となり、環境磁場雑音のキャンセル効果が向上した。そのため、磁気および電磁シールドルームを用いることなく計測が可能となった。なお、この同心円 2 次微分型ピックアップコイルの磁束-電圧変換係数 (理論値) は $1.4 [\text{pT/V mm}^2]$ である。

3. Meander の計測

3.1 Meander および実験方法

今回開発した SQUID 非破壊検査装置の検出特性を確認するため、Meander に直流電流を印加し、発生した磁場を計測した。Fig. 4 に今回測定に用いた Meander の概略図を示す。配線パターンの隣接する線との間隔は 5 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm の 4 通りで、線幅はすべて 0.3 mm である。4 通りの間隔の配線パターンを直列につなぎ、20 mA の直流電流を印加した状態で X-Y ステージを二次元的に走査し、発生する磁場を計測した。走査の範囲は 30 mm $\times$ 150 mm で、ステップ幅は XY 軸とも 0.5 mm である。このときのセンサと Meander

Fig. 6 Magnetic image of the stainless steel SUS304 (a) before tensile testing, (b) after tensile testing in the region of elastic deformation, and (c) after tensile testing to 15% residual strain.

との距離は約 3 mm であった。

3.2 Meander の計測結果

Fig. 5 に計測結果を示す。隣接する線には互いに逆向きの電流が流れるため、観測される磁場はそれぞれの線の間隔の 2 倍の周期をもつと予想される。図より、確かに線の間隔が 5 mm, 3 mm, 2 mm の領域では、それぞれ 10 mm, 6 mm, 4 mm 周期の磁場パターンが発生していることが明確にわかるが、線の間隔が 1 mm の領域ではそれに対応する磁場パターンが観測できなかった。この原因として、センサと Meander との距離が小さくなったとはいえ約 3 mm あるために、Meander から発生する磁場パターンを分解するには空間分解能が不足しているためと考えられる³⁾。

4. SUS304 の劣化の診断

4.1 試料片および実験方法

今回開発した SQUID 非破壊検査装置により、金属材料の劣化の検出を試みた。

実験に用いた試料はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 材である。試料は幅 25 mm×長さ 300 mm×厚さ 2 mm の板状に加工の後、固溶体化処理を行い引張試験片とした。引張試験は、弾性変形領域は引張荷重で、塑性変形領域は変形量

Fig. 7 Eddy current magnetic image of three flaws (a) at the surface, (b) at a depth of 1 mm, and (c) at a depth of 2 mm.

(残留歪) で制御を行った。

この試験片を引張試験機より取り外し、磁場や電流を印加することなく二次元的走査し、引張試験片の磁場分布を計測した。走査の範囲は 40 mm×200 mm で、ステップ幅は XY 軸とも 1 mm である。このときのセンサと引張試験片との距離は約 3 mm であった。

4.2 実験結果および検討

SQUID 非破壊検査装置による金属材料の劣化の検出結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6(a) は引張試験前の磁場分布で、Fig. 6(b) は弾性変形領域内の荷重 (降伏点の約 80%) を加えた後の磁場分布である。図よりすでに加工誘起マルテンサイト変態に伴うと考えられる磁場分布が観測されていることがわかる。これは、局所的に降伏点を超える荷重が加わったためだと考えられる。Fig. 6(c) は残留歪 15% の引張試験後の結果で、残留歪が増加するに従い、磁場分布が観測される領域の拡大と、磁気分布の振幅の増大が観測された。

5. Al の円孔欠陥の検出

5.1 試料および実験方法

今回開発した SQUID 非破壊検査装置により、金属材料の欠陥の検出を試みた。

実験に用いた試料は Al (A1050) である。試料は幅 30 mm×長さ 180 mm×厚さ 2 mm の板状に加工の後、 $\phi 0.3$ mm, $\phi 1.0$ mm, $\phi 0.5$ mm の三つの貫通穴を 10 mm 間隔でこの順番であけ、穴あき試料とした。また、表面に露出していない欠陥を再現するため、上記の穴あき試料の上に同じ幅と長さで、厚さ 1 mm ないしは 2 mm の Al 板をのせ、欠陥の深さの調整を行った。

クライオスタット底外面には $\phi 1$ mm の渦電流励起用コイルが装備されており、1 kHz で 15 μ T の交流磁場を印加している。

測定は三つの穴の中心を通る直線上を一次元的に行い、走査の範囲は 30 mm でステップ幅は 0.1 mm である。このときのセンサと試料との距離は約 3 mm、励起用コイル試料との距離は約 0.5 mm であった。

5.2 実験結果および検討

SQUID 非破壊検査装置による金属材料の欠陥の検出結果を Fig. 7 に示す。ここではすでに試料のたわみによる信号のドリフトを補正している。Fig. 7(a) は表面に傷のある場合の計測結果で、欠陥による渦電流の乱れにより、それぞれの欠陥の位置と大きさに応じた出力が得られている。それに対して Fig. 7(b) は深さ 1 mm、Fig. 7(c) は深さ 2 mm に欠陥があるときの結果で、 $\phi 1.0$ mm の欠陥は判別できるものの、それ以下の大きさの欠陥の判別は困難である。

6. ま と め

非破壊検査用に開発した微小領域計測用 SQUID 磁気センサ、SQUID 駆動回路、底部の厚さが非常に薄いクライオスタット、ステッピング駆動式の非磁性 X-Y ステージおよび制御・解析用コンピュータより構成される非破壊検査装置を開発した。これを用いて、金属材料の劣化の診断、欠陥の検出について実験を行った。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 新たに開発した SQUID 磁気センサを用いることにより、磁気および電磁シールドルームを用いることなく計測が可能となった。

(2) 専用の SQUID 磁気センサと、底部の厚さが 2 mm と非常に薄いクライオスタットを製作することにより、磁気パターンの検出分解能（分離分解能）を 2 mm まで向上できた。

(3) オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 の引張試験片の測定から、引張りによる加工誘起マルテンサイト変態に伴うと考えられる磁場分布を観測した。このことから、本装置が金属材料の疲労・劣化の診断に有効である可能性を得た。

(4) 渦電流を用いた Al の円孔欠陥の検出を行い、表面に露出した欠陥であれば $\phi 0.3$ mm の欠陥まで検出可能であることが確認できた。また、表面から 2 mm の深さにある欠陥に対しては、 $\phi 1.0$ mm の欠陥まで検出可能であることがわかった。今後、励起コイルの形状や励起周波数の最適化により、より深い場所にある、より小さい欠陥の検出を目指す必要がある。

文 献

- 1) 荒川 彰, 富田 司, 富田 定, 梶原茂樹, 近藤泰志, 吉田佳一, 上田雅之: 第 10 回日本生体磁気学会論文集, 8(1), 56 (1995).
- 2) S. J. Williamson and L. Kaufman: *J. Magn. Magn. Mat.*, 22, 129 (1981).
- 3) 葛西直子: 電学論 A, 115, 663 (1995).
- 4) 中山 哲, 師岡利光, 小田原成計, 清水信宏, 茅根一夫: 電気学会論文誌 A, 115, 1228 (1995).
- 5) D. Drung, R. Cantor, M. Peters, T. Ryhänen, and H. Koch: *IEEE Trans. Magn.*, 27, 3001 (1991).
- 6) K. Shinada, T. Munaka, M. Ueda, Y. Fujiyama, S. Nagamachi, and Y. Yamada: 5th International Superconductive Electronics Conference (ISEC '95), ed. by H. Hayakawa, p. 364 (Nagoya, 1995).
- 7) 松田直樹, 品田 恵, 仲野光一, 富田 司, 荒川 彰, 山田康晴, 吉田佳一: 第 58 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, p. 195 (秋田, 1997).

1997 年 10 月 27 日受理, 1997 年 12 月 18 日採録