

学術論文

インダクション磁気センサを用いた微小金属片検出

Detection of a tiny metal wire using induction gradiometer

田代 晋久^{*1}(正員), 脇若 弘之^{*1}(正員)

Kunihisa TASHIRO (Mem.), Hiroyuki WAKIWAKA (Mem.)

A magnetic contamination detection system based on high sensitive induction gradiometer is presented. This system is free from heavy cooling system, and the magnetic sensor consists of coil and simple electronics only. This paper considers the detection limit of two kinds of wire, SUS304 and Fe. It is found that the detection limit and profile of output signal are differs from the wire material. When the length of wire is 10 mm, our system can detect a SUS304 wire having 0.2 mm diameter, and an Fe wire having 0.1 mm diameter.

Keywords: nondestructive evaluation, magnetic contamination detection system, induction gradiometer

1 緒言

食品内に混入する可能性がある材料の一つに加工機械の破損による鋭利な金属異物が考えられる。耐食性・強度・加工性などで非常に優れた特性を有するステンレス材料のうち、ステンレス生産量の60%を超えるオーステナイト系ステンレス SUS304 は食品ラインで多用されている材料の一つである。しかし、SUS304の抵抗率は銅の100倍程度と高く、渦電流方式の金属異物検査装置では、こうした小片が混入した場合の検出が難しい[1]。こうした問題点を解決する手法の一つとして、HTc-SQUIDセンサを用いた磁性異物検査装置が近年提案されている[1-4]。本来 SUS304 は非磁性であるが、加工時による応力によってマルテンサイト変態し磁性を示すことが知られている。検査対象を磁石による磁界発生装置を通過させた後、SQUIDセンサで残留磁化を計測することで渦電流方式では検出が困難な $\phi = 0.7$ mm以下のSUS304小片を導電性包装の有無に関わらず検出が行える画期的な手法である。しかし、SQUIDセンサを動作させるための冷凍機あるいは液体冷媒のメンテナンスを必要とし、センサと検査対象間のリフトオフが感度限界を左右する。

一方、SQUIDセンサと同程度の感度を有し微弱低周波磁界検出に有利なインダクション磁気センサが知られている[5-9]。著者らは差動構造を有する検出コイルを用いたインダクショングラジオメータ(以下センサ)

を用いることで、液体冷媒を必要とせず、検査対象を検出コイル間に通過できるリフトオフの問題のない磁性異物検査装置について報告を行っている[10-11]。チーズ(直径20 mm程度、長さ50 mm程度)を検査対象とし、磁性異物としてホッチキス(幅0.5 mm、長さ10 mm)を埋め込み、導電性包装(アルミホイル)の有無に関わらず容易に磁性異物を検出できることを確認している[10]。また、ホッチキスの位置とセンサ出力の関係、および励磁磁界強度とセンサ出力の関係に関する検討を行ったところ、磁性の飽和・非飽和を検出していると思われる動作原理が認められた[11]。本報告では試料として長さ10 mmを有するSUS304およびFeの細線に対するセンサ出力波形観測を通じ、材料および線径による検出感度限界を調査した。

2 原理

磁性異物検査装置の動作原理図をFig. 1に示す。本装置はFig. 2に示す一様磁界発生用の多層ソレノイドコイルとFig. 3に示す2つの単層ソレノイドコイルを逆接続した差動構造を有する検出コイルにより構成されている。検出コイルは励磁コイルの発生する一様磁界中に配置し、検査対象を検出コイル内部に通過させる。検出コイルに一様磁界が鎖交しても、検出コイルには誘導電流が流れない。一方、磁性異物の存在により磁界分布が乱されることで検出コイルに誘導電流が流れる。検出コイルに誘導する微弱電流を電圧に変換するセンサの動作原理図をFig. 4に示す。検出コイルに鎖交する磁束のアンバランスは誘導電流として現れ、I-V変換回路で電圧に変換する。検出コイルのパラメ

連絡先: 田代晋久, 〒380-8553 長野市若里4-17-1, 信州大学工学部電気電子工学科,
e-mail: tashiro@shinshu-u.ac.jp

^{*1} 信州大学

ータがインダクション磁気センサ設計で重要な2つのパラメータを決定する。2つの単層ソレノイドコイルのうち、一方のコイルに磁束密度 B [T]が鎖交した場合に誘導される電流 i [A]の比で定義される磁束電流変換係数 T_{ib} はインダクタンスの定義より、

$$T_{ib} = \frac{i}{B} = \frac{NS}{L} \quad [\text{A/T}] \quad (1)$$

として求まる。ここで、 S [m^2]はコイルの平均断面積、 N [turn]は1つの単層ソレノイドコイルの巻数、 L [H]は検出コイルのインダクタンスを示す。一方、検出コイルが持つ抵抗 R [Ω]により、誘導電流はカットオフ周波数 f_c [Hz]

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

を有する一次高域通過型の周波数特性を示す。励磁コイル、検出コイルおよびセンサの仕様を Table 1~3 に示す。励磁コイルは内径 55 mm、外径 146 mm、長さ 165 mm の多層ソレノイドコイルで全長の1/3の領域で中心軸上に偏差 3%以下の一様磁界を発生できる[10]。検出コイルは一様磁界を利用できる空間に合わせた大きさで設計しており、内径 35 mm、外径 36 mm、長さ 25 mm の単層ソレノイドコイルを2つ逆接続している。製作した励磁コイル、検出コイルはインダクタンス、抵抗値の設計値と実測値が相対誤差 3%以下で一致していることを確認している[10]。また、センサの磁束電圧換算係数は 6.63 nT/V という SQUID センサに匹敵する高い磁界分解能を有する。

3 実験方法

今回用いた試料は直径の異なる SUS304 および Fe (ニラコ社製) を用いた。長さは 10 mm となるように切断した。任意波形発生装置 (AFG3022B, Textronix) で発生した正弦波電圧を高精度電力増幅器 (NF4510, NF Corp.) の CC モードを利用して励磁コイルに励磁電流を流す。励磁電流は 1 Ω のシャント抵抗 (アルファテクトロジー) を用いて電圧に変換して読み取る。励磁周波数は 10 Hz とし、励磁磁界方向に長手方向を合わせ、一方の差動コイル内部に置いた。励磁周波数をセンサのカットオフ周波数より低い周波数を選択した理由は、異物による渦電流の影響を避けるためと使用した高精度電力増幅器の電源容量による制限のためである。励磁周波数 10 Hz の場合、今回の装置構成では、50 mT_{pp}

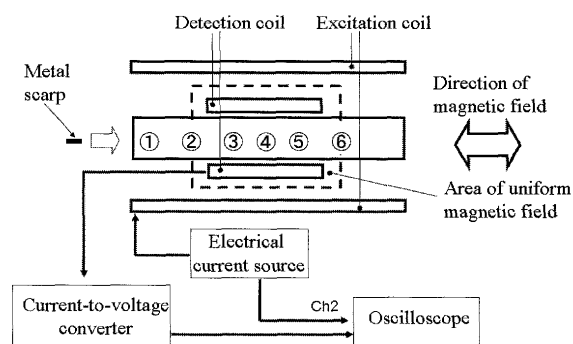


Fig. 1 Schematic diagram of the system. Number of position represents area where to be placed sample.

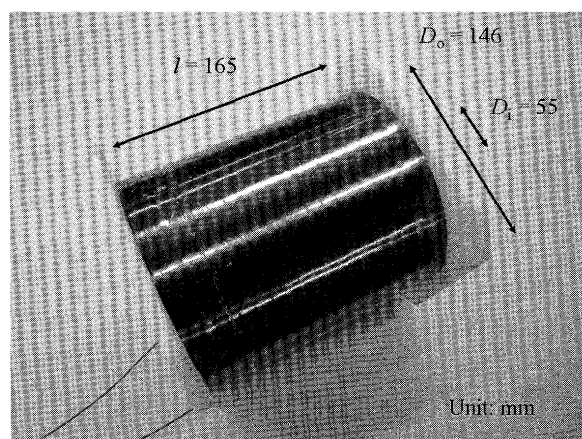


Fig. 2 Our developed excitation coil. The specifications are summarized in Table 1.

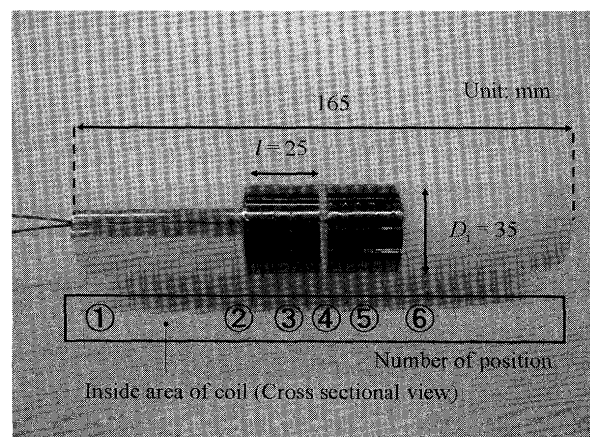


Fig. 3 Our developed detection coil. The specifications are summarized in Table 2. Number of position represents area where to be placed sample.

以上の励磁磁界強度を発生しようとする励磁電流波形が歪む。センサはカットオフ周波数まで 20 dB/oct で感度が上昇するため、磁性異物がない場合にも検出コイルの構造的アンバランスを励磁磁界の高調波成分として出力することを報告している[11]。本実験では励磁磁界強度は $40 \text{ mT}_{\text{pp}}$ とし、磁性異物が無い状態でセンサ出力が零(センサの直流オフセット電圧を除く)となる初期状態とした。励磁電流波形およびセンサ出力はオシロスコープ (TPS2014, Textronix) を用いて DC カップリングで観測した。本センサは原理的に直流磁界を検出しない。しかし、センサが正常動作時には、オペアンプの有する有限のオフセット電圧によって帰還抵抗 R_f に比例した値がセンサ出力される。また、波形をオシロスコープの AC カップリングで観測することでセンサ自体が出力している低周波信号の位相・振幅に影響を与えられ考えられる。センサの正常動作とセンサが出力している低周波信号をそのまま観測するため DC カップリングによる観測を行った。

4 実験結果

同じ線径 $\phi = 0.5 \text{ mm}$ を有する異なる材質の試料について励磁電流波形とセンサ出力の関係を観測した。SUS304 の結果を Fig. 5 に、Fe の結果を Fig. 6 に示す。試料を固定する場所は Position③および⑤の結果を示している。以降、負方向に伸びるセンサ出力をパルス波形と呼び、ゼロクロス点付近でのパルス幅および励磁電流波形との相関に注目する。2 つの材質ともに Position③で励磁電流の減少時、Position⑤では励磁電流の増加時にパルス波形の立下りが観測されるという逆送の関係となった。この結果は、検出コイルの差動構造による特徴を表している。一方、SUS304 は 10 ms、Fe は 25 ms 程度のパルス幅となり、Fe の方が広いパルス幅の傾向を見せた。この結果は検出コイルに鎖交する総磁束量の違いとして理解することができる。

異なる材質の試料について、線径に対する検出感度限界を調べた。試料の設置場所は最もセンサ出力波形変化が見られる場所を選んだ。今回の実験では、SUS304 については Position③、Fe の例については Position⑤が該当した。現在の所、励磁磁界方向と試料長手方向の角度依存性が原因であると推測している。SUS304 の例を Fig. 7 に、Fe の例を Fig. 8 に示す。SUS304 の場合、 $\phi = 0.2 \text{ mm}$ において励磁電流の減少時に僅かなセンサ出力変化が得られたが、 $\phi = 0.1 \text{ mm}$ においてセンサ出力変化は確認できなかった。

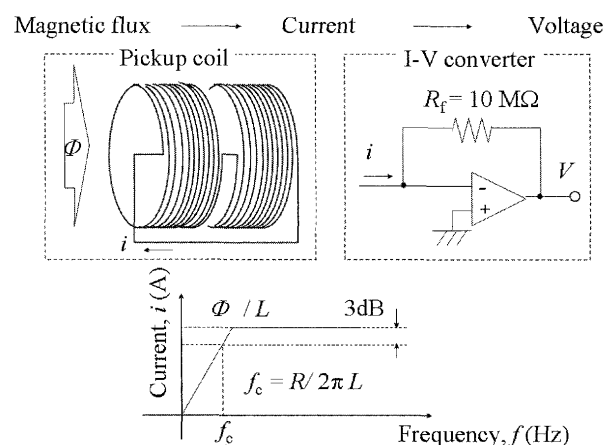


Fig. 4 Schematic diagram of an induction gradiometer with a current-to-voltage converter. If there is an imbalance of magnetic flux density in the detection coil, it is transferred into electric current, and converted into output voltage. The flux-to-current transfer function and the cutoff frequency are defined by the coil properties.

Table 1 Specifications of excitation coil

Inner diameter, D_i [mm]	55
Outer diameter, D_o [mm]	146
Length, l [mm]	165
Diameter of winding coil, δ [mm]	0.5
Spacing factor, β	0.79
Number of turns, N [turn]	30,000
Resistance, R [Ω]	841
Inductance, L [H]	30.5
Transfer function, B_o / I [T/A]**	0.20

* B_o [T]: magnetic flux density at the center

** I [A]: provided electric current

Table 2 Specifications of detection coil

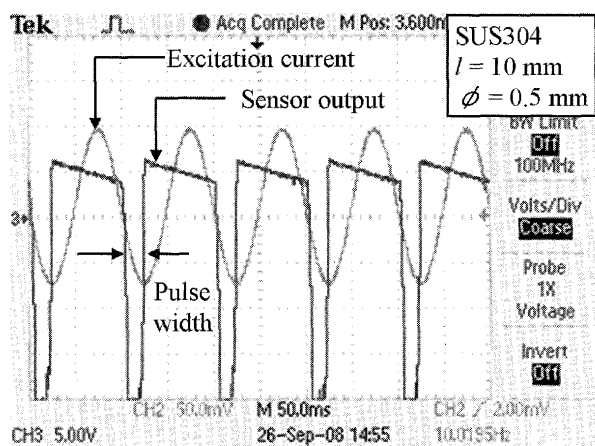
Inner diameter, D_i [mm]	35
Outer diameter, D_o [mm]	36
Length of one coil, l [mm]	25×2
Number of turn, N [turn]	50×2
Diameter of winding coil, δ [mm]	0.5
Mean cross section area, S [mm^2]	989
Self inductance, L_s [μH]	74.5
Combined inductance, L [μH]	112
Combined resistance, R [Ω]	1.01

Table 3 Specifications of induction gradiometer

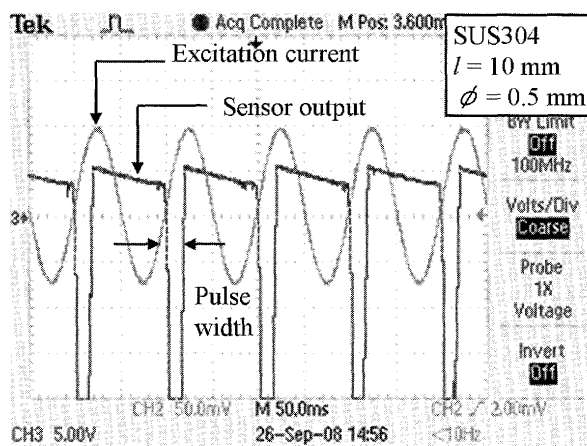
Op-amp	LT1028*
Feedback resistor, R_f [$\text{M}\Omega$]	10**
Cutoff frequency, f_c [kHz]	1.71
Transfer function, T_{ib} [A/T]	663
Sensitivity, $R_f \times T_{ib}$ [V/nT]	6.63

* Input noise voltage density, $1 \text{ nV}/\text{Hz}^{1/2}$ at 10 Hz,
Input noise current density, $4.7 \text{ pA}/\text{Hz}^{1/2}$ at 10 Hz

** High precision resistor; $\pm 1\%$, 100ppm/ $^\circ\text{C}$

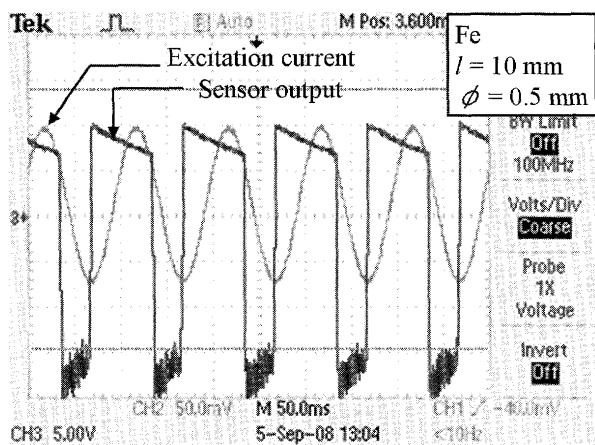


(a) Position ③

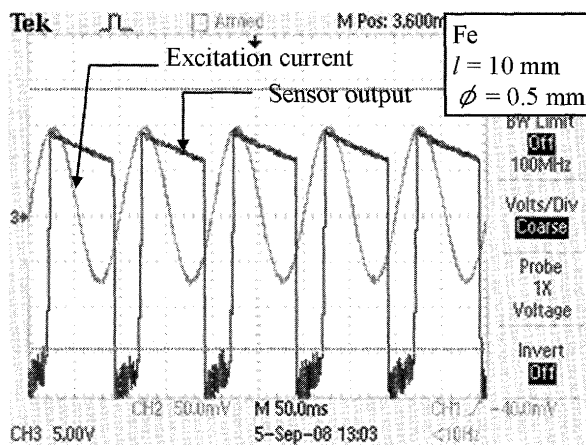


(b) Position ⑤

Fig. 5 Sensor output for a SUS304 wire ($\phi=0.5$ mm), as a parameter of the position.

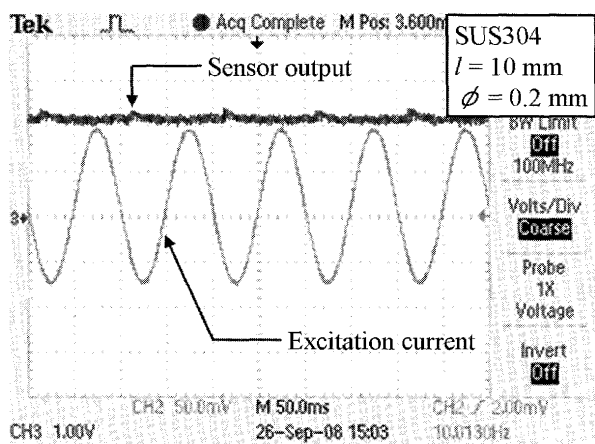


(a) Position ③

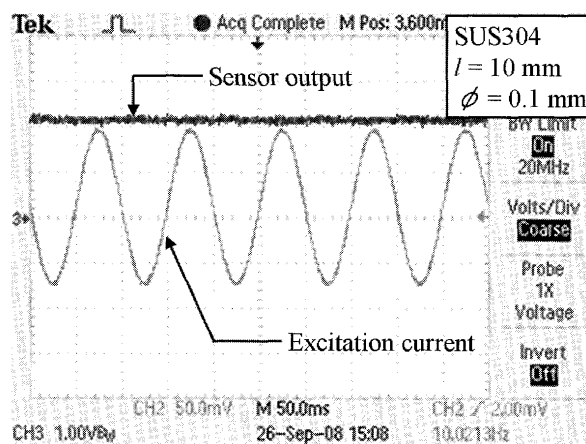


(b) Position ⑤

Fig. 6 Sensor output for an Fe wire ($\phi=0.5$ mm), as a parameter of the position.



(a) $\phi=0.2$ mm



(b) $\phi=0.1$ mm

Fig. 7 Sensor output for a SUS304 wire, as a parameter of the diameter of the wire.

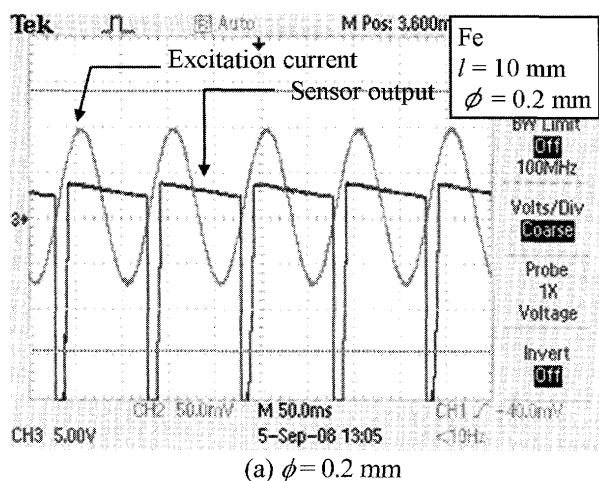
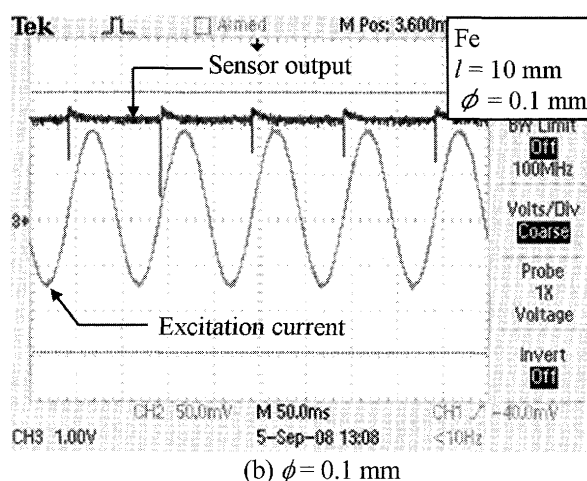
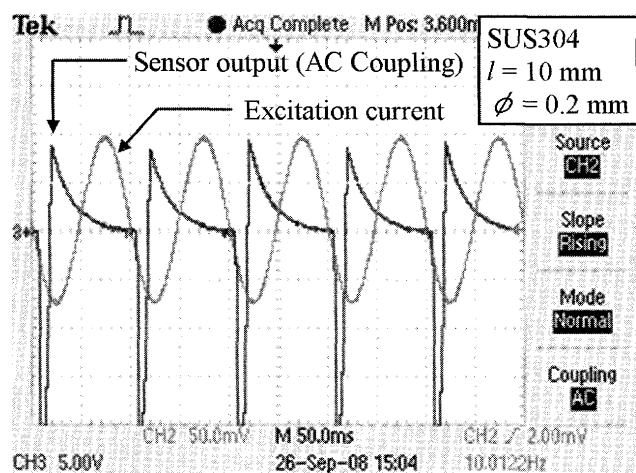
(a) $\phi = 0.2$ mm(b) $\phi = 0.1$ mm

Fig. 8 Sensor output for an Fe wire, as a parameter of the diameter of the wire.

Fig. 9 Sensor output for a SUS304 wire ($\phi = 0.2$ mm). It was observed with AC coupling mode.

Fe の場合、 $\phi = 0.2$ mm において 5 ms 程度と線径が小さくなるにつれパルス幅が狭くなったが、明瞭なセンサ出力変化が得られており、 $\phi = 0.1$ mm においてもセンサ出力変化が確認された。

5 考察

今回の計測方法では、SUS304 の検出限界は $\phi = 0.2$ mm、Fe の検出限界は $\phi = 0.1$ mm 以下という結果が得られた。SUS304 の検出限界となった $\phi = 0.2$ mm の試料について、センサ出力波形をオシロスコープの AC カップリングを用いて観測した結果を Fig. 9 に示す。他の計測条件は Fig. 7(a) と同じであるが、5 ms 程度のパルス幅、15 V を超えるパルス波形の波高値としてセンサ出力波形変化が得られた。Fe の検出限界となった $\phi = 0.1$ mm でも同様に明瞭なセンサ出力波形変化が得られ

た。今回用いたオシロスコープのマニュアルによると、AC カップリングによる低域限界周波数は 10 Hz であった。AC カップリングを用いる場合、DC 成分を遮断する HPF による位相・振幅特性の変化が生じる。明瞭なセンサ出力波形として観測できた理由として、この HPF の周波数特性が起因していたと推測している。一方、SUS304 における $\phi = 0.1$ mm の試料については AC カップリングを用いても明瞭なセンサ出力波形変化は得られなかった。

ここで、検出限界の向上について考察する。今回の実験に用いたセンサは原理的に直流磁界を検出しない。センサの感度を定める磁束電圧換算係数は帰還抵抗 R_f に比例して増加する一方、オペアンプの持つ有限の直流オフセット電圧もそれに比例して増加し、センサ出力飽和を引き起こす。今回の場合、2 V 程度のオフセット電圧が存在するため、HPF を付加した計装アンプによりセンサ出力波形を増幅することで更なる感度は可能である。一方、検出コイルの構造的アンバランスがセンサ出力波形変化をもたらす。AC カップリングを用いて SUS304 における $\phi = 0.1$ mm の試料を観測した結果、検出コイルのアンバランスと磁性異物によるセンサ出力波形変化の違いを明瞭に判別できなかった。解決法として、検出コイルの大型化による磁束電流換算係数の向上およびアンバランスの低減、FFT 等によるセンサ波形の周波数解析が挙げられる。

6 結言

開発した磁性異物検査装置を用いて、長さ 10 mm を有する SUS304、Fe の金属細線を試料とし、センサ出力波形観測から線径に対する検出感度限界を調査した。

以下得られた結果をまとめる。

- (1) 今回の計測法において, SUS304 の検出限界は $\phi=0.2$ mm, Fe の検出限界は $\phi=0.1$ mm 以下であった。
- (2) 逆接続された差動コイルにおいて出力される波形は逆相の関係にあった。
- (3) 線径が小さくなると, センサ出力波形のパルス幅が小さくなる傾向が確認された。

上記のうち(2)は検出コイルの差動構造による特徴, (1)および(3)は検出コイルに鎖交する総磁束量の違いとして理解することができる。また, 検出限界の更なる向上についての考察を行った。

(2008年10月23日受付, 2009年1月13日再受付)

謝辞

本研究の一部は2007年度JSTシーズ発掘研究の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 田中三郎, SQUID を用いた新しい応用計測, 応用物理, vol. 72, pp. 1039-1045, 2003.
- [2] H. J. Krause, G. I. Panaitov, N. Wolters, D. Lomparski, W. Zander, Y. Zhang, E. Oberdoerffer, D. Wollersheim, and W. Wilke, Detection of magnetic contaminations in industrial products using HTS SQUIDs, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, pp. 729-732, 2005.
- [3] T. Nagaishi, F. Kamitani, H. Ota, K. Nishi, K. Kuwa, H. Fujita, and S. Tanaka, First practical high Tc SQUID system for the detection of magnetic contaminants in commercial products, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, pp. 800-803, 2007.
- [4] S. Tanaka, H. Fujita, Y. Hatsukade, T. Nagaishi, K. Nishi, H. Ota, T. Otani, and S. Suzuki, High Tc SQUID based metallic contaminant detection system for beverage or ground meat, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, pp. 756-759, 2007.
- [5] S. A. Macintyre, A portable low-noise low-frequency 3-axis search coil magnetometer, *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 16, pp. 761-763, 1980.
- [6] K. P. Estola and J. Malmivuo, Air-core induction-coil magnetometer design, *Journal of Physics E-Scientific Instruments*, vol. 15, pp. 1110-1113, 1982.
- [7] S. Tumanski, Induction coil sensors - a review, *Measurement Science & Technology*, vol. 18, pp. R31-R46, 2007.
- [8] K. Tashiro, Optimal design of an air-core induction magnetometer for detecting low-frequency fields of less than 1 pT, *J. Magn. Soc. Jpn.*, vol. 30, pp. 439-442, 2006.
- [9] K. Tashiro, Proposal of coil structure for air-core induction magnetometer, *Proc. IEEE Sensor 2006*, pp. 939-942, 2006.
- [10] K. Tashiro, A. Kakiuchi, A. Matsuoka, and H. Wakiwaka, Magnetic contamination detection system based on high sensitive induction gradiometer, *Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics 2008 (APSAEM08)*, 0059, 2008.
- [11] 田代, 脇若, インダクショングラジオメータを用いた磁性異物検査装置の設計, 第32回日本磁気学会学術講演会概要集, 14PS-78(E), 2008.