

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560508

研究課題名(和文) 時間と空間を制御した励起磁場による極微弱磁気信号イメージ検出による高速非破壊検査

研究課題名(英文) fast non-destructive inspection system using the weak magnetic signal images detected by the magnetic excitation field controlled in both the time-domain and the space-domain

研究代表者

作田 健 (SAKUTA, Ken)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：70221273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：時間と空間を制御した励起磁場による極微弱磁気信号イメージ検出による高速非破壊検査について、基本となる磁場励起コイル対、位置特定用コイル配置の設計および位置特定手順の検討、雑音除去について適応フィルタの入力対応の実現をおこなった。またSQUID制御回路の広帯域対応化とその際に問題となる感度変動に対する補正システムの検討を行い、さらに検出システムの基本動作の確認を行った。励起信号について、準直流磁場をもちいて時間シーケンスのみによる位置特定をもちろんでいたが、回路の広帯域対応などにより、複数のコイルに異なる周波数の交流信号を印加することで、より有効に位置検出ができると考えられる。

研究成果の概要(英文)：For fast non-destructive inspection system using the weak magnetic signal images detected by the magnetic excitation field controlled in both the time-domain and the space-domain, The excitation coil pair design, its characteristic evaluation, and the location design of the coil pairs were done. The contaminant position estimation procedure was considered. In addition, the active noise control system using the adaptive filter with single input signal was considered. In this system, the reference signal was reproduced by the correlation between the actual noise and input signal. Also consider for a wide band SQUID FLL circuit was performed and the correction system for the sensitivity variation was investigated. Furthermore investigation of the basic operation of the detection system were made.

It was considered the suitable excitation signal was not a pseudo-DC signal, but AC signals with different frequencies which were applied to each of coils.

研究分野：工学

キーワード：SQUID 磁気計測システム 異物検出

1. 研究開始当初の背景

安全・安心な社会の実現のため、製品の欠陥検査がますます重要になっている。近年、検査対象物と欠陥(傷、異物など)がどんどん小さくなり、検出信号もますます微弱になっている。そこで、磁気に対して量子レベルの感度を有する超伝導量子干渉素子(SQUID)磁束計による検査システムの実用化への期待が大きくなっている。しかし、初期コストおよび冷却コストが必要な SQUID 磁束計を検査システムに用いるためには、測定範囲の広域化と欠陥場所の特定、検査速度の高速化を合理的なコストで実現することが課題となる(図 1)。

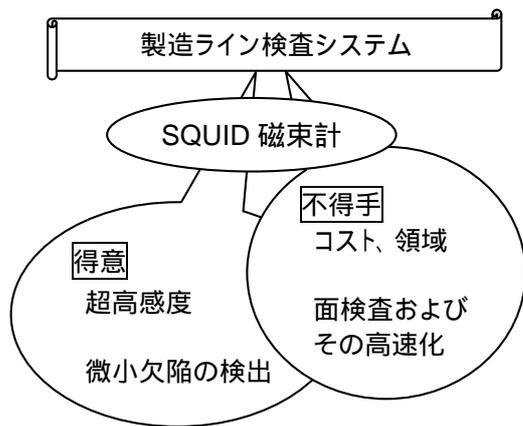


図 1 SQUIDと検査システムの相性

非破壊検査の研究において、微小磁気検出の応用として微小異物検出の可能性に関する問い合わせがしばしばある。SQUID 磁束計の性能は異物検出には十分対応できるが、その検査速度が問題であった。より簡便、低コストで、要求する性能(検査速度、位置特定、最少検出サイズ等)を満足させる手段として、空間・時間変化を利用すれば、機械的な動作をなくしても、同様の効果が得られるのではないかと考えられる。すなわち、磁気測定では、励起信号により磁気を励起し、欠陥からの磁場信号を計測する。そこで、励起信号の空間分布を時間的に変化させることで、少ない SQUID 磁束計で位置も含めて欠陥を特定することが可能な測定データを得る。この方法を用いて、測定範囲の広域化と欠陥場所の特定、検査速度の高速化を合理的なコストで実現することが本研究の全体構想である。

2. 研究の目的

目指しているシステムの基本は、空間分布を時間的に変化させた励起磁場により、検査対象物の欠陥から発生する磁気信号を測定し、その時間変化から欠陥の位置を特定することにある。本研究の目的は、時間的に空間分布が変化する任意の磁場分布の生成と、その磁場を励起信号として、検査対象物から発生する極微弱磁気信号の SQUID 磁束計によ

る検出および、検出信号から欠陥の状態を解析することである。

3. 研究の方法

励起磁場制御による極微小磁気信号の位置情報を含めた検出(磁場イメージ検出)を実現するため、以下の各項目について検討する。

(1) 電氣的制御による所望の時間的・空間的分布をもつ磁場の生成を実現する電流要素の空間パターンおよび時間シーケンスの検討：例えば図 2 に示すように 2 次的に配線(電流経路)を配置した励起アンテナに対し、適切な電流分布を与えることで、任意の時間的・空間的磁場分布の構成が実現できる。本システムに要求される時間的・空間的磁場分布を実現するための、配線パターンとこの配線に流す電流分布を時間的に変化させることで、所望の時間的・空間的に変化する磁場を作り出すことをめざす。

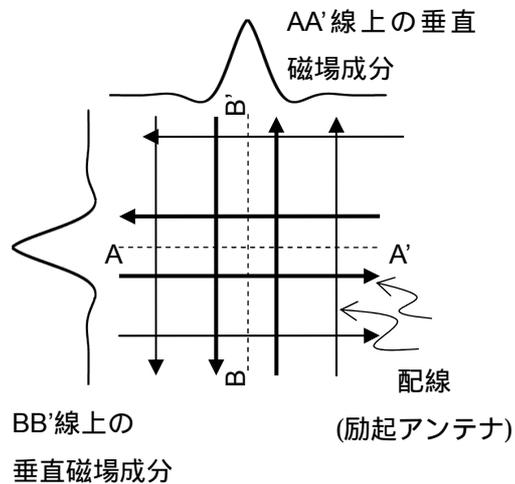


図 2 制御線の電流による磁場分布。(制御線の太さは電流の大きさを、矢印は電流の向きを表す。)

図 2 制御線の電流による磁場分布。(制御線の太さは電流の大きさを、矢印は電流の向きを表す。)

(2) SQUID 磁束計による極微弱磁気信号の検出における性能向上のための SQUID 磁束計の配置や雑音対策：本方式では、SQUID 磁束計の最適配置は、励起アンテナ直上に SQUID 磁束計を配置する従来の配置と異なる。磁気信号が検出可能な範囲ができるだけ広がる SQUID 磁束計の配置について、SQUID 素子の向きまで含めて検討する。さらに、SQUID 磁束計は超高感度のため、欠陥からの信号以外ではできるだけ入力しない配慮が必要である。そのため、最低限励起信号をキャンセルするシステムが必要である。そこで時間変化に追従してキャンセル信号を変化させるシステムを構築について検討を行う。

(3) 複数の基本システム要素の組合せにむけて、高速化、測定領域の広域化、高感度化の検討を行う。

4. 研究成果

(1) 磁場分布パターンの生成

本研究において磁性異物位置の特定を行う際、励磁コイルによって磁性異物の励磁を行う。そのため、観測される磁性異物からの磁気信号の強さは励磁コイルから出力される磁場の強さに影響される。励磁コイルから出力される磁場の強さはコイルの巻き数や流す電流値、コイルの断面積等によって変化する。しかし、巻き数や電流値を増加していくとインダクタンスの増加や発熱による損失の発生につながるため、この2つのパラメータには増加できる上限がある。そこで本章では、数種類の励磁コイルの間隔や形状のパターンについてシミュレーションを行い、段階的に励磁コイル形状の決定を行った。図3は、2つの方形コイル(20×20mm)を距離30mm離して配置した場合の磁束密度分布を示している。

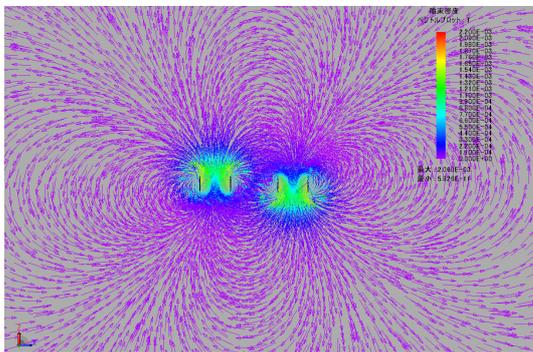


図3 コイル間距離 30mm における ZX 平面上の磁束密度分布

各種パラメータに対する特性を検討した結果、システムに用いる方形型励磁コイルの形状は、コイルの高さが10mm、コイルの厚みが0.5mmの前提として、コイル表面が正方形で一辺が20mm、コイル間隔が約12mmの形状の時、励磁コイルから発生するZ軸方向磁束密度は最も大きい値をとり、本システムに適していることがわかった。

(2) 磁性微小異物の位置特定手法

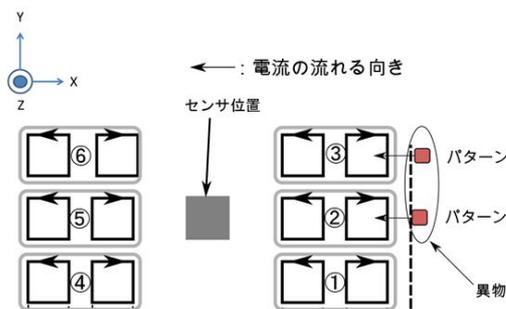


図4 磁性微小異物の位置特定を可能にするコイル配置の例

当初は、疑似直流磁場分布を時間的に変化させて、場所特定を行う予定であった。研究

が進むにつれ、SUIQD 制御 (FLL) 回路の検討により、比較的高い周波数による励起の可能性が見えてきた。定常的に異なる周波数の励起磁場を空間的に分割して発生させることにより、検出した磁場信号の周波数と強度から、異物のサイズおよび位置を特定できることがわかった。図4に励起に用いるコイルの配置を占めず。各コイルに印可する磁場励起電流は、それぞれ異なる周波数を与える。

本磁性異物の位置特定手法により、異物の位置の特定ができるかどうかをシミュレーションモデル上におこし、異物位置を想定して解析を行った。解析の結果、異物の通過位置が設置した励磁コイル上であれば異物の位置の特定が可能であることが分かった。

(3) 1 入力のアクティブノイズコントロールシステム

通常の ANC システムは信号入力と参照入力に磁気センサを2つ用いるが、高感度な磁気センサは初期費用・維持費用共に高い。また参照入力センサに観測したい信号が入力されないように、センサ間の距離を取る必要がある。そこで1つの磁気センサのみを用いる ANC システムについて検討を行った。このシステムは磁気信号 s と磁気雑音 n_0 が含まれる検出信号を信号入力、計測した n_0 を元にシステム内で再現した疑似雑音 n_1 を参照入力に用いる。磁気センサは信号入力にのみ用いる。適応フィルタブロックは信号入力に含まれる参照入力と相関のある成分 y (n_0) を出力する。フィルタ出力 y によってコイルより発生した雑音の逆位相波をセンサに印加すると、誤差信号 ϵ が出力され、これは信号 s とほぼ一致する。この ϵ は適応フィルタブロックに戻され、次の出力信号 y を決定する。このシステムでは雑音低減により信号のみがセンサに印加されるため、微小な振幅の信号にセンサの感度を合わせて計測することが出来る。本研究では、ANC システムのプログラムを MATLAB/Simulink を用いて作成し、DSP(TI 社製 TMS320C6713)に実装した。また適応アルゴリズムには Least Mean Square(LMS) アルゴリズムを用いた。

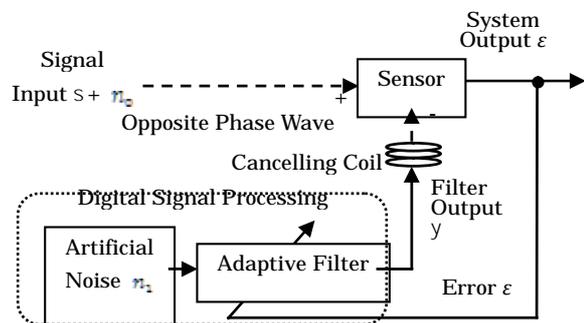


図5 1 入力 ANC システムのブロック図

図5に示す1入力ANCシステムを用いて、環境雑音の低減について検討した。磁気センサにはフラックスゲートセンサを用いた。ま

た適応フィルタの参照入力には疑似雑音 n_1 として、センサ出力と同程度の振幅の 60Hz 正弦波を発生させた。LMS アルゴリズムの適応フィルタを用いた ANC システムは信号入力と参照入力に同周波数の雑音が入力されることを前提としているため、信号入力と参照入力の周波数の違いが雑音低減性能に及ぼす影響を調べた。入力信号の周波数を変化させ、その減衰量を評価した。この測定では環境雑音の影響を避けるため、磁気シールドボックス内で計測を行った。周波数の差分と入力信号の減衰量の関係を図 6 に示す。周波数の差が 2.0×10^{-3} Hz 以内である場合は、入力信号は 40dB 以上減衰している。しかし周波数差が 2.0×10^{-4} Hz を超過する場合は減衰量が低下することがわかった。キャンセル用信号は十分に雑音と周波数を一致させることが必要であることがわかった。

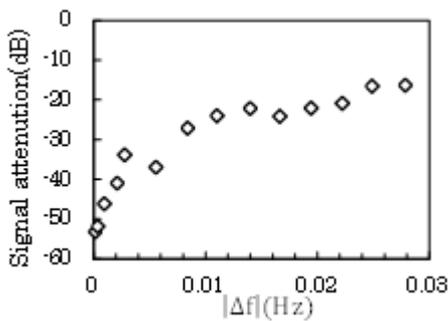


図 6 周波数の差分に対する信号の減衰量

(4) SQUID FLL 回路の高帯域対応および出力補正

SQUID は微小な大きさの磁束量子を 1 周期とした非線形な特性を持つため、通常は帰還により外部磁束を測る FLL 回路を用いて、線形化してから用いられる¹⁾。しかし、微小な欠陥や異物から生じる磁束密度は SQUID の線形領域よりも小さいことが多いため、FLL を用いずとも検出は可能であると考えた。そこで、低周波領域で磁束ロックをかけ、高周波領域では SQUID 出力を直接取り出す 2 出力方式の FLL 回路を SQUID 検査システムへ導入することを検討した。メリットとして、FLL 回路の帯域を低くすることができること、かつ励磁周波数を大きくすることができる。しかし、SQUID から直接得る電圧出力の変換係数は SQUID 動作環境のばらつきにより特性の変動が大きくなり、正確に磁束値へと換算できないという問題点が生じる。そこで、今回はその問題を解決する方法を検討した。

2 出力 FLL 回路の High_out の変換係数は動作点での傾き V と FLL 回路の増幅器のゲイン G_A を用いて、 $V_{High} = V G_A \varphi_{ex}$ となる。 V の値は、温度やバイアス電流量などによって変動する。また動作点が V 特性のどこにかかっているかによっても変わるため、正確な磁束密度へと換算することができない。そこで、図 7 のように帰還コイルから微弱な

交流磁界を SQUID へ印可し、ロックイン検出することで、変換係数をリアルタイムで算出できるようにした。発振器の電圧 V_{FG} と High_out での電圧の関係は、

$$\frac{V_{High}}{V_{GH}} = \frac{V_{\phi} G_A M_f}{R_f}$$

で表され、変換係数 $V G_A$ の算出が可能となる。

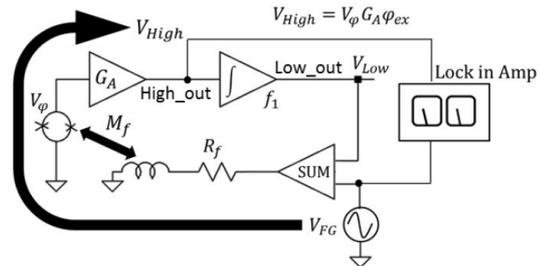


図 7 2 出力 FLL 回路の変換係数算出概略図

本算出法を付加した実験系を図 8 に示す。SQUID の真下に WD コイルを設置し交流励磁する。SQUID と WD コイルの間に異物(銅球 1.2 mm)を往復させ、SQUID 出力をロックイン検出する。折り返し時には、SQUID へのバイアス電流量を調整し、意図的に V 特性を変化させる。このとき本算出法によって変換係数は図 9 (a) のように得られた。そのとき、銅球によって生じるロックイン検出信号は図 9 (b) のように復路の部分で小さくなっていることが分かる。これは動作点での傾き V が小さくなったことによって、同じ大きさの磁束密度でも異なる出力電圧が得られてしまうことを示している。この検出信号を得られた変換係数で補正すると図 9 (c) のようになる。これより、SQUID の V 特性の変化による 2 出力 FLL 回路の High_out の変換係数の変動を補正することができている。

特性を変化させる。このとき本算出法によって変換係数は図 9 (a) のように得られた。そのとき、銅球によって生じるロックイン検出信号は図 9 (b) のように復路の部分で小さくなっていることが分かる。これは動作点での傾き V が小さくなったことによって、同じ大きさの磁束密度でも異なる出力電圧が得られてしまうことを示している。この検出信号を得られた変換係数で補正すると図 9 (c) のようになる。これより、SQUID の V 特性の変化による 2 出力 FLL 回路の High_out の変換係数の変動を補正することができている。

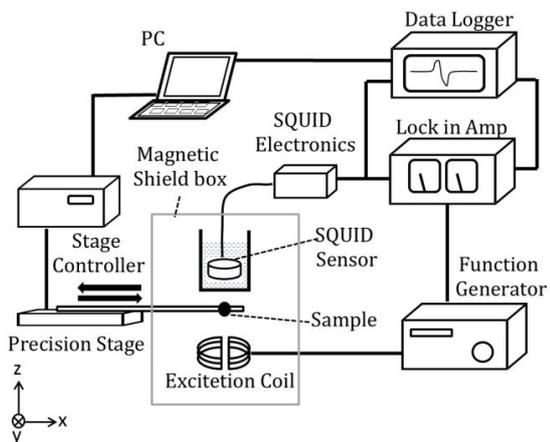


図 8 SQUID による異物検出実験システム

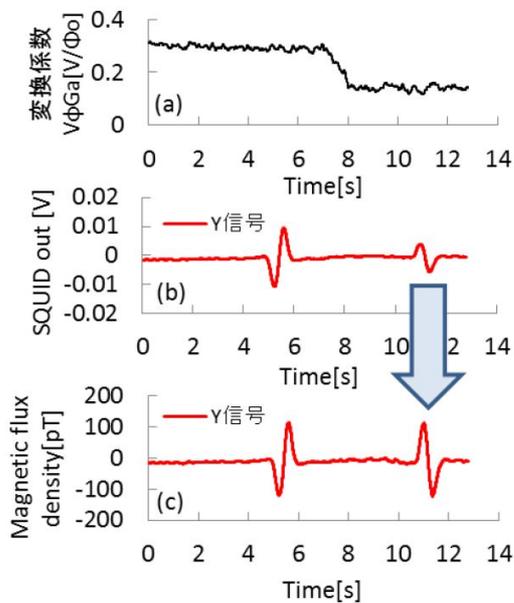


図9 異物検出実験での出力補正結果

低周波で磁束ロックをかけ、高周波の SQUID 出力を直接取り出す 2 出力 FLL 回路を SQUID 検査システムへ導入することを目的に、High_out の変換係数を算出する方法を検討した。金属球を交流励磁して検出するシステムに本算出法を導入することを仮定して、検証実験を行い、変換係数の値をリアルタイムで算出できることを示した。また、その変動による出力電圧の補正を行うシステムを実現した。

<引用文献>

1) S. Tanaka *et. al.* “Measurement of metallic contaminants in food with a high-Tc SQUID” *Supercond. Sci. Technol.* 17, 620-623, 2004.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

八木俊文, 福岡克弘, 作田 健, “SQUID 検査システムのための感度補正に関する検討”, 平成 27 年電気学会全国大会講演論文集, 2015, p. 2-149-150.

[学会発表](計2件)

木村慎太郎, 福岡克弘, 作田 健, “磁気による微小欠陥検出における 1 入力のアクティブノイズコントロールシステムの検討”, 平成 25 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 北見工業大学(北海道北見市), 2013.9.4-9.7.

八木俊文, 福岡克弘, 作田 健, “SQUID 検査システムのための感度補正に関する検

討”, 平成 27 年電気学会全国大会, 東京都大学(東京都世田谷区), 2015.3.24-2.15.3.26, 2-125.

6. 研究組織

(1)研究代表者

作田 健 (SAKUTA, Ken)

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号: 70221273