

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06467

研究課題名（和文）時間・空間を制御した励起磁場からの微弱磁気信号イメージによる微小欠陥特定

研究課題名（英文）Micro defect identification by weak magnetic signal excited by magnetic field controlled in time and space

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：今日、工業製品などにおいて、異物を含めた欠陥の検出は非常に重要な課題である。超伝導量子干渉素子（SQUID）による超高感度磁気センサーを使用し、外部から励起磁場を印加して発生する磁気信号を検出することで、欠陥を検出するシステムについて検討した。励起磁場の生成機構や、検出システムであるSQUID駆動回路の改良、さらに雑音対策について検討し、個々のパートにおける性能向上を図ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ますます微細化が進む各種製品において、その傷や異物混入など欠陥検出は非常に重要な課題である。これらに対応する一つの手法として、磁気検出を利用したシステムの性能向上は、欠陥検出技術の幅を広げるものである。

さらに、SQUID FLL回路の簡便なデジタル回路化は、SQUIDの利用範囲を広げることにつながり、より高感度化への試みを容易にするものと考えられる。また、励起信号の時間的・空間的制御技術および雑音低減技術は、欠陥検出に限らず、様々な計測領域で重要な要素技術と考えられる。

研究成果の概要（英文）：Today, detection of defects including foreign articles is a very important issue in industrial products. We have investigated a defect detecting system by measuring magnetic signals generated by applying an external excitation magnetic field using a super-sensitive magnetic sensor based on a superconducting quantum interference device (SQUID).

We investigated the generation mechanism of the excitation magnetic field and its optimization, improvement of the SQUID flux locked loop circuit, which is the main detection device, and the noise canceling system, and, as a results, were able to improve the performance of each part.

研究分野：計測工学

キーワード：磁場計測 SQUID

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導磁気センサーに代表される高感度磁気センサーの進歩にともない、磁気計測が注目されている。磁気計測の特徴は、非破壊、非接触、無侵襲においても検出が可能であり、さらに逆問題を解くことで磁気が発生源の形状などが特定できることである。非破壊検査はこれらの特徴を利用した用途の一つである。安全・安心な社会の実現のため、製品の欠陥検査は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、それらを検出するための信号もますます微弱になっている。そのため、磁束量子 0 レベルの感度をもつ超伝導量子干渉素子(SQUID)磁束計も視野に入れた高感度磁気計測検査システムの実用化に対する期待が、高まっている。

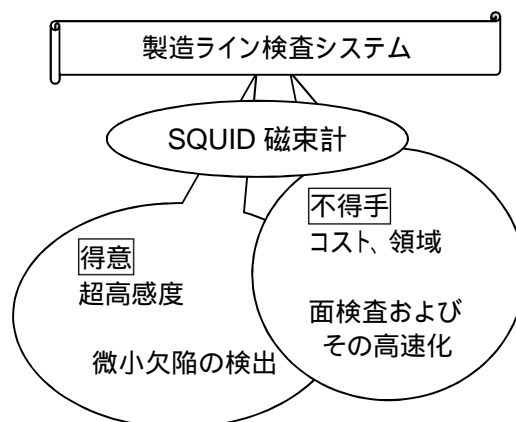


図1 SQUIDと検査システムの相性

高感度な磁気計測は、しかしながら初期コストが

比較的高く、また、SQUID 磁束計を用いた場合、

ランニングコストとして冷却コストが要求されるため、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)。広範囲の計測とその位置特定には、センサーを機械的に走査する必要があり、これが高速化の妨げになる。複数のセンサーを使用すれば高速化は図れるが、センサーのコストおよびシールド範囲が広くなり結果として高コスト化となる。そこで、これらの課題を解決する手法が求められている。

2. 研究の目的

この課題を解決するため、励起磁場に着目する。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、少ないセンサーで位置も含めて欠陥の位置を特定することが可能な測定データを得る。さらにこの方法を発展させ、核磁気共鳴(NMR)と組み合わせる。これらにより、測定範囲の広域化と欠陥場所と欠陥物質の特定、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。

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) 電気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

適切な電流分布を設定することで所望の磁場分布を形成することができる。2次元的に配置した電流経路による磁場励起アンテナを用いて、任意の時間的空間的磁場分布を構成することである。これまで、直線による電流を検討していたが、より強い励起磁場を得るため、コイルによる励起磁場を検討する。信号検出に適した励起磁場の時間波形と空間波形を明確にし、その波形を形成するためのコイル設計を行う。

また、本方式では、センサーの最適配置は、検出信号強度を単純に強くするための励起アンテナ直上に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くなるセンサー配置について、ベクトル計測を考慮して検討する。

さらに、高感度磁気計測では、欠陥からの信号以外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。今回のシステムでは、励起信号は時間とともに変化するため、キャンセルシステムはその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する必要がある。そこで動的雑音対策の検討も行う。

(2) 核磁気共鳴システムの構造設計

これまでに構築したシステムは、磁性体の磁化を目的としており、核磁気共鳴信号を検出するためには、磁場分布の調整と検出信号の周波数解析が必要となる。そこで、核磁気共鳴に適したシステムの構造の設計および周波数解析システムの組み込みを行う。構造の設計は、従来の磁場分布の最適化と同様にシミュレーションと実験で進める。周波数解析については、高精度信号入力ボードによりワークステーションに信号を取り込み、周波数解析ソフトウェアを開発する。

(3) 磁気画像イメージの再構築

基本はフーリエ変換である。グリーン関数を用いたより簡単なアルゴリズムを検討する。また、励起磁場の波形シーケンスの工夫により、簡単な処理でイメージを推定できる場合もある。それらを踏まえ、磁気イメージ像再構築の各手法を考案し、その性能を検討する。

(4) 核磁気共鳴信号の検出と欠陥物質イメージの構成

これまでの、励起磁場分布制御と核磁気共鳴を併用した欠陥の場所と物質を同時に特定できるシステムの構築を行う。場所特定の精度、検出限界、物質同定の確度などを検証し、より高性能にするための検討をおこなう。
 具体的な項目として、機構的な最適化設計、電子回路の高性能化、パルスシーケンスの最適化、さらにイメージング化ソフトウェアなどについて、検討する。

4. 研究成果

(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

磁場の時間的空間的制御を行うための制御回路の検討をおこなった。特に、磁場を空間的に制御するため、複数のコイルを配置し、それぞれのコイルに流す励起用の交流電流を制御することで、空間的に制御する。複数のコイルに流れる電流を切り替えるためには、信号の立ち上がり、立ち下がり時間をできるだけ短くする必要がある。できるだけ簡単な回路で制御を試みた。

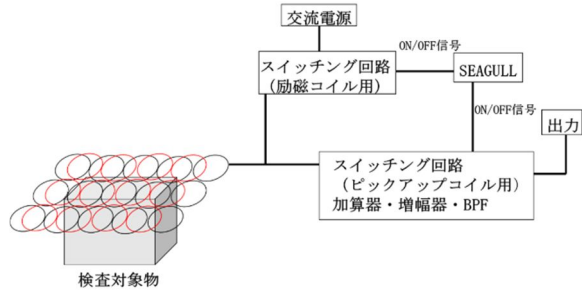


図2 励起磁場印加システムのブロック図

励起磁場印加のブロック図を図2に示す。SEAGULL (MIS製) と呼ばれるアナログ/デジタル信号処理システムによる各種制御信号でシステム全体の制御を行っている。

信号のオンオフの切り替え速度向上のため、励起コイルと直列に挿入するにカップリングコンデンサの値を適切に設計することで、図3に示すように、0.35 Aの交流電流を約3 msで遮断することができた。

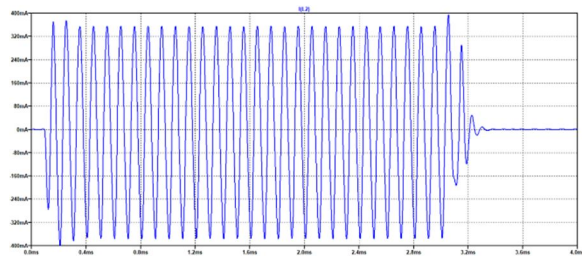


図3 励磁コイルに流れる電流に時間波形

信号ピックアップ側においても、時間分離が必要であり、同様の回路で、同様の特性を確認できた。

(2) ノイズキャンセルシステム

微小磁場の検出が必要な本システムでは、雑音対策が必須である。これまで検討してきたが、雑音対策について、さらに検討を進めた。

これまで、アクティブノイズキャンセルを中心にシステムを構成してきたが、補償コイルによるノイズキャンセル用磁場がセンサーに入力することで、補償すべき値が変動してしまう。これまで、適応フィルタによりすべての変動の影響を補正させてきたが、適応フィルタの負担を減らすため、センサーに入力する補償成分を打ち消すアンチコイルを追加した構成の検討を行った。図4に示すように、アンチコイルの追加により、補償コイルへのキャンセル磁場生成用電流に対し、適切なフィードバックゲイン G を選ぶことで、ノイズ減衰

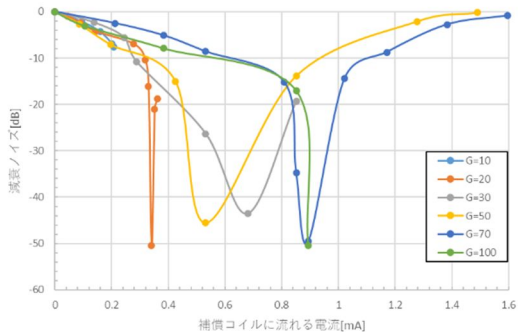


図4 アンチコイルに追加によるノイズ減衰量

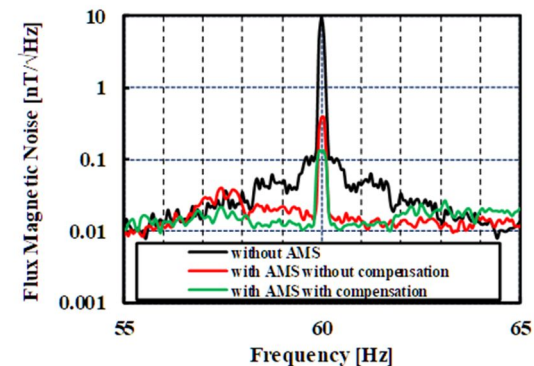
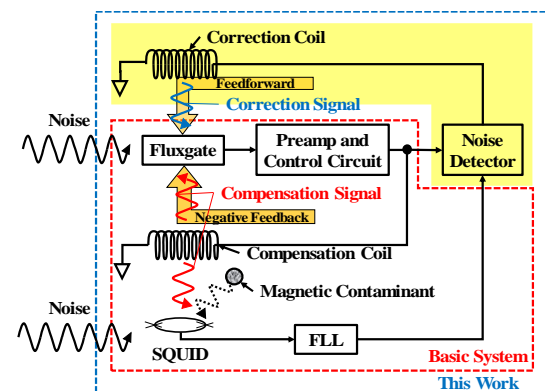


図5 勾配磁気ノイズキャンセルシステムと測定結果

量約 50 dB が得られた。これより、補償コイルの影響を低減することは、ノイズキャンセルに

有効であることが分かった。

これらの知見をもとに、空間的に勾配のある磁気雑音に対して、位相検波の原理を用いて、磁気勾配を抽出し、アンチコイルを追加することで、雑音検出センサーと所望信号検出センサーの場所が離れている場合でも、ノイズキャンセル量の改善がみられた(図5)。

(3) FPGA による SQUID FLL 回路のデジタル化

SQUID FLL 回路の高機能化のためには、デジタル化が欠かせない。本研究でも汎用 FPGA 基盤を用いたデジタル化を試みた。さらに flux-quanta counting 法により、電源電圧や DAC の出力電圧幅に制限されずにダイナミックレンジの拡大を図った。図6に示すように、アナログ FLL に比べ、低周波域における頭打ちの状況が改善され、動作域を拡大させることができた。アナログ FLL では、積分器出力のフィードバックが電源電圧などで制限されるが、quanta counting 法のデジタル化により、この制限から解放されたためである。

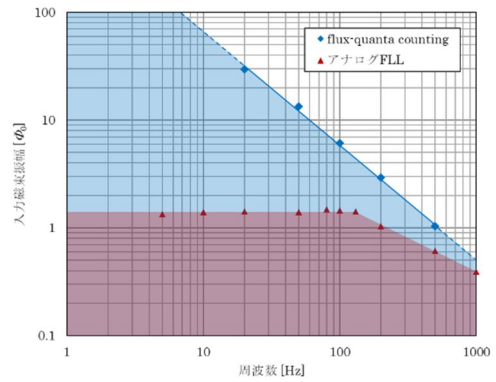


図6 オートレンジ型 FPGA FLL の動作域

図6に示すように、アナログ FLL に比べ、低周波域における頭打ちの状況が改善され、動作域を拡大させることができた。アナログ FLL では、積分器出力のフィードバックが電源電圧などで制限されるが、quanta counting 法のデジタル化により、この制限から解放されたためである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Takao Nishikawa and Ken Sakuta | 4. 巻 1293 |
| 2. 論文標題 Reduction of Environmental Magnetic Field Noise for Detection of Small Magnetic Contaminants | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series | 6. 最初と最後の頁 12054 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1293/1/012054 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takao Nishikawa, Ken Ssakuta |
| 2. 発表標題 Reduction of Environmental Magnetic Field Noise for a Small Magnetic Contaminant Detection |
| 3. 学会等名 The 31th International Symposium on Superconductivity, ISS 2018（国際学会） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 森寺雪夫、作田 健 |
| 2. 発表標題 汎用FPGAボードを用いた自動調節機能FLL回路の検討 |
| 3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 西川高央、作田 健 |
| 2. 発表標題 微小磁性金属異物検出における低磁場空間生成についての基礎検討 |
| 3. 学会等名 平成30年 電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 並川 誠、作田 健 |
| 2. 発表標題 SQUID磁束計用FLL回路の耐雑音特性向上の検討 |
| 3. 学会等名 平成30年 電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|