

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350558

研究課題名(和文) ナノ医用診断のためのSQUID磁気センサの高性能化設計用シミュレーションの開発

研究課題名(英文) Development of design simulation tool to enhance SQUID performance for nano medical diagnosis

研究代表者

野口 聡 (Noguchi, So)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：30314735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁気センサである超電導磁束干渉素子(SQUID)の高性能化のために、新しい電磁場解析手法を開発した。開発した電磁場解析では、磁束量子化という特殊な現象が表現できるようになった。さらに、最適化設計手法として、より堅固な手法を提案し、SQUIDの薄膜磁気シールドの最適化設計を可能にした。そして、今後のノイズ低減化を目的として、ミクロスケールの磁束挙動シミュレーション手法も開発した。

研究成果の概要(英文)：To enhance the performance of Superconducting Quantum Interference Device (SQUID), a new electromagnetic simulation method was developed. The developed simulation method can take into account the phenomenon of fluxoid quantum. Also, a new robust optimization method was developed to optimally design a thin superconducting magnetic shield over a SQUID. In addition, to reduce a magnetic noise in future, a new simulation on fluxoid moving was also developed.

研究分野：ナノ医用システム

キーワード：ナノ医用 超電導応用 電磁場解析 最適化設計

### 1. 研究開始当初の背景

ナノ磁性微粒子の製造技術の発展に伴い、磁性微粒子を生体内に投与する新しいナノ医用診断手法が考案、研究されている。たとえば、MR 用の造影剤として磁性微粒子を利用した肝臓腫瘍の検診装置や、ナノ磁性微粒子をコーティングした薬を患部に誘導するドラッグ・デリバリーにも、大きな期待が寄せられている。

このようなナノ磁性微粒子を応用したナノ医用診断手法の研究が進む中で、最近では生体内における磁性微粒子の検出・計測手法が新たな問題となってきた。磁気センサとしては超伝導量子干渉素子(以後、「SQUID」と呼ぶ)が最も高感度な磁気センサであることから、生体内の磁性微粒子の検出に効果的であると考えられている。SQUID は、古くから脳磁計測に使用されてきた。さらに、高温超伝導体を使用した SQUID(以後、「HTS SQUID」と呼ぶ)が登場し、その扱いの簡便さから、食品の安全検査などへの応用が実現し始めている。また、直近の研究として、ナノ医用診断手法を目指した生体内における流体中の磁性微粒子の計測などが国際会議で報告され始めている。これらの研究成果が実れば、ドラッグ・デリバリーなどの人間の健康や長寿命化に貢献できると期待されている。

このような研究背景のもと、HTS SQUID で生体内における流体中の磁性微粒子の検出を実現させるために、HTS SQUID 設計・開発のためのシミュレーション・ツールの開発を研究目的としてきた。

### 2. 研究の目的

前述の研究背景のもと、HTS SQUID で生体内における流体中の磁性微粒子の検出を実現させるために、HTS SQUID 設計・開発のためのシミュレーション・ツールの開発を研究目的としてきた。HTS dc-SQUID の低ノイズ化と動作磁場環境の向上が研究の主たる目的である。しかし、目的を達成するためには、HTS dc-SQUID の総合的な設計・開発と磁束挙動が HTS dc-SQUID に与える影響評価が重要な検討事項である。そこで目標は、HTS dc-SQUID の設計ツールと HTS dc-SQUID 内の磁束挙動シミュレーション・ツールの開発である。このツールを開発することで、前記した低ノイズ・高磁場動作が可能な HTS dc-SQUID の開発を援助することができる。なお、すでにマクロ・スケールの電磁現象を評価するためのシミュレーション・ツールの基礎部分は開発してきた。そこで、本研究では、このツールをベースとし、さらに要求される開発内容は、(1)SQUID リングおよびピックアップコイルの解析、(2)薄膜超伝導磁気シールドの形状最適化設計がある。さらに、(3)磁束挙動シミュレーションによる磁気ノイズのメカニズム解明を目的に、新たにシミュレーション・ツールを開

発する。

### 3. 研究の方法

以下の3項目について、それぞれ新しい解析手法を開発した。

(1)SQUID リングおよびピックアップコイルの解析に関しては、ジョセフソン接合部の磁束量子化を考慮した電磁場解析手法を開発した。従来の有限要素法に、ジョセフソン接合部の磁束量子化を表す

$$I = I_c \sin \phi + \frac{V}{R_c}$$

$$V = \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dt}$$

の2式を連成させ、SQUID リング内の電流分布を明らかにした。

(2)薄膜超伝導磁気シールドの形状最適化設計に関しては、従来の遺伝的アルゴリズム(GA)などの手法を用いて磁気シールドを設計した場合に、メッシュに依存する解析精度のために、最適な設計ができていなかった。そこで、PSO (Particle Swarm Optimization) 法に、複数のメッシュを用いる手法へと拡張し、メッシュ依存を低減させた。そこから、k-means 法を適用することで、不適な解を削除する手法を開発した。

(3)磁束挙動シミュレーションに関しては、超伝導体内のピンに作用して、磁束線が挙動するシミュレーションを開発した。

### 4. 研究成果

図1に示す dc-SQUID リングの電流分布解析に、開発した磁束量子化を考慮した有限要素法を適用した。これまでは、可視化できなかった dc-SQUID 内の電流分布が図2に示すように解析により明らかになった。また、磁束と電圧の関係を図3に示す。これまで、設計時に SQUID リングのインダクタンスは一定と考えることが一般的であったが、変化していることが、図3から示され、今後の SQUID 設計に応用すべきである。

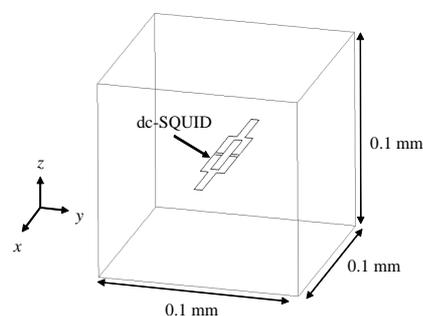


図1 dc-SQUID 解析モデル

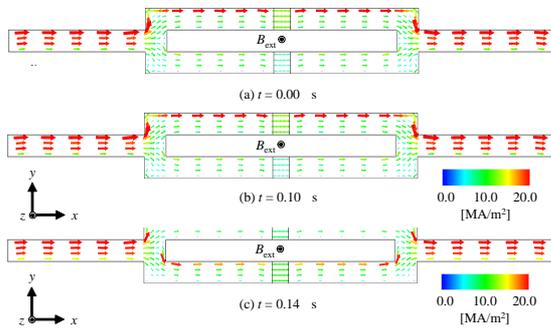


図2 電流分布図

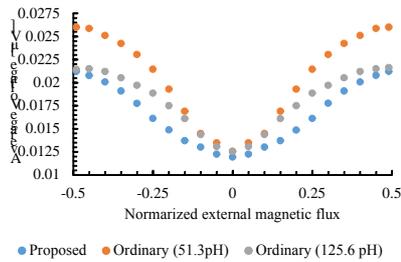


図3 鎖交磁束と電圧の関係

有限要素法を利用した最適化設計では、初期メッシュに解が依存してしまうことが、知られている。最適化手法として、PSO法のパーティクルを初期メッシュに応じた個々の最適解へ誘導し、その後k-means法で不適な解を削除した。図4に設計に使用した薄膜磁気シールド付きSQUIDを示す。設計変数は、薄膜の幅とSQUIDとの距離とした。図5に開発したPSO法を適用した結果を示す。横軸は、シールド幅であり、縦軸は目的関数である。目的関数は、磁束センサの有効面積であり、有効面積を高めることを目的としている。図5からも明らかなように、1点だけ他よりもはるかに高い有効面積が得られている。従来の最適化設計手法では、この点が解となるが、これは明らかに解析精度の問題であり、解としては不適である。そこで、k-means法を適用することで、図6のようにグルーピング化した。この際に、グループ内に1点しかないものを省くことにより、明らかに制度の悪い解を除外することに成功した。

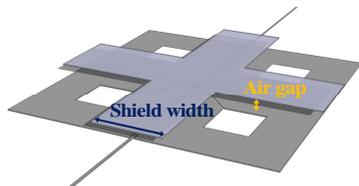


図4 薄膜時期シールド付きSQUID設計モデル

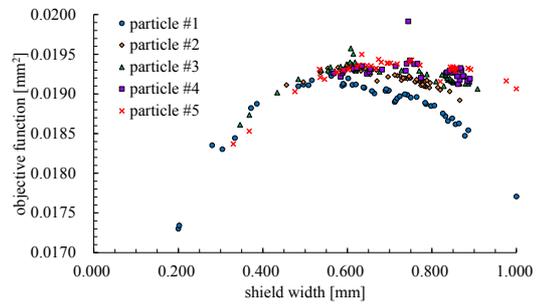


図5 シールド幅と目的関数の関係

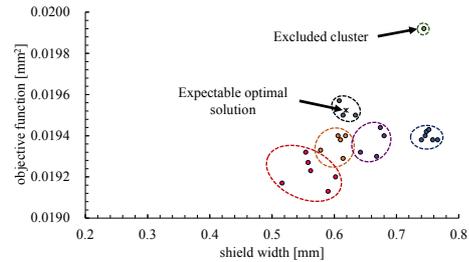


図6 k-means法によるグルーピング

磁束線の挙動シミュレーションでは、図7のようなモデルに対して、磁束線間の力、外部磁場との力、ピンニング力を考慮して、磁束線1本1本の挙動を特定した。図8に、磁束線の挙動を示す。この結果から、外部(x=0)付近に磁束線が集中し、内部には疎らであることがわかる。また、この分布から超電導体内の磁場を求めた。その結果を図9に示す。超電導体内の磁場も適切に求まっており、磁束挙動シミュレーションが妥当であることが示された。これらの挙動シミュレーションから、SQUIDのノイズ・メカニズム解明まで至らなかったが、磁束挙動が明らかになったことで、今後のSQUID設計に大きく役立つ。

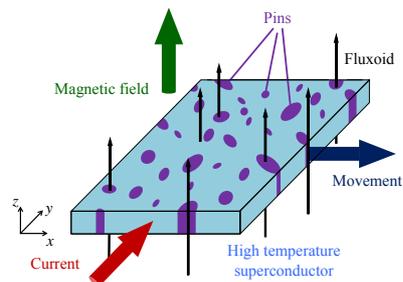


図7 磁束線挙動シミュレーションモデル

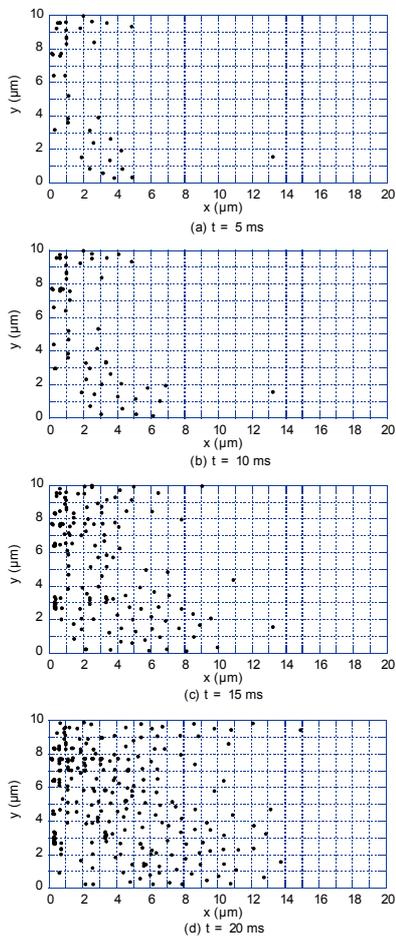


図8 磁束線の挙動シミュレーション結果

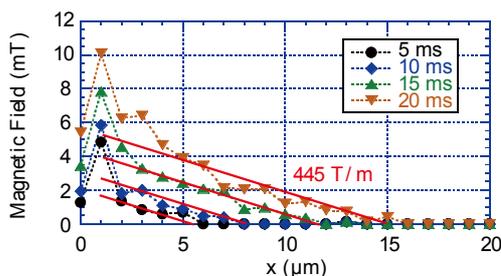


図9 超電導体内の磁場

### 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 2件)

1. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical simulation of SQUID magnetometer considering equivalent electrical circuit of Josephson junction," *Physics Procedia*, 査読有, vol. 58, 2014, pp. 200-203, doi:10.1016/j.phpro.2014.09.055.
2. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical Simulation of DC SQUID Taking Into Account Quantum Characteristic of

Josephson Junction," *IEEE Transactions on Magnetics*, 査読有, vol. 51, no. 3, Mar. 2015, Art. ID. 7202804, doi:10.1109/TMAG.2014.2357011.

[学会発表](計 9件)

1. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical Simulation of SQUID Magnetometer Considering Equivalent Circuit of Josephson Junction," 26th International Symposium on Superconductivity, Nov. 19 2013, タワーホール船堀(東京都・江戸川区).
2. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "A modified PSO method using multiple finite element meshes for minimizing influence of mesh on optimal solution," The Sixteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, May 26 2014, Annecy (France).
3. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical simulation of SQUID magnetometer taking into account quantum characteristic of Josephson junction," The Sixteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, May 26 2014, Annecy (France).
4. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical Simulation of dc-SQUID by FEM Coupling with Circuit Equation Taking into Account Phase Difference of Josephson Junction," 27th International Symposium on Superconductivity, Nov. 27 2014, タワーホール船堀(東京都・江戸川区).
5. So Noguchi, Naoya Terauchi, Hajime Igarashi, "A Robust Optimization Method using PSO with Multiple Finite Element Meshes for Minimizing Mesh Influence," 20th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jun. 29 2015, Montreal (Canada).
6. Naoya Terauchi, So Noguchi, Hajime Igarashi, "Numerical simulation of HTS dc-SQUID by FEM coupling with circuit equation taking into account phase difference of Josephson junction," 20th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, Jul. 2 2015, Montreal (Canada).

- 7 . So Noguchi, Naoya Terauchi, “Numerical simulation of HTS dc-SQUID by FEM coupling with circuit equation taking into account phase difference of Josephson junction,” 12th European Conference on Applied Superconductivity, Sep. 9 2015, Lyon (France).
- 8 . 寺内直也, 野口聡, 五十嵐一, 「ジョセフソン接合の位相差を考慮したdc-SQUIDの数値シミュレーション」, 平成26年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 平成26年10月25日, 北海道大学(北海道・札幌市)
- 9 . 寺内直也, 野口聡, 五十嵐一, 「高温超電導量子干渉素子の量子的特性を考慮した数値解析」, 平成27年電気学会静止器・回転機合同研究会, 平成27年3月6日, 宮古島マリントーミナル(沖縄県・宮古島市)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

野口 聡 (NOGUCHI SO)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：30314735

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

なし