



Title	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に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	寺内, 直也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第11769号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58944
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Naoya_Terauchi_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (情報科学) 氏名 寺内 直也

審査担当者 主 査 准教授 野口 聡
副 査 教 授 五十嵐 一
副 査 教 授 北 裕幸

学位論文題名

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に関する研究

(Study on numerical simulation of HTS-SQUID considering quantum characteristics)

本学位論文では高温超電導磁束量子干渉装置 (HTS-SQUID) のマクロ的な観点と量子的な観点からのシミュレーション手法について検討し、それらについて論じている。SQUID は、微弱な磁気信号を計測できる装置であり、脳磁気や非破壊検査などへ応用されている。また、近年、運転温度が高く、信号源までの距離を短くできるなどの特徴から、HTS-SQUID の研究、開発が盛んに行われるようになってきている。従来の低温超電導磁束量子干渉装置 (LTS-SQUID) とは、形状や特徴などが大きく異なることから、HTS-SQUID ではこれまでの設計技術が使用できない部分があり、シミュレーションによる HTS-SQUID 内の現象 (電流分布など) を明らかにすることが望まれている。そこで、筆者は HTS-SQUID 特有である薄膜構造に起因する有限要素法の問題点を明らかにし、さらにジョセフソン結合や SQUID リングの量子的現象を有限要素法と連成させて解く手法を提案している。これらの手法を用いて、HTS-SQUID の現象論についても論じ、より高性能 (高感度) な SQUID についても検討している。

本論文の第 1 章では簡潔に HTS-SQUID の機能、応用、問題について述べ、本研究の背景、目的についてまとめている。

第 2 章では、本論文に関連する HTS-SQUID の種類、動作原理、特徴について詳細に述べている。また、HTS-SQUID で重要な役割となるジョセフソン接合の特徴についても詳述している。さらに、本論文で取り上げている HTS-SQUID マグネットメータの構造、動作原理について述べ、磁束の有効捕獲面積を向上させる超電導薄膜磁気シールドの原理、特徴についても述べている。

第 3 章では、HTS-SQUID のシミュレーション手法と超電導薄膜磁気シールドの有効性について論じている。超電導薄膜磁気シールドは、近年、HTS-SQUID の動作安定性向上と磁束の有効捕獲面積向上のために提案された装置である。しかしこれまで、その原理・現象は明らかになっておらず、シミュレーションによる裏付けを必要とされている。そこでまず、筆者は、電流分布などの現象を明らかにすることで、超電導薄膜磁気シールドの有効性の検証を行っている。対象としている HTS-SQUID マグネットメータは、3mm 四方の形状に対し、厚さ $0.2\mu\text{m}$ と大変に薄く、有限要素法などの解析が大変に困難な形状をしている。その問題に対し、筆者は、有効なメッシュ生成手法や解析手法を検討している。その結果、電流分布から超電導薄膜磁気シールドの有効性を示す現象を

明らかにしている。続いて、筆者は、最適化手法を用いて、効果的な超電導薄膜磁気シールドの寸法を検討している。しかし、初期メッシュが最適解（最適寸法）に大きな影響を及ぼすことから、初期メッシュを複数用いた新しい Particle Swarm Optimization 手法を提案している。この提案手法により、初期メッシュに依存した明らかな間違いを排除することに成功している。本章の最後に、超電導薄膜磁気シールドの有効性や最適寸法をマクロ的な現象から検討した結果についてまとめている。

第4章では、ジョセフソン接合の非線形特性と量子的な現象を考慮した有限要素法によるシミュレーション手法について論じている。これまで、SQUID の設計では計測対象に合わせて、SQUID リングのインダクタンスを決定する方法で、その寸法を設計してきた。しかし、HTS-SQUID は幅広の導体を有することになり、電流経路が変化することでインダクタンスが変化する問題から、従来の設計手法が適用困難になっている。そこで、筆者は、有限要素解析により、HTS-SQUID の動的電流経路を明らかにすることについて検討している。まず、ジョセフソン接合の非線形電圧 - 電流特性に対して、波動関数から求まる位相差を考慮した等価電気回路を、有限要素法に連成させる手法を提案している。これにより、これまでは表現できなかった、鎖交磁束量増加に伴う、電圧変動を表現することに成功している。続いて、等価電気回路と有限要素法に量子化条件を考慮する手法について提案している。これにより、量子的な現象からも、SQUID の実動作特性により近い表現が可能となり、SQUID の動作特性である鎖交磁束量 - 電圧 (Φ -V) 特性の表現に成功している。これまでは、等価電気回路のシミュレーションで行われてきたが、電流経路が変化する動的特性を考慮できていない。筆者は、提案手法により、電流の動的経路を明らかにしており、HTS-SQUID の設計に新しい解析手法を用いることが有効であることを示している。本章の最後に、ジョセフソン接合特性と量子化条件を考慮しているシミュレーション結果から、HTS-SQUID 動作を量子的な現象から検討した結果についてまとめている。

第5章では、本研究を総括し、得られた知見についてまとめている。

これを要するに、著者は高温超電導磁束量子干渉装置マグネトメータの超電導薄膜磁気シールドの有効性を検証するために、高温超電導磁束量子干渉装置に適した有限要素解析技術を検討し、超電導薄膜磁気シールド付き高温超電導磁束量子干渉装置マグネトメータの電流分布から、その原理や効果を明らかにしている。さらに、初期メッシュに依存しない新しい Particle Swarm Optimization 手法を提案し、超電導薄膜磁気シールドの寸法最適化を行っている。また著者は有限要素法にジョセフソン接合の非線形性を表す等価電気回路ならびに磁束量子化条件を連成する解析手法を提案し、高温超電導磁束量子干渉装置内の電流分布を明らかにしている。これらから、著者は高温超電導磁束量子干渉装置の設計開発のみならず超電導工学、数値解析学に重要な寄与をしていると考えられる。よって著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。