HOKKAIDO UNIVERSITY

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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 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

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, 超電導量子干渉素子 (SQUID) を対象とした数値シミュレーションを行っている. 本論文の第 1 章では研究の背景, 目的について述べている. 第 2 章では,dc-SQUID マグネトメータに関して, その周辺技術である超電導薄膜磁気シールドと併せて説明を行っている. 第 3 章では, 有限要素法を用いて行った SQUID マグネトメータおよび超電導薄膜磁気シールドの解析手法, 解析結果を述べ, 得られた結果について考察を行っている. 第 4 章では,SQUID に含まれるジョセフソン接合の特性を考慮するための解析手法について述べ, 得られた解析結果を示し, 考察を行っている.

SQUID は, 超電導を応用した非常に高感度な磁気センサである.SQUID は, 超電導リングとジョセフソン接合から構成され, 磁束の量子化とジョセフソン効果を利用することによって, 極めて微弱な磁界を検出することが可能である.SQUID は, その高感度を活かして様々な分野で応用が研究されている.SQUID は高感度である一方で, 環境磁気ノイズの影響を受けやすく, わずかな磁界にさらされた場合にも動作が不安定となり, 測定が行えなくなるという問題がある. そのため, 多くの SQUID 応用では磁気シールドルームを使用して,SQUID 素子を保護するということが行われている. このように測定の際に, 磁気シールドルームを必要とすることから測定できる対象が限られることや, 磁気シールドルームに使用されるパーマロイが高価であることが SQUID の応用範囲拡充の妨げとなっている. このような背景のもと, 環境磁気ノイズに対して高い耐性を持った SQUID が必要とされている.SQUID が磁界にさらされた場合に, その動作が不安定となる理由として, 磁束のトラップが原因であると言われている. この磁束トラップの現象の発生のメカニズムを解明し, その発生を抑制することを実現することが SQUID の動作安定性の向上につながると考えられる. しかしながら, これまでに磁束のトラップが発生する詳細なメカニズムは解明されておらず, その解明が望まれている.

上記のように,SQUID の動作安定性を向上させるために, 磁束トラップの発生のメカニズムを解明することが望まれている. 本研究では, このような SQUID におけるミクロ・スケールの内部現象を解明するための第一歩として, ミクロ・スケールの現象までを考慮したマクロ・スケールでの SQUID の数値ミュレーションを実現することを目的としている.

SQUID マグネトメータを対象として, 有限要素法を用いて数値シミュレーションを行った. その際, 超電導体の E-J 特性を表現するために, 仮想導電率を用いている. 有限要素法では, 解析領域をメッシュに分割して解析を行う. 本研究では, 四面体要素と六面体要素でのメッシュ分割を行い, 両者の結果の比較を行い, どちらが適しているかを検討した. 比較を行った結果, 少ない要素数で精度を良く解析できる六面体要素が適していることが分かった.

また, 超電導薄膜磁気シールドの効果を検証するために, 複数のシールド形状の解析モデルを用いて, シミュレーションを行った. 本研究では, 四角形シールドと十字型シールドの 2 種類のシー

ルド形状を扱った. 解析を行った結果, 四角形シールドと十字型シールドでは十字型シールドの方が,SQUID の有効捕獲面積を増加させることができるということが分かった. この結果は, 実験結果ともおおよそ一致している.

SQUID では, ジョセフソン効果を利用していることで, 波動関数の位相差といったミクロ・スケールの現象をマクロ・スケールにおいて観測できるという大きな特徴を持っている. 上記の有限要素法による SQUID の解析では, マクロ・スケールの現象を表現することはできていたものの, ミクロ・スケールの現象を考慮することまではできていなかった. そこで, 有限要素法による SQUID のマクロ・スケールでのシミュレーションを元にして, ミクロ・スケールの現象を考慮に加えた解析を行った. この解析により, 量子的な振る舞いを考慮した, より正確な SQUID のシミュレーションを実現することを目指した.

マクロ・スケールのデバイスである SQUID において, ミクロ・スケールの現象を観測することができるのはジョセフソン接合が存在するためである. ジョセフソン接合は, ジョセフソン効果を示すトンネル接合である. このジョセフソン接合の特性が SQUID の動作にも大きく影響している. ジョセフソン接合の特性は, 等価回路を用いて表すことができることが知られている. 本研究では,SQUID の動作をより正確に解析するために, この等価回路を有限要素法と組み合わせた解析を行っている.

ジョセフソン接合の特性を考慮するにあたり, まず, その非線形性を解析に組み込むということを行った. 等価回路方程式をから得られた, 非線形電流電圧特性の曲線を元にして, 解析上でジョセフソン接合の状態が超電導・常電導の 2 状態に切り替わるようにして解析を行った. 解析を行った結果,SQUID に鎖交する磁束量が不連続に増加する様子を表現できるようになった. しかしながら, この解析手法では一度に増加する磁束量が磁束量子よりも小さく, 現象を正しく表現できていないことが分かった. この結果を受けて, 新たに解析手法を検討した.

上記の内容を受けて, 考察を行った所, 磁束の量子化を考慮することが SQUID の動作を正確に表現するためには不可欠であるということが分かった. そこで, 解析内において磁束の量子化を考慮する方法を考えた. 本研究では, 磁束の量子化条件式と SQUID の等価回路方程式を有限要素法と組み合わせる解析手法を考案し,2 つの条件で解析を行った.

まず, 外部磁界を印加していない状態で解析を行った. この状態でも SQUID には臨界電流値以上のバイアス電流を印加しているため, 常に電圧が発生する. このとき, 発生する電圧は外部磁界やバイアス電流に変化がないにもかかわらず, 周期的に変化する. 磁束の量子化条件式および等価回路方程式を新たに組み合わせたことにより, この現象が解析上でも確認できた. 次に, 一定の外部磁界を印加した状態で解析を行った. このとき, 超電導体のマイスナー効果によって外部磁界を打ち消すために遮蔽電流が流れるが, この遮蔽電流の大きさと方向が周期的に変化する. この様子が解析上で確認できた. また, 有限要素法を用いたことにより, 電流が偏って流れるという現象を表現できるようになった. これにより, 解析内で SQUID の実効的なインダクタンス値が変化することを表現でき, 現象を等価回路方程式のみで解く場合よりも正確に表すことが可能となった.