

| | |
|-------------|---|
| 氏 名 | くるす 努 |
| 授 与 学 位 | 博 士 (工 学) |
| 学位授与年月日 | 平成 6 年 3 月 25 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 5 条第 1 項 |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻 |
| 学 位 論 文 題 目 | 第 2 種超電導体における熱・電磁連成過渡特性 に関する研究 |
| 指 導 教 官 | 東北大学教授 戸田 三朗 |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 戸田 三朗 東北大学教授 渡辺 博茂 東北大学教授 北村 正晴 東北大学助教授 橋爪 秀利 |

論 文 内 容 要 旨

本論文は、安定化材を含む第 2 種超電導体中の熱・電磁連成過渡現象の解明を目的とし、解析コードを開発して、クエンチの発生・伝搬・開腹時における温度場と電磁場の過渡挙動を解析するとともに、クエンチに対する安定性の評価を行ったもので、全編 4 章よりなる。

第 1 章 序 論

超電導マグネットの必要性を述べ、マグネットのコンパクト化と軽量化、および電流密度の向上を達成するために、過渡状態における安定性のより正確な評価が必要であることを指摘した。すなわち、超電導体のクエンチ伝搬と安定性に関する従来の研究を詳細に検討し、超電導体内部の不十分な電磁場解析のモデル化が、温度場と電磁場の正確な連成解析を困難にしていることを明らかにした。この困難を解決して、超電導体の熱・電磁連成過渡解析を実施するためには、温度場における超電導電流分布を評価する必要がある、フラクソイドの運動の解析を実施することにより、超電導電流分布の解析モデルを導出する必要があることを示した。

以上のことを踏まえ、安定化材を含む第 2 種超電導体の温度場と電磁場の詳細な連成解析を行い、クエンチ伝搬と過渡的な安定性を明らかにするために、以下の研究を実施する。

- (1) 第 2 種超電導体中の温度分布に対応した巨視的な超電導電流の分布を解析するモデルを構築する。このために、分子動力学的手法を適用して、超電導体内の温度変化に伴うフラクソイドの運動を 2 次元解析する。巨視的な超電導電流分布の温度依存性の考察から、臨界状態モデルの一つ

であるビーンモデルを基に超電導電流分布の解析モデルを構築する。

- (2) (1)において導いた解析モデルを用いて、安定化材を含む第2種超電導体の、詳細な温度場と電磁場の連成2次元解析を実施する。クエンチ伝搬と安定性を明らかにするとともに、従来の安定性解析との比較検討によりその問題点を指摘する。

第2章 分子動力学的手法による、温度変化に伴うフラクソイドの動的解析と温度・電磁場解析モデル

本章では、輸送電流が流れる第2種超電導体の局所の温度履歴により、フラクソイドの分布がどのように変化するかを明らかにするため、従来の分子動力学的手法に、新たに外部磁場を取り扱うための仮想的なフラクソイド群を導入し、さらにポテンシャル関数の温度依存性を考慮して、フラクソイドの運動の2次元解析を行った。

その結果、導体温度が一樣の条件下で、磁場が超電導体内部に浸入して輸送電流が流れ始める場合には、フラクソイドの分布はビーンモデルから予測される巨視的な磁場分布に従うことを示し、仮想的なフラクソイド群の導入の妥当性を確認した。さらに、巨視的な電流密度の温度依存性を求めた結果、実験式と良好な一致を示すことから、ポテンシャル関数に導入した温度依存性の評価が妥当であることを確認した。

そして、輸送電流が流れる超電導体の局所の温度上昇時においては、フラクソイドの分布の変化はビーンモデルにより良好な近似が可能であるが、温度下降時には、フラクソイドの分布は変化せず、ヒステリシスが存在することを明らかにした。

以上の解析により、ビーンモデルに、新たに温度変化に対する電流分布のヒステリシスを組み込み、温度履歴に対応できる巨視的超電導電流分布の解析モデルを構築した。

解析結果の一例として、輸送電流が流れ始める場合に対応したフラクソイド分布の変化の様子を図1に、この時の最終的なフラクソイドの数密度分布を図2に示す。そして、局所的に温度上昇が生じた後のフラクソイドの数密度分布を図3に示す。

第3章 安定化材を含む第2種超電導体における温度場、電磁場の連成2次元解析

本章では、第2章の結果を基に、安定化材を含む第2種超電導体の温度場と電磁場を直接数値解析する2次元解析モデルを構築した。本モデルの妥当性は、計算力学の立場から、解析に導入した物理モデル、およびその計算条件を検討することによって確認した。

超電導体におけるクエンチの発生と伝搬を解析し、クエンチ領域が超電導体中を2次元的に広がる様子を明瞭に示した。そして、導体長手方向へのクエンチ伝搬速度は、クエンチ発生後から数 μs 程度の間に急速に上昇することを明らかにした。

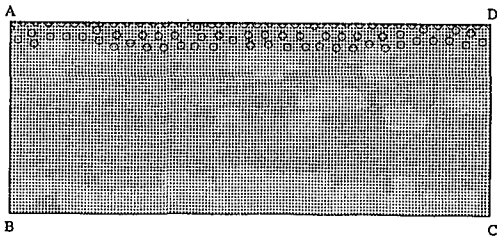
さらに、短時間のパルス加熱を導体中心部に与えて、クエンチに対する安定限界の評価を行った結果、現象は磁束流状態での電気抵抗と発熱率によって大きく変化し、クエンチの発生と開腹の様子、および安定限界は外部磁場に大きく依存することが明らかになった。次に、従来の解析で多用されている解析モデルによる結果と比較して、従来モデルの磁束流状態の取り扱いに問題があるこ

とを指摘し、さらに、温度拡散と磁気拡散の緩和時間のオーダーが大きく異なることから、詳細な温度場と電磁場の連成解析を実施する場合には、超電導電流分布の温度変化に対するヒステリシスを考慮する必要があることを述べた。

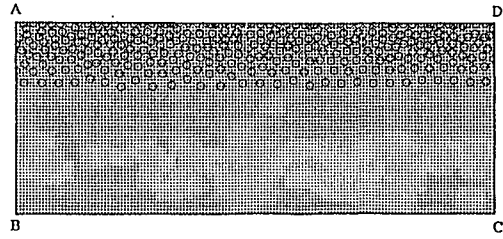
解析結果の一例として図4にクエンチが伝搬していく様子を示す。図5には、本研究で得られた安定限界とパルス加熱継続時間との相関を示す。

第4章 結 論

本章は、以上の成果を結論にまとめたものである。本研究では、第2種超電導体の巨視的電流を、フラクソイドの動的物理に基づく解析により明らかにし、巨視的なモデルである臨界状態モデルと微視的な現象であるフラクソイドの挙動との対応を明らかにした。また、従来の研究では明らかにできなかった詳細な温度場と超電導電流の連成解析を実行可能にする解析モデルを提案し、クエンチおよび安定性の解析を行い、本モデルの有用性を実証した。



(a) 80タイムステップ後



(b) 240タイムステップ後

図1 フラクソイドの侵入の様子 (GLパラメータが30.4で、ピン止め力が比較的に弱い場合。黒丸と白丸はピン止め中心とフラクソイドをそれぞれ表す。)

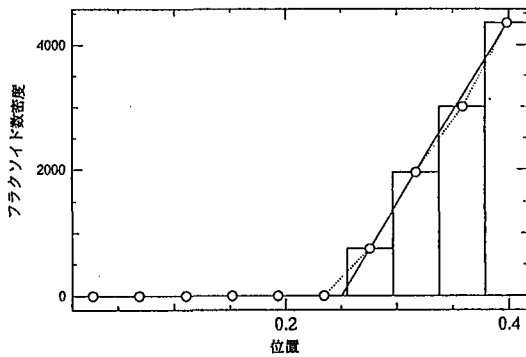


図2 フラクソイドの数密度分布

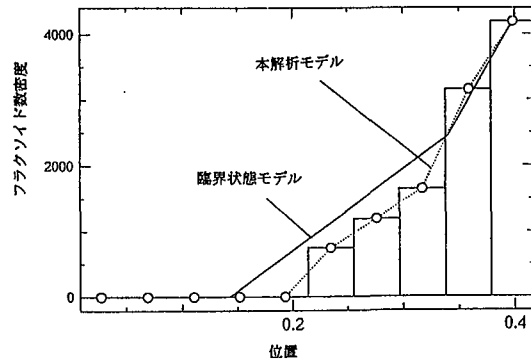
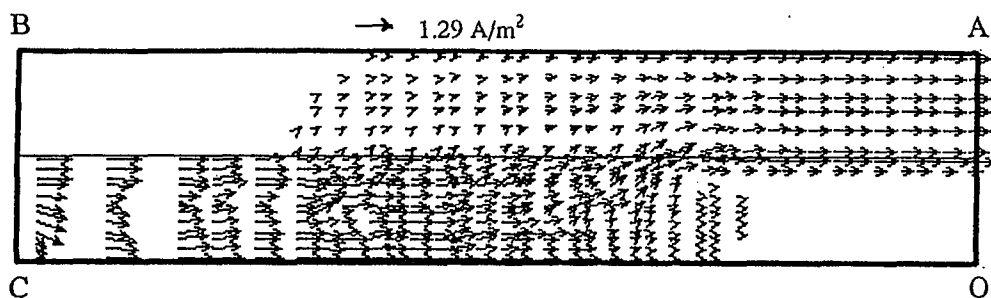
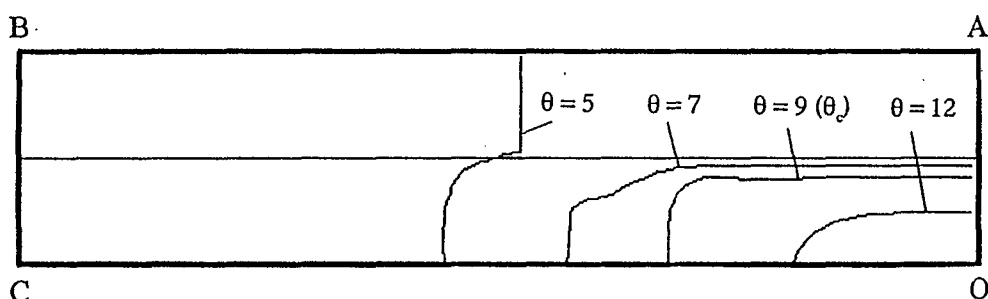


図3 局所的な温度上昇が生じた後のフラクソイドの数密度分布 (導体温度4.2Kから局所を7 Kに上昇。実践はビーンモデルを表す)



(a) パルス加熱終了後, $3.75 \mu\text{s}$ 経過した時の電流分布



(b) パルス加熱終了後, $3.75 \mu\text{s}$ 経過した時の温度分布

図4 ケンチ伝搬の一例。(解析体系の対称性から $1/4$ の領域を図示。四角形 OABC の上半分の領域は, 安定化材の銅を表す。外部磁場 2 Tesla, 銅の電気伝導率は $3 \times 10^7 \text{ S/m}$, 輸送電流量は臨界電流値の 75%。)

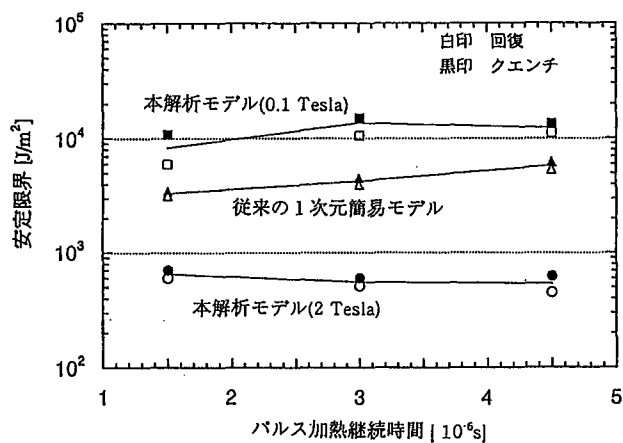


図5 安定限界とパルス加熱継続時間

審 査 結 果 の 要 旨

磁気閉じ込め核融合炉やその開発のためのプラズマ磁場閉じ込め実験装置、大型粒子加速器、磁気浮上列車や超電導電磁推進船、医療用MRI（磁気共鳴撮像）装置等における高磁場の発生には、飽和磁場による限界と大電流によるジュール熱の冷却等の問題がある常電導マグネットに代わり、超電導マグネットがすでに応用され、あるいは大規模に応用されようとしている。これらの超電導マグネットのシステムでは、特に安全上、高率の発熱につながるクエンチを防止あるいは抑制する手段を講ずることが要求され、マグネットの機械的、磁気的および熱的安定性が求められている。そのため過渡状態を含めた安定性を正確に評価することが必要不可欠である。これまで、超電導体内部の電気抵抗がゼロという性質のため電流磁場を正確に把握する解析が困難であり、それを簡略化しさらに定常状態での熱的平衡を仮定した評価によって過度に保守的な設計が行われてきた。これは、コンパクト、軽量で高い電流密度の超電導マグネットの製作の障害となっていると言っても過言ではない。

本論文はこのような状況の中で、先ず第2種超電導体中の温度分布に対応した巨視的な超電導電流分布を解析するモデルを構築し、このモデルを基礎に安定化材を含む第2種超電導体の温度場と電磁場の連成解析を行って、超電導体中のクエンチ発生、伝搬あるいは回復の様相を明らかにするとともに、過渡状態の熱的および磁気的安定性を詳細に述べたもので、全編4章よりなる。

第1章は序論である。従来研究の問題点を指摘し、超電導素線を対称とする詳細な温度場と電磁場の連成解析と、クエンチに関わる過渡的安定性の解明の重要性を示し、本研究の位置づけを明らかにしている。

第2章では、第2種超電導体中の温度分布に対応した巨視的な超電導電流分布を解析するモデルを構築している。分子動力学的手法を用いて、超電導体中のフラクソイドの運動をポテンシャルの温度依存性を考慮して解析し、輸送電流が流れ始めるときのフラクソイドの分布変化と、巨視的な超電導電流密度の温度上昇時および下降時のヒステリシス特製を明らかにし、これらの結果を基に巨視的電流分布解析モデルを構築している。これは独創的で新しい知見である。

第3章では、先ず第2章で得られた成果と提案された解析モデルを基に、第2種超電導体中の電流分布と温度場連成解析モデルを構築している。次に、この解析モデルを2次元体系の安定化材を含む第2種超電導体中のクエンチ発生、伝搬、回復時の温度場と超電導電流分布の連成変化、および安定性解析に適用している。この結果、温度変化に伴う超電導電流分布の過渡的な変化と2次元敵に拮がるクエンチ伝搬の様子を明瞭にし、クエンチ伝搬速度が初期の数 μ 秒後に急激に増大することを明らかにしている。さらに、過渡時の安定性解析によって、安定限界が従来の一次元簡易解析による評価と相違し、低磁場ではそれより高く、高磁場では逆に1オーダー低くなることを示し、温度場・電磁場連成2次元解析による評価の必要性、重要性を指摘している。これらは新しい注目のべき知見であり、超電導マグネット設計に貢献する重要な成果として高く評価される。

第4章は結論である。

以上要するに本論文は、第2種超電導体中の温度場に対応した巨視的電流分布を正確に与える解

析モデルを確立し、安定化材を含む超電導体中の温度場と電磁場の過渡連成挙動の2次元解析によりクエンチ伝搬、および安定限界を明らかにし多くの重要な知見を与えたもので、原子核工学並びに超電導工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。