

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 乙	第 7047 号
------	-----	----------

氏 名 高山 彰優

### 論文題目

高温超伝導体内遮蔽電流密度の時間発展シミュレーション：高性能解析法とその応用

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	客員准教授	中村 浩章
委員	京都大学	工学研究科	教授	松尾 哲司
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	辻 義之
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	吉田 隆

## 論文審査の結果の要旨

高山彰優君提出の論文「高温超伝導体内遮蔽電流密度の時間発展シミュレーション：高性能解析法とその応用」は、高温超伝導（HTS）薄膜内を流れる遮蔽電流密度の高性能解析法を提案し、同法を用いて、臨界電流密度の非接触測定法である誘導法と永久磁石法の性能を数値的に検討したものである。本論文は全6章で構成されている。

第1章では、本論文の動機付けとなる研究背景と目的を詳述している。特に、研究の背景として、臨界電流密度の非接触測定法である誘導法及び永久磁石法を説明する。さらに、これまで提案されてきた遮蔽電流密度の解析法を概観する。

第2章では、薄板近似と準定常近似に基づき、Maxwell方程式から遮蔽電流密度の支配方程式（遮蔽電流密度方程式）を導出している。さらに、巨視的超伝導特性を表すため、3種類のJ-E構成方程式を紹介する。

第3章では、遮蔽電流密度方程式の高性能数値解析法を提案している。有限要素法（FEM）で遮蔽電流密度方程式の初期値・境界値問題を離散化すると、連立1階常微分方程式の初期値問題が得られる。しかしながら、同初期値問題はRunge-Kutta法で必ずしも解ける訳ではない。たとえば、時間刻み幅自動調節機能をRunge-Kutta法に実装しても、J-E構成方程式の強い非線形性のため、数値解はある時間ステップで発散する。数値解の発散を抑制する目的で、本論文では、J-E構成方程式緩和法を考案した。その結果、連立常微分方程式を安定かつ高速に解くことに成功した。一方、連立常微分方程式の係数には特異4重積分が含まれる。そこで、特異4重積分を効率的かつ高精度に評価する手法を提案し、連立常微分方程式の係数を精度良く求めることを可能にした。

第4章では、FEMコードを用いて誘導法及び永久磁石法を数値的に再現し、高温超伝導薄膜の縁が両法の精度に及ばず影響を数値的に調べている。その結果、薄膜の縁近くにおいて、誘導法では臨界電流密度を見積もれないのに対して、永久磁石法では臨界電流密度を見積もれることが示された。さらに、分解能の点からは、誘導法は永久磁石法よりも優れていることが示された。

第5章では、クラックを含むHTS薄膜内の遮蔽電流密度を解析する手法を開発している。HTS薄膜がクラックを含む場合、クラック表面上で基本境界条件だけでなく、積分型Faraday則を課す必要がある。この積分型Faraday則は弱形式に完全に含まれるため、自然境界条件とみなすことができる。そのため、弱形式を基本境界条件と共に数値的に解きさえすればよいことになる。しかしながら、その結果得られる数値解は、離散化誤差のため積分型Faraday則を厳密に満たさない。この問題を解決する目的で、本論文では仮想電圧法を提案している。仮想電圧法では、クラック表面に仮想電圧を強制的に印加することにより、積分型Faraday則を数値的に満足させる。この仮想電圧法を実装したFEMコードを用いて、誘導法及び永久磁石法のクラック検出可能性を数値的に検討した。その結果、コイル内径がクラックを内包する場合、誘導法ではクラック検出が不可能であることが判明した。これに対して、永久磁石法によるクラック検出の困難さはクラック長に強く依存することが示されている。

第6章では、本論文の総括及び将来の展望を述べている。

上記の研究成果は、数値電磁界解析のみならず超伝導工学の分野に対して価値ある知見を多く含んでいる。特筆すべきは、特異多重積分高精度評価法、J-E構成方程式緩和法、仮想電圧法を駆使すれば、断面形状の連結性と無関係に、高温超伝導薄膜中の遮蔽電流密度を高精度かつ高速に解析できるようになったことである。

以上のように、本論文は、高温超伝導に関する数値電磁界解析を研究・開発する上で、新たな指針を与えるものであり、学術上・工学上寄与するところが大きい。よって、本論文の提出者高山彰優君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があるものと判断した。