

論文の内容の要旨

論文題目 2次錐計画問題を用いた直流磁気シールドの最適化

氏名 笹川卓

本研究では、直流磁界に対する磁気シールドの設計問題を扱う。具体的には、超電導磁気浮上式鉄道の磁気シールド重量の軽量化問題を取り上げる。本論文では元の問題を簡略化することにより、2次錐計画問題と呼ばれる凸計画問題に帰着させ、磁気シールドの最適設計を試み、モデルの有効性を実験を通じて検証する。さらにそれに近年開発された新しい最適化アルゴリズムである主双対内点法を適用することで、高速により信頼度の高い数値最適解の評価を得ようとするものである。序論を含め本論文は全9章からなる。

序論においては、この論文の背景と論文の構成について述べる。現在開発が進められている超電導磁気浮上式鉄道は、強力な超電導磁石を車上に搭載している。このシステムの開発では、超電導磁石から旅客スペースに漏洩する磁界を磁気シールドすることが、乗客を乗せる公共交通機関として重要な課題の一つとなる。一方浮上走行する車両にとっては、車体や車載機器の軽量化も同時に重要な課題である。そこで磁気シールド性能を維持しつつ、旅客スペースを磁気シールドするのに必要な磁性体重量を最小化することが望まれる。また序章では、本論文で重要な役割を果たす数理計画法、とりわけ主双対内点法の簡単な紹介も行う。

第1章では本論文で扱う磁気シールド問題を中心に、直流磁気シールド問題の一般的な事柄について概説を行うとともに、比較的一般にはなじみの薄い超電導磁気浮上式鉄道の磁気シールドとその特色について説明する。その特徴の主なものを挙げれば、超電導磁石による比較的強力な磁界の遮蔽、磁気シールドの軽量化の必要性、複雑なシールド板形状、そして空間的に非一様な磁界分布などとなる。これらの特徴は、地磁気などに対する従来

の磁気シールド問題と著しい対比をなすものであり、新たな研究が必要な所以である。この章は次の第2章の準備となるものである。

第2章ではまずこの問題（浮上式鉄道車両の磁気シールド重量最小化問題）に対し、問題の本質を損なわない範囲で、浮上式鉄道車両の磁気シールドにとり一番重要な磁性体の指標である $B-H$ カーブの飽和磁束密度のみに注目した単純化を行い、これを記述する最適化問題を導出する。それは磁気シールド板上での磁束の釣り合い条件を表す等式制約条件、磁気シールド板が飽和しないことに対応する2次錐制約条件、および磁気シールド材料の重量を線形目的関数とする、無限次元の凸計画問題となる。この凸計画問題は、簡単な書き換えで（無限次元）2次錐計画問題に帰着されることにも触れる。本論文では、この凸計画問題に対する二通りの計算方法を以下の章で提案する。

第3章では、この磁気シールド問題の導出過程に対する考察を行う。まず直流磁気シールド問題をエネルギー的（変分法的）側面から考察し、最適化問題導出の際に行った種々の簡略化（透磁率無限大、外部問題と磁気シールド最適化問題の分離）の意味することを再検討する。結局これらの簡略化は、磁性体の透磁率 μ をパラメータとする層別最小化に対応することを述べる。

第4章では、この無限次元凸計画問題を有限要素法で離散化した後に、ユークリッドノルム和の連続版である元の目的関数を未知数の2次多項式で表される目的関数で近似し、反復計算を行うことで最適化を行う方法（逐次反復改良法）を提案する。直観的に導出された方法で、現時点で数値解の収束性や最適性などに関して理論的保証は無い方法であるが、後の第5章以降の計算結果（と実測値）からわかるように、実際には有効に機能する計算法である。

第5章では、前段の手法を超電導磁気浮上式鉄道車両の実際の諸元に基づいた直流磁気シールドの設計に適用する。この計算結果に物理的な説明を与えるとともに、それを実物大模型による実験結果と比較検討する。そしてこの最適化問題を用いる設計法が、磁気浮上式鉄道車両の磁気シールド設計モデルとして適切であることを実証する。また本方法を用いて、「磁気シールド重量を現状より更に軽量化するためには、超電導コイルの配置を一部変更して台車端部に短いコイルを配置する方式が有利である」ことを示し、また磁気シールドの形状最適化の初歩的な試みなども行う。

本論文ではこの第5章までを第1部とし、浮上式鉄道の磁気シールド問題の特徴、その最適化問題への定式化、逐次反復改良法による計算とその磁気シールド試験結果による検証までを、直流磁気シールドの設計という実務的側面を中心に述べている。以下の第6章から始まる第2部では、第1部で提案された最適化問題について、磁気シールド最適化問題という元々の出発点を少し離れ、若干数理的な考察を加える。またより大規模な問題を解くにあたり必要な、プログラムの実装に関わる工夫についても述べる。第2部では2次錐計画問題が、より中心的な役割を果たす。

第6章では、本論文で定式化した無限次元凸計画問題の解析的性質を調べる。まず、「この簡略化した磁気シールド最適化問題の本質は、磁束の流れが磁気シールド板内で最短路（直線）を構成するように磁気シールド板を配置することにある」ことを示す。また主問題である磁気シールド重量最小化問題の双対問題を、具体的に構成する。得られた最適化

問題の境界条件についても、この章で検討する。

第7章では、この無限次元凸計画問題を少し変形したものを離散化することにより、(有限次元の)2次錐計画問題を導く。また元の問題の形状及び電流分布に対称性がある場合に、境界条件を設けて計算領域を縮小することがよく行われるが、本論文で扱う問題に対して行われる境界条件処理の妥当性を示す。次に、得られた2次錐計画問題を計算するのに用いられる主双対内点法の既知のことからについて、本論文に必要な範囲の紹介を行う。本章ではさらに、元の離散化前の凸計画問題の最適値に対する、数値解(有限要素解)を用いた上下界の構成法についても論じる。この上下界は、次の8章で具体的に計算される。

最後の第8章では、こうして得られた2次錐計画問題に対して主双対内点法を実際に適用し、プログラムの実装を行う。まず主双対内点法の種々の探索方向ベクトルの比較検討を行い、その後の検討を行うのに最適な探索方向ベクトルを選定する。以上を踏まえ、本2次錐計画問題に対してより高速で頑健な主双対内点法プログラムを開発し、これを用いて元の無限次元凸計画問題の上下界値の具体的な計算を行うとともに、5章で行った逐次反復改良法の計算結果との比較を通じてその検証を行う。問題を大規模化した場合のプログラムの挙動についても検討する。また、同プログラムのロバスト最適化問題への適用を試み、実用的な近似計算方法とその結果について述べる。