

学 位 論 文 題 名

均質化法を用いた磁界解析に関する研究

学位論文内容の要旨

有限要素法等を用いた電磁界解析は、電動機や変圧器をはじめとする電気機器の設計や無線通信における電波伝搬の解析、高温超電導体の電磁現象の解析等、様々な分野に応用されてきた。近年においては、電子計算機の急速な高性能化と普及を背景に、電磁界解析は各種デバイスの開発・設計業務で日常的に使用する必要不可欠な技術となった。そして、解析や設計の対象は、大規模化、複雑化、高精度化の傾向にあり、より高度な電磁界解析の実現が期待されている。しかし、大規模な電磁界解析に要する計算コストは膨大な負担であり、解析の高速化が強く望まれている。また、パーソナルコンピュータやワークステーションといった低廉な小型計算機を使って、より高度な解析を行いたいというニーズもある。そのため、解析の高速化や使用メモリの低減は、今日の電磁界解析における技術的課題となっている。

電磁界解析における計算量増大の一因として、解析対象物の大きさや形状に由来する問題がある。例えば、電気鉄道のき電電流から発生する磁界の分布を近傍の鉄筋建築や土木構造物による擾乱を考慮して、有限要素法で解析する場合である。このような問題では、磁界分布の解析領域は数十メートルの範囲に及ぶが、構造物内部には数センチメートルの間隔で無数の棒鋼が格子状に配列されている。このような複雑な磁性体の構造を忠実にモデリングした場合、細かい要素分割を行う必要があるため、解析は使用メモリや計算時間と言う点で困難が生じる。このような問題では、複雑な磁性体の構造を、等価な透磁率を持った均質な磁性体（均質体）に置き換えること、すなわち均質化が計算量の低減に有効だと考えられる。

この様に、混合媒質を見かけの材料定数、すなわち等価材料定数の媒質に置き換える手法は、均質化法とよばれており、これまでに地殻環境工学における地下水流動解析や応用力学における複合材料の弾性解析等で使われてきた。電磁界解析に均質化を適用した事例は、混合媒質中の波動伝播や電磁シールド用複合材料の研究において、関連する報告がある。これらの解析では、等価材料定数を、古くから知られている Maxwell-Garnett の式や Bruggeman の式により算定している。しかし、これらは、主材の中に材料定数の異なる球状粒子（2 次元では円柱）が存在している様な混合媒質を前提にした算定式である。また、粒子間の相互作用を適切に考慮していない。実際の構造物では、様々な形状の磁性体が使われているだけでなく、磁性体同士の接近もあるため、これらの算定式を適用できない場合がある。

そこで本論文では、任意形状の磁性体に適用可能な均質化法を提案し、磁界解析における妥当性と有用性について論じたものである。内容は、全 7 章で構成されている。

第 2 章では、従来の解析で使われてきた Maxwell-Garnett の式と Bruggeman の式について説明している。これらの算定式は、球状や円柱形状の磁性体を含む構造物にしか適用できない。また、磁性体間の相互作用を適切に考慮していない。そのため、実際の構造物の均質化には、任意形状の磁性体に適用可能な均質化法の提案が必要であることを示した。

第 3 章では、任意形状の磁性体に適用可能な、単位セルを用いた均質化法を提案した。

本手法では、磁性体の構造を無限の広がりを持った周期構造と仮定し、その性質を表すことができる最小体積を単位セルとして設定する。等価透磁率は、ローレンツの微視的磁界の概念を単位セルに適用した平均場に基づく定義、または単位セルが持つ磁気エネルギーに基づく定義により算定する。この算定は、有限要素法により解析した単位セル内部の磁界分布を基に行う。そのため、本手法は、任意形状の磁性体に適用可能で、かつ相互作用も考慮している。数値実験を行った結果、本手法による等価透磁率が妥当で、かつ Maxwell-Garnett の式や Bruggeman の式よりも精度が高いことを確認した。

第4章では、単位セルを用いた均質化法の非線形磁界解析への適用について説明した。均質体の磁性を求める際、まず単位セルに印加する磁界を段階的に強め、各ステップにおける単位セルの磁気エネルギーを求める。次に、前述の「磁気エネルギーに基づく定義」により、均質体の B - H 特性曲線を決定する。数値実験を行った結果、提案した均質化法が非線形解析にも適用可能であることがわかった。

第5章では、磁気シールド等によく見られる数枚の磁性鋼板で構成された層状構造物に均質化法を適用する場合の単位セルの設定について説明した。層状構造物の場合、鋼板の面方向と垂直方向では空間的な広がり異なる。そのため、第3章で述べた単位セルでは、相互作用が適切に考慮されない。ここでは、層状構造物における磁性体の相互作用を適切に評価するため、空気領域が付加された単位セルを提案した。数値実験の結果、提案した単位セルを適用することにより、磁界解析の精度が向上することを確認した。

第6章では、提案した均質化法の適用例を示した。

1 つ目の適用例は、強磁性鋼板で構成された層状構造物による磁気シールド効果を解析した例である。この解析では、第5章で提案した空気領域を付加した単位セルを適用した。均質化法の適用により、要素分割数を大幅に低減することができた。

2 つ目の適用例は、非線形特性を持つ複雑な形状の磁性体によるシールド効果を解析した例である。この解析では、第4章で述べた手法を適用した。提案手法を適用した結果、要素分割数を大幅に低減することができた。また、非線形解析では、ニュートンラプソン法による繰り返し計算を伴うため、均質化法による計算時間短縮の効果は大きいことが認められた。

3 つ目の適用例は、より高度な解析例として、電気鉄道に沿って細かい形状を持つ構造物を設置した場合の磁気シールド効果を解析した。磁気シールドは、立体的な構造を持つため、この問題は本来3次元解析を行う必要がある。しかし、均質化法の適用により、磁気シールドは鉄道に平行な鋼板と見なすことができるため、2次元問題として扱うことが可能になった。この様な問題では、均質化法により次元を下げた解析が可能になるため、計算量の低減効果は大きい。均質化法により、この様な高度な解析が小型計算機でも解析することが可能になった。

以上の適用例の結果から、提案した均質化法を用いた磁界解析が、メモリ使用量の低減や計算時間の短縮に有効であることが確かめられた。

第7章では、最後に結論として、以上の内容をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 間 利 久
副 査 教 授 五十嵐 一
副 査 教 授 北 裕 幸
副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

均質化法を用いた磁界解析に関する研究

有限要素法等による磁界解析では、ポテンシャル分布を求めるために解析領域の要素分割を行う。解析対象の磁性体が微細な形状を持つ場合、細かい要素分割を行う必要があるため、メモリ使用量や計算時間の点で解析に困難を伴うことがある。このような磁界解析問題では、磁性体を等価な磁性（等価透磁率）を持った均質な物体（均質体）に置き換えることによってメモリ使用量の低減と計算時間の短縮が可能だと考えられる。このような手法は均質化法と呼ばれており、応用力学における複合材料の弾性解析等で使われてきた。電磁界解析の分野では、均質化法はまだ一般化されていない手法だが、大気中の波動伝播や電磁複合材料の電波吸収等の研究において、関連する解析事例が報告されている。これらの解析では、等価誘電率や等価透磁率を、古くから知られている Maxwell-Garnett の式や Bruggeman の式により算定している。しかし、これらは、主材中に材料定数の異なる球状粒子（2 次元では円柱）が存在している様な混合媒質を前提にした算定式であり、また粒子間の相互作用を適切に考慮していない。そのため、適用可能な対象物が極めて限定されてしまうという問題がある。実際のデバイスや構造物で使われている磁性体には様々な構造のものがおり、均質化法をより多くのものに適用するためには、任意形状の磁性体に適用できる手法の考案が必要である。

本論文は、任意形状の磁性体に適用可能な均質化法を提案し、その手法の磁界解析における妥当性と有用性を数値実験により検証した結果をまとめている。

以下に本論文の概要を示す。

第 1 章は、本論文の背景と目的、構成について述べている。

第 2 章では、従来の解析で使われてきた Maxwell-Garnett の式と Bruggeman の式の問題点について述べ、任意形状の磁性体に適用可能な均質化法の必要性を提議している。

第 3 章では、任意形状の磁性体に適用可能な単位セルを用いた均質化法を提案している。本手法では、磁性体の構造を無限の広がりを持った周期構造と仮定し、その性質を表すことができる最小体積を単位セルとして設定する。等価透磁率は、単位セル内部の平均場または磁気エネルギーにより定義する。この等価透磁率は、有限要素法を用いて解析した単位セル内部の磁界分布を基に決定するため、任意形状の磁性体に適用可能で、かつ相互作用も考慮している。さらに、本手法による等価透磁率が妥当で、かつ Maxwell-Garnett の式や Bruggeman の式よりも精度が高いことを数値実験により示している。

第4章では、本手法を非線形磁界解析に適用する際の実用的なプロセスについて述べている。また、本手法が非線形磁界解析にも適用可能であることを、数値実験により示している。

第5章では、磁気シールド等によく見られる鋼板やシート材で構成された層状構造物に均質化法を適用する場合について説明している。層状構造物では、鋼板の面方向と垂直方向では空間的な広がり異なるため、第3章で提案した単位セルでは、相互作用が適切に評価できない。ここでは、より正確に等価透磁率を算定するため、空気領域が付加された単位セルを提案している。さらに、この単位セルの適用により、磁界解析の精度が向上することを数値実験により示している。

第6章では、3つの磁気シールド問題を解析し、本手法の有用性を示している。

1つ目の適用例では、電力線路に対する層状構造物の磁気シールド効果を解析している。解析結果は、本手法により、要素分割数が大幅に減少するだけでなく、計算時間も短縮することを示している。

2つ目の適用例では、非線形特性を持つ複雑形状の磁性体による磁気シールド効果が解析されている。解析結果は、Newton-Raphson法を用いた非線形解析では、反復計算を行うため、本手法により極めて大きな計算時間の短縮効果が得られることを示している。

3つ目の適用例では、電気鉄道に沿って設置された構造物による磁気シールド効果を解析している。この解析では、本手法を用いて細かい形状を持った構造物を線路に平行な鋼板としてモデル化している。この問題では、本来大規模な3次元解析を必要とするが、本手法により簡易な2次元問題に置き換えられている。この適用例は、本手法により小型計算機でも高度な問題を解析することが可能になったという典型例を示している。

第7章では、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、任意形状の磁性体に適用可能な等価透磁率の算定法を提案し、磁界解析における均質化法の適用可能性と有用性について有益な知見を得たものであり、本研究の成果は電磁界解析及び電磁応用工学の分野に大きく貢献するものと考えられる。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。