

## 学位論文題名

## 渦電流現象数値解析技術とその応用に関する研究

## 学位論文内容の要旨

磁場の時間的に変化に伴い電場が発生し、変化磁場中に金属板があるとき、金属板には電流が誘起されて流れる。この誘導電流が渦電流である。渦電流の発熱作用、電磁力作用等を有効に応用した多種多様な機器があり、将来、新たな機器の開発も期待される。また、その影響を低減したい渦電流に絡んだ現象も多くある。誘起される渦電流並びにその影響を定量的に把握することはこれら応用機器の設計開発、最適化、現象の理解にとって極めて重要である。より複雑な体系において渦電流現象をシミュレーションするには、計算機を用いた数値解析技術が必須となる。計算シミュレーションにより機器・装置の性能、工学的な課題を事前に予測し、必要な対策を講ずることができるので試作回数の低減が図れ、高性能な機器・装置の開発期間を短縮することができる。そこで、機器、現象の特徴に適合した精度のよい効率的な計算法、計算アルゴリズムを開発し、それを磁場の生成・消滅・移動に伴う渦電流現象、渦電流損現象等の解析に応用して現象を定量的に明らかにし知見を得ることは、工学的に有用で意義があると考え、本研究を行った。

本論文は全9章より成り、第1章を緒論、第9章を結論とした。

第2章では、本研究は鉄材のない渦電流場を対象としていることを配慮して採用した2つの渦電流数値計算法、即ち、等価回路法並びに電流ベクトルポテンシャル法についてその定式化を明かした。等価回路法は渦電流の流れ方が明確に規定できるときに有効である。電流ベクトルポテンシャル法は渦電流の流れ方が特定できないときに、渦電流場の支配方程式を解く。等価回路法についてはシールド付き空心リアクトルモデルを、電流ベクトルポテンシャル法については核融合装置の構造物に誘起される渦電流を想定した各種基礎モデルを用いて、定常状態での渦電流を実測し、計算結果との比較を行い、各計算法の妥当性を確かめた。

第3章では磁場の生成・消滅に伴い誘起される渦電流の解析例として核融合装置を取り上げ、真空容器、ライナ、架台に誘起される渦電流を解析した。解析法としては電流ベクトルポテンシャル法を用いた。真空容器はドーナツ形状をしており、円周方向に卵形断面形状の厚肉部とベロズが交互に溶接されている。計算に際して、ベロズの異方抵抗性並びにドーナツの孔の部分を通る磁場による渦電流を考慮した。プラズマ電流が移動しながら消滅するときに真空容器に誘起される渦電流を計算し、厚肉部を鞍形に流れる渦電流を示した。ベロズを備えた真空容器の電磁モデルを製作し、過渡的に変わる磁場を含め、印加磁場周波数を変えて渦電流並びに容器内部に浸透する磁場を測定するとともに計算結果と対比した。ライナについては、ライナに誘起される渦電流とトロイダル並びにポロイダル磁場との相互作用により、ライナ各部に働く電磁力を計算した。また、プラズマ消滅時定数並びにライナの長さ誘起される渦電流

の関係を明らかにした。架台については電流ベクトルポテンシャル法において孔並びにスリットがあるときの計算アルゴリズムを示すとともに、架台に誘起される渦電流による不整磁場を低減する方策に関する検討結果を示した。

第4章では磁場の移動に伴い誘起される渦電流の応用として、軌道側に短絡コイルを置くループ式磁気浮上列車を取り上げた。等価回路法を用い、渦電流に相当する誘起電流を求め、磁気浮上列車の浮上特性を計算する方法を示した。浮上力並びに磁気制動力の速度依存性、浮上高と浮上力、水平方向変位力、揚抗比、磁気モーメント等の解析結果を明らかにした。

第5章では軌道側に導電性シートを置くシート式磁気浮上列車について、列車の走行方向に直交する面内での2次元解析を等価回路法により行う場合の定式化を示すとともに平坦なシート、対向Lチャンネル軌道での浮上案内特性の解析結果を示した。次にシート式磁気浮上列車の準3次元解析を電流ベクトルポテンシャル法で行うときの定式化を示し、解析を行った。要素分割はシート部分のみで、磁石の移動に伴う渦電流が、安定に求解できる。列車速度による渦電流の流れパターンの違い、車上コイルの各辺各部に働く電磁力等を明らかにした。

第6章では渦電流による損失問題としてMRI用超電導磁石の極低温容器に誘起される渦電流を解析した。MRIのZ傾斜磁場コイルによる渦電流については等価回路法を用い、X、Y傾斜磁場コイルによる渦電流については電流ベクトルポテンシャル法を用いて計算した。熱シールド板の径、抵抗率を変えて4.2Kの液体ヘリウムに浸漬されているSUS製の巻き枠に発生する渦電流損を計算した。また、極低温容器に誘起される渦電流が、傾斜磁場コイル自身が作る磁場に対して及ぼす影響を明らかにした。Z傾斜磁場コイルについては磁場の直線性と磁場発生効率の向上を実現するコイル設計法、X、Y傾斜磁場コイルについては極低温容器に誘起される渦電流を大幅に低減するアクティブ・シールド形傾斜磁場コイルのコイル設計法を示した。

第7章では、渦電流並びに渦電流損現象を直裁に解釈し、局部過熱防止、損失低減などの対策を講ずる際に有効な汎用性のある考え方、物差しを明らかにするために、薄い無限長非磁性金属平板の渦電流現象を電流ベクトルポテンシャル法により解析した。電流ベクトルポテンシャル法におけるR-リミット、L-リミットの物理的な意味を明確にし、各リミットにおける限界値の計算法を明示した。両リミットの限界値から、板がR、Lどちらの領域にあるか判定でき、板の渦電流損特性が推定できる。磁場の平均値が等しくとも、磁場分布が異なれば発生する損失は異なる。R領域にある板では磁場分布の影響が大きい。板の一部に磁場が印加されている場合には、R領域にある板では磁場がない部分の抵抗が並列に作用し、損失の増大並びに印加側の渦電流の増加を招く。均一磁場中にある板をスリットにより細分し、電氣的に絶縁した場合には、板がL、Rのどちらの領域にあるかにより、損失低減効果が判定できる。L領域にある板では板の細分により損失が増大する場合がある。薄板近似の仮定より、予め計算で求めた一对の曲線を基に、印加磁場周波数、板幅、板厚、固有抵抗が任意の無限長平板の渦電流並びに渦電流損が算定できることを示した。

第8章では、仮想的な印加磁束密度を線形計画法により最適化し、コイル形状を予め規定することなく渦電流の形を借りて電流形状並びに起磁力の最適化を行う「仮想印加磁束密度法」を提案した。「仮想印加磁束密度法」の定式化を明らかにすると共に、軸対称として扱えるMRI用Z傾斜磁場コイルに本計算法を適用し、所要空間に均一の傾斜磁場を生成する1ターン電流の粗密分布となる分布巻コイルの形状並びに起磁力の最適化を試みた。また、本計算法をMRI用X、Y傾斜磁場コイルに適用し、自由曲線からなる渦形コイルの形状並びに起磁力の最適化を試みた。その結果、本計

算法の妥当性並びに有効性を確かめることができた。

以上のように、本論文は、渦電流現象を数値解析する技術を開発し、それを渦電流に関連した機器の特性解析、渦電流現象の解明に応用して、種々の基礎的な知見を与えることができた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 本 間 利 久

副 査 教 授 田 頭 博 昭

副 査 教 授 小 柴 正 則

## 学位論文題名

### 渦電流現象数値解析技術とその応用に関する研究

磁場の時間的に変化に伴い電場が発生し、変化磁場中に金属板があるとき、金属板には過電流が誘起されて流れる。この渦電流の発熱作用、電磁力作用などを有効に応用した機器に様々なものがあり、将来、新たな機器の開発も期待される。また、その影響を低減した渦電流に絡んだ現象も多くある。このため、誘起される渦電流ならびにその影響を定量的に把握することはこれら応用機器の設計開発、最適化、現象の理解にとって極めて重要となってきた。さらに、より複雑な体系において渦電流現象をシミュレーションするには、計算機を用いた数値解析技術が必須となる。その理由は、計算シミュレーションにより機器・装置の性能、工学的な課題を事前に予測し、必要な対策を講ずることができるため試作回数の低減が図れ、高性能な機器・装置の開発期間を短縮することができるからである。そこで、機器、現象の特徴に適合した精度のよい効率的な計算法、計算アルゴリズムを開発し、それを、磁場の生成・消滅・移動にともなう渦電流現象、渦電流損現象等の解析に応用して現象を定量的に明らかにし新しい知見を得ることが、本研究の目的である。

本論文は全9章よりなり、第1章を緒論、第9章を結論とした。

第2章では、非磁性体の渦電流場を対象とし、等価回路法並びに電流ベクトルポテンシャル法についてその定式化法を明かにしている。等価回路法は渦電流の流れ方が明確に規定できるときに、電流ベクトルポテンシャル法は渦電流の流れ方が特定できないときに有効であることを、各種基礎モデルを用いて、実測値と計算結果との比較から明らかにした。

第3章では核融合装置を取り上げ、真空容器、ライナ、架台に誘起される渦電流を電流ベクトルポテンシャル法を用いて解析している。ドーナツ形状の真空容器では、ペロズの異方抵抗性並びにドーナツの孔の部分を通る磁場による渦電流の解析を行い、ペロズを備えた真空容器の電磁モデルの実測値と計算結果と比較検討している。ライナについては、ライナに誘起される渦電流とトロイダル並びにポロイダル磁場との相互作用により、ライナ各部に働く電磁力を計算し、プラズマ消滅時定数並びにライナの長さから誘起される渦電流の関係を明らかにした。架台については孔並びにスリットがあるときの架台に誘起される渦電流による不整磁場の低減する方策に関する検討を行い有益な知見を得ている。

第4章ではループ式磁気浮上列車の浮上特性を等価回路法を用いて解析し、浮上力並びに磁気制動力の速度依存性、浮上高と浮上力、水平方向変位力、揚抗比、磁気モーメント等

の解析結果を明らかにした。

第5章ではシート式磁気浮上列車について、等価回路法により2次元解析を行い、平坦なシートおよび対向Lチャンネル軌道での浮上案内特性を解析した。また、準3次元解析を電流ベクトルポテンシャル法を用いて行い、列車速度による渦電流の流れパターンの違い、車上コイルの各辺各部に働く電磁力等を明らかにした。

第6章ではMRI用超電導磁石の極低温容器に誘起される渦電流を解析した。MRIのZ傾斜磁場コイルによる渦電流については等価回路法を用い、X、Y傾斜磁場コイルによる渦電流については電流ベクトルポテンシャル法を用いて計算している。Z傾斜磁場コイルについては磁場の直線性と磁場発生効率の向上を実現するコイル設計法、X、Y傾斜磁場コイルについては極低温容器に誘起される渦電流を大幅に低減するアクティブ・シールド形傾斜磁場コイルのコイル設計法明らかにした。

第7章では、渦電流並びに渦電流損現象を直裁に解釈し、局部過熱防止、損失低減などの対策を講ずる際に有効な汎用性のある考え方、物差しを明らかにするために、薄い無限長非磁性金属平板の渦電流現象を電流ベクトルポテンシャル法により解析した。電流ベクトルポテンシャル法におけるR-リミット、L-リミットの物理的な意味を明確にし、各リミットにおける限界値の計算法を明示し、両リミットの限界値から、板がR、Lどちらの領域にあるか判定でき、板の渦電流損特性が推定できることを明らかにした。また、薄板近似の仮定より、予め計算で求めた一對の曲線を基に、印加磁場周波数、板幅、板厚、固有抵抗が任意の無限長平板に対する渦電流並びに渦電流損が算定できることを示した。

第8章では、仮想的な印加磁場密度を線形計画法により最適化し、コイル形状を予め規定することなく渦電流の形を借りて電流形状および起磁力の最適化を行う「仮想印加磁場密度法」を提案し、MRI用X、Y傾斜磁場コイルに本手法を適用し、自由曲線からなる渦形コイルの形状並びに起磁力の最適化を試み、本手法の妥当性並びにその有効性を確かめた。

これを要するに、著者は、渦電流現象を数値的に解析する方法を開発し、それを渦電流に関連した機器の特性解析、渦電流現象の解明に応用し、種々の基礎的な重要な知見を得たものであり、応用電磁工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

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あるものと認める。