

|         |                                      |
|---------|--------------------------------------|
| 称号及び氏名  | 博士（工学） 樋口 理宏                         |
| 学位授与の日付 | 2007年3月31日                           |
| 論文名     | 「変動磁場を受ける導電性材料の<br>電磁熱弾性挙動に関する理論的研究」 |
| 論文審査委員  | 主査 谷川 義信<br>副査 杉村 延広<br>副査 三村 耕司     |

## 論文要旨

近年の電磁気応用分野の進展に伴い、磁場内で作動する機械構造物・構造要素や電磁誘導現象を積極的に利用した加熱・加工処理法が増加して来ている。例えば、前者については、現在開発研究が進められている電気浮上列車、トカマク型核融合炉や、超強磁場を発生させるパルスマグネットなどの強磁場内で使用される機器などが挙げられ、後者については電磁誘導加熱(IH: Induction Heating)や電磁成形法などが挙げられる。このような磁場の時間変動を受ける導電性構造物には、電磁誘導現象により渦電流が誘起される。この渦電流と磁場により、電磁力が構造物に作用するとともに、導電性材料の抵抗により渦電流損と呼ばれるジュール熱が生じる。すなわち、変動磁場を受ける導電性構造物には、電磁力により誘起される電磁応力と、渦電流に起因する温度変化によって誘起される熱応力の二種類の異なった形態の応力が生じる。

これまで、磁場の作用を受ける弾性体の力学的挙動について論じた電磁弾性力学および電磁熱弾性力学に関する研究が数多く行われてきているが、まず、一様磁場中に置かれた導電性材料における弾性波の伝播や分散に関する研究が挙げられる。これらの研究においては、一様静磁場中に置かれた常磁性あるいは反磁性導体材料からなる弾性体に、力学的負荷あるいは熱的負荷により生じる弾性波と、その弾性体の運動・変形により誘起される渦電流との相互作用を主に論じており、磁場の時間変動により誘起される渦電流の影響を無視できうる場合を考えている。これらの研究は、地球物理の分野において地震波におよぼす地磁気の影響について論じられたのが始まりであり、近年では、一般化された熱弾性論を拡張した電磁熱弾性の理論も構築されてきている。また、磁場中に置かれた強磁性体の座屈・振動といった安定性に関する研究や、き裂を有する常磁性あるいは反磁性、および強磁性弾性体の特異応力場に関する研究が精力的に行われてきている。

一方で、変動時場の作用を受ける導電性構造物においては、電磁誘導現象に伴うジュール熱による温度場の影響が無視できない場合も多いと考えられる。しかし、変動磁場を受ける導電性構造物を考える際、導体の変形に伴う速度起電力に起因する非線形な連成項を含む電磁熱弾性基礎方程式系を取り扱わなければならない、解析が極めて困難であり、このような問題に対する解析的研究は極めて少ない。以上に述べたように、電磁誘導は現象に起因する温度変化および電磁力を受ける導電材料からなる構造物の電磁熱弾性挙動に関する解析的方法や定量的評価は十分に解明されておらず、これらは電磁気応用機器の設計や安全性評価の観点から重要な課題といえる。

そこで、本研究では、導電性金属材料の中でも取り扱いが容易である常磁性あるいは反磁性導電性材料を対象として、時間変動する外部磁場の作用を受ける導電性構造物の電磁熱弾性挙動を理論解析し、導電性構造物に生じるローレンツ力により誘起される電磁応力と渦電流損により誘起される熱応力の二種類の異なった形状の応力の動的挙動および準静的挙動を明らかにすることを目的としている。本論文は、全5章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章「序章」では、本研究の背景と目的について述べるとともに、本論文の研究内容の概要について述べている。

第2章「変動磁場を受ける導体無限円柱の電磁熱弾性挙動」では、変動磁場を受ける導体無限円柱の動的／準静的電磁熱弾性挙動について論じている。時間に関して任意関数で表される外部磁場が、常磁性あるいは反磁性導体からなる無限円柱の表面に平衡に作用する場合を想定し、導体無限円柱内の電磁場、温度場および弾性場の平面軸対称基礎方程式系を定式化している。このとき、磁場に関する基礎方程式には導体の変形に伴う速度起電力に起因する非線形な連成項が現れ、取り扱いが困難となる。そこで、速度起電力に伴う連成項が無視でき得る条件を導き出し、非連成問題としての取り扱いを可能とし、変動時場により誘起される渦電流損による温度変化とローレンツ力を受ける導体無限円柱の電磁熱弾性挙動を理論解析により取り扱っている。電磁場の解析においては、任意関数で与えられ、時間変動する非同次型の境界条件を同次型の境界条件に置き換え、変数分離法を用いて磁場および渦電流の解析解を導出している。次に、渦電流損を考慮した熱伝導方程式を、導体無限円柱の表面で熱放散される場合あるいは表面が絶縁される場合に対して変数分離法を用いてとき、温度変化の解析解を導出している。さらに、軸対称平面ひずみ状態を仮定することにより、温度変化とローレンツ力により導体無限円柱に生じる応力と変形の動的解および準静的解を解析解として導出している。動的解を導出するにあたり、変数分離法を用いている。なお、時間変動する外部磁場を任意関数の形で与え、解析解を導出しているため、様々な磁場の印加条件に適用することができる。そこで、1. 誘導加熱される導電性構造物を想定し、任意関数を正弦関数で仮定した場合、2. 過渡的な強磁場を受ける導電性構造物を想定し、任意関数を正弦関数で平滑化されたランプ関数で仮定した場合、の二つのケースについて取り上げ、理論解析に基づいた数値計算を行い、導体無限

円柱に生じる電磁応力と熱応力の動的挙動と準静的挙動を評価している。任意関数を正弦関数で与えた場合には、導体無限円柱に生じる応力は、熱応力の準静的解により十分評価できることを示している。一方、任意関数を正弦関数で平滑化されたランプ関数で与えた場合には、熱応力と電磁応力の大きさのオーダーが等しく、ランプ関数の立ち上がり時間が短い場合は動的解析が必要であることを示している。また、電磁応力に関しては、応力派の干渉により円柱の中心で、準静的解では得られない大きな応力が得られることを示している。

第3章「変動磁場を受ける導体無限平板の電磁熱弾性挙動」では、変動磁場を受ける導体無限平板の動的／準静的電磁熱弾性挙動について論じている。ここでは、時間に関する任意関数で表される外部磁場が、常磁性あるいは反磁性導体からなる無限平板の両表面に平行に作用する場合を想定している。第2章の円柱座標系で規定される無限円柱に対して、第3章では直交座標系で規定される無限平板を取り上げることにより、磁場変動により誘起される渦電流損による温度変化とローレンツ力の作用を受ける導電性構造物の物理的挙動を、より簡略化した形で評価することを目的としている。第2章と同じく、磁場に関する基礎方程式には導体の変形に伴う非線形の連成項が現れるが、第2章と同様に非連成問題に帰着させ取り扱っている。理論解析においては、第2章と同様に、変数分離法に基づき解析を行っており、時間変動する外部磁場を任意関数の形で与え、解析解を導出しているため、様々な磁場の印加条件に適用することができる。さらに第2章と同様に、二つのケースに対して数値計算を行い、導体無限平板に生じる電磁応力と熱応力の動的挙動と準静的挙動を評価している。任意関数を正弦関数で与えた場合には、導体無限平板に生じる応力は、熱応力の準静的により十分評価できることを示している。一方、任意関数を正弦関数で平滑化されたランプ関数で与えた場合には、熱応力と電磁応力の大きさのオーダーが等しく、ランプ関数の立ち上がり時間が短い場合は、電磁応力に関しては動的解析が必要であるが、第2章の無限円柱とは異なる応力波の伝播挙動が示されている。

第4章「変動磁場を受ける導体無限中空円筒の電磁熱弾性挙動」では、変動磁場を受ける導体無限中空円筒の動的／準静的電磁熱弾性挙動について論じている。ここでは、時間に関する任意関数で表される外部磁場が、常磁性あるいは反磁性導体からなる導体無限中空円筒の外側表面に平行に作用する場合を想定している。第2章の無限円柱に対して、第4章では内部に空洞領域を有する無限中空円筒を取り上げ、電磁誘導現象に伴う温度変化とローレンツ力を受ける薄肉構造要素の物理的挙動を評価することを目的としている。また、第2章および第3章と同じく、導体内の磁場に関する基礎方程式に含まれる速度起電力に伴う連成項を無視することにより非連成問題に帰着させ取り扱っている。電磁場の解析においては、中空円筒内部の空洞領域を考慮しているため、非同次の境界条件を同次境界条件に変換することが困難となり、ラプラス変換法を用いて導体内の磁場と渦電流および空洞領域の磁場の解析解を導出しており、温度場および弾性場の解析においては変数分離法を用いて解析を行っているが、時間変動する外部磁場を任意関数の形で与え、解析解

を導出しているため、様々な磁場の印加条件に適用することができる。さらに、第2章と第3章と同様に、二つのケースに対して数値計算を行い、導体無限中空円筒に生じる電磁応力と熱応力の動的挙動と準静的挙動を評価している。任意関数を正弦関数で与えた場合には、導体無限中空円筒に生じる応力は、熱応力の準静的解により十分評価できることを示している。一方、任意関数を正弦関数で平滑化されたランプ関数で与えた場合には、電磁応力と熱応力のそれぞれの動的挙動において、円筒の半径方向の自由振動に伴う変形および応力が生じることが示されており、ランプ関数の立ち上がり時間が長くても動的解析が必要となることを示している。

第5章「結論」では、本論文の総括を行い、今後の課題と展望を示している。

### 審査結果の要旨

本論文は、導電性金属材料に時間変動する外部磁場が作用する場合の電磁熱弾性挙動を解析的方法により取り扱ったものであり、以下のような成果を得ている。

- 1) 時間変動する外部磁場の作用のもとで、導電性材料に生じるローレンツ力により誘起される電磁応力と、導電性材料の電気抵抗により生じる渦電流損と呼ばれるジュール熱により誘起される熱応力という2種類の異なった形態の応力を生じるが、電磁場、温度場、弾性場という3つの異なる場を解析的手法により巧みに取り扱い、温度変化、電磁応力、熱応力、および変形状態を導く手法を開発し、確立している。
- 2) 外部磁場の印加直後から定常状態に至るまでの非定常問題として電磁熱弾性問題を取り扱っており、力学的応答として、慣性項を考慮した動的解、慣性項の影響を無視した準静的解を導き、変動磁場を受ける際の動的挙動ならびに準静的挙動を明らかにしている。
- 3) 時間変動する外部磁場を任意関数の形で与え、上述の解析解の導出に成功しているため、印加する外部磁場を任意に選ぶことができる。導電性金属材料が誘導加熱される場合を想定し、正弦関数により外部磁場を与える場合、および過渡的な強磁場が作用する場合を想定し、正弦関数で平滑化されたランプ関数で外部磁場を与える場合の2種の異なる印加条件を与え、実際に数値計算を行い、力学的挙動について考察している。
- 4) 具体的な解析例として、直角座標系における無限平板、円柱座標系における中実円柱および中空円筒を取り上げ、動的解が必要とされる外部磁場の印加条件、準静的解が有効となる外部磁場の印加条件を詳細に検討し、その印加条件を明らかにしている。

以上の他にも、本論文では、導電性金属材料の電磁熱弾性挙動に関して多くの新しい知見を得ており、これらの諸成果は、時間変動する強磁場の作用を受ける導電性金属材料の構造強度設計問題に対して多くの基礎的データを与えており、寄与するところ大である。また申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを示したものである。

本委員会は、本論文の審査並びに最終試験結果から、博士（工学）の学位を授与することが適当と認める。