

# 博士学位論文審査要旨

2017年2月17日

論文題目： 加工ひずみを考慮したモータ鉄損の解析手法に関する研究

学位申請者： 土井 智史

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 井上 馨

副査： 京都大学大学院工学研究科 教授 松尾 哲司

要 旨：

近年、自動車の排ガス規制の厳格化や低燃費への需要の高まりを背景に、自動車の電動化が急速に進められおり、中でも従来の内燃機関と電動モータによるハイブリッド駆動自動車（HV）は拡張競争が激化している。このため HV 用メインモータにおいては、低コスト化要求が厳しく、材料費低減のために、モータのさらなる小形・高回転化が検討されている。高回転化に伴ってモータ損失が増大することから、小形化と低損失化が両立する設計手法が必須となっている。モータの鉄損評価および磁気回路設計には、磁界の数値シミュレーションが重要な役割を担ってきたが、加工に起因する鉄芯材料の磁気特性の変化については、十分な知見がなく、解析時に考慮できる状況ではなかった。

そこで、本論文では、モータで発生する鉄損の予測精度向上を目的に、まず、加工ひずみによる磁気特性の劣化量および劣化範囲について、加工解析によって鉄芯素材内の残留ひずみ分布を求めるとともに、SPring-8 の放射光 X 線を用いた評価実験により、解析の妥当性を検証した。次に、磁界解析時に必要となる加工により劣化した磁気特性を実験的に求め、それを実機モータの動作特性解析に適用して、誘導起電力やトルク、鉄損などに与える影響を明らかにした。

第 1 章では、本研究の背景およびモータ鉄損計算における問題点、本研究の目的、本研究の概要について述べている。

第 2 章では、モータ鉄損を高精度に計算する上でベースとして必要となる高調波磁束による鉄損の計算に関し、モデリング手法について述べている。

第 3 章では、鉄損計算手法である非線形一次元磁界解析の収束特性の安定性と高速性の改善手法について述べ、基礎検証モデルを用いて、計算の精度、および計算安定性と高速性の改善の効果を検証している。

第 4 章では、モータコア加工時における打抜き加工によって電磁鋼板内部に生じるひずみ分布を、放射光 X 線を用いた回折現象により、詳細に実測することを検討している。

第 5 章では、2 章の高調波鉄損解析モデルをベースとした打抜きひずみによる鉄損のモデル化手法について、基礎的な検討を行い、基礎検証として磁気測定用リングテストピースモデルに適用し、計算精度を検証している。

第 6 章では、5 章で述べた打抜きひずみによる鉄損のモデル化手法をモータへ適用する際に必要となるひずみによる磁気異方性のモデル化を検討し、モータの諸特性に与える影響を考察している。

第 7 章では、本研究を総括し、今後の課題および展望について述べている。

本論文は、電動車両用モータの鉄損の予測精度向上を目的として、加工に伴って鉄芯に付与されるひずみの影響を考慮した鉄損の解析手法を提案しており、鉄損解析技術の実用化に寄与するところ大である。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2017年2月17日

論文題目：加工ひずみを考慮したモータ鉄損の解析手法に関する研究

学位申請者：土井 智史

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 井上 馨

副 査： 京都大学大学院工学研究科 教授 松尾 哲司

要 旨：

本論文提出者は、本学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程（前期課程）を2009年3月に修了後、(株)デンソーに入社し、2014年4月に博士課程（後期課程）に入学して、現在、3年生である。

本論文の主たる内容は、「IEEE Transaction on Magnetics」(2016/3)に掲載されているとともに、「電気学会論文誌」(2017/3)に掲載されることが決定しており、既に十分な評価を受けている。2017年1月28日午前10時30分より約2時間に亘って学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明によって、いずれについても十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により、論文に関係する諸問題について口頭試問を実施した結果、論文提出者の十分な学力を確認することができた。なお、英語については、国際会議に筆頭著者として論文を提出し、自ら英語で発表を行っていることに加えて、語学試験にも合格していることから、十分な語学力を有するものと認められる。以上、論文提出者の専門分野における学力および語学力は、十分であると判断できる。よって、総合試験の結果は、合格であると認められる。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 加工ひずみを考慮したモータ鉄損の解析手法に関する研究  
氏名： 土井 智史

## 要 旨：

本論文では、加工ひずみを考慮可能なモータ鉄損の高精度計算手法に関する研究結果をまとめたものである。その内容は、以下のとおりである。

**背景：**近年、自動車の排ガス規制の厳格化や低燃費への需要が高まっていることを背景に、自動車の電動化が急速に進められている。その中でも従来の内燃機関と電動モータによるハイブリッド駆動自動車（以下、HV）は自動車メーカ各社から製品化されており、拡張競争が激化している。このためHV用メインモータにおいては低コスト化要求が厳しくなっており、材料費低減のためにモータのさらなる小形・高回転化が検討されている。しかし高回転化に伴ってモータ損失が増大することから、小形化と低損失化の両立が必須となっている。

モータの損失には、巻線で発生するジュール損失である銅損、モータコアで発生する磁氣的損失である鉄損、軸受けの摺動抵抗や風損である機械損に大別される。高回転化においては、このうち特に鉄損の増大が懸念されることから、モータのコア材料には、低鉄損である電磁鋼板の適用が検討される。

一方、モータコアの製造工程では、量産性を目的として、打抜き、かしめ、焼嵌めなどの生産性の高い加工方法を取られることが一般的であるが、残留ひずみ（以下、加工ひずみ）を材料中に伴うため、鉄損を増大させる要因となっている。加工ひずみの影響は、特に低鉄損な材料において感度が高いことや、小形化によってコア全体に占める加工ひずみの影響範囲が増大することから、小形・高効率化を突き詰めた設計においては、加工ひずみによる損失増加が大きな問題となる。このため、設計段階における加工ひずみを考慮した鉄損評価が、モータの最適化において重要と考えられる。

従来、モータの鉄損評価手法は、モータ実機の試作評価による方法と、計算機を用いたモータの磁界解析による方法に大別される。実機評価において、一般的に鉄損は直接計測することが困難であるため、電気的な入力エネルギーから出力エネルギー（ $\propto$ トルク $\times$ 回転数）および銅損、機械損などを差し引いた残差分として算出されてきた。しかしながら、トルクを高精度に計測するにはノウハウや細かな調整が必要であり、このため誤差を生じ易い。また、機械損は個体間バラつきが大きく、さらに実機試験では、モータ内部の温度分布が時々刻々と変化するため、経験に基づいたコイル抵抗の補正を行っているのが実状である。このような誤差の積上げが、鉄損の算出値に直結することから、実機評価による詳細な鉄損の分析は極めて困難であると言える。また実機評価では、上記の評価精度が解決されたとしても、根本的に鉄損の内部分布を知ることはできないため、鉄損低減の具体的な対策に結びつき難い問題点がある。

そこで、従来からモータの鉄損評価および磁気回路設計には、磁界解析が重要な役割を担ってきたが、材料の複雑な磁化挙動や加工時のストレス、動作時の複雑に時間変化する磁束密度などの、様々な影響を受けることから、鉄損の予測精度低下が問題となってきた。したがって、モータ性能の最適化においては、加工ひずみを考慮した高精度な鉄損計算手法を確立することが重要となる。

**従来の問題点と研究の目的：**加工ひずみによる鉄損増加を計算する手法は多くの研究がなされて

きたが、以下に挙げる問題点から、今日においても高精度な計算手法は確立されていない状況である。

【問題点 1】実際のモータ動作時には、鉄心内部に励磁電流やスロット形状などによる高調波磁束が流れるため、いわゆる高調波鉄損が発生する。このため加工ひずみを考慮した計算においても、この影響を考慮可能なモデル化が必要となる。

しかし従来、高調波鉄損を考慮するためには、大規模な三次元磁界解析によってモータ鉄心中の磁化過程を過渡的に計算する必要があったため、計算機資源が必ずしも十分とは言えないモータの設計現場においては、実用に耐えないことから、簡便で計算規模が小さいスタインメッツの実験式を用いた推定手法が使用されてきた。しかし、スタインメッツの実験式は、正弦波磁束が流れたときの材料の鉄損測定データを使用するため、あらゆるパターンの高調波磁束による鉄損に対しては、根本的に実際の現象を捉えることが困難であると考えられる。加工ひずみを考慮した従来の手法は、この実験式をベースとしていることから、モータの鉄損解析に適用すると鉄損予測誤差が増大することが予測される。

【問題点 2】鉄心材料である電磁鋼板をモータ鉄心へ加工する際、加工方法によって材料に加わるひずみの大きさや分布は様々であるが、スロット形状を作るために必ず行われる打抜き加工では、破断部近傍に大きく局所的なひずみが分布すると考えられる。

一方、加工ひずみを考慮した従来の鉄損解析では、加工解析によってひずみ分布を得る方法が検討されてきた。しかし、材料の延性破壊を利用した打抜き加工の解析は、従来から破壊の判定が困難であり、結果として得られる加工ひずみの信頼性に疑義が生じていた。しかしながら、加工解析によって得られる複雑な打抜きひずみ分布の妥当性は実証されておらず、鉄損解析全体への妥当性にも疑義が生じていた。

【問題点 3】加工によって材料に生ずるひずみは、塑性変形によるひずみとそれに伴う弾性的なひずみに大別される。材料の観点で見れば、弾性ひずみは結晶格子のひずみであるのに対し、塑性ひずみは結晶格子のズレによる転位の蓄積であり、それらのひずみが磁気特性に与える影響のメカニズムが異なると考えられる。しかし従来の鉄損解析手法では、上記のメカニズムを捉えたモデル化がなされていないため、精度低下や膨大な測定データを必要とする非現実的な手法の要因となっていた。

そこで本研究の目的は、上述した種々の問題点について検討し、実用的な計算規模で加工ひずみを考慮可能なモータ鉄損の高精度計算手法の確立に資することである。

## 論文の構成と内容：

第 1 章では、本研究の背景およびモータ鉄損計算における問題点、本研究の目的、本研究の概要について述べる。

第 2 章では、モータ鉄損を高精度に計算する上でベースとして必要となる高調波磁束による鉄損の計算に関し、モデリング手法について述べる。

第 3 章では、鉄損計算手法である非線形一次元磁界解析の収束安定性と高速性の改善手法について述べ、基礎検証モデルを用いて、計算の精度、および計算安定性と高速性の改善の効果を検証する。

第 4 章では、モータコア加工時における打抜き加工によって電磁鋼板内部に生じるひずみ分布を、放射光 X 線を用いた回折現象によって、詳細に実測することを検討する。

第 5 章では、2 章の高調波鉄損解析モデルをベースとした打抜きひずみによる鉄損のモデル化手法について、基礎的な検討を行い、基礎検証として磁気測定用リングテストピースモデルに適用し、計算精度を検証する。

第 6 章では、5 章で述べた打抜きひずみによる鉄損のモデル化手法をモータへ適用する際に必要となるひずみによる磁気異方性のモデル化を検討し、モータの諸特性に与える影響を考察する。

第7章では、本研究を総括し、今後の課題および展望について述べる。

本論文の結論：本研究によって得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) モータ内部で発生する高調波磁束密度による鉄損を高精度に計算することが期待できる後処理型一次元動磁界ヒステリシス解析に着目し、本手法のモータ設計適用時において課題となる非線形計算の収束特性の不安定性を改善することを検討した。ニュートン・ラフソンの初期値およびステップサイズの決定方法の最適化による検討を行った結果、平均非線形反復回数の安定化とし、計算時間短縮の両立可能な手法を構築した。
- (2) 加工解析によって求めるひずみの妥当性を検証するため、従来、測定が困難とされてきた電磁鋼板内部の加工によるひずみ分布を、高輝度な放射光 X 線 (SPring-8) の適用、およびひずみの分布予測に基づいた揺動探索法を適用することで、ひずみ分布を定量的かつ詳細に明らかにし、加工解析で得られたひずみの妥当性を実証した。
- (3) 後処理型一次元動磁界ヒステリシス解析をベースとする打抜きひずみを考慮した鉄損計手法を提案し、実測が可能かつ外乱の少ないリングテストピースを対象とした、計算と実測との比較による基礎的な検証を行った。

その具体的な方法は、破断を考慮した加工解析により、打抜きひずみを求める。そして、塑性ひずみと弾性応力に分け、磁気特性への影響を考慮する。二次元静磁界解析では、打抜きひずみ分布に応じた初磁化特性データを与え、磁束密度分布を算出する。一次元動磁界ヒステリシス解析では、打抜きひずみ分布に応じたヒステリシス特性データおよび二次元解析で得られた磁束密度分布を入力として鉄損を算出した。

リングテストピースによる検証の結果、正弦波および高調波の励磁条件において誤差 10% 以内と精度良く計算できており、提案手法の妥当性を確認することができた。

- (4) さらに、上記の提案手法をモータへ適用する際には、加工による弾性応力と磁束密度との相対的な方向の影響、すなわち応力磁気異方性を考慮した磁束密度分布および鉄損の計算手法が必要となる。そこで、材料の磁気異方性を一次的な磁気測定結果から推定する手法に着目し、応力磁気異方性のモデル化へ応用する手法を提案した。本手法をモータに適用した結果、応力磁気異方性によって、スロット周りの打抜き加工による塑性ひずみ部の磁束密度が集中し、当該箇所のヒステリシス損失密度が大きく上昇するなど、従来手法では得られない知見を得た。