

2021 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	鹿児島大学 大学院理工学研究科 工学専攻 電気電子工学プログラム
職位または役職	准教授
氏 名	甲斐 祐一郎

1. 研究題目

誘導磁界を利用したモータコアのひずみ取焼鈍技術の開発

2. 研究目的

電気自動車や産業機器用のモータには、性能向上や高効率化が要求されており、これらに必要な要素技術開発が必要不可欠である。モータ用の鉄心材料として電磁鋼板が用いられるが、応力に敏感であり、加工・組み立て工程で生じた外部応力や残留応力によって磁気特性が劣化する。特に、低損失材料ほど応力の影響を受けやすく、わずかな応力によって磁気特性は著しく低下する。また、モータの小型化に伴い、鉄心加工には高い加工精度が要求され、加工応力の影響は今後避けられない問題となる。

本研究では、簡便かつ短時間にモータコアを焼鈍するため、誘導磁界を利用した新しいひずみ取焼鈍法を提案し、その装置開発及び磁気特性評価に取り組んでいる(図 1)。本助成の研究成果にて、誘導磁界を用いてリング状のモータコアを加熱することで、10分で 600°C 以上の加熱が可能であり、鉄損が低減することを示した。本年度は、実機のモータコア(ティースを有するコア)に誘導磁界加熱法によるひずみ取焼鈍を行い、その焼鈍効果を検討する。

誘導磁界加熱を用いた焼鈍技術が確立することによって、実用的なモータコアのひずみ焼鈍が可能となり、モータの高効率・低損失化へ向けたモータ製造支援が期待できる。

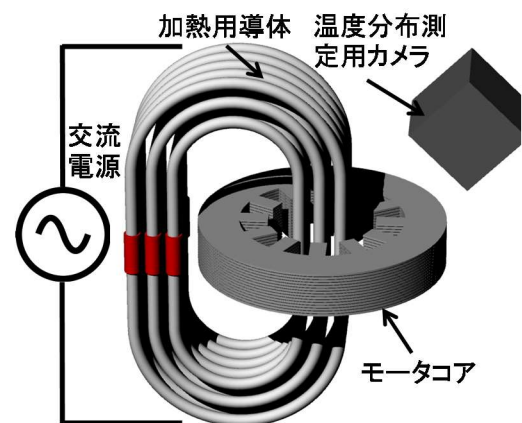


図 1 誘導磁界加熱法の原理

3. 研究内容及び成果

本研究では、誘導磁界加熱法による焼鈍技術を実機モータへ応用し、焼鈍効果の検証を行う。昨年度までは1枚のモータコアに対して焼鈍を施し、ティース及びコアバックの磁気特性を検討してきたが、最終年度は、積層したモータコアにおいても同様の焼鈍を行い、その効果を検討する。

(1) 誘導磁界加熱法による焼鈍時の温度分布と電力

まず、二次元有限要素解析にてモータの磁束やトルク特性の解析を行い、モータを設計する。次に、ワイヤー放電とレーザ切断の2種類の加工方法を用いて、無方向性電磁鋼板(50A300)からモータモデルコアを切り出し、積層コアを作製した。

図2にモータコアの焼鈍時における温度分布を示す。モータコアの積層枚数は25枚であり、中段付近において、約600℃まで加熱できている。図3にモータコアの上下面に断熱板を配置した時の加熱コイルの電圧、電流及び電力を示す。断熱材の有無に関わらず、モータコアの温度を600℃一定としているが、モータコアの上面と下面に断熱材を配置することによって、入力電力が、10%程度低減することを確認した。断熱材を用いてモータコアの放熱を抑えることで、加熱効率を改善できることがわかった。

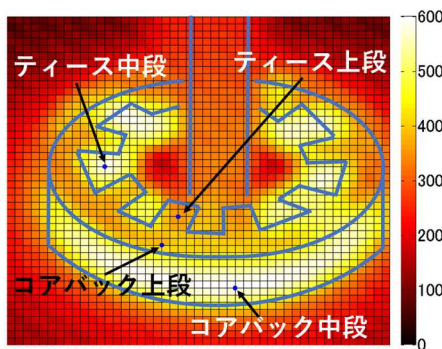


図2 モータコア加熱時の温度分布

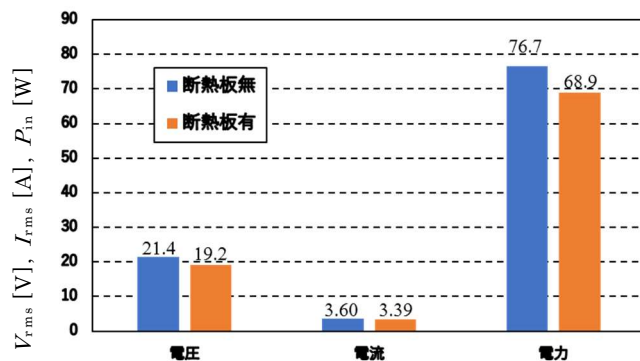
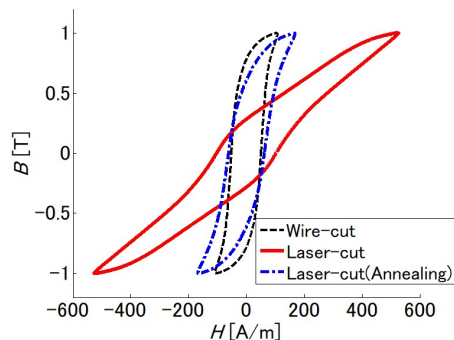


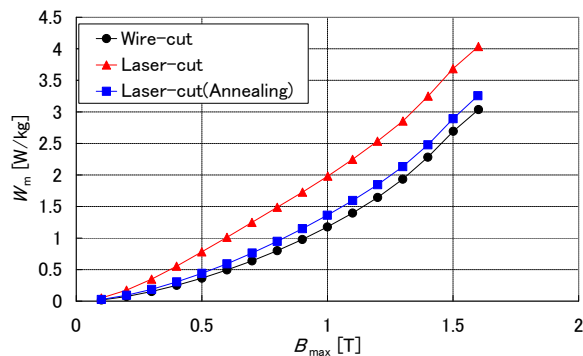
図3 断熱板有無における加熱導線の電力特性

(2) 積層したモータコアの焼鈍前後における磁気特性

図4に積層枚数が25枚のモータコアの磁気特性を示す。コアバックに励磁巻線とBコイルを巻き、環状試料法を用いてコアバックの磁気特性を測定した。測定条件は、励磁周波数を50Hzとし、最大磁束密度を0.1~1.6Tまで変化させた。図4(a)のBHループを見ると、ワイヤー放電加工のモータコア(Wire-cut)に比べて、レーザ加工のモータコア(Laser-cut)の磁界強度が大幅に増加しており、レーザ切断時に生じた熱ひずみによるものと考えられる。また、誘導磁界加熱法による焼鈍を施したレーザ加工のモータコア(Laser-cut(Annealing))において、磁界強度が減少している。図4(b)に示すように、レーザ加工のモータコア(Laser-cut)の磁気損失は、ワイヤー放電加工のモータコアの磁気損失と比較して、約70% ($B_{max} = 1.0$ T)程度増加している。一方で、レーザ加工のモータコアに焼鈍を施すことによって、焼鈍前後の磁気損失が約70% ($B_{max} = 1.0$ T)減少しており、積層したモータコアにおいても焼鈍によって磁気特性が改善することを確認した。



(a) BH ループ



(b) 磁気損失

図4 積層したモータコアの磁気特性の比較

(3) 焼鈍したモータコアを用いたモータの入力電力

図 5 にモータの評価方法を示す。積層したモータコアに励磁巻線を施し、ロータを挿入した状態でモータの特性を評価する。本測定では、コンデンサモータを模擬しているため、90° 位相の異なる電圧をモータに印加し、電圧と電流波形を測定し、入力電力を求めた。

図 6 に入力電圧を変化させた時のモータコアの電力を示す。ワイヤー放電加工したモータコアに比べて、レーザー切断したモータコアの入力電力が増加している。モータコアの磁気特性が劣化すると、磁束を一定するために、より多くの電力が必要になると考えられる。さらに、レーザー切断後のモータコアを焼鈍した場合、焼鈍前に比べて、入力電力が約 40 % 減少しており、焼鈍効果を確認できる。一方、図 4 に示した積層したモータコアの磁気損失と比べて減少率が小さいこともわかる。昨年度の研究成果において、誘導磁界加熱法を用いてモータコアを加熱した際に、ティースとコアバックで温度差が生じ、コアバックの磁気特性と比較して、ティースの磁気特性の改善量が小さくなることがわかっている。今回作製したモータコアにおいては、巻線で発生した磁束がコアバックだけでなくティースにも通っており、改善量が低くなったと考えられる。さらに、ワイヤー放電加工のモータコアの磁気特性まで改善しておらず、焼鈍温度が 600°C と低かったことが原因として考えられる。

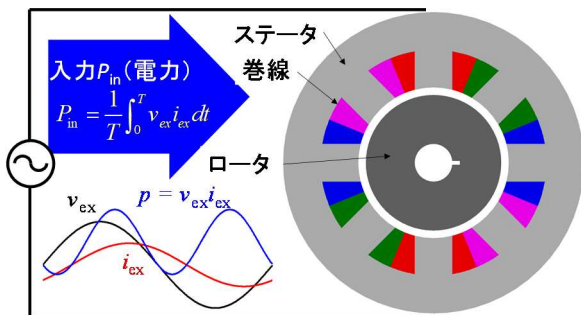


図 5 モータコアの特性評価方法

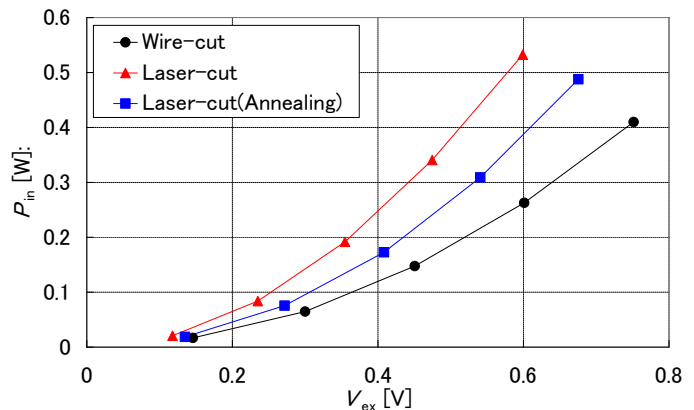


図 6 モータコアの焼鈍前後の電力の比較

4. 今後の研究の見通し

本研究では、簡便かつ短時間のモータコアのひずみ取焼鈍技術の開発を目指し、誘導磁界を利用した新しい焼鈍法を提案し、その装置開発及び磁気特性評価を行った。3 年間の研究期間において、1 枚のモータコアから実機モータコアに至るまでの焼鈍効果を明らかにした。しかしながら、加熱導線の耐熱温度の制限から今回の最高の焼鈍温度が 600°C であり、一般的な焼鈍温度よりも低い温度であったため十分な焼鈍効果が得られなかった。さらに、今回用いたモータコアは、比較的シンプルな形状であったものの、温度分布に偏りが見られ、温度分布の改善までには至っていない。今後は、実際の製造工程においては、より精密な加熱温度の制御や均一加熱や加熱時の酸化を防止する必要があるため、モータコアの形状や材質に応じて最適な加熱条件や加熱導線配置の検討、設備の導入が必要と考えられる。将来的には、本手法は、モータコアのひずみ取焼鈍に限らずに、モータコアの圧着積層や熱処理へ展開できると考えられる。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議（査読無）

- [1] 鮫島康之介, 甲斐祐一郎, 誘導磁界加熱法による不均一温度分布がモータモデル鉄心の磁気特性へ及ぼす影響, 電気学会研究会資料, マグネティックス研究会, MAG-22-017, pp.25-30, 2022.1.29
- [2] 鮫島康之介, 甲斐祐一郎, 誘導磁界加熱時におけるモータコアの温度分布解析, 第 31 回 MAGDA コンファレンス in 鹿児島 講演論文集, PS-7, pp.121-124, 2022.11.1