

令和 2 年 5 月 21 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06309

研究課題名(和文) モータ用鉄心材料の任意応力下におけるベクトル磁区構造解明とその制御技術の開発

研究課題名(英文) Mechanism Elucidation and Development of Control Technique of Vector Magnetic Domain Structure of of Motor Core Material under Arbitrary Stress

研究代表者

甲斐 祐一郎 (Kai, Yuichiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：50595436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、応力とベクトル磁気特性の因果関係を解明へ向けてミクロな観点から詳細な分析を行うため、磁気光学効果を用いた任意応力ベクトル磁区評価システムを開発した。さらに、応力及び励磁下におけるモータ鉄心材料のベクトル磁区構造を観察し、応力、磁区構造及び応力とベクトル磁気特性の関係を明らかにした。また、誘導加熱処理を施すことで鉄心材料の磁気特性が改善することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、電気自動車や産業機器用モータには高効率化が要求されており、鉄心材料の低損失化技術が必要不可欠である。本研究の核となる応力ベクトル磁気特性評価およびその制御技術は、国内及び世界的に見ても、研究代表者らが最先端の研究を行っている。将来的には、モータの鉄心材料の開発並び加工・組み立て工程において、応力ベクトル磁気特性の制御を行うことによって、高効率・低損失モータの開発に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have been developed arbitrary stress vector domain evaluation system using magneto-optical effect to clarify relationship between stress and vector magnetic properties. The magnetic domain structure of motor core materials was observed and the relationship between stress and vector magnetic properties was clarified. In addition, the magnetic properties were improved by applying an induction heating technique.

研究分野：電気機器

キーワード：応力 ベクトル磁気特性 誘導加熱 鉄心材料 磁区構造

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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。代表的なモータ鉄心材料として電磁鋼板が用いられているが、モータの低損失化のためには実機駆動状態における鉄心内部の磁気現象を明らかにした上で、鉄心材料を有効活用することが重要となる。モータを製造する際、加工・組み立て工程において鉄心材料に外部応力や残留応力が発生するため、磁気特性が劣化し、モータの損失が増加する。また、モータの駆動状態において、鉄心内には交番磁束や回転磁束が発生し、電磁鋼板の磁気特性は複雑な挙動を示すことが、ベクトル磁気特性評価技術により解明されてきた。

国内・国外の研究動向として、応力と磁気特性に関する研究については、古くから行われているが、いずれも応力方向と同じ方向の磁束密度と磁界強度が測定され、応力、磁気特性や磁区構造が評価されてきた。研究代表も応力と磁気特性の関係について研究を開始し、X線残留応力測定装置を用いて実機モータ鉄心の残留応力分布測定を行った。その結果、引張、圧縮応力だけでなくせん断応力が発生していることを明らかにし、せん断応力は鉄心内に生じる応力の大きさだけでなく、応力の方向へ影響を及ぼすことがわかった。モータ鉄心内には様々な大きさや方向を持った応力が発生しており、必ずしも応力方向と励磁方向が一致するとは限らず従来の磁気特性評価法では不十分であることを明らかにした。そこで、任意応力とベクトル磁気特性の関係を明らかにするために、応力ベクトル磁気特性評価技術を提案し研究を進めてきた。

これまでの研究成果を踏まえ、応力を積極的に利用することで鉄心材料のベクトル磁気特性を制御し、モータの高効率・低損失が可能になるという考えに至った。そこで、モータ鉄心の局所応力印加法として誘導加熱によって発生する熱応力に注目した。円筒型磁束収束板を用いた誘導加熱処理コイルを提案し誘導加熱処理を施すことで、応力効果を鉄心材料に生じさせることができたが、この要因解明までには至っていない。

これまでの経緯を踏まえると、応力を利用して鉄心材料のベクトル磁気特性制御は可能であるが、その要因解明に至っていない。そこで、ミクロの観点から磁気現象を明らかにする必要があると考え今回の研究課題を取り組むに至った。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、ミクロの観点から応力とベクトル磁気特性の因果関係を解明するため、応力下における鉄心材料の磁区観察を行い、応力・ベクトル磁気特性・磁区構造の3つの関係を明らかにする。そこで、研究代表者らがこれまでに開発した任意応力ベクトル磁気特性評価システムに、磁気光学効果(カー効果)を利用した磁区観察装置を組み込むことでシステムを改良する。さらに、実用的な立場から磁区制御法を検討するため、鉄心材料の磁区構造を解明し、誘導加熱処理を用いて鉄損の低減を図る。以上のことを踏まえ、以下の3点に関して研究を進める。

- (1) カー効果を用いた任意応力ベクトル磁区評価システムの開発
- (2) 任意応力下における鉄心材料の磁区構造解明
- (3) 誘導加熱処理による鉄心材料の磁気特性改善法

### 3. 研究の方法

本研究は3年間にわたって取り組むものであり、初年度は、研究代表者らがこれまでに開発した任意応力ベクトル磁気特性評価システムにカー効果を用いた磁区構造観察装置を組み込み、任意応力ベクトル磁区評価システムを開発を目指す。次年度は、任意応力及び励磁下におけるモータ鉄心材料のベクトル磁区構造の観察に加え、磁区構造の詳細な分析と鉄損との関係を明らかにし、応力とベクトル磁気特性の因果関係を解明する。最終年度は、実用的な観点からモータ鉄心材料の磁区制御を目指し、従来の誘導加熱コイルを改良した新しいコイルを作製し、本システムを用いて鉄心材料の損失低減法について検討する。

#### 初年度：カー効果を利用した任意応力・磁束下の磁区評価システムの開発

初年度は、任意応力・励磁下における鉄心材料の磁区構造を観察するためにカー効果を用いた任意応力ベクトル磁区評価システムを開発する。本システムの主要部分は、面内任意応力印加機構、任意励磁部分、磁区観察部分である。研究代表者らは、面内応力印加機構と任意励磁部分を備えた、応力ベクトル磁気特性評価システムを開発しており、本研究課題ではこのシステムの改良を行う。本システムの特徴として、試料に多軸の応力印加軸(4本)を設けることによって、各方向から外部加重を加え、鋼板面内において任意方向の応力を制御可能である。さらに、二方向から励磁し磁束密度ベクトル軌跡を制御することで交番・回転磁束を発生させることができる。今回新たにカー効果を用いた磁区観察部分を追加することで、任意応力・磁束条件下における鉄心材料の磁区構造評価が可能となる。

#### 次年度：任意応力・磁束下におけるモータ鉄心材料の磁区構造解明

次年度は、モータに使用される無方向性電磁鋼板を用いて、応力の大きさや応力角度を変化させた場合のベクトル磁区観察を行い、磁区構造の分析及び磁区の挙動を明らかにする。また、同時に磁束密度および磁界強度ベクトルを測定することによって任意応力や磁束条件下における鉄損も評価し、磁区構造と鉄損の関係を明らかにし、応力を利用したモータ鉄心材料の低損失要因について詳細な分析を行う。

最終年度：誘導加熱を用いたモータ鉄心材料の磁気特性の改善

実用的な立場からのモータ鉄心材料の磁区制御を目指し、改良円筒磁束収束板を用いた誘導加熱コイルを新たに作製及び誘導加熱処理装置を導入する。さらに、開発したシステムを用いて鉄心材料に誘導加熱処理を施し、鉄心材料の磁気特性改善を試みる。

#### 4. 研究成果

初年度：カー効果を利用した任意応力・磁束下の磁区評価システムの開発

初年度は、任意応力・励磁下における鉄心材料の磁区構造を観察するために磁気光学効果を用いた任意応力ベクトル磁区評価システムを開発することが目的である。本システムの主要部分は、面内任意応力印加機構、任意励磁部分、磁区観察部分である。研究代表者らは、面内応力印加機構と任意励磁部分を備えた応力ベクトル磁気特性評価システムを開発しており、本年度は磁区観察部分について本システムの改良を行った。そこで、今年度は磁気光学効果を用いた磁区観察装置を購入し、これまでの装置と組み合わせ調整を行った（図1）。その結果、任意応力・磁束条件下における鉄心材料の磁区構造評価が可能であることを確認した。さらに、磁区構造装置を組み合わせることによって、任意応力の評価法や励磁方法もこれまでの方法と異なるためこれらについて検討を行った。任意応力印加のためには、4方向から応力を印加する必要があるが、ロードセルを用いて外部応力を測定し、目標の応力を印加する手法を提案した。また、巻線からの漏れ磁束が磁区観察領域の磁区構造へ及ぼす影響について検討したが、従来の巻線配置でも磁区観察が十分行えることを確認した。

次年度：任意応力・磁束下におけるモータ鉄心材料の磁区構造解明

次年度は、前年度開発した任意応力ベクトル磁区評価システムを用いて、応力印加時における磁区構造を観察し、応力とベクトル磁気特性の関係について検討した。まず、今回開発したシステムにおける磁区構造観察において、試料の設置段階で発生する応力が磁区構造へ及ぼす影響について検討し、試料設置時の応力が磁区構造へ影響がないことを確認した。さらに、鉄心材料の磁区構造は、材料の不均一性から測定箇所で異なると考えられるため9箇所の異なる位置における磁区構造分布を測定することによって、応力と磁区構造の関係を明らかにした（図2）。

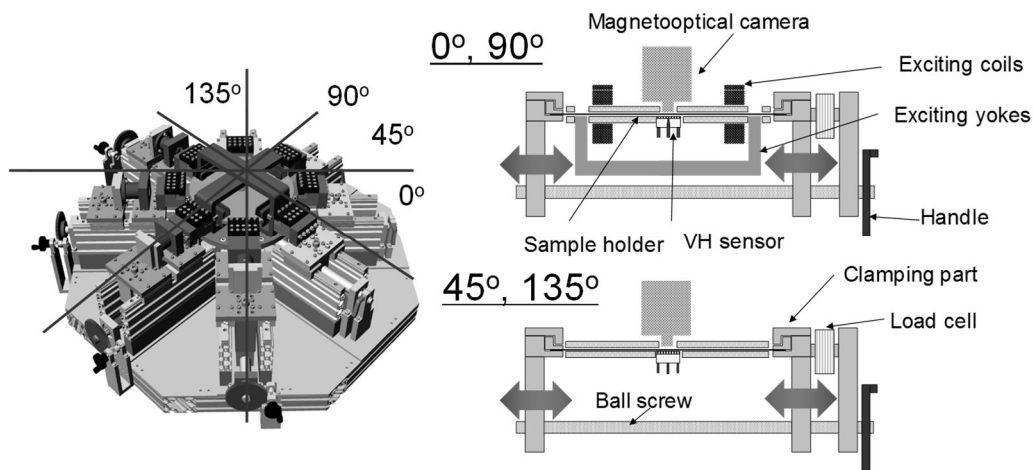


図1 応力下の磁区観察システムの外観

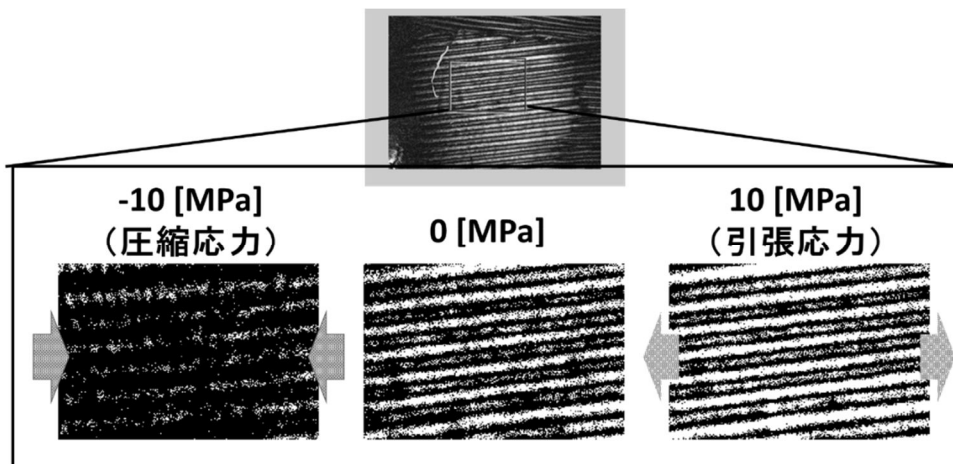


図2 応力印加時における磁区構造の観察結果

さらに、鉄心材料に引張及び圧縮応力を印加することによって、磁区構造が変化し、磁区構造が分割し、鉄損が減少する応力条件があることを明らかにした（図3）。特に、圧延方向に圧縮応力を印加した場合、もしくは、圧延直角方向に引張応力を印加した場合に磁区が分割する。磁区が分割することによって、励磁方向に対して磁区が移動しやすくなり、鉄損が減少したと考えられる。これまで報告されている結果とは異なった新しい現象であり、非常に興味深い結果が得られた。

#### 最終年度：誘導加熱を用いたモータ鉄心材料の磁気特性の改善

最終年度は、応力を積極的に利用したモータの高効率・低損失化を目指し、鉄心材料の誘導加熱コイル及び処理法について検討した（図4）。まず、磁場・熱・応力を考慮した三次元軸対称有限要素誘導加熱解析によって、鉄心材料の局所部において引張及び圧縮応力を発生できることを明らかにした（図5）。さらに、円筒型磁束収束板の寸法や中心部に挿入するフェライトコアの大きさを最適化し、誘導加熱コイルを作製した。さらに、誘導加熱コイルを用いて鉄心材料に誘導加熱処理を施した結果、鉄心材料の局所部の透磁率が向上し、今回提案した加熱法は鉄心材料の磁気特性改善に有効であることを明らかにした（図6）。

従来は、加工・組立て工程で生じた外部応力や残留応力をいかに低減するかが重要視されていたが、本技術は応力を積極的に利用とする試みであるため、これまでの研究とは全く視点が異なり、本研究課題における取組みは学術的に非常に価値が高いと考えられる。将来的には、モータの鉄心材料の開発並びに加工・組み立て工程において、応力ベクトル磁気特性の制御を行うことによって、高効率・低損失モータの開発に貢献できる。

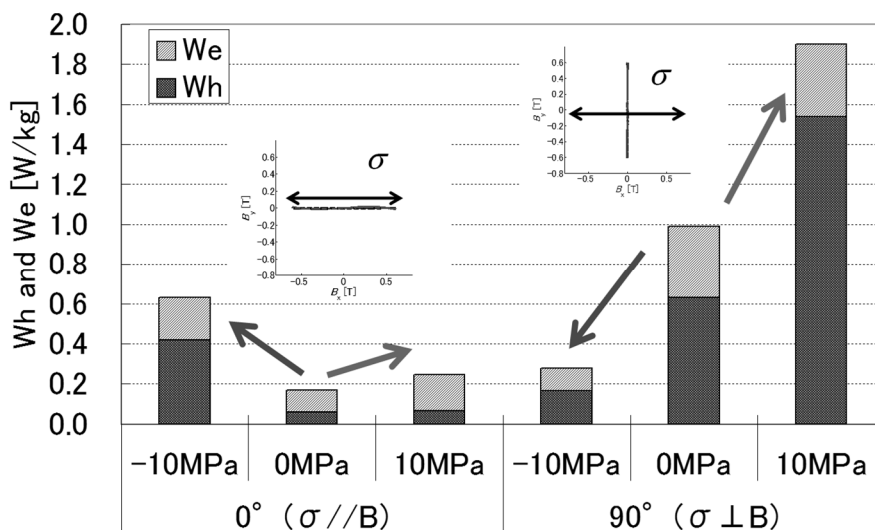


図3 応力印加時におけるヒステリシス損と渦電流損

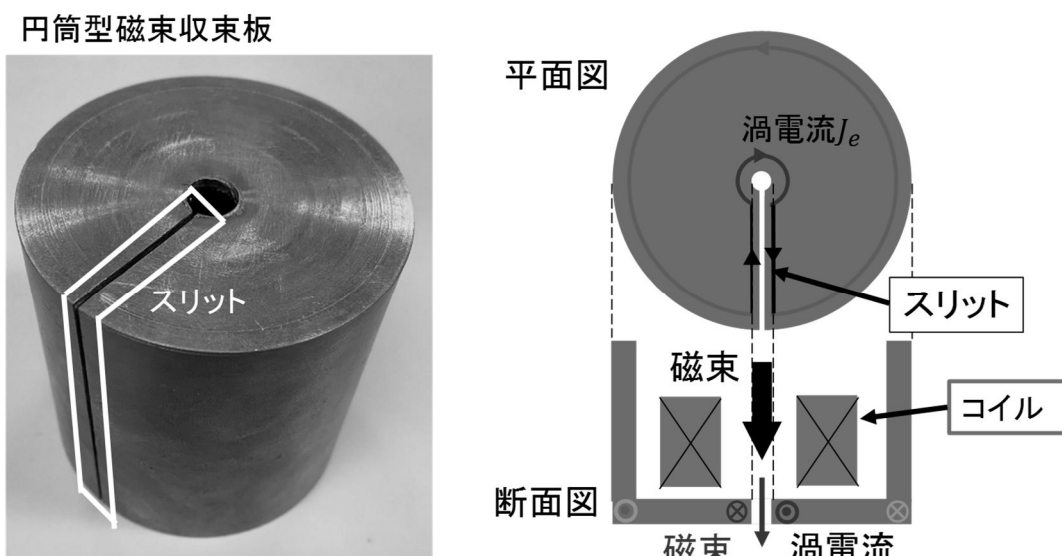


図4 誘導加熱コイルの構造

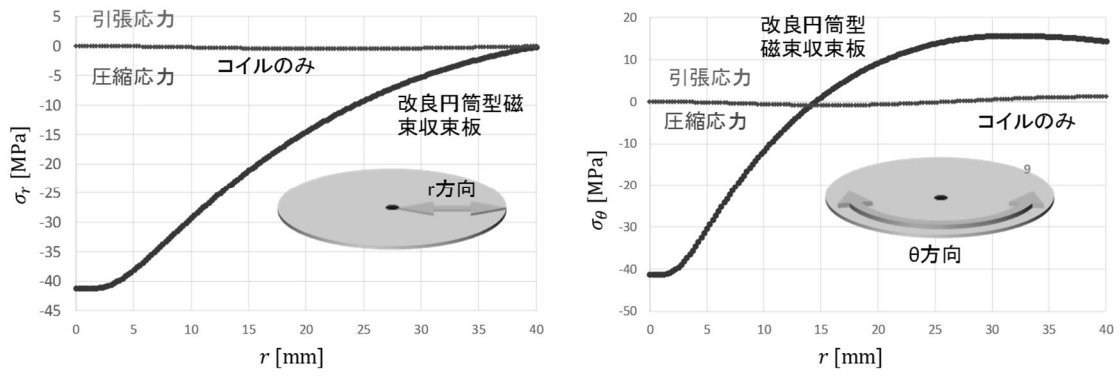


図5 三次元軸対称有限要素法を用いた応力分布の比較

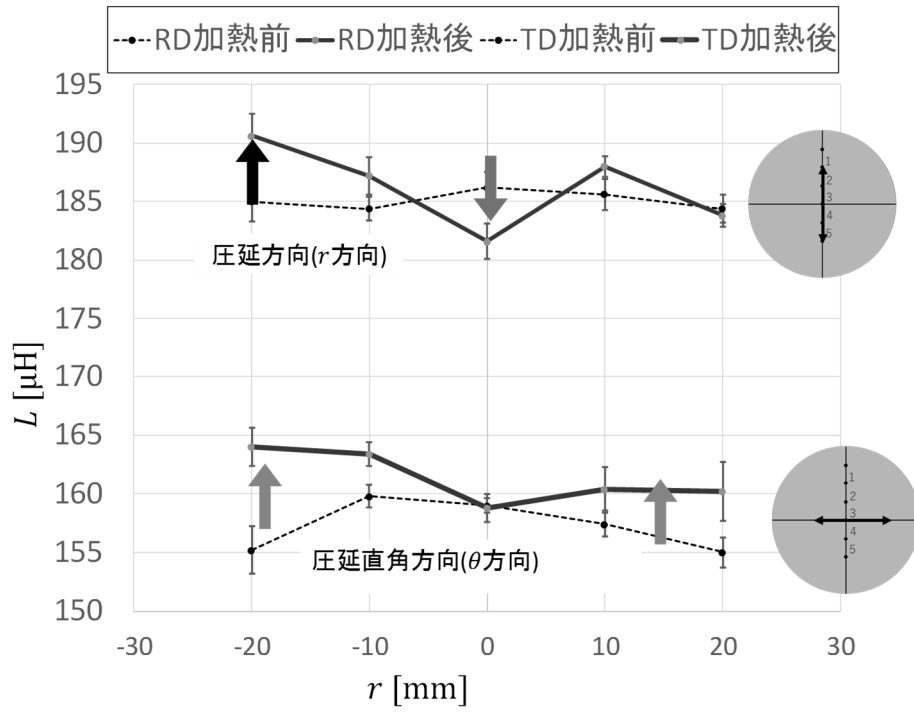


図6 誘導加熱処理前後の磁気特性の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 甲斐祐一郎, 榎園正人	4. 巻 Vol.26, No.3
2. 論文標題 応力下における鉄心材料のベクトル磁気特性評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 pp.460-467
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀬戸教紘, 甲斐祐一郎, 榎園正人	4. 巻 Vol.26, No.2
2. 論文標題 高周波励磁下における三相誘導電動機モデル鉄心の交番及び回転鉄損特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 pp.344-3449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 甲斐祐一郎
2. 発表標題 無方向性電磁鋼板におけるベクトル磁気特性の応力依存性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲斐祐一郎, 榎園正人
2. 発表標題 応力下における無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性とそのモデル化に関する検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuichiro Kai
2. 発表標題 Frequency dependence and vector magnetic properties of non-oriented electrical steel sheet, under arbitrary stress conditions
3. 学会等名 15th international workshop on 1&2 dimensional magnetic measurement and testing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 甲斐祐一郎, 榎園正人
2. 発表標題 任意応力下における無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性と周波数依存性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 甲斐祐一郎, 榎園正人
2. 発表標題 任意せん断応力下における無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性測定 (その2)
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----