

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 4月1日現在

機関番号：17501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760266

研究課題名（和文）応力・磁気ひずみ効果による磁気特性制御のための
材料評価システムの開発研究課題名（英文）Development of material evaluation system for controlling of magnetic
properties by stress-magnetostriction effect

研究代表者

甲斐 祐一郎 (KAI YUICHIRO)

大分大学・工学部・客員研究員

研究者番号：50595436

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、応力・磁気ひずみ効果を利用した電磁鋼板の応力ベクトル磁気特性制御技術の確立を目指し、その材料評価システムを開発した。本システム開発において、応力と磁気ひずみを同時に測定可能な六軸ゲージを作製及び、ロックインアンプを用いた磁気ひずみ測定法について検討し、応力下の磁気ひずみのデータベース作成が可能となった。さらに、本システムを用いて、引張・圧縮応力印加時におけるに交番及び回転磁束下の二次元磁気ひずみを測定し、磁気ひずみの応力依存性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a new measurement system of magnetostriction of a electrical steel sheet under stress in order to control vector magnetic properties by applying mechanical stress. Then, a new six-axial strain gauge is developed to measure the stress and magnetostriction in the plane of the electrical steel sheet. In addition, the measurement method of the magnetostriction is examined by using a lock-in amplifier. It is possible to make the database of the two-dimensional magnetostriction under various stress and magnetic flux conditions. In addition, the relationships between the stress and the magnetostriction under the alternating and rotating magnetic flux conditions was clarified by measuring the magnetostriction under the tensile and compressive stress.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：無方向性電磁鋼板，二次元磁気ひずみ，ベクトル磁気特性，応力，モータ，ロックインアンプ，ひずみゲージ

1. 研究開始当初の背景

電磁応用機器に使用される鉄心材料の1つである無方向性電磁鋼板は、磁気ひずみを有しており、圧縮応力に対して磁気特性が劣化し、わずかな引張応力によって磁気特性が改善することが知られている。また、機器の加工・組み立て工程時に残留応力や外部応力が発生し、電磁鋼板の磁気特性を劣化させる。

一方、機器の励磁状態において、任意方向

の交番磁束や回転磁束（任意方向磁束条件）が発生するため、磁気ひずみや磁気特性は複雑な挙動を示すことが予想される。これまでの研究では、実機励磁状態における鉄心材料の磁気特性を正確に評価するために、電磁鋼板面内の磁束密度と磁界強度をベクトル量として測定できるベクトル磁気特性評価法が提案されている。さらに、鋼板面内の交番や回転磁束下において磁気ひずみを正確に

把握するために、二次元磁気ひずみの測定・評価法も確立されている。

このような背景のもと、研究代表者は、鉄心材料を機器にさらに有効活用するためには、実機内の応力や励磁状態に基づいたベクトル磁気特性を正確に把握することが必要不可欠であると考えており、これまでの研究成果として、以下の成果を得た。

(1) X線残留応力測定装置を用いて、回転機鉄心内の残留応力を測定し、ティースやバックヨーク部において、様々な大きさと方向が異なる応力が生じていることがわかった。さらに、製造後の機器において電磁鋼板の磁気特性を2倍以上劣化させることを明らかにした。

(2) モータ鉄心のX線残留応力分布測定結果に基づき、一軸や二軸応力下のベクトル磁気特性(応力ベクトル磁気特性)を測定し、応力の大きさや方向によって磁界強度ベクトルの軌跡が異なることを明らかにした。さらに、応力を積極的に利用することによってベクトル磁気特性を制御が可能であることを示した。

これらの研究成果を踏まえ、モータ鉄心材料の残留応力の低減だけでなく、応力を積極的に利用した応力ベクトル磁気特性制御技術を構築することによって高効率・低損失機器の開発が実現できると考えられる。この際、応力と磁気ひずみには密接に関わっていることから、応力・磁気ひずみ効果を把握した上で、応力ベクトル磁気特性制御のための手法開発が必要と考えられる。

応力・磁気ひずみ効果を解明することによって、モータ鉄心材料の応力ベクトル磁気特性制御法に関する知見を得ることが可能となり、鉄心材料の低損失化や改質技術開発につながるものと考えられる。さらに、応力・磁気ひずみ効果を考慮したベクトル磁気特性解析技術を導入することによって、数値シミュレーション上で残留応力や外部応力による磁気特性の劣化量の推定や、低損失なモータ鉄心の最適構造の知見を得ることができると考えられ、高効率・低損失電磁応用機器開発の新しい設計ツールとしての応用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、応力・磁気ひずみ効果を解明するために、応力下における磁気ひずみ評価システムを開発し、そのデータベースを構築する。研究期間内においては下記の点を明らかにする。

(1) 応力・磁気ひずみ評価システムの開発

応力下において任意方向の磁気ひずみを測定するために、応力と磁気ひずみが測定可能な新しいゲージパターンを設計・作製する。また、磁気ひずみは非常に微小信号であるため、ロックインアンプを用いた高感度な磁気ひずみ測定システムを開発する。

(2) 応力下における二次元磁気ひずみの測定
本所属機関では、前述したようにすでに応力下ベクトル磁気特性測定システムを開発している。(1)で開発したひずみゲージや磁気ひずみ測定システムを、応力下ベクトル磁気特性測定システムを組み込むことによって、応力下における磁気ひずみを測定し、データベースを作成する。

3. 研究の方法

(1) 六軸ひずみゲージの開発

応力下における任意方向の磁気ひずみを測定するために、新しいひずみゲージを開発する。本ゲージは、応力と磁気ひずみの両方を同時に測定可能な、6軸のひずみゲージであることが特徴である。さらに、磁気ひずみを測定する際は、無誘導ゲージを用いることでノイズの影響を低減させる。

(2) 高精度磁気ひずみ測定システムを開発

磁気ひずみは微小信号であるため、S/N比の低下によって測定が非常に困難となる。そこで、磁気ひずみを高感度に検出するために、ロックインアンプを用いた磁気ひずみ測定法及びそのシステムを考案する。

(3) 応力下における磁気ひずみ測定及びデータベースの構築

実機内を模擬した励磁条件及び応力条件下における二次元磁気ひずみを測定する。そのシステム内に高精度磁気ひずみ測定システムを組み込むことで、応力下の磁気ひずみ測定することが可能であり、このデータベースを作成する。

4. 研究成果

(1) 六軸ひずみゲージの開発(2011年)

図1に六軸ひずみゲージの構造(共和電業製)を示す。今回開発した六軸ひずみゲージは、応力測定用のひずみゲージが3枚と磁気ひずみ測定用のひずみゲージが3枚の計6枚から構成される。応力測定用のゲージ間角度は、電磁鋼板の圧延方向からの傾き角度が 0° 、 45° 、 90° である。また、鋼板面内における任意方向の磁気ひずみを測定するために、磁気ひずみ測定用のゲージ間角度は、圧延方向からの傾き角度が 0° 、 60° 、 120° である。応力下の磁気ひ

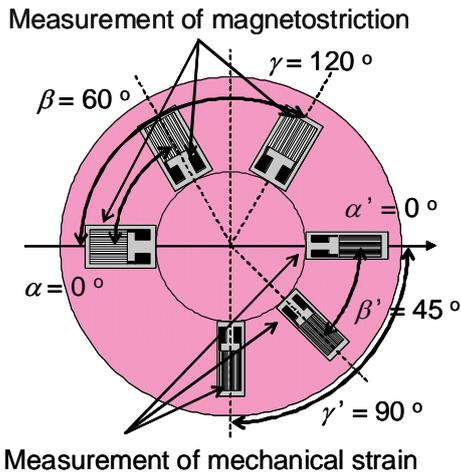


図1 開発した六軸ひずみゲージ

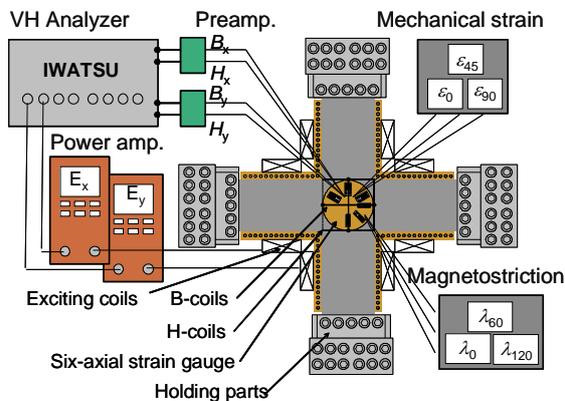
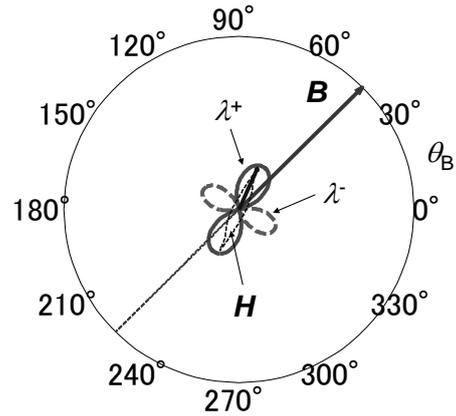


図2 応力・磁気ひずみ効果の評価システムの概観

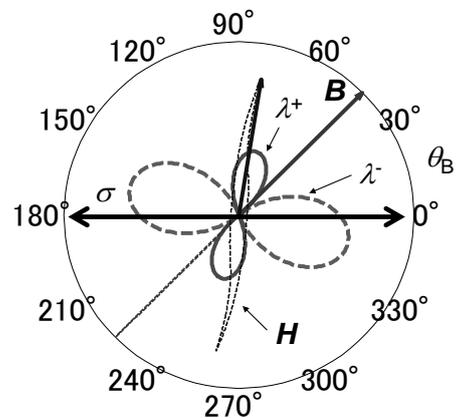
ひずみを測定する際には、まず、機械ひずみ測定用ゲージを用いて目標となるひずみになるように外部荷重を印加する。次に、電磁鋼板を励磁し、磁気ひずみ測定用ゲージを用いて磁気ひずみを測定し、二次元磁気ひずみを評価する。

(2) 応力・磁気ひずみ評価システムの開発 (2011年)

図2に測定システムを示す。測定システムは、外部荷重を印加するための応力印加機構、磁気ひずみ測定装置とベクトル磁気特性測定装置によって構成される。機械的なひずみを測定するために試料の中央部に六軸ひずみゲージを貼り、機械ひずみの値を用いて応力を評価する。ベクトル磁気特性を測定するため、試料を二方向から励磁するために x と y 方向に励磁コイルと励磁ヨークを配置し、BコイルとHコイルを用いることで磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルを評価する。ベクトル磁気測定装置は、応力VHアナライザ(IE-1131E, 岩通



(a) 応力無



(b) 応力有

図3 応力下における二次元磁気ひずみの測定結果

計測株式会社製)を用いており、磁束密度波形が目標の波形になるようにデジタルフィードバック制御を行う。磁気ひずみの測定方法として、ひずみゲージの抵抗変化をブリッジ回路で検出し、ロックインアンプにブリッジ回路の出力電圧と参照信号を入力し、磁気ひずみを評価した。

(3) 応力下における二次元磁気ひずみの測定 (2012年)

図3に応力印加前後における二次元磁気ひずみを示す。応力印加前後において、圧延方向をからの磁束密度ベクトル B の傾き角度を一定 ($\theta_B = 45^\circ$) として、二次元磁気ひずみを測定した。応力印加前後において、無応力状態と比較して、二次元磁気ひずみと磁界強度ベクトルの軌跡が異なった。特に、圧延方向に引張応力 σ を印加すること

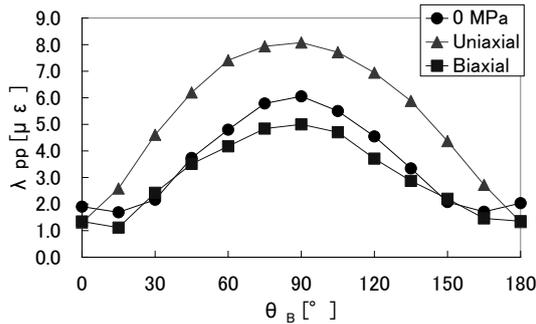


図3 応力下における磁気ひずみの値

によって、磁気ひずみの伸び(λ)と縮み(λ')の大きさが増加した。このように、六軸ひずみゲージを用いることによって応力下の二次元磁気ひずみを測定が可能となった。

図4に応力に対する磁気ひずみのピーク値を示す。この際、一軸(Uniaxial)の応力印加方向は圧延方向とし、二軸(Biaxial)の応力印加方向は、圧延方向と直角方向である。また、磁束密度ベクトル B の傾き角度 θ_b を 0 から 180° まで変化させ、磁気ひずみを測定した。一軸方向の引張応力と平行に磁束密度ベクトルを向けた場合($\theta_b = 0^\circ$)、磁束密度ベクトルと平行方向の磁気ひずみの値は減少したが、磁束密度ベクトルの傾き角度 θ_b が 90° に近づくにつれて磁気ひずみの値は増加した。一方、二軸から同時に電磁鋼板面内に引張応力を印加することによって、任意方向の磁気ひずみの値が減少しており、一軸と二軸応力によって磁気ひずみの挙動が異なることを明らかにした。

一般的に電気機器の高効率・低損失化のためには、製造工程で発生する残留横領応力を低減することが重視されているが、これらの研究成果を踏まえることによって、逆に応力を積極的に利用することでモータ鉄心の低損失・低騒音化が図れるものと考えられる。

今後の研究課題として、一軸引張応力や二軸応力を電気機器用鉄心に印加するための、新たな応力印加技術の開発が必要と考えられる。

本研究の実施に際して、平成 20 年 1 月より開始された「次世代電磁力応用技術開発技術の構築」プロジェクト(平成 24 年 12 月まで)にも組み込まれ、一部その成果を活用した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

(国内・国外共に査読有の論文である)

- [1] 甲斐 祐一郎, 槌田 雄二, 戸高 孝, 榎園 正人, ロックインアンプを用いた電磁鋼板の磁気ひずみ測定法の検討, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 132, No. 11, pp.1033-1038, 2012
- [2] 甲斐 祐一郎, 槌田 雄二, 戸高 孝, 榎園 正人, 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法, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 132, No. 10, pp.930-935, 2012
- [3] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Influence of Stress on Vector Magnetic Property Under Rotating Magnetic Flux Conditions, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, No.4, pp.1421-1424, 2012
- [4] 甲斐 祐一郎, 槌田 雄二, 戸高 孝, 榎園 正人, 応力印加時における任意磁束条件下のベクトル磁気特性, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.48, No.4, pp.1421-1424, 2012
- [5] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Measurement of the two-dimensional magnetostriction and the vector magnetic property for a non-oriented electrical steel sheet under stress, Journal of Applied Physics, Volume 111, Issue 7, pp.07E320 - 07E320-3, 2012
- [6] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Influence of Stress on Vector Magnetic Property Under Alternating Magnetic Flux Conditions, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 10, pp. 4344-4347, 2011
- [7] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Effect of Stress on Vector Magnetic Property of Non-oriented Electrical Steel Sheet, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 19, No.3, pp.540-543, 2011
- [8] Yuichiro Kai, Measurement of vector magnetic property under stress along arbitrary direction in non-oriented electrical steel sheet, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), R. 87 No 9b, pp.101-105, 2011

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Effect of

Stress on Vector Magnetic Property and Two-dimensional Magnetostriction of a Non-oriented Electrical Steel Sheet, Proceedings of The 7th Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, pp.284-289, 2012.7.26

- ② Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Measurement of Vector Magnetic Property and Two-dimensional Magnetostriction in a Non-oriented Electrical Steel Sheet under Stress Condition, 56th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, 2011, Scottsdale, Arizona, USA, (2011.11.2)
- ③ 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 応力下における無方向性電磁鋼板の任意方向磁気ひずみ評価, 第35回日本磁気学会学術講演会, 日本磁気学会学術講演概要集, 朱鷺メッセ, No.35, p.304 (2011.9.29)
- ④ 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, ロックインアンプを用いた電磁鋼板の磁気ひずみ測定法の検討, 平成23年度電気学会基礎・材料・共通部門大会, 東京工業大学 pp.106-111, (2011.9.21)
- ⑤ 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, ロックインアンプを用いた磁気ひずみ測定法の検討, 電気学会研究会資料, マグネティックス研究会, MAG-11-023, pp.1-6, (2011.6.30)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他] (計1件)

- ① 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 実機回転機鉄心における残留応力と応力ベクトル磁気特性の測定, 日本AEM学会誌<特集>次世代電磁力応用機器の開発技術 III, Vol. 19, No. 4, pp.625-632 (2011)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 祐一郎 (KAI YUICHIRO)

大分大学・工学部・客員研究員

研究者番号: 50595436