

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月20日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760212

研究課題名（和文） 省エネ機器開発のための圧縮応力下での歪み波鉄損推定法の開発

研究課題名（英文） Study of estimation of iron loss under both dc-biased magnetization and compressive stress for design of energy saving devices

研究代表者

宮城 大輔（MIYAGI DAISUKE）

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10346413

研究成果の概要（和文）：面内方向に圧縮応力が印加された電磁鋼板の直流偏磁下における準静的ヒステリシスループ（励磁周波数：5mHz）を測定する装置の開発を行った。初期磁化曲線上マイナーループ鉄損（ヒステリシス損）は、面内方向の圧縮応力の有無に係わらず直流偏磁が1.5T付近の領域で最大になり、それよりも大きくなると減少する。また、圧縮応力を5MPa印加するとマイナーループ鉄損の増加率は減少し、直流偏磁が1.5T以上では、圧縮応力を印加しても鉄損はほとんど増加しない結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The measurement system was developed used for the measurement of the semi-static hysteresis loop (excitation frequency : 5mHz) of an electrical steel sheet under both dc-biased magnetization and compressive stress. The effect of the compressive stress on the hysteresis loss of minor loop which generated on the initial magnetization curve is examined. Irrespective of the largeness of compressive stress, the hysteresis loss of a minor loop of the non-oriented electrical steel sheet reaches the maximum when the DC biased magnetization of 1.5T is applied. When the compressive stress of 5MPa is impressed, the increasing rate of the hysteresis loss of a minor loop decreases. Under the dc-biased magnetization above 1.5T, when the compressive stress increases, the hysteresis loss of a minor loop hardly increases.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |
| 2011年度 | 700,000   | 210,000 | 910,000   |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

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：電磁鋼板，鉄損推定，圧縮応力，直流偏磁，歪み波鉄損，マイナーループ，ヒステリシス損

## 1. 研究開始当初の背景

回転機や変圧器などの鉄心には、電磁鋼板が用いられており、その磁気特性は、トルク

や効率等の電気機器の性能を大きく左右する。特に、回転機に使用される電力は国内の年間消費電力の約53%を占めており、効率を

1%向上させると、50万kW級の中型原子力発電所1.3基分の電力を削減することが可能であると言われている。近年、地球温暖化対策やエネルギーの枯渇問題の観点から、その対策の一環として、エネルギー資源（電力）を出来る限り無駄にすることなく利用することが重要であり、回転機の効率化を図る事が強く求められている。したがって、回転機などの鉄心の素材としては、高透磁率・低鉄損が強く求められている。実際の設計において、実機のモータで生じる損失は設計時に行った数値解析法で求めた値と異なっていることが問題となっている。特に、高透磁率・低鉄損の電磁鋼板を用いた場合に、この差異が大きく、高効率・低損失電気機器の開発の大きな問題となっている。この原因として、モータ製造の際の組み立てによる機械的応力、切断加工や打ち抜き加工に伴う鉄心端部の歪み、やきばめやボルト締めなど鉄心保持のためにコアに付与される弾性歪み、かしめや溶接等による歪みなどによる鉄心磁気特性の劣化が考えられる。

これまでに電磁鋼板面内の圧縮応力が磁気特性の劣化に大きく影響することが報告されており、特にやきばめによる面内方向圧縮応力による電磁鋼板の磁気特性の劣化が問題視され、多くの研究が行われている。また、申請者は平成20年～21年若手研究(B)「積層電磁鋼板の厚さ方向圧縮応力が電力機器の性能に及ぼす影響」により、ボルト締めやかしめ等によりモータコアを固定した際、モータコアの積層鉄心の厚さ方向に働く圧縮応力によって磁気特性がどの程度劣化するかを明らかにした。以上の測定結果より、圧縮応力が印加された電磁鋼板はヒステリシスループが大きくなるため、磁束密度波形が歪んだ場合およびマイナーループが生じた場合には、損失増加が激しいことが予測され、これらの値および特性を十分理解した上で、鉄心に印加される応力も考慮して、さらにはそれらをコントロールしなければ、低損失な電力機器の設計は不可能である。

この電磁鋼板の圧縮応力下での歪み波およびマイナーループによる鉄損特性が明らかになれば、加工や構造上やむなく印加された応力により、損失がどれだけ増加するかを事前に確認できると同時に、鉄損増加が出来るだけ少なくなるような構造および組み立てを開発することが可能である。さらには、運転時に不平衡となり直流バイアスが付加された場合などでの損失増加も事前に把握することが可能となり、制御の必要性や精度などにも大きな知見を与えることになる。

## 2. 研究の目的

本研究では、電磁鋼板の圧延方向または直角方向に圧縮力を加えた状態でさらに直流

偏磁を印加した状態でヒステリシスループ（マイナーループ）が測定できる磁気特性試験装置を開発し、無方向性電磁鋼板の面内方向に圧縮力を加えた状態でのマイナーループの鉄損を測定し、数値解析に用いることができるようなデータベースの検討を行う。また、圧縮応力下で歪み波を励磁した場合の鉄損の測定を行い、得られた測定結果をもとに、圧縮応力下における歪み波鉄損の推定手法を確立する。さらに、従来行われている、応力解析と磁界解析に新たに開発する鉄損推定法を用いることにより、その推定精度を検証するとともに、加工および構造上印加されてしまう応力を考慮した、低損失な電力機器の設計指針について検討を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)面内方向圧縮応力下での電磁鋼板の直流偏磁下によるマイナーループ鉄損の測定システムの開発 積層電磁鋼板に圧縮応力を印加した状態で、直流偏磁をかけながら、準静的マイナーループを測定できる測定システムの開発を行う。先の研究から、直流偏磁下での磁束密度の制御が難しくなることが知られており、高速なフィードバック波形制御の開発が必要となる。また、準静的なヒステリシスループを測定するためには、積分器のドリフトによる測定誤差を取り除く必要があり、地磁気などの外部ソースにより測定サンプルに印加されたノイズなのか、測定器で発生したノイズなのかを区分して、それぞれを取り除けるシステムを開発する。

(2)直流偏磁下におけるマイナーループヒステリシス損の面内圧縮応力依存性の測定と損失特性の分析 10MPa程度までの大きな圧縮応力を印加した無方向性電磁鋼板の初期磁下曲線上における準静的マイナーループの鉄損を様々な偏磁下において測定を行い、面内圧縮応力が初期磁下曲線上のマイナーループのヒステリシス損に及ぼす影響について明らかにする。さらに、測定結果を分析することで、マイナーループによるヒステリシス損の推定法の検討を行ない、圧縮応力や歪み波によるマイナーループが鉄損増加に大きく寄与していることを明らかにし、省エネ機器開発のための設計指針を明らかにする。

## 4. 研究成果

(1)面内方向圧縮応力下での電磁鋼板の直流偏磁下によるマイナーループ鉄損の測定システムの開発 直流偏磁させた時の磁気特性を5mHzの低周波下で測定するため、試料は無方向性電磁鋼板JIS35A360の圧延方向を14枚積層したもの（長さ:360mm、幅:30mm、厚さ:5mm）を用いた。Bコイルは

試料に直接 500 ターン巻いた。磁束密度  $B$  は積分器を用いて試料に巻いた  $B$  コイルの誘起電圧により測定した。磁界  $H$  はアキシャルタイプのプローブを試料に設置しガウスメーターを用いることにより測定を行った。応力印加装置を制御して、試料に圧縮応力を印加した。開発した測定回路の配線図を図 1 に示す。

磁束密度の各測定諸量は、 $B_{\max}$  : 磁束密度の最大値,  $B_{\min}$  : 磁束密度の最小値,  $B_a$  : 交流磁束密度の振幅,  $\Delta B$  : 磁束密度の偏磁量とした。測定手順を以下に示す。

- ① 周波数 30Hz で消磁を行う。
- ②  $B_a=0.3T$  付近で周波数 5mHz のヒステリシスループを描き, (1)式より積分器のオフセット分の磁束密度  $B_{\text{error}}$  を求め, 積分器の値から  $B_{\text{error}}$  を引くことにより, 積分器のオフセット分の磁束密度を補正する。

$$B_{\text{error}} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2} \quad (1)$$

- ③ 目標の磁束密度まで制御してマイナーループを一回測定し, その時の  $B_{\max}$  と  $B_{\min}$  の電流値を確認する。次に, その値を基準に周波数が 5mHz となるように再度マイナーループを描き, 次の目標の磁束密度で同様の動作を繰り返す。

図 2 に示すような初期磁化曲線上にできるマイナーループの測定を効率良く行うためには, 積分器によるドリフトを少なくしなければならず, 測定範囲を分割し, 測定時間を短縮して測定を行うことで, 積分器によるドリフトを少なくした測定システムを開発した。

(2)直流偏磁下におけるマイナーループヒステリシス損の面内圧縮応力依存性の測定と損失特性の分析 圧縮応力  $\sigma=0\text{MPa}$ , 1MPa, 5MPa をそれぞれ印加し, マイナーループの振幅は  $B_a=0.05T$  で, 測定範囲は  $\Delta B=0T$ , 0.5T~1.7T (0.1T 刻み) で測定を行った。(2)式で表わされる  $\Delta B=0T$  のときを基準とした鉄損の増加率  $\eta$  を図 3 に示し, (3)式で表わされる  $\sigma=0\text{MPa}$  のときを基準とした鉄損の増加率  $\kappa$  を図 4 に示す。

$$\eta = \frac{W_{\Delta B}}{W_{B_0}} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{W_{\sigma}}{W_{\sigma_0}} \quad (3)$$

ここで,  $W_{B_0}$  :  $\Delta B=0T$  の鉄損,  $W_{\Delta B}$  : 各偏磁量でのマイナーループ鉄損,  $W_{\sigma_0}$  :  $\sigma=0\text{MPa}$  の鉄損,  $W_{\sigma}$  : 各応力値でのマイナーループ鉄損である。

図 3 の結果より, 初期磁化曲線上のマイナーループ鉄損は  $\Delta B=1.5T$  付近の領域までは増加してゆき, その後減少することが分かる。

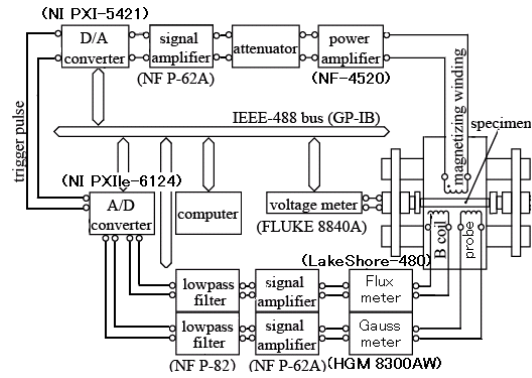


図 1 開発した測定回路の配線図

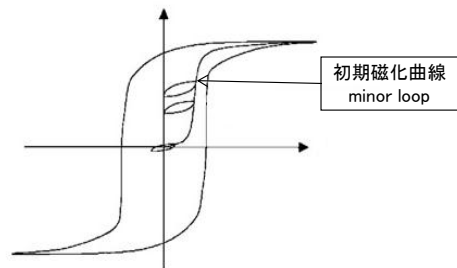


図 2 初期磁化曲線上のマイナーループ

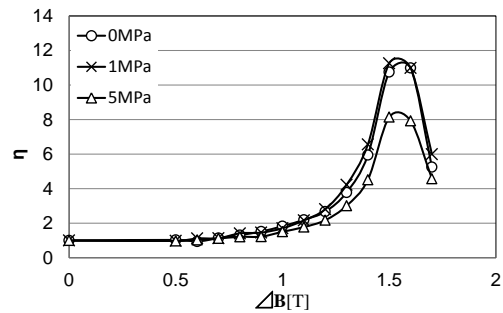


図 3 直流重畳によるマイナーループ鉄損増加率  $\eta$  ( $f=5\text{mHz}$ )

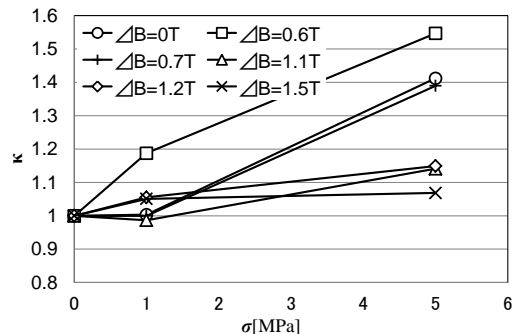


図 4 圧縮応力によるマイナーループ鉄損増加率  $\kappa$  ( $f=5\text{mHz}$ )

これは、 $\Delta B=1.5T$  以下では磁壁移動が生じて鉄損は増加するが、 $\Delta B=1.5T$  付近で磁壁移動から磁化回転へと移行することで鉄損が減少したと考えられる。また、 $\sigma=0MPa$  や  $\sigma=1MPa$  では  $\Delta B=1.5T$  でマイナーループ鉄損の増加率  $\eta$  が最も大きくその値は約 11 倍になるが、 $\sigma=5MPa$  では増加率  $\eta$  は約 8 倍になっており、 $\Delta B=1.5T$  付近においてマイナーループ鉄損の増加率  $\eta$  が圧縮応力により最も減少していることがわかる。

図 4 より、偏磁量  $\Delta B$  が低い領域では圧縮応力によりマイナーループ鉄損は増加しているが、 $\Delta B=1.2T$  付近以上から圧縮応力による鉄損の増加率  $\kappa$  は減少していることがわかる。この理由は以下のように考えられる。電磁鋼板の面内方向に圧縮応力を印加したことにより、電磁鋼板の磁壁が  $90^\circ$  方向に移動したため、磁壁移動が生じる領域では鉄損が大きくなる。磁壁移動が終わり磁化回転の領域となると、面に平行な方向への圧縮応力による磁壁の移動の影響が少なくなるために、応力を印加しても磁化回転領域におけるマイナーループ鉄損の大きさはあまり変化しなくなったためと考えられる。

得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 初期磁化曲線上マイナーループ鉄損は  $\Delta B=1.5T$  付近の領域で最大になり、それよりも大きくなると減少する。
- 圧縮応力を印加すると初期磁化曲線上のマイナーループ鉄損は  $\Delta B=1.5T$  以下の領域では増加するが、 $\Delta B=1.5T$  以上の領域になると圧縮応力を印加してもそれほど変化しない。
- 電磁鋼板の面に平行な方向に圧縮応力を印加するとマイナーループ鉄損の増加率  $\eta$  は減少する。
- 大きな圧縮応力が印加された場合は、高磁束密度領域でのマイナーループ鉄損増加率がそれほど大きくないため、考慮しなくて良いと考えられる。

## 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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 森直人, 高橋則雄, 中野正典, 宮城大輔, 圧縮応力が偏磁条件下の電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響, 平成 24 年電気学会全国大会, 2012 年 3 月 21 日, 広島工業大学 (広島市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教