

特 集

次世代電磁力応用機器の開発技術Ⅱ

応力下における電磁鋼板のベクトル磁気特性

Vector Magnetic Property of Electrical Steel Sheet by applying Mechanical Stress

甲斐 祐一郎^{*1,*2} (正員), 槌田 雄二^{*2} (正員), 戸高 孝^{*2} (正員), 榎園 正人^{*2} (正員)

Yuichiro KAI (Mem.), Yuji TSUCHIDA (Mem.), Takashi TODAKA (Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

In general, alternating and rotating magnetic flux occur in actual rotating machines. In addition magnetic property of electrical steel sheet is deteriorated by residual stress, which occurs during manufacturing process. Therefore, it is important to know the magnetic property under the various magnetic flux and mechanical stress conditions. This paper presents the influence of the mechanical stress on vector magnetic property of non-oriented electrical steel sheet. We developed a new system for measuring vector magnetic property by applying the mechanical stress. And the vector magnetic properties under the alternating and rotating magnetic flux conditions are measured by applying the mechanical stress. From the results, it was clarified that the difference of the vector magnetic property are obtained due to the mechanical stress.

Keywords: alternating magnetic flux, mechanical stress, rotating magnetic flux, vector magnetic property.

1 緒言

環境・エネルギー問題を解決するために、モータやアクチュエータなどの電磁力応用機器には高効率・高出力が要求される。これら電磁力応用機器には、磁性材料である電磁鋼板や永久磁石が用いられており、材料特性の有効活用技術が必要となる。このような背景のもと、「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」のプロジェクトのテーマの1つでは、加工応力を利用したベクトル磁気特性の制御技術の確立を目指し、応力下におけるベクトル磁気性の解明とその制御技術に関する研究を行っている。

例えば、家電製品や産業機器用モータには電磁鋼板が用いられており、交番及び回転磁束条件下で使用される。この際に、電磁鋼板面内の磁束密度及び磁界強度は大きさや方向を持ったベクトル量であり、磁束密度ベクトル B と磁界強度ベクトル H の大きさや方向は一致しないことが知られている。そこで、これらのベクトル関係を正確に表現するために、ベクトル磁気特性評価法が提案された[1]。

一方、電磁鋼板は応力に極めて敏感であるため、製造段階の加工・組み立て工程で生じた残留応力によって磁気特性が劣化する。そこで、製造工程における磁気特性の劣化量を推定するために、打抜きやかしめな

どが磁気特性へ及ぼす影響について検討されている[2, 3]。著者らも、製造工程の残留応力を定量的に評価するため、回転機鉄心の局所的な残留応力分布を測定し、各位置の残留応力が異なることを明らかにした[4]。さらに、回転機鉄心内の残留応力が磁気特性へ及ぼす影響を詳細に検討するためには、応力と磁気特性の関係を明らかにする必要がある。応力下の磁気特性評価法は、これまで応力印加方向と同方向の磁束密度と磁界強度が測定されている[5]。しかしながら、従来の評価法では、応力印加時における任意方向の交番磁束及び回転磁束条件下の磁気特性を正確に評価することが困難である。

そこで、実機内の様々な応力及び磁束を模擬した条件下のベクトル磁気特性を解明するため、応力下のベクトル磁気特性システムを開発した。本稿では、開発したシステムの概要を示すと共に、応力下におけるベクトル磁気特性を測定したのでその結果を報告する[6, 7]。

2 応力下ベクトル磁気特性測定システム

Fig. 1 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とベクトル磁気特性を測定するための磁気特性測定装置から構成されている。Fig. 2 に測定試料を示す。測定試料として、無方向性電磁鋼板を十字形に切出したものを用いた。また、十字形試料の中央部における応力の均一度を向上させるためスリットを施した。Fig. 3 に測定システ

連絡先： 甲斐 祐一郎, 〒870-1192 大分市旦野原 700 番地, 大分大学工学部内サブコア研究室,
e-mail: y.kai@oita-mag.jp

^{*1}大分県産業創造機構 ^{*2}大分大学

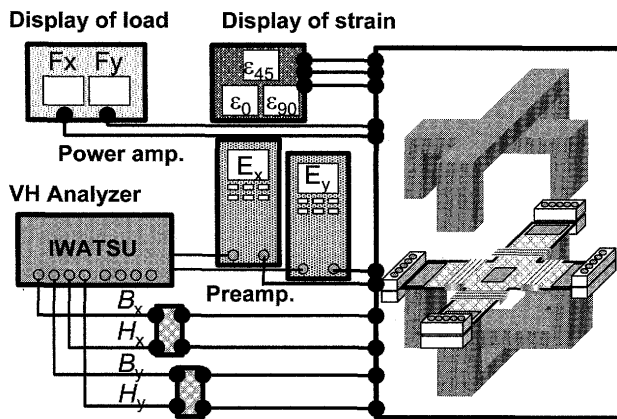


Fig. 1 Measurement system of vector magnetic property under stress.

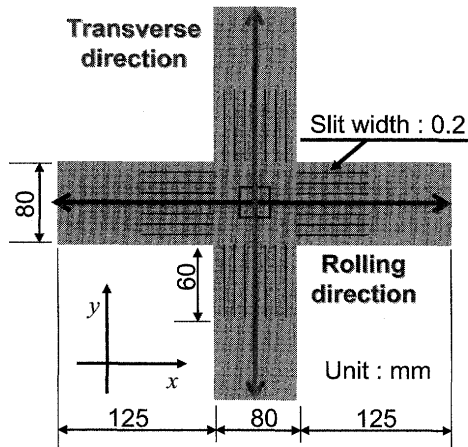


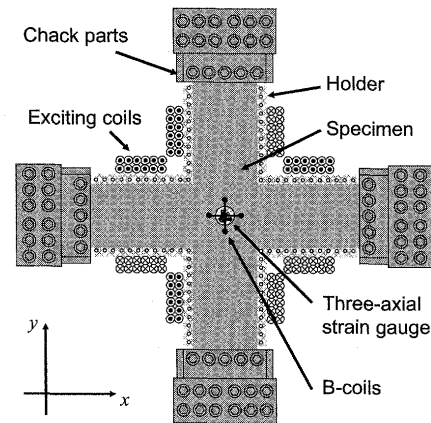
Fig. 2 Dimension of cross-shaped specimen.

の概観図を示す。応力を評価するために、試料の中央部に三軸ひずみゲージ(三軸 0/90/45 交叉 350 Ω ゲージ, 共和電業製)を貼った。また, 十字形試料の4つの端部をチャックで固定し, 二方向励磁を行うため励磁コイルと励磁ヨークを配置した。さらに, 直交したBコイルによって磁束密度ベクトルを測定し, Hコイルによって磁界強度ベクトルを測定した。測定手順として, 鋼板面内のひずみから応力を算出し, 主応力を制御した後, ベクトル磁気特性測定装置(VH アナライザ IE-1131B, 岩通計測株式会社製)を用いて, 応力下のベクトル磁気特性を測定した。

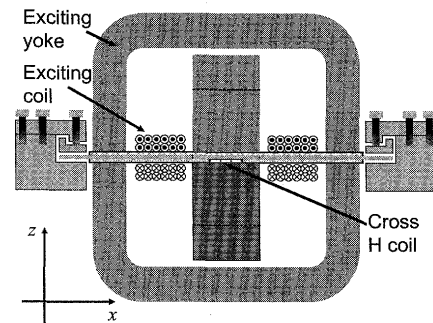
3 鋼板面内の応力評価法

三軸ひずみゲージによって測定したひずみを ε_0 , ε_{45} , ε_{90} とし, 平面応力の状態を仮定し応力を求める。平面応力におけるフックの式は

$$\sigma_x = \frac{1}{1-\nu^2} (\varepsilon_0 + \nu \varepsilon_{90}) \quad (1)$$



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 3 Schematic view of measurement system.

$$\sigma_y = \frac{1}{1-\nu^2} (\varepsilon_{90} + \nu \varepsilon_0) \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} (2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}) \quad (3)$$

となる。ここで, σ_x , σ_y は x 及び y 方向の応力, τ_{xy} はせん断応力, E はヤング率, ν はポアソン比である。さらに, 主応力の大きさ σ_1 , σ_2 と方向 θ_σ は次式で与えられる。

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta_\sigma + 2\tau_{xy} \cos \theta_\sigma \sin \theta_\sigma + \sigma_y \sin^2 \theta_\sigma \quad (4)$$

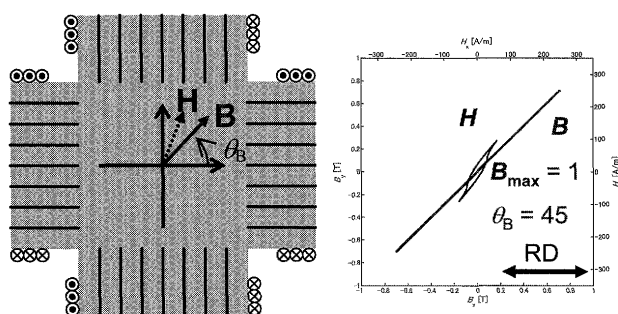
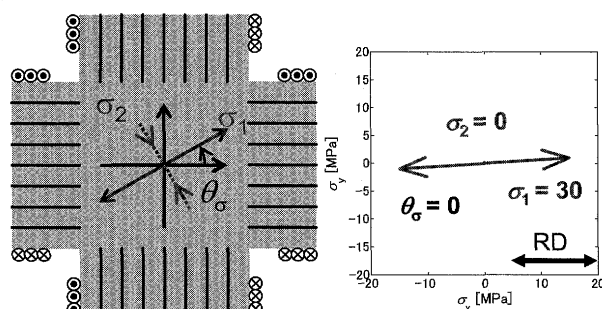
$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta_\sigma - 2\tau_{xy} \cos \theta_\sigma \sin \theta_\sigma + \sigma_y \cos^2 \theta_\sigma \quad (5)$$

$$\theta_\sigma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (6)$$

4 応力印加時のベクトル磁気特性評価

4.1 評価方法

Fig. 4 に応力印加時におけるベクトル磁気特性の評価法を示す。磁束条件は, 最大磁束密度 $B_{\max}$ を 1.0 T

(a) B and H without mechanical stress

(b) Applied mechanical stress

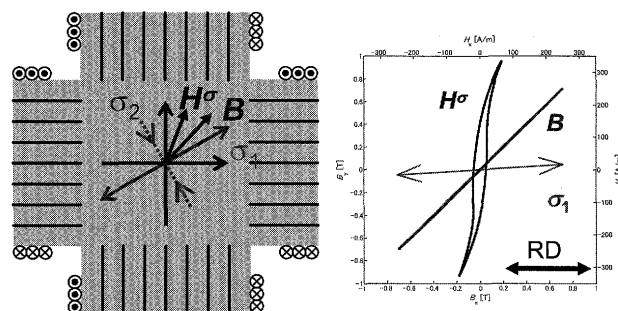
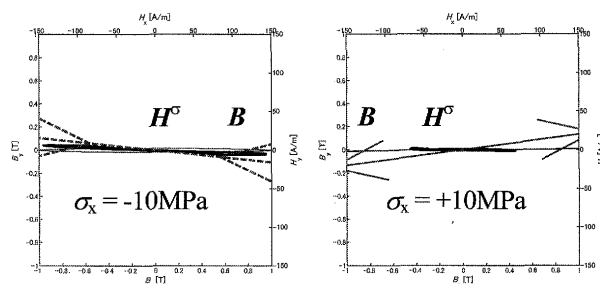
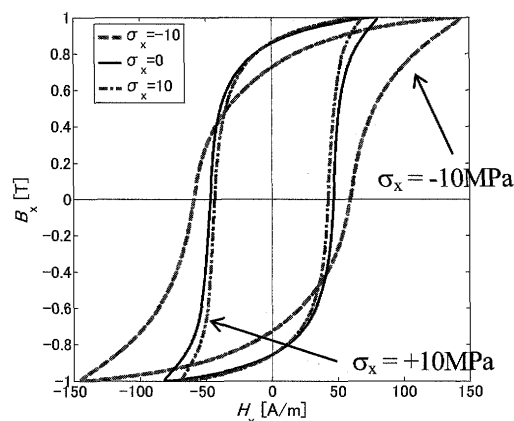
(c) σ , B and H with applied mechanical stress

Fig. 4 Evaluation method of vector magnetic property with and without mechanical stress.

とし、圧延方向を基準とした磁束密度ベクトルの傾き角度 θ_B を45 deg. に制御し、測定を行った。Fig. 4 (a) に応力印加前のベクトル磁気特性を示す。 B と H の方向は一致しておらず、空間的な位相差が生じている。次に、鋼板面内において x 方向に主応力が向くように外部加重を制御した。Fig. 4 (b) に印加した応力の大きさと方向を示す。本測定では、印加した応力の方向が圧延及び直角方向に一致しているため、 $\sigma_1 \approx \sigma_x$, $\sigma_2 \approx \sigma_y$, $\theta_\sigma \approx 0$ deg., とすることができる。Fig. 4 (c) に応力印加後のベクトル磁気特性を示す。ここで、応力印加後の磁界強度ベクトルを H^σ と定義した。応力印加前後の磁

(a) Loci of B and H 

(b) BH loops

Fig. 5 Vector magnetic property with and without mechanical stress at $B_{\max} = 1.0$ T and $\theta_B = 0$ deg.

束条件は同じであるが、応力によって H と H^σ の大きさと方向が異なる。

以上の結果より、本システムを用いることで、応力を制御し、応力下のベクトル磁気特性を測定することが可能である。

4.2 従来評価

本システムでは、応力印加方向と同方向の磁気特性を測定できるため、従来法を模擬した評価が可能である。Fig. 5 (a) に応力印加方向に励磁した時のベクトル磁気特性を示す。主応力及び B は圧延方向を向いており、応力印加後の磁界強度ベクトル H^σ もほぼ圧延方向を向く。Fig. 5 (b) に応力印加前後のBHループを示す。引張応力によってBHループの膨らみが減少し、圧縮応力によって増加する。

Fig. 6に応力に対する透磁率 μ_{mx} と保磁力 H_{cx} の磁気特性を示す。透磁率 μ_{mx} を次式にて計算した。

$$\mu_{mx} = \frac{B_{mx}}{\mu_0 H_{mx}} \quad (7)$$

ここで、 B_{mx} は x 成分のBHループの最大磁束密度、

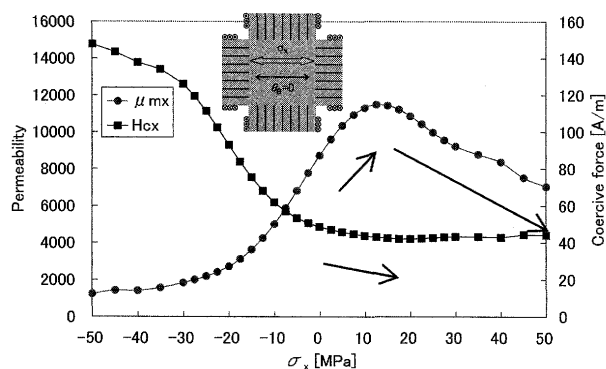


Fig. 6 Magnetic properties as a function of applied mechanical stress at $B_{\max} = 1.0$ T and $\theta_B = 0$ deg.

H_{mx} は x 成分の BH ループの最大磁界強度である。透磁率は、低い引張応力によってわずかに増加し、保磁力が減少している。さらに、引張応力を増加させることで、透磁率は減少し、保磁力は増加している。また、圧縮応力の増加に伴って透磁率は減少し、保磁力は増加していることがわかる。

以上の結果より、応力印加方向と同方向に励磁した場合、低い引張応力にて磁気特性は向上し、圧縮応力によって磁気特性が劣化する。

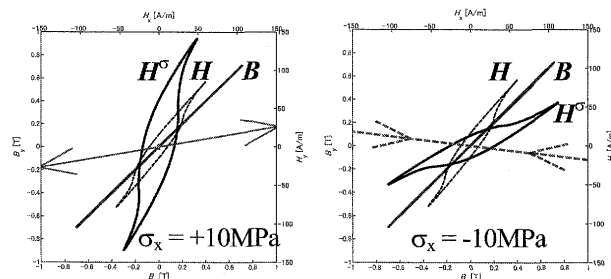
4.3 任意方向交番磁束条件下のベクトル磁気特性

次に、応力印加方向と異なる方向に励磁し、ベクトル磁気特性を測定した。Fig. 7 (a) に応力印加時の磁束密度ベクトル B 、磁界強度ベクトルの軌跡 H と H^σ を示す。引張応力によって H^σ は圧延直角方向に傾き、圧縮応力によって圧延方向に傾く。応力印加方向と励磁方向が同じ場合、 H^σ の方向は変化しなかったが、応力印加方向と励磁方向が異なる場合、 H^σ は大きく変化する。Fig. 7 (b) と (c) に各成分の BH ループを示す。 x 成分の BH ループは、従来法で得られた BH ループと同様の傾向を示す。一方、応力を印加することで y 成分の BH ループの膨らみは引張応力によって増加し、圧縮応力によって減少する。

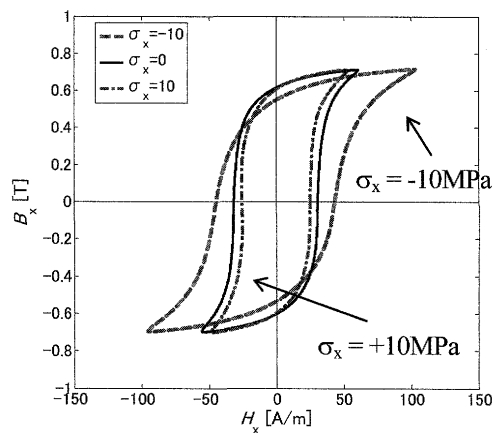
Fig. 8 に応力に対する磁気特性を示す。式(1)にて x 成分の透磁率を計算し、 y 成分の透磁率は次式にて計算した。

$$\mu_{my} = \frac{B_{my}}{\mu_0 H_{my}} \quad (8)$$

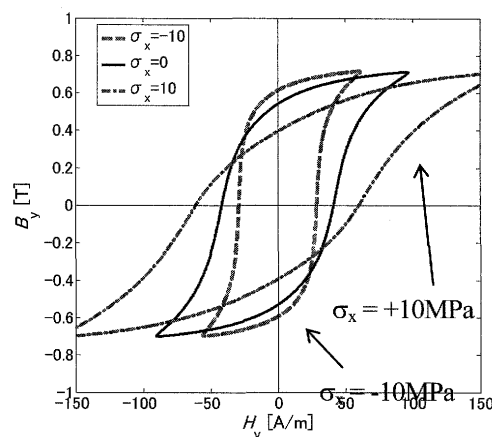
ここで、 B_{my} は y 成分の BH ループの最大磁束密度、 H_{my} は y 成分の BH ループの最大磁界強度である。これまで応力印加方向と同方向の磁気特性が主に評価さ



(a) Loci of B and H



(b) BH loops of x component



(c) BH loops of y component

Fig. 7 Vector magnetic property with and without mechanical stress at $B_{\max} = 1.0$ T and $\theta_B = 45$ deg.

れていたが、応力印加方向と励磁方向が異なる場合、各成分の磁気特性が大きく変化する。 x 方向の磁気特性は、従来法で得られた傾向と同様であるが、 y 成分の磁気特性は圧縮応力によって向上し、引張応力によって劣化する。

以上の結果より、応力印加方向と励磁方向が異なる場合、応力印加方向だけでなく直角方向の磁気特性も変化することが明らかとなった。応力と磁気特性の関

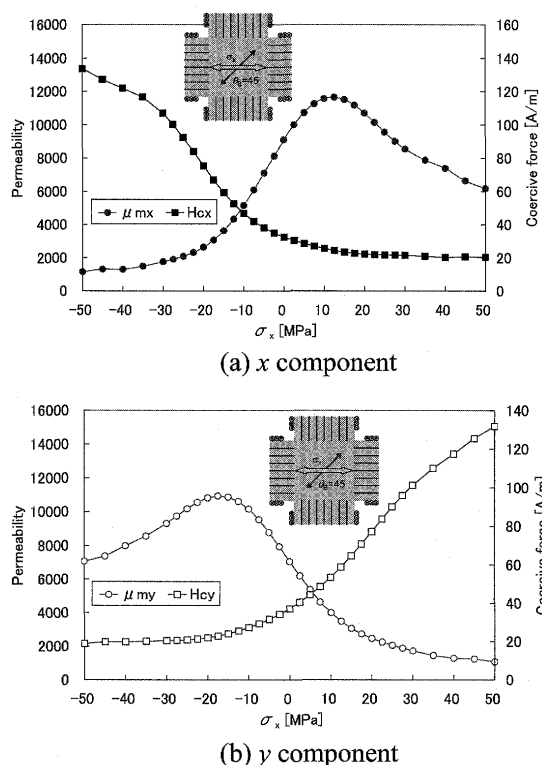


Fig. 8 Magnetic properties as a function of applied mechanical stress at $B_{\max} = 1.0$ T and $\theta_B = 45$ deg.

係を正確に表現するためには、応力下におけるベクトル磁気特性評価技術が必要となる。

4.4 回転磁束条件下におけるベクトル磁気特性

Fig. 9 に x 方向に応力を印加したときの回転磁束条件下のベクトル磁気特性を示す。磁束条件は、 $B_{\max} = 1.0$ T, $\alpha = 1.0$ の真円である。引張応力の増加に伴い、応力印加方向に直角な方向の磁界強度が増加する。一方、圧縮応力を印加した場合、応力印加方向の磁界強度が増加する。応力を印加することで応力・磁歪効果によって応力印加方向及び直角方向の磁気特性が変化したと考えられる。

Fig. 10 に二軸応力印加時のベクトル磁気特性を示す。一軸応力印加時を基準($\sigma_x = 20$, $\sigma_y = 0$)として、 y 方向にも引張及び圧縮応力を印加した。 y 方向の引張応力によって、 y 方向の磁界強度が減少し、圧縮応力によって磁界強度が増加する。Fig. 11 に各成分の透磁率と保磁力を示す。一軸と二軸応力に対する各成分の磁気特性を比較すると、 y 方向に応力を印加することで、各成分の磁気特性が変化する。特に、引張応力によって y 成分の磁気特性が向上し、圧縮応力によって劣化する。

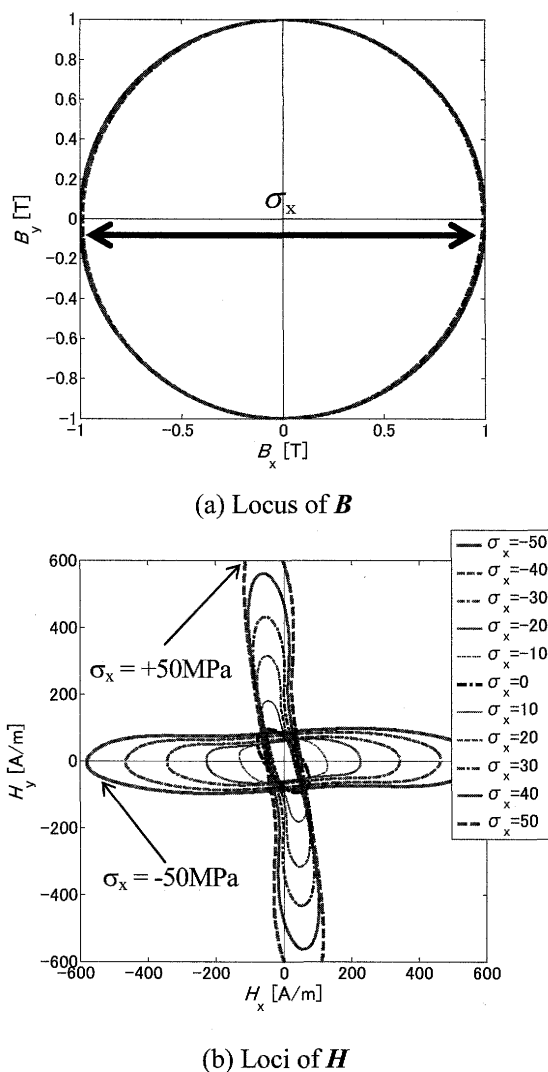


Fig. 9 Vector magnetic property with and without mechanical stress under rotating magnetic flux condition at $B_{\max} = 1.0$ T and $\alpha = 1.0$.

以上の結果より、応力を印加することで、圧延及び直角方向の磁界強度ベクトルが異なることを明らかにした。さらに、一軸だけでなく二軸方向の応力が各成分の磁気特性へ影響を及ぼすことがわかった。

5 結言

本論文では、無方向性電磁鋼板面内に応力印加時のベクトル磁気特性について検討を行った。以下にまとめを示す。

- (1) 圧延及び圧延直角方向に主応力を制御し、ベクトル磁気特性を測定可能なシステムを開発した。応力印加方向と励磁方向が同じ場合、低い引張応力によって磁気特性は改善し、圧縮応力によって磁気特性

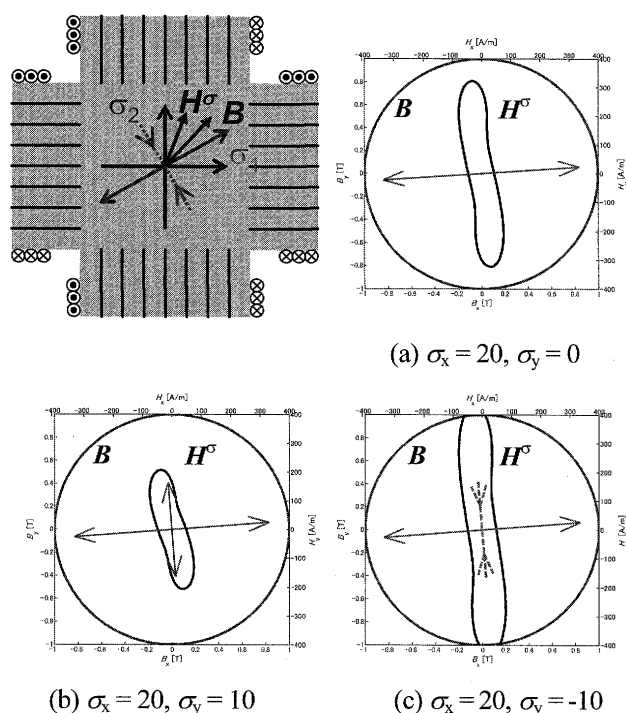


Fig. 10 Vector magnetic property with and without biaxial stress along rolling and transverse direction.

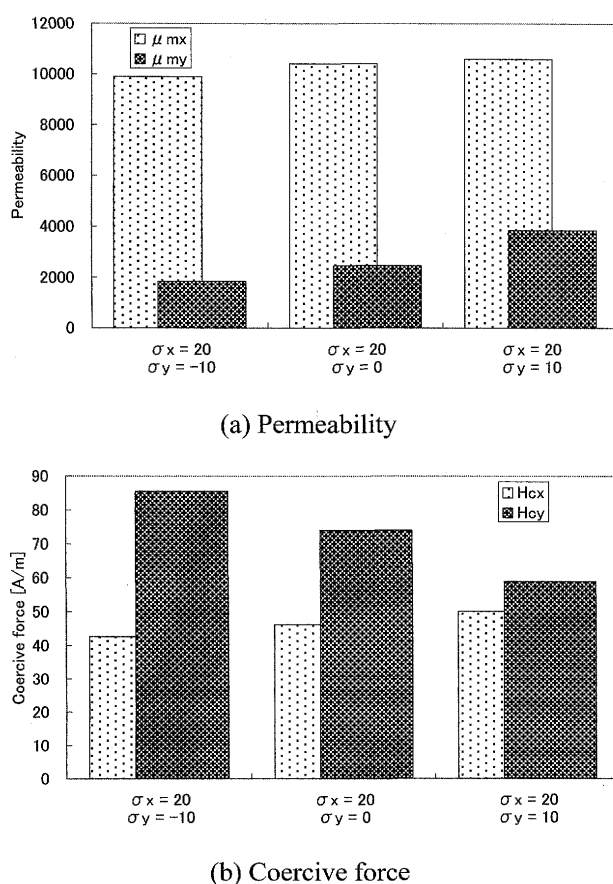


Fig. 11 Permeability and coercive force depending on the applied biaxial stress.

が大きく劣化することがわかった。

- (2) 応力印加方向と励磁方向が異なる場合、応力印加方向及び直角方向の磁気特性が変化することを明らかにした。従来法は応力印加方向の磁気特性が評価されているが、応力と磁気特性を正確に評価するためには、ベクトル磁気特性評価技術が有効である。
- (3) 一軸応力だけでなく二軸応力下のベクトル磁気特性を測定し、圧延及び直角方向の磁界強度ベクトルが異なることを明らかにした。本システムを用いることで、圧延及び直角方向の応力印加時におけるベクトル磁気特性の評価が可能である。
- (4) 今後は、実機内の応力及び磁束条件下のベクトル磁気特性についてより詳細な検討を行うため、任意方向の応力印加時におけるベクトル磁気特性を測定する。また、応力がベクトル磁気特性へ与える要因を解明するため、応力下の磁気ひずみや磁区観察を行う予定である。

謝辞

本研究は、JST、大分県地域結集型研究開発プログラム「次世代電磁力応用機器開発技術の構築」の補助により遂行された。また、無方向性電磁鋼板の十字形試料は(株)安川電機より提供して頂きました。関係者各位のご協力に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 榎園正人, 二次元ベクトル磁気特性, 日本応用磁気学会誌, Vol.27, No.2, pp.50-58, 2003.
- [2] 千田邦浩, 河野正樹, 石田正義, かしめによる鉄心磁気特性劣化の要因解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-05-42, pp.21-26, 2005.
- [3] 藤村浩志, 屋鋪裕義, 児嶋浩, 中山大成, 無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす打ち抜き・かしめによる応力の影響, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-03-190, pp.9-14, 2003.
- [4] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 榎園正人, 回転機鉄心における局所的残留応力分布の評価, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-224, pp.1-6, 2009.
- [5] 谷良浩, 大穀晃裕, 中野正嗣, 有田秀哲, 山口真一, 都出結花利, 応力下における無方向性電磁鋼板の鉄損特性, 日本磁気学会誌, Vol.30, No.2, pp.196-200, 2006.
- [6] 甲斐祐一郎, 下地広泰, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 二軸応力下におけるベクトル磁気特性測定システムの応力印加機構の検討, 電学論A, 130 巻4号, pp.403-408, 2010.
- [7] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性に及ぼす二軸引張応力の影響, 電気学会マグネティックス・静止器・回転機合同研究会資料, MAG-10-034, SA-10-034, RM-10-034, pp.43-48, 2010.