The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

学術論文

高磁束密度下における方向性電磁鋼板の 2 次元磁気ひずみ

Two-dimensional Magnetostriction of a Grain-oriented Electrical Steel Sheet under High Magnetic Flux Density Conditions

若林　大輔[*1](学生員)，戸高　孝[*1](正員)，榎園　正人[*1](正員)

Daisuke WAKABAYASHI (Stu. Mem.), Takashi TODAKA (Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

Two-dimensional magnetostriction of a grain-oriented electrical steel sheet under high magnetic flux conditions is measured by means of a new method for evaluating magnetostriction phenomena in arbitrary direction. The direction of the principal strain didn't change at low magnetic flux conditions. However, under high magnetic flux conditions the direction of the principal strain was changed and the magnetostriction waveform was distorted. The maximum magnetostriction increased depending on the inclination angle for the rolling direction.

Keywords: Two-dimensional magnetostriction, vector magnetic property, high magnetic flux condition, grain-oriented electrical steel sheet.

1 緒言

近年，地球温暖化対策の一環として低損失・高効率な電気機器の開発が求められている。特に変圧器においては省エネ法により効率の基準値が設けられ，実際に高い省エネ性能を実現したトップランナー変圧器が登場している。高効率な変圧器の開発の手段として低損失な方向性電磁鋼板の使用や高磁束密度下での運転が挙げられる。そのため高磁束密度下の方向性電磁鋼板のより詳細な磁気特性の把握が重要となってきた。一方，方向性電磁鋼板は磁気ひずみ特性を有しており，磁気ひずみは変圧器の騒音問題の主要因とされている。しかしながら，これまで，高磁束密度下での磁気ひずみについてはあまり報告されていない。そのため，磁気特性同様に磁気ひずみについても議論する必要がある。

電磁鋼板の磁気特性の測定法についてはIEC標準規格や JIS 規格によって定められているが，得られる結果は励磁方向と同方向成分の磁気特性（スカラー磁気特性）である。著者らは磁気特性をベクトル量で評価できるベクトル磁気特性測定法を提案し，高磁束密度下のベクトル磁気特性の測定を行ってきた[1, 2]。一方，磁気ひずみ測定についてはまだ規格化されておらず，励磁方向のひずみ測定が慣習的に行われている[3]。そこで著者らはベクトル磁気特性と関連づけるために 2 次元磁気ひずみ測定法を提案した[4]。この測定法を用いることにより，鋼板面内の任意方向の磁気ひずみ（2 次元磁気ひずみ）を評価することができ，測定方向に依存しない評価が可能となった。特に方向性電磁鋼板の 2 次元磁気ひずみは磁束条件によらず，圧延方向に縮み，圧延直角方向に伸びが生じることが知られており，従来の測定手法ではそれらを同時に評価することができないため磁気ひずみ量は過小評価されてきた[4, 5]。

変圧器内のＴ接合部などの磁束の流れが変化する部分では圧延方向以外にも磁束が生じており[6]，その箇所で磁気ひずみが比較的大きく発生していることが知られている[7]。このため，本論文では高磁束密度下で一枚の方向性電磁鋼板に生じるベクトル磁気特性と 2 次元磁気ひずみの測定を行い，それらの関係性や圧延方向以外の特性について議論を行う。

2 測定手法

2.1 磁気ひずみ測定システム

Fig. 1 に磁気ひずみ測定システムを示す。励磁器には二次元ベクトル磁気特性測定装置を用いた。装置中央にある試料台に試料を設置して励磁する。試料内部の磁束密度は試料の中央部に穴を開けて巻かれた二方向の B コイル(Bx, By)，磁界強度は試料台下部中央に設置された二方向の H コイル(Hx, Hy)によって測定する。磁界強度ベクトルの接線方向成分の連続性を利用して，H コイルで試料近傍の磁界強度の接線方向成

連絡先：若林　大輔，〒870-1192 大分県大分市大字旦野原 700 番地，大分大学大学院工学研究科物質生産工学，
e-mail: v10f1006@oita-u.ac.jp
[*1] 大分大学

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

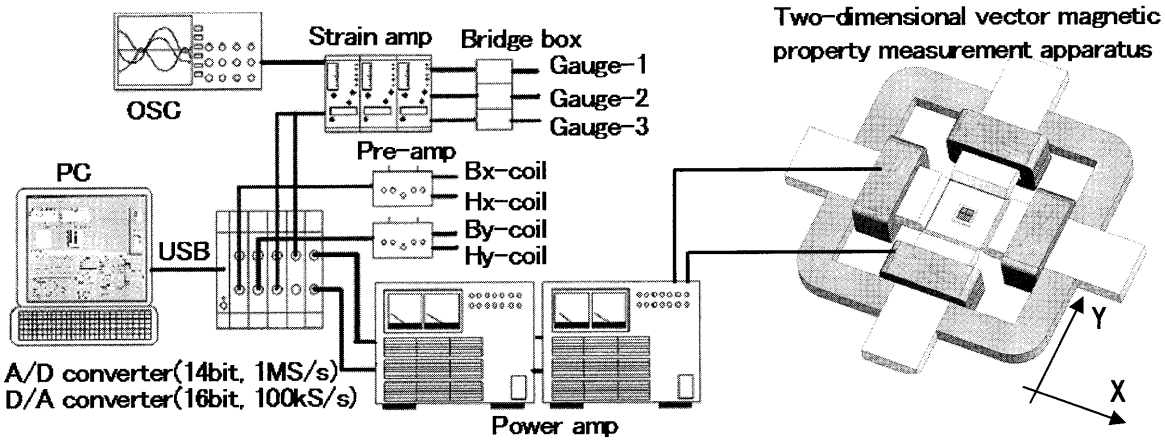


Fig. 1　Measurement system for magnetostriction.

分を測定する。測定では磁束密度波形を正弦波となるようにフィードバック制御を行う。波形が収束後，動ひずみ測定器の調整を行い磁気ひずみの測定を行った。磁気ひずみ波形は 100 周期の加算平均化を行い，奇数調波，51 調波以上の成分を除去した。

2.2 ベクトル磁気特性

二方向励磁が可能な二次元ベクトル磁気特性測定装置により試料に励磁を行い，磁束密度と磁界強度を二方向のBコイルとHコイルで測定することによって電磁鋼板の磁束密度と磁界強度をベクトル量として取り扱うことができ，磁束密度ベクトル $\boldsymbol{B}$ と磁界強度ベクトル $\boldsymbol{H}$ の関係（空間的位相差）が得られる。また二方向の磁束密度波形(Bx, By)を正弦波に制御し，それらの大きさを変えることによって試料中央部に任意の交番磁束条件を再現できる。Fig. 2 に磁束条件の定義図を示す。磁束条件は，最大磁束密度 B_{max}，傾角 θ_B（圧延方向に対する最大磁束密度方向の角度）のパラメータで表現する。

2.3 3 軸ひずみゲージと測定試料

Fig. 3 に今回測定に用いた試料の概念図を示す。磁気ひずみの測定には 3 軸ひずみゲージを用いた。3 軸ひずみゲージは試料中央部にあるBコイル用の穴を避けるために図のように接着した。試料の磁気特性評価領域は中央部の 20 mm × 20 mm の領域である。X 方向に試料の圧延方向を揃え，圧延方向を 0 deg とする。

2.4 2 次元磁気ひずみ

試料面内に生じる磁気ひずみの 3 方向成分を測定し，ひずみテンソルを計算することにより測定していない任意方向のひずみを求めることができる。今回用いた

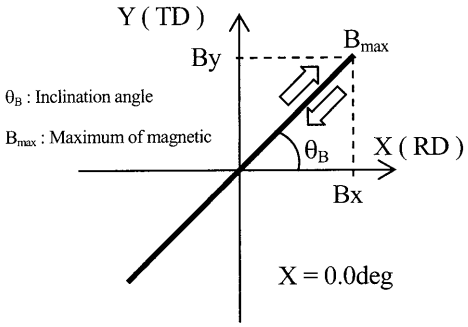


Fig. 2　Definition of magnetic flux condition.

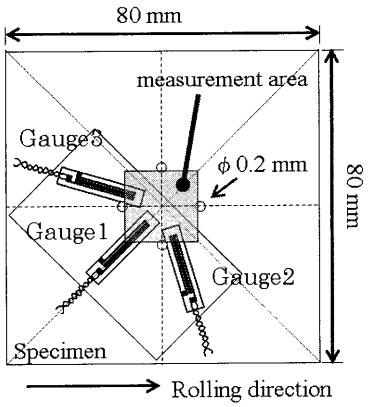


Fig. 3　Three-axial strain gauge and specimen.

試料の厚さは 0.35 mm と薄板であることから二次元場として考えると，ひずみ λ は

$$\frac{\Delta L}{L} = \lambda = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} e_{ij}\beta_i\beta_j = e_{11}\beta_1\beta_1 + 2e_{12}\beta_1\beta_2 + e_{22}\beta_2\beta_2 \qquad (1)$$

で表される。ただし L は変形前の試料の長さ，ΔL は長さの変化量，e_{ij} はひずみテンソル，β は各方向の方向余弦($\cos\theta_i$, $\sin\theta_j$)を表す[8]。(1)式をひずみテンソルについて書き換え，3 軸ひずみゲージの各ゲージ角度を代入すれば次式となる。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

$$\begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{22} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\sqrt{3})/3 & 1/3 & (1+\sqrt{3})/3 \\ 1/3 & -2/3 & 1/3 \\ (1+\sqrt{3})/3 & 1/3 & (1-\sqrt{3})/3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{Gauge1} \\ \lambda_{Gauge2} \\ \lambda_{Gauge3} \end{pmatrix} \tag{2}$$

(2)式からひずみテンソルが求まり，(1)式に代入すれば任意方向の磁気ひずみを求めることができる[4]。この面内ひずみを 2 次元磁気ひずみと呼ぶ。

3 測定結果

3.1 測定条件

Table. 1 に測定条件を示す。最大磁束密度 B_{max} は 0.1 T から 1.0 T までは 0.1 T 刻み, 1.0 T から 0.05 T 刻みで測定可能なレベルまでとし, 傾角 θ_B は 0 deg から 90 deg まで 5 deg 刻みで変化させた。励磁周波数は 50 Hz である。測定試料は方向性電磁鋼板 35P135(厚さ 0.35 mm)を用いた。

3.2 高磁束密度下での磁気特性

Fig. 4 に交番磁束条件で傾角 $\theta_B = 0, 55, 90$ deg の B-H カーブを示す。(3), (4)式から求められる磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルの最大値を用いている。

$$B = \sqrt{(B_x)^2 + (B_y)^2} \tag{3}$$

$$H = \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2} \tag{4}$$

Table 1　Measurement conditions.

Specimen	B_{max} [T]	θ_B [deg]	Exciting Frequency[Hz]
35P135	0.1 - 1.0 (0.1) 1.0 - 1.95 (0.05)	0-90 (5)	50

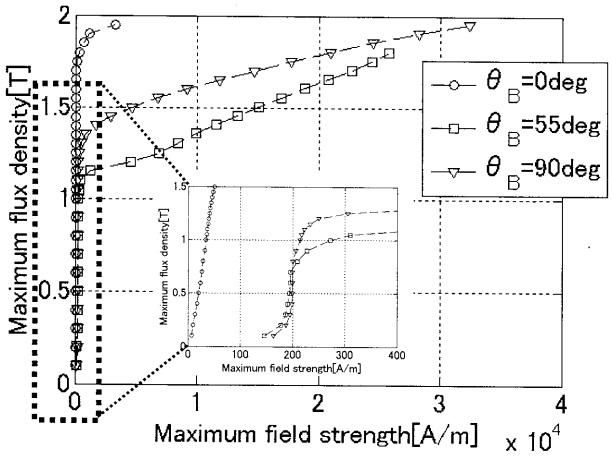


Fig. 4　B-H curves.

方向性電磁鋼板の磁気特性の特徴として，圧延方向に磁化容易軸が揃えられているため圧延方向に生じる磁束条件では優れた高透磁率特性を示す。また圧延方向に対して直角方向には磁化困難方向となるため，θ_B = 90 deg の条件では磁界強度は大きくなる。しかし，磁束密度レベルが高くなると θ_B = 55 deg の条件で磁界強度が大きくなる。これは磁束密度レベルが低い場合には圧延磁気異方性が，磁束密度レベルが高い場合には結晶磁気異方性が支配的となるためである[1]。このように磁束密度ベクトルの大きさと方向で磁気特性が大きく異なる。また磁気ひずみは電磁鋼板の磁区挙動に依存していることから各 BH カーブが変化する前後の特徴的な箇所での磁気ひずみ特性について次に述べる。

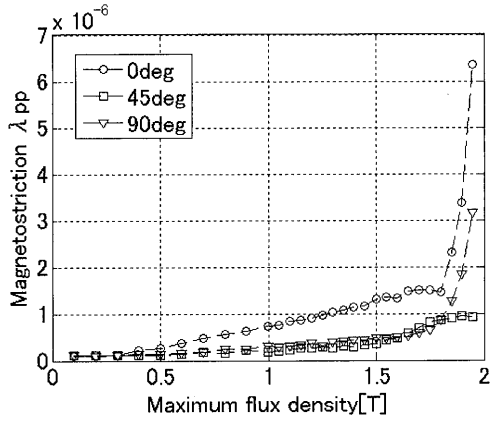
3.3 2 次元磁気ひずみ特性

Fig. 4 に示した傾角が異なる磁束条件について詳細に述べる。まず傾角 θ_B = 0 deg の条件で磁束密度レベルに対する磁気ひずみ量 λ_{pp}（磁気ひずみ波形の peak-to-peak 値）の推移を Fig. 5(a)に示す。3 つの λ_{pp} は圧延方向(0 deg)，圧延方向に対して直角方向(90 deg)，45 度方向のひずみを示した。1.5 T 以下の磁束条件では，磁束密度が増加すると磁気ひずみは比例して増加するが，その絶対値は小さかった。しかし，1.8 T を超え BH カーブが線形領域から非線形領域に移行するにつれ磁気ひずみ量の発生が急激に変化することがわかる。このとき，圧延方向の磁気ひずみ波形を Fig. 5(b)に示す。低磁束密度レベルでは圧延方向にわずかに縮みが発生していたが, 伸びに転じていることがわかる。このような現象は様々な研究機関から報告されており，ランセット磁区の発生と消滅に起因することが知られている[9, 10]。Fig. 5(c)に各磁束条件での磁束密度が最大である瞬時の 2 次元磁気ひずみを示す。矢印はそれぞれ磁束密度ベクトル，磁界強度ベクトルを示しており，＋は伸び，－は縮みを表す。低磁束密度領域では磁束密度ベクトルと同方向に縮みの主ひずみ（最大磁気ひずみ）が生じているが, 磁束密度レベルによって，磁束密度ベクトルの方向には伸びの主ひずみ，その直角方向には縮みの主ひずみが生じている。このように 2 次元磁気ひずみを評価することによって任意方向のひずみ量がわかり，主ひずみの変化についても捉えることができる。

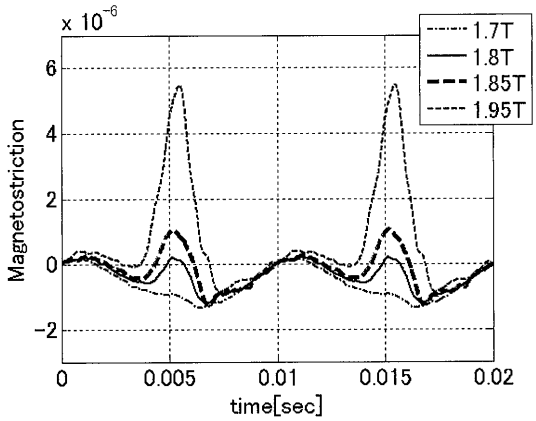
Fig. 6 に傾角 θ_B = 90 deg の条件での結果を示す。λ_{pp} は磁束密度が増すと増加したが，約 1.5 T の磁束密度レベル以上では増加せずほぼ一定となった。これは磁

NII-Electronic Library Service

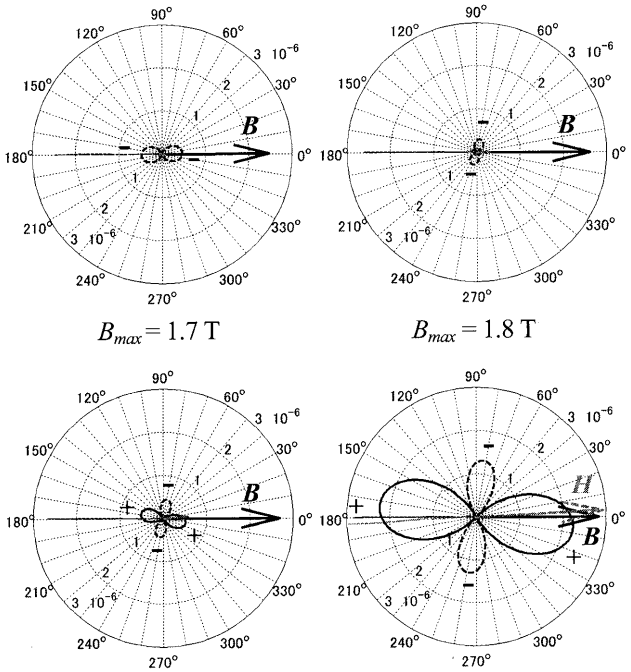
The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics



(a) Magnetostriction peak-to-peak depending on B_{max}



(b) Magnetostriction waveforms in RD

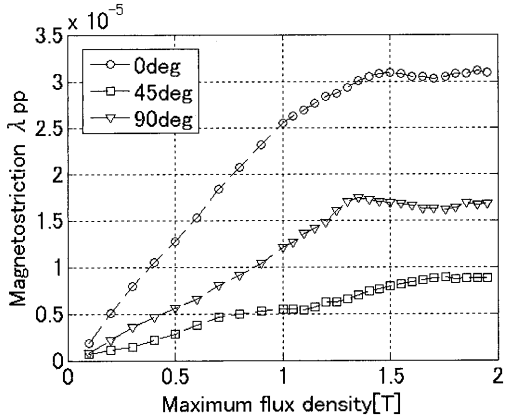


B_{max} = 1.7 T　　B_{max} = 1.8 T

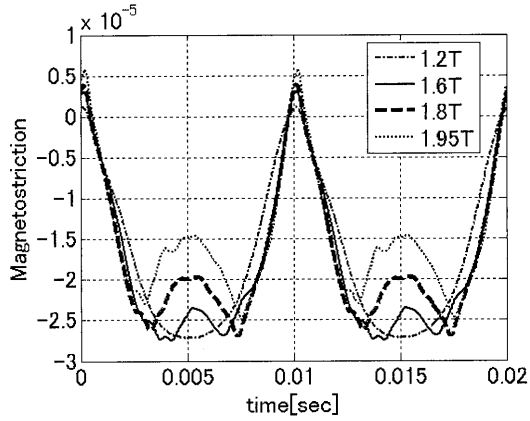
B_{max} = 1.85 T　　B_{max} = 1.95T

(c) Two-dimensional magnetostriction

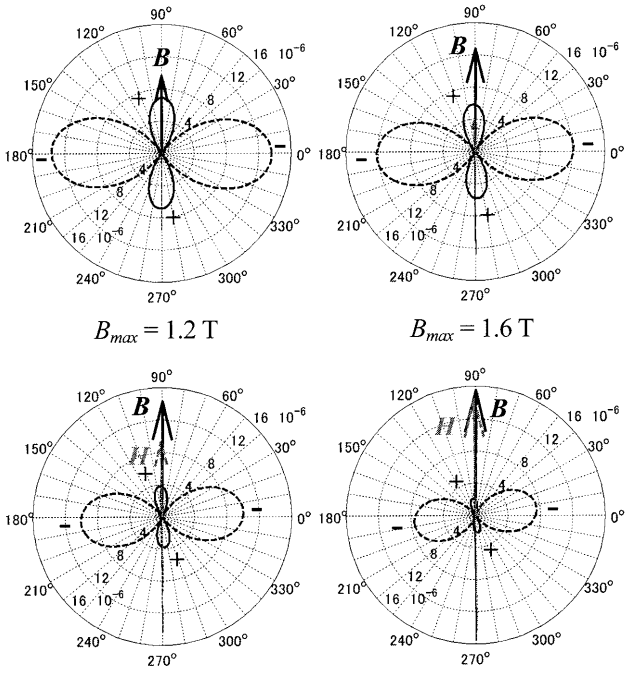
Fig. 5　Measured results (θ_B = 0 deg).



(a) Magnetostriction peak-to-peak depending on B_{max}



(b) Magnetostriction waveforms in RD



B_{max} = 1.2 T　　B_{max} = 1.6 T

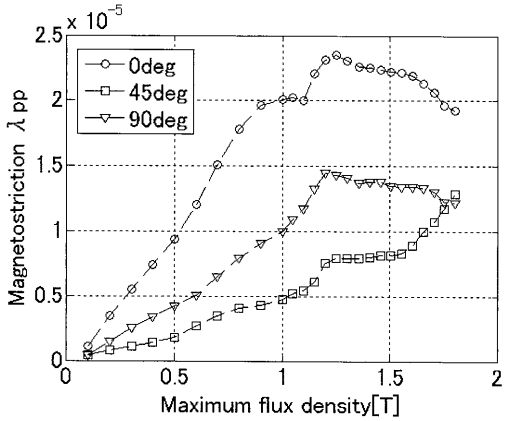
B_{max} = 1.8 T　　B_{max} = 1.95 T

(c) Two-dimensional magnetostriction

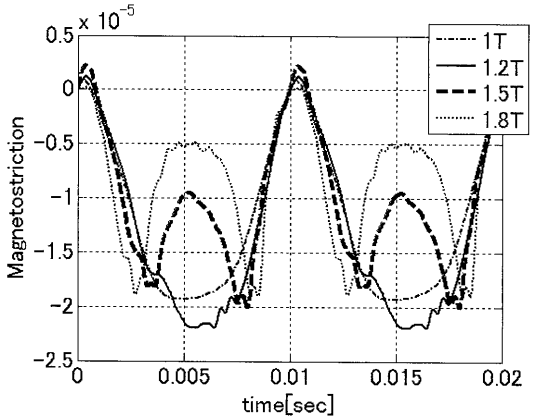
Fig. 6　Measured results (θ_B = 90 deg).

NII-Electronic Library Service

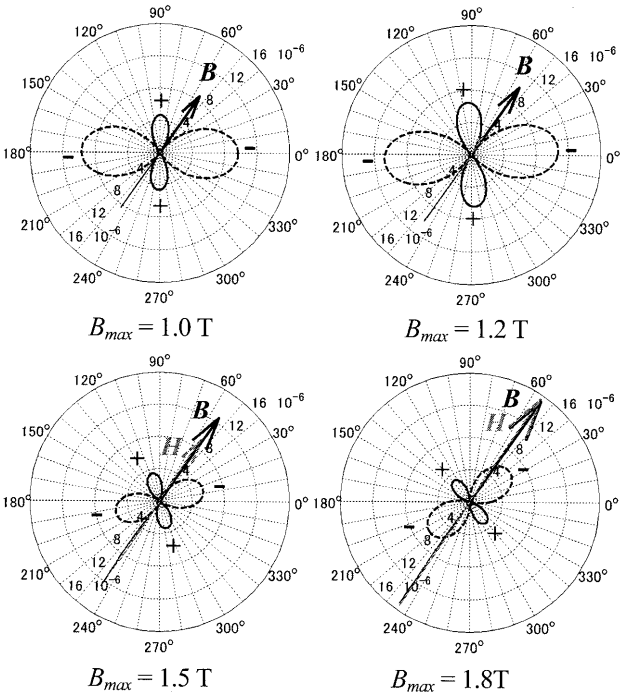
The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics



(a) Magnetostriction peak-to-peak depending on B_{max}



(b) Magnetostriction waveforms in RD



(c)　Two-dimensional magnetostriction

Fig.7　Measured results (θ_B = 55 deg).

気ひずみが飽和したためと考えられる。その領域で磁気ひずみ波形をみると，磁束密度が最大であるときの磁気ひずみが減少している。これは先の傾角θ_B = 0 deg の条件で見られた現象と同様で縮みから伸びに転じていると考えられる。主ひずみの方向については Fig. 6(c)に見られるように圧延方向に縮み，圧延直角方向に伸びが生じており，磁束密度レベルの変化による違いは見られない。

Fig. 7 に傾角θ_B = 55 deg の条件での結果を示す。低磁束密度条件ではλ_{pp}は磁束密度が増すと増加したが，方向によってある磁束密度レベル以上において減少や更なる増加が見られた。磁気ひずみ波形が縮みから伸びの方向に変化しているため，磁気ひずみ量としては増加せず，減少した。またその要因は Fig. 7(c)を見ると明らかで，磁束密度レベルによってそれまで一定な方向にしか生じていなかった縮みの主ひずみが圧延方向から約 45 deg 方向に生じたため，圧延方向の磁気ひずみ量は減少し，45 deg 方向の磁気ひずみ量が増加している。このように主ひずみの方向が磁束条件によって変化するような場合，一方向でのひずみ評価では実際の磁気ひずみを正確に把握することができない。

次に，一方向のλ_{pp}評価ではなく，一周期中に生じる最大磁気ひずみ（伸びの主ひずみと縮みの主ひずみの合計）を(5)式から算出し，実際に鋼板が伸縮する量について求めた結果を Fig. 8(a)に示す。

$$\lambda = \left|\max(\lambda_p(+))\right| + \left|\min(\lambda_p(-))\right| \tag{5}$$

ここでλ_p(+)は伸びの主ひずみ，λ_p(-)は縮みの主ひずみである。傾角による依存性について見ると，傾角θ_B = 0 deg や 5 deg で生じる磁気ひずみ量は非常に小さく，あまり変化はない。しかしながら，傾角θ_B = 10 deg になると生じる磁気ひずみ量は倍以上となることがわかる。傾角の大きさに比例して磁気ひずみも増加し，どの磁束密度レベルにおいても傾角θ_B = 90 deg で最大値をとることがわかる。

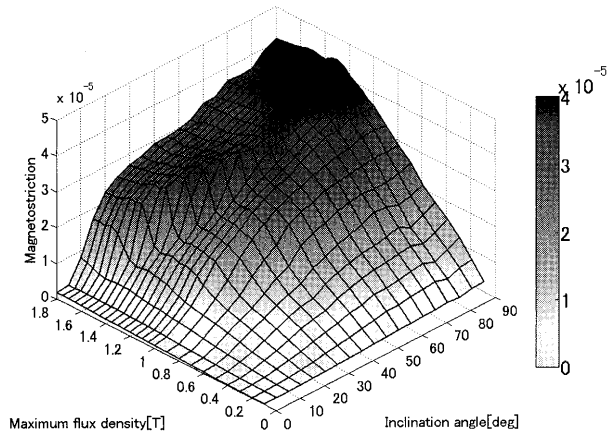
また，圧延方向の磁気ひずみ波形の波形ひずみについて着目した。(6)式から高調波ひずみ D.F.(Distortion factor)を算出し，その結果を Fig. 8(b)に示す。

$$D.F. = \frac{\sqrt{|V_4|^2 + |V_6|^2 + \cdots |V_{50}|^2}}{\sqrt{|V_2|^2}} \times 100[\%] \tag{6}$$

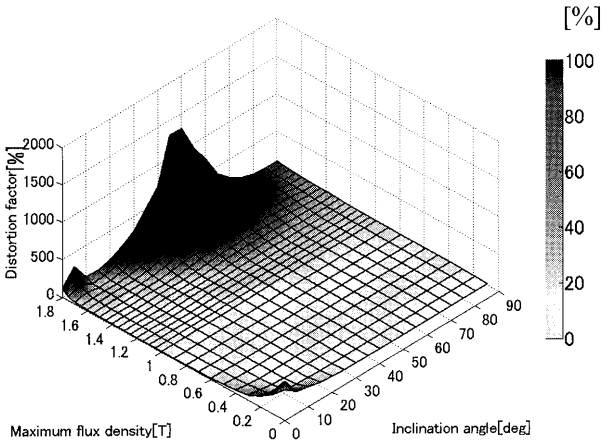
ここでV_2は磁気ひずみの基本波(100Hz)成分の実効値，V_nはn 次高調波成分（n = 4 が二次に対応）の実効値である。磁束密度が増すと高調波ひずみは増加して

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics



(a) Magnetostriction



(b) Distortion factor

Fig. 8　Magnetostriction properties depending on B_{max} and θ_B.

いる。それはFig. 5(b), Fig. 6(b), Fig. 7(b)の磁気ひずみ波形からも明らかである。傾角に対しては傾角θ_B = 55 deg付近で最大となることがわかり，またその他の傾角と比べて低い磁束密度レベルで高調波ひずみが発生することがわかる。高磁束密度領域での磁気ひずみ量は傾角θ_B = 90 degで最大となり，結晶磁気異方性の影響で磁界強度が傾角θ_B = 55 deg付近で最大となるような現象は見られなかった。しかし，結晶磁気異方性の発生により傾角θ_B = 55 deg付近の低い磁束密度レベルにおいて磁化過程が線形領域から非線形領域に変化するため，そのような磁束条件では磁気ひずみ波形に含まれる高調波ひずみはその他の傾角の磁束条件（磁束密度レベル一定）と比べ大きいことがわかった。

4 結言

高磁束密度領域での方向性電磁鋼板の特徴として，磁束密度が一定な場合，結晶磁気異方性の影響により，圧延直角方向に励磁した場合の磁界強度に比べ，約55度付近に励磁した場合の磁界強度が大きくなる。今回，磁気ひずみについて議論を行ったが，圧延直角方向に励磁した条件で最も磁気ひずみが大きいことが分かった。また，結晶磁気異方性により，鋼板の磁化状態が変化（線形領域から非線形領域へ）するため，その影響として磁気ひずみ波形にひずみが生じた。さらに，主ひずみの方向が変化するような条件も見られた。このような，主ひずみの方向が未知である場合やその方向が変化する場合，任意方向を同時に評価できる測定法を用いる必要がある。以上のように，高磁束密度領域で磁気ひずみは複雑な挙動をとるため，更なる低騒音，低振動化を図るにはこれらの振動に対する能動的な対策が必要となると言える。

(2011年4月12日受付，2011年9月11日再受付)

参考文献

[1] 前田義隆，戸高孝，榎園正人，高磁束密度領域における電磁鋼板のベクトル磁気特性測定，IEEJ Trans. FM, Vol. 131, No. 2, pp. 145-150, 2011.

[2] 榎園正人，二次元ベクトル磁気特性，日本応用磁気学会会誌，Vol. 27, No. 2, pp. 50-58, 2003.

[3] 平野順平，海老名紘明，石原好之，原田和郎，戸高敏之，景山寿晴，清水健，PWM 波形励磁下における電磁鋼板の磁歪特性，日本AEM学会誌，Vol. 12, No. 4, pp. 78-81, 2004.

[4] 若林大輔，戸高孝，榎園正人，任意方向交番磁束条件下での3次元磁気歪みとベクトル磁気特性, IEEJ Trans. FM, Vol. 130, No. 4, pp. 387-393, 2010.

[5] 茂木尚，熊野知二，種々の磁化方向における直流偏磁化の交流磁気ひずみ，日本応用磁気学会誌，Vol. 24, No. 4-2, pp. 667-670, 2000.

[6] 相原茂，梅原英嗣，戸高孝，榎園正人，絶縁被膜貫通型4mm×4mm サイズ磁気センサの試作とモデル変圧器鉄心内のベクトル磁気特性，日本AEM磁気学会誌，Vol. 18, No. 4, pp. 9-14, 2010.

[7] Georgi Shilyashki, Helmut Pfutzner, Franz Hofbauer, Damir Sabic, Viktor Galabov, Magnetostriction Distribution In A Model Transformer Core, *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, Vol. 61, No. 7/s, pp. 130-132, 2010.

[8] 太田恵造，磁気工学の基礎Ⅱ-磁気の応用-，共立全書，pp. 236-239, 1973.

[9] 藤倉晶浩，溝上雅人，増井浩昭，松尾征夫，藪本政男，久保田猛，方向性電磁鋼板の磁区構造と低磁歪化，日本応用磁気学会誌，Vol. 22, No. 4-1, pp. 166-171,1998.

[10] 堀康郎，田中基八郎，電磁振動&騒音設計ヒットする製設計と実例解説，三松株式会社，pp. 33-44, 2010.

NII-Electronic Library Service