

トピックス

方向性電磁鋼板の磁区構造と低磁歪化

Domain Structures and Magnetostriction in Grain-Oriented Electrical Steels

藤倉昌浩・溝上雅人・増井浩昭*・松尾征夫**・藪本政男***・久保田 猛

新日本製鐵(株)鉄鋼研究所・*帝京大学理工学部・**新日本製鐵(株)八幡技術研究所・*** (財)金属系材料研究開発センター

M. Fujikura, M. Mizokami, H. Masui,* S. Matsuo,** M. Yabumoto,*** and T. Kubota,

Nippon Steel Corp., Steel Research Laboratory, *Teikyo University, School of Science and Engineering, **Nippon Steel Corp., Yawata Laboratory, and ***The Japan Research and Development Center for Metals

It is well known that one of main causes of the noise in power transformers is magnetostriction in the grain-oriented electrical steels used as transformer cores. In order to reduce the magnetostriction, change in the volume of 90° domains under ac magnetization should be suppressed. Improvement of the $\{110\}\langle 001\rangle$ orientation and strengthening of the coating stress are effective in this regard.

Frequency analysis of magnetostriction under non-sinusoidal magnetization was carried out. Magnetization with lower harmonics did not increase the corresponding frequency components of magnetostriction, whereas PWM magnetization induced high-frequency components in magnetostriction.

Key words: grain-oriented electrical steel, silicon steel, transformer noise, magnetostriction, magnetic domain, stress, frequency analysis

1. はじめに

トランスの発明された当初から今日に至るまで、電力用トランスの騒音を低減するために、素材、トランス設計の両面からさまざまな改善がなされてきた^{1,2)}。特に最近の電力需要の増加、人口の密集、居住環境快適化指向などの状況は騒音に対する基準をますます厳しくし、トランスの低騒音化は現在でも重要な課題となっている。

トランスの騒音は、鉄心や導線を震動源としてトランス全体を振動させることによって起こると考えられており、さらに、鉄心振動の原因の一つは、鉄心素材の磁歪とされている。したがって、鉄心素材の磁歪発生の要因を明確にし、低磁歪化を図ることが、トランス騒音の低減に非常に有効な手段であるといえる。

電力用トランスの鉄心素材として多く使用されている方向性電磁鋼板の磁歪については、これまで数多くの研究がなされており^{3~14)}、磁区構造と非常に密接な関係をもつことが知られている。また、それに基づいて、磁歪を低減するための方策が、種々とられてきた。本稿では、方向性電磁鋼板の磁区構造と磁歪の関係について整理し、磁歪低減の方策について述べる。

一方、トランス騒音の原因を明確にするため、鉄心素材の磁歪と鉄心の振動を関連させて解析が行われている^{2,14~19)}。実際のトランスでは、鉄心構造や素材特性に由来し、鉄心内の磁束密度波形は時間的にも空間的にも歪んでいる²⁰⁾。最近では、インバーターなどの高周波発生源が接続されることにより、この傾向は強くなっている。磁束密度波形の歪みは磁歪波形にも変化をもたらす、鉄心の振動にも影響を与えられ考えられる。したがって、トランス騒音と鉄心材料特性との関係の解明を進めるためには、正弦波以外の任意波形での励磁による磁歪特性を評価する必要がある。また、人間の可聴周波数を考慮して、振動の周波数分析も行う必要がある。本稿の後半では、高調波を含む非正弦波波形で励磁した場合の方向性電磁鋼板の磁歪特性について述べる。

2. 磁歪発生の素材要因と磁歪低減の方策

2.1 方向性電磁鋼板における磁歪

方向性電磁鋼板は、3wt%のSiを含有し、構成するbccFe(Si)の $\{110\}\langle 001\rangle$ 方位(以下GOSS方位)が圧延方向に先鋭化された多結晶材料である。3wt%Si-Feの磁歪定数は $\lambda_{100}=27\times 10^{-6}$ 、 $\lambda_{111}=-6\times 10^{-6}$ である²¹⁾が、方向性電磁鋼板では、磁化過程での磁区構造の変化に伴う鋼板の圧延方向の伸縮をしばしば磁歪と表現する。本稿でも磁歪をこの意味で使用する。

理想的な方向性電磁鋼板では、圧延方向に一致する容易軸(X[100]とする)のほかに、圧延方向と垂直かつ板面垂直方向と 45° の方向に2本の容易軸(Y[010], Z[001]とする)をもつ。磁化過程においてX[100]軸上で磁化の向きが変化するだけなら圧延方向の伸縮、すなわち磁歪は発生しない。しかし、X[100]とY[010], Z[001]との間で磁化の回転があると磁歪は発生することになる。すなわち、 $\lambda_{100}>0$ であるから、X[100]からY[010], Z[001]に磁化が回転すれば、圧延方向には負の、逆にY[010], Z[001]からX[100]に磁化が回転すれば正の磁歪が発生する。磁歪を抑えるには磁化がY[010], Z[001]方向を向かないようにすることが重要である。

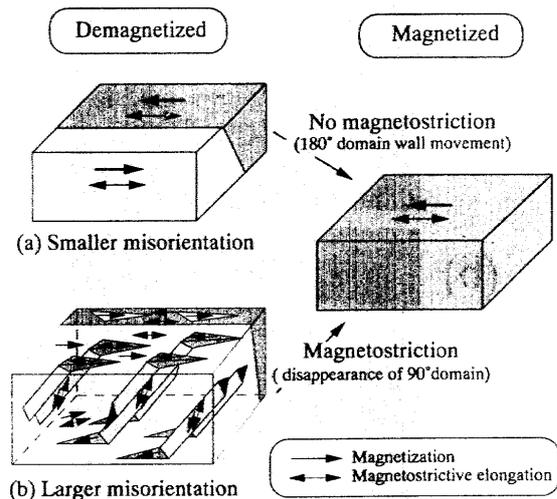


Fig. 1 Magnetic domains and the magnetostriction of grain-oriented electrical steel sheets.

磁化が $Y[010]$, $Z[001]$ 方向を向く主要な要因として、① GOSS 方位の圧延方向からのずれ、②鋼板に作用する応力が挙げられる。それぞれの影響を以下に述べる。

2.2 GOSS 方位の影響

Fig. 1 は圧延方向に対する GOSS 方位の傾きの違う二つの結晶粒について磁区構造を模式的に示したものである。GOSS 方位の圧延方向からのずれが小さい場合は、磁区構造は単純な 180° 磁区だけで構成され、磁化過程は 180° 磁壁の移動で進行する。磁化は $X[100]$ 軸上で向きを変えるだけであるから、磁歪は生じない。一方、GOSS 方位の圧延面からの傾きが大きくなった場合、表面に生じる自由磁極による静磁エネルギーの増加を抑えるため、ランセット磁区が発生する^{22),23)}。ランセット磁区には図に示すように、圧延方向と 90° 方向の磁区を下部構造としてもつ。磁化過程においては、この 90° 磁区内の磁化は圧延方向に回転しなければならないから、圧延方向に正の磁歪が生じる。また、 180° 磁壁移動の磁化過程においては、磁区幅の広がりに伴う静磁エネルギーの増加を補償するため、ランセット磁区の体積は一時増加することが確認されている⁹⁾。この場合、磁化進行に伴いいったん負の磁歪が観察されることになる。

2.3 応力の影響

方向性電磁鋼板の鉄損を低減させるため、鋼板に張力作用のある皮膜を形成させることはよく知られている²⁴⁾。張力によりランセット磁区が消滅し、 180° 磁区が細分化され、渦電流損失が低減されるからである。一方、張力によるランセット磁区の消滅は、前述したように、 90° 磁区の体積減少を意味するので、磁歪低減にも有効に働く。以下に、磁歪や磁区構造に対する応力の影響を定量的に調査した結果¹¹⁾について述べる。

板厚 0.23 mm の方向性電磁鋼板を用いて、1 次、2 次皮膜とも付着している試料 A と、1 次皮膜のみ付着している

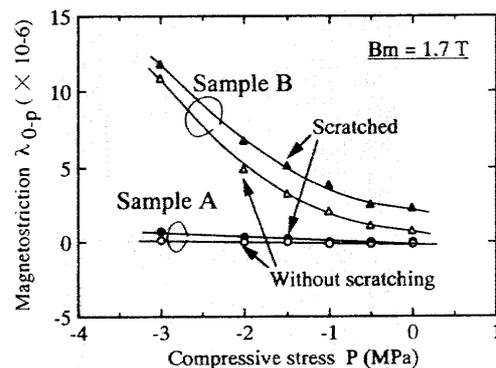


Fig. 2. Effects of compressive stress applied to a specimen on the 0-peak magnetostriction, λ_{0-p} , at 1.7 T and 50 Hz. The coating tensile stress is 14.7 MPa for sample A and 3.9 MPa for sample B.

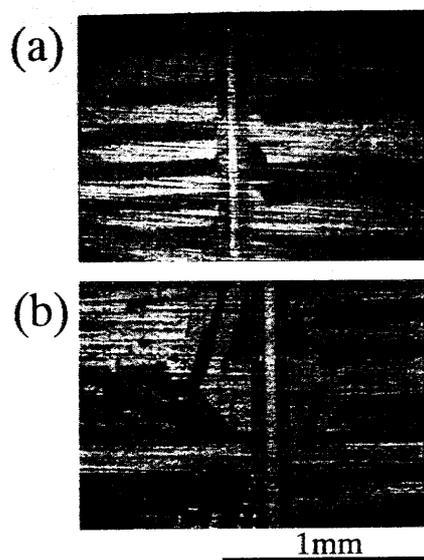


Fig. 3 Magnetic domain structures near the scratched lines without applied stress: (a) for sample A; (b) for sample B.

試料 B を作製し、圧縮力に伴う磁歪の変化を測定した。試料 A, B の皮膜張力はそれぞれ、14.7 MPa および 3.9 MPa であった。励磁周波数は 50 Hz とした。また鋼板に圧延方向と垂直にボールペンで幅 $40 \mu\text{m}$ 、間隔 10 mm のけがき線を入れた場合の磁歪も調べた。

励磁磁束密度 1.7 T における磁歪の 0-peak 値の圧縮力による変化を Fig. 2 に示す。まず、圧縮力の作用していない状態で見ると、皮膜張力の小さい試料 B の方が皮膜張力の大きい A に比べて磁歪が大きい。そこにけがきを施すとどちらの場合も磁歪は上昇するが、その割合は皮膜張力の小さいサンプル B の方が顕著である。これらの状態に、圧縮応力を作用させると、試料 A では磁歪は増加するもののその変化は小さい。一方、試料 B は圧縮応力の増加とともに急激に増加する。けがき線が入っている場合も絶対値は異なるものの、同様の変化を示す。

けがき線を入れた後の試料 A, B の磁区構造を Fig. 3 に

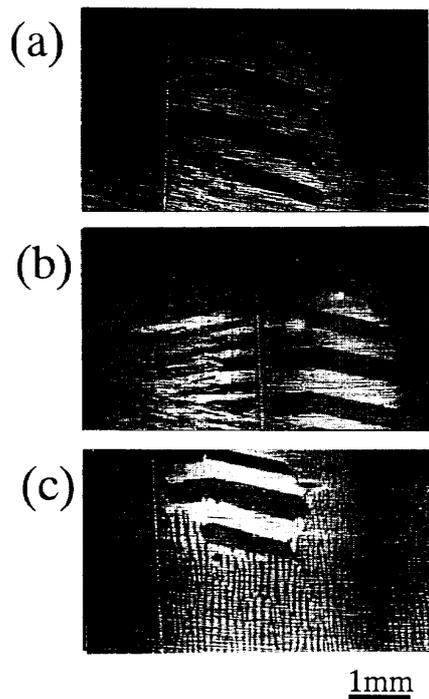


Fig. 4 Effect of applied compressive stress on the magnetic domain of sample A: (a) stress-free; (b) 4 MPa; (c) 6 MPa.

示す。観察は走査型電子顕微鏡 (JSEM200) で行った。どちらの試料でもけがき線の周辺に三角形の磁区がみられるが、その磁区のけがき線からの生成範囲は試料 A では最大で $190\ \mu\text{m}$ 、一方、試料 B では $420\ \mu\text{m}$ である。けがき線の近傍には、けがき線と垂直 (圧延方向) に圧縮応力が作用しており、三角磁区は、下部に板厚方向に磁化成分のある 90° 磁区をもつ環流磁区である²⁵⁾。この三角磁区の生成範囲は圧縮応力が作用している領域であると考えられる。試料 A では皮膜張力が大きいため、圧縮応力の作用する領域が狭く、三角磁区、すなわち 90° 磁区の体積は少ない。一方、皮膜張力の小さい試料 B では試料 A に比べて 90° 磁区の体積は大きい。Fig. 2 において、けがき線のある場合、圧縮応力を作用させない状態の磁歪は、試料 A の 0×10^{-6} に対して、試料 B では 2×10^{-6} で非常に大きくなっている。 90° 磁区の体積に対応していることがわかる。

次に、圧縮応力付与に伴う磁区構造の変化を試料 A, B についてそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。どちらの試料でも圧縮力を増加していくと、ある応力以上でストライプ状の磁区が観察されるようになる。この磁区は、試料 A では 4 MPa 以上、試料 B においてはより小さな 1 MPa 以上の圧縮応力で生じる。このストライプ磁区は Fig. 3, 4 で見られた三角磁区と同様、下部に 90° 磁区をもつ環流磁区である⁵⁾。したがってストライプ状磁区の生成は磁歪の劣化につながる。実際、Fig. 2 では圧縮力付与で 90° 磁区が生成しにくい試料 A では、圧縮に対する磁歪増加は小さく、 90° 磁区が発生しやすい試料 B では磁歪の増加は顕著であ

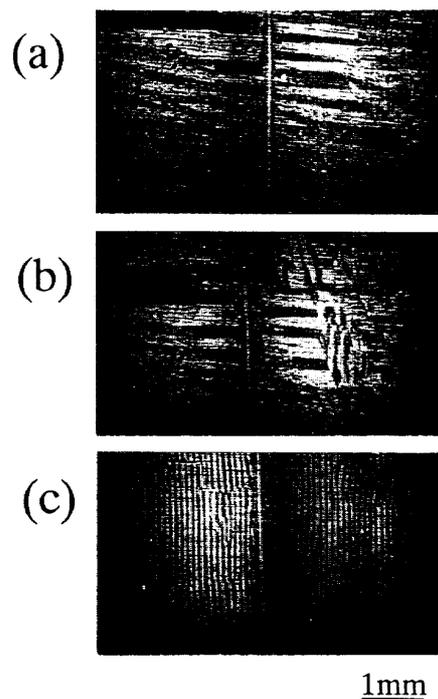


Fig. 5 Effect of applied compressive stress on the magnetic domain of sample B: (a) stress-free; (b) 1 MPa; (c) 2 MPa.

る。参考文献¹¹⁾では、このような磁区構造の応力による変化を、磁化容易方向磁区 $\langle 100 \rangle$ の弾性エネルギーとの関連で考察している。

2.4 方向性電磁鋼板の磁歪低減の方策

以上のように方向性電磁鋼板の磁歪は 90° 磁区の発生に強く影響を受ける。磁歪の低減法は一言で言えば 90° 磁区の抑制法である。Table 1 にこれまで述べてきた磁歪に対する素材因子と方向性電磁鋼板における具体的な低磁歪化の方策についてまとめた。

Table 1 Factors and methods for reducing magnetostriction in grain-oriented electrical steel

Factor		Method
{110}<001> orientation	Orientation → ○	・ Improving orientation
	Misorientation → ×	
Stress	Tensile → ○	・ Strengthening coating stress ・ Reducing residual stress ・ Keeping sheet flatness
	Compressive → ×	
Sheet thickness	Thick → ×	・ Thinning gauge
	Thin → ○	

磁歪低減のためには、多結晶体である電磁鋼板の場合、GOSS 方位の集積度を向上させることが重要である。方位集積度を評価する目安として周波数 50 Hz、励磁磁場 800 A/m での磁束密度 B_8 を用いている。Fig. 6 に B_8 と磁歪の関係を示した。 B_8 が大きい素材ほど磁歪は小さくなる。

応力に関連しては、製品の絶縁皮膜の皮膜張力を増大することによって磁歪の低減が図れる。また、鋼板内部に応

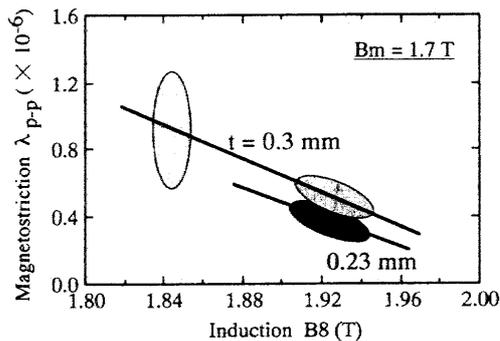


Fig. 6 Effects of induction, B_0 , and the sheet thickness on the peak to peak magnetostriction, λ_{p-p} , at 1.7 T and 50 Hz without applied stresses.

力が残留しないように、製造の最終工程においては最適な焼鈍が施されなければならない。その焼鈍の際、板を積層したときに圧縮応力が作用しないように平坦度を確保することも重要である。鉄心を組み立てるときにも、加工歪みや不均一な応力が作用しないようにしなければならない。

支障がなければ、板厚を薄くすることが効果的である。Fig. 6 に示したように、板厚を低下すると磁歪が低減される。これは板厚が薄いほど 90° 磁区の静磁エネルギーは増加し、 90° 磁区は生成しにくくなる¹⁰⁾ からである。また、断面積が減少することによって皮膜張力がより効果的に作用することも期待される。

3. 磁歪高調波の解析

3.1 周波数解析と聴感補正

トランス騒音と磁歪の関係を考察するには、磁歪波形の周波数解析が有効であると考えられる。またさらに、人間の可聴周波数領域を考慮して周波数特性に重みづけする聴感補正 (A-weight) を行うことによって、より問題点を明確にすることができる。以下では、最近開発した^{26), 27)} レーザードップラー振動計を用いた磁歪測定法²⁸⁾ による評価例を示す。

試料に厚さ 0.3 mm の高透磁率方向性電磁鋼板 (HI-B)

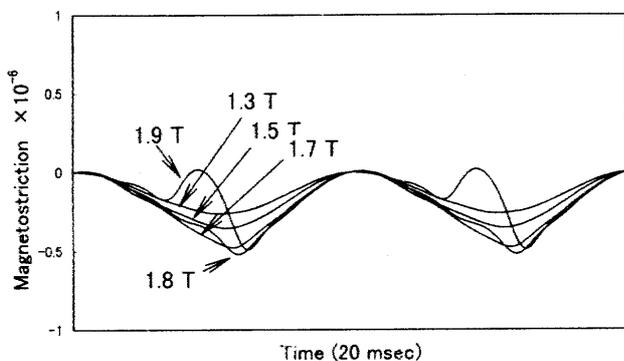


Fig. 7 Magnetostriction curves of 0.3 mm grain-oriented electrical steel with magnetizations of 1.3, 1.5, 1.7, 1.8, 1.9 T, and 50 Hz.

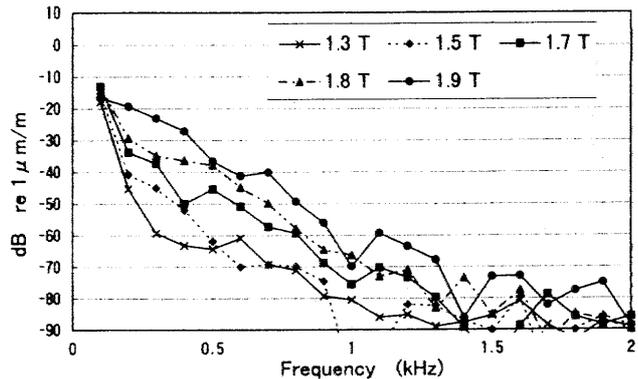


Fig. 8 Frequency components of magnetostriction (0.3 mm-thick HI-B).

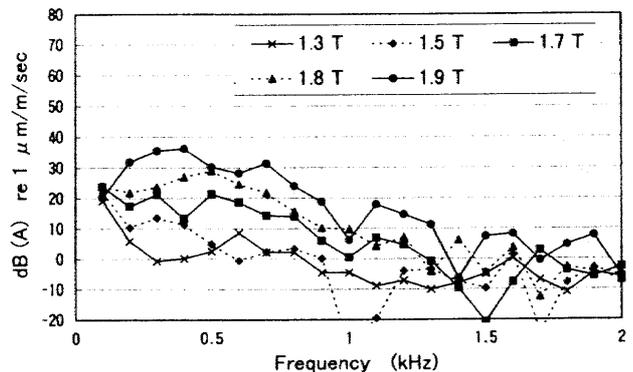


Fig. 9 Frequency components of the A-weighted magnetostrictive vibration velocity (0.3 mm-thick HI-B).

を用いて、50 Hz の正弦波励磁による磁歪特性を測定した。励磁磁束密度は 1.3 T, 1.5 T, 1.7 T, 1.8 T, 1.9 T で、歪み感受性を調べるための圧縮応力は印加していない。

Fig. 7 に磁歪波形を示す。1.8 T 以上で波形が歪み始め、1.9 T の歪みはかなり顕著になる。磁歪波形を周波数解析した結果を Fig. 8 に示す。磁歪の基本周波数は、励磁周波数の 2 倍の 100 Hz であるが、磁束密度が高くなるほど、高次の成分が増えるのがわかる。Fig. 9 には聴感補正した結果を示す。ここでは鉄心から空気への振動伝達を考慮して、磁歪を微分した振動速度成分を評価する。1.8 T 以上の磁束密度で 200~800 Hz の高調波成分の寄与が大きいことがわかる。

3.2 高調波含有波形での励磁による磁歪

トランスの設計磁束密度によらず、鉄心の部位によって実際の磁束密度波形は変化し、高調波含有率も変化する。したがって、磁歪の騒音への影響を調べるには、高調波含有波形で励磁したときの磁歪特性も評価しなければならない。

Fig. 10 と Fig. 11 は基本励磁周波数 50 Hz で励磁した場合、およびそれに 150, 250, 450 Hz の高調波を重畳させて励磁した場合の、磁束密度波形と磁歪波形の周波数分析の結果である。Fig. 10 の磁束密度波形には、重畳した成分

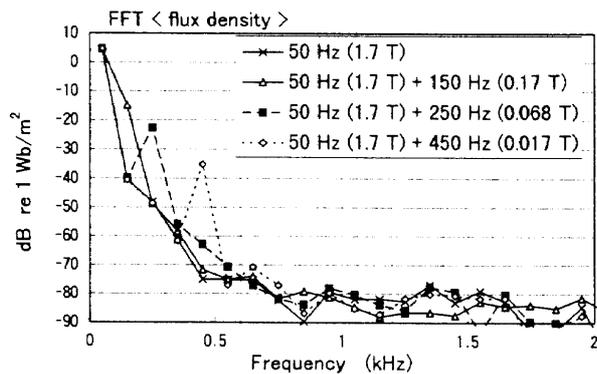


Fig. 10 Analysis of the frequency components of the flux density under non-sinusoidal magnetization (0.30 mm-thick HI-B, harmonics superimposed).

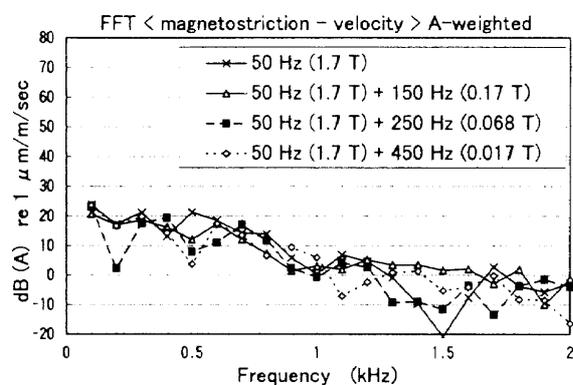


Fig. 11 Analysis of the frequency components of the A-weighted magnetostrictive vibration velocity under non-sinusoidal magnetization (0.30 mm-thick HI-B, harmonics superimposed).

について強度の増加がみられるが、Fig. 11 の磁歪波形には対応する周波数成分の増加が見られなかった。

Fig. 12 と Fig. 13 は、10 および 16 パルスの PWM (Pulse Width Modulation) 波形で、1.7 T の励磁を行った場合の、磁束密度波形と磁歪波形の周波数分析の結果である。Fig. 12 の磁束密度波形では、10 パルスの場合は 1000 Hz 付近に、16 パルスの場合は 1600 Hz 付近に成分のピークが見られる。一方、Fig. 13 に示した磁歪波形では、これらの成分だけでなくそれ以外の高調波の成分の増加も見られる。

磁束の高調波成分が必ずしも磁歪の高調波成分の増加に対応しないことがわかった。磁束高調波成分と磁歪高調波成分の関連を系統的に調査し、実在磁束波形の磁歪への影響を明確にすること、また、実鉄心の振動、騒音との関連を明確にしていくことが今後の課題である。

4. まとめ

トランスの鉄心材料として多く用いられている方向性電磁鋼板の磁歪はトランス騒音の原因の一つといわれている。磁歪は、鋼板圧延方向と垂直な方向に磁化成分をもつ

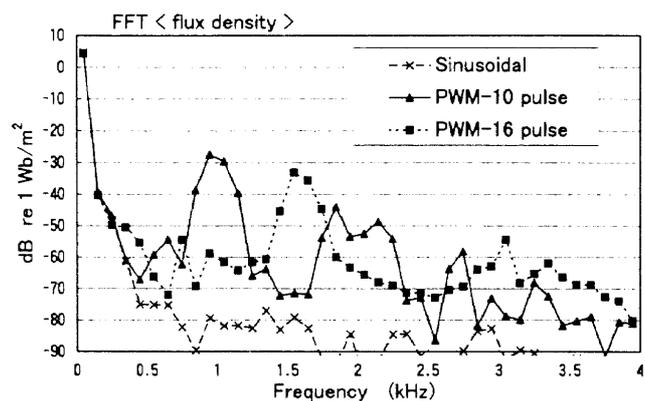


Fig. 12 Analysis of the frequency components of the flux density under PWM magnetization (0.3 mm-thick HI-B).

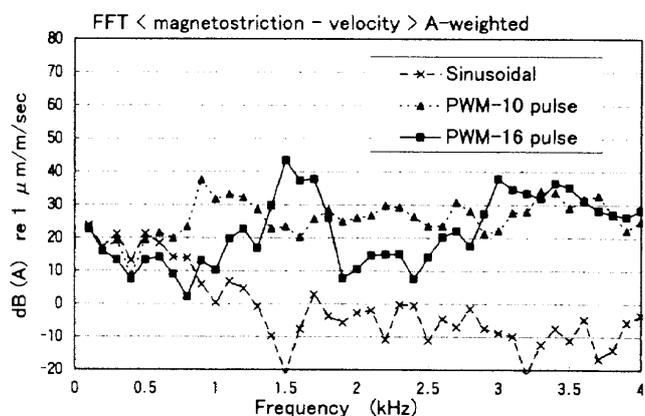


Fig. 13 Analysis of the frequency components of the A-weighted magnetostrictive vibration velocity under PWM magnetization (0.3 mm-thick HI-B).

90°磁区の生成によって生じる。90°磁区はGOSS方位の圧延方向からのずれ、および圧延方向の圧縮応力によって生じる。磁歪低減のためには、GOSS方位の方位集積度を高め、皮膜の張力を増加させることが効果的であり、加えて、鋼板製造時、鉄心組立時において残留応力を極力減らすことも重要である。

磁束密度波形が歪んだ場合の磁歪への影響を調べた。低次の高調波を磁束波形に重畳させた場合には、磁歪波形には対応する周波数成分の増加が見られなかったが、PWM波形での励磁では、対応する周波数の成分とともにそれ以外の高調波成分についても増加が観察された。

文 献

- 1) *IEEE Trans.*, PAS-87-2, 372 (1958).
- 2) 電気学会技術報告, (I)部, 第101号.
- 3) C. M. Brownsey and G. C. Maples: *Proc. IEE (London)*, 113, 1859 (1966).
- 4) P. J. Banks and E. Rawlinson: *Proc. IEE (London)*, 114, 1537 (1967).
- 5) C. Holt and J. A. Robey: *IEEE Trans. Magn.*, 5, 384 (1969).

- 6) G. C. Eadie: *J. Magn. Magn. Mat.*, **26**, 43 (1982).
- 7) H. T. Stanbury: *Physica Scripta*, **39**, 538 (1989)
- 8) 土屋英司, 岡田 将, 池田英男, 岡部正志: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-80-53 (1980).
- 9) M. Imamura, T. Sasaki, and A. Saito: *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 2479 (1981).
- 10) T. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 2033 (1984).
- 11) H. Masui, M. Mizokami, Y. Matsuo, and H. Mogi: *ISIJ International*, **35**, 409 (1995).
- 12) H. Masui: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 930 (1995).
- 13) H. Masui, Y. Matsuo, M. Mizokami, and H. Mogi: *ISIJ International*, **36**, 101 (1996).
- 14) M. Yabumoto, S. Arai, R. Kawamata, M. Mizokami, and T. Kubota: *J. Mater. Eng. Performance*, **6**, 713 (1997).
- 15) 土屋英司, 岡田 将, 河上英典: 三菱電機技報, **46**, 1122 (1972).
- 16) 石田昌義, 佐藤圭司: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-93-187 (1995).
- 17) 堀 康郎, 藤澤二三夫: 日本機械学会論文集 (C編), **59**, 3694 (1993).
- 18) 鍋嶋 晃, 長江洋典, 小松 蔵: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-21 (1995).
- 19) 溝上雅人, 藪本政男, 岡崎靖雄: 電気学会論文誌 A, **116A**, 744 (1996).
- 20) 石原好之, 山田耕司, 笹野 昭: 電気学会磁性材料研究会資料, MAG-75-12 (1975).
- 21) T. Wakiyama and S. Chikazumi: *J. Phys. Soc. Japan.*, **15**, 1975 (1960).
- 22) A. Hubert, V. Heinike, and J. Kranz: *Z. Angew. Phys.*, **15**, 521 (1965)
- 23) Y. A. S. Shur and Yu. N. Dragoshanskiy: *Fiz. Metal. Metalloved.*, **22**, 702 (1966).
- 24) T. Yamamoto and T. Nozawa: *J. Appl. Phys.*, **41**, 2981 (1970).
- 25) T. Nozawa, T. Yamamoto, Y. Matsuo, and Y. Ohya: *IEEE Trans. Magn.*, **15**, 972 (1979).
- 26) 藪本政男, 溝上雅人, 茂木 尚, 新井 聡: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-113 (1996).
- 27) 茂木 尚, 溝上雅人, 藪本政男, 岡崎靖雄: マグネティックス研究会資料, MAG-94-65 (1994).
- 28) T. Nakata, N. Takahashi, M. Nakano, K. Muramatsu, and M. Miyake: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4563 (1994).

(1997年12月25日受理)



藤倉昌浩 ふじくら まさひろ
 昭61 東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 同年 新日本製鐵(株)入社, 平8 東京工業大学社会人大学院プログラム博士後期課程修了, 現在に至る。
 専門 磁性材料 (工博)



溝上雅人 みぞかみ まさと
 昭60 岡山大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年 新日本製鐵(株)入社, 電磁鋼板の応用研究に従事, 現在に至る。
 専門 電気工学



増井浩昭 ますい ひろあき
 昭42 東大大学院工学系修士課程卒, 同年 八幡製鐵(株)入社, 平3 新日本製鐵(株)主幹研究員, 平8 帝京大学理工学部教授, 平9 日本学術振興会未来開拓学術研究 No. 21 プロジェクトリーダー, 現在に至る。
 専門 材料情報科学, 磁性 (工博)



松尾征夫 まつお ゆきお
 昭37 福岡県立八幡工業高等学校機械科卒, 同年 (株)八幡製鐵所に入社, 昭45 社名変更により新日本製鐵株式会社となる。おもに試験・分析部門に従事, 現在に至る。
 専門 電子顕微鏡



藪本政男 やぶもと まさお
 昭56 北海道大学工学研究科博士後期課程原子工学専攻修了, 同年 新日本製鐵(株)に入社, 昭58 方向性電磁鋼板の研究に従事 平9(財)金属系材料研究開発センター主任研究員, 現在に至る。
 専門 磁性材料 (工博)



久保田 猛 くばた たけし
 昭50 大阪市立大学工学部応用物理学科卒業, 昭52 大阪大学大学院基礎工学研究科修士課程修了, 同年 新日本製鐵(株)入社, 基礎研究所配属, 昭56 生産技術研究所, 平7 鉄鋼研究所, 現在に至る。
 専門 電磁材料