日本応用磁気学会誌 25,895-898 (2001)

レーザー照射による方向性電磁鋼板の磁歪の変化

Effect of Laser Irradiation on the Magnetostriction of Grain-Oriented Electrical Steels

藤倉昌浩・新井聡*・久保田猛 新日鐵(株)鉄鋼研究所、千葉県富津市20-1(〒293-8511) *新日鐵(株)広畑技術研究部、姫路市広畑区富士町1(〒671-1188)

M. Fujikura, S. Arai* and T. Kubota Steel Research Labs, Nippon Steel Corp., Shintomi 20-1, Futtu, Chiba 293-8511 *Hirohata R & D Labs, Nippon Steel Corp., Fuji 1, Hirohata, Himeji 671-1188

(2000年10月5日受理、2000年12月6日採録)

Changes in the magnetostriction characteristics of grainoriented electrical steels due to laser irradiation were studied. It was found that the ac magnetostriction amplitude could be controlled by laser irradiation, which creates magnetic closure domains in the steels. This effect may make it possible to reduce the transformer noise.

Whereas the volume of lancet-type sub-domains increases with the magnetization in the domain wall displacement processes, that of the closure domains caused by laser irradiation decreases. When the effects of these two types of domains on the sample length are controlled so that they equal each other, a low ac magnetostriction amplitude can be obtained.

Key words: grain-oriented electrical steels, Si-Fe, magnetostriction, magnetic domains, domain refining, laser irradiation, transformer noise

1. はじめに

電力用トランスの鉄心材料には方向性電磁鋼板が多く使 われるが、そのトランスに於いては鉄損と共に騒音の低減 が求められている。電磁鋼板の鉄損を低減させる方法とし て、レーザー照射法が知られている¹⁾。レーザーを鋼板の 圧延直角方向に照射することによって鋼板に局所歪みを導 入し、主磁区を細分化させ、異常渦電流損失を低減させて いる。一方騒音に関しては、原因の一つに方向性電磁鋼板 の磁歪振動があると言われている²⁾。レーザー照射は、照 射痕周辺に歪みによる環流磁区を生成し磁区構造を変化さ せるので、磁歪特性に影響を与えると考えられる。即ち、 レーザー照射を適切に制御する事により、磁歪振動の小さ い方向性電磁鋼板を得ることができる可能性がある。本研 究では、レーザー照射エネルギーを変化させ方向性電磁鋼 板の磁歪特性の変化を調査した結果について述べる。

2. 実験方法

厚さ0.23 mmの方向性電磁鋼板の製品を、60 mm×300 mmの大きさに、長手方向に圧延方向を切り出した。800 ℃、2時間の歪みとり焼鈍を施し、*H*=800 A/mの磁束密度 *B*₈が1.93 T程度のものを選び、供試材とした。

YAGパルスレーザーを用い、パルスエネルギーを変化さ

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001

せ、圧延直角方向に点列状にレーザー照射を行った。エ ネルギーは鋼板の単位面積あたりの投入熱量で評価し た。磁歪はレーザードップラー方式の磁歪測定装置^{3),4),5)}を用い、周波数50 Hz、最大磁東密度2.0 Tで、試料長 手方向に励磁して、試料長手方向の磁歪を測定した。鋼 板の励磁方向に3 MPaの圧縮応力を印加した状態での磁歪 測定も行った。磁気測定は、Hコイル法単板磁気試験器に よった。

3. 実験結果

Fig.1にレーザーエネルギーを変化させた時の鉄損の変 化を示す。エネルギー増加に伴い鉄損は低下し、約2 mJ/ mm²の照射で最低値をとった後、僅かに増加の傾向を持 つ。照射エネルギー増加に伴い、活動磁壁数が増加する が、エネルギー過剰になると導入された歪みが鉄損に悪 影響を与えるものと考えられる。

照射エネルギーを0.2、2.0、5.0 mJ/mm²と変化させた ときの磁歪波形のゼロ-ピーク値 λ_{0p} の磁束密度依存性の 変化をFig.2に示す。鋼板への圧縮応力は印加していな い。レーザー照射が0.2 mJ/mm²とごく弱い場合、磁束 密度 B_m と共に λ_{0p} は減少し、1.8 T以上で増加に転じ る。2.0 mJ/mm²の照射では、 λ_{0p} は1.8 Tまではほぼ平 坦な変化を示し、1.8 T以上で増加する。照射エネルギー を5.0 mJ/mm²まで増加させると、 λ_{0p} は B_m 増加に伴い



Fig. 1 Changes in the iron loss with the density of laser energy.



Fig. 2 Effect of laser irradiation on the $B_m - \lambda_{OP}$ curve.



Fig. 3 Magnetostriction λ_{0p} and λ_{pp} as functions of the density of laser energy. The maximum induction $B_m = 1.7$ T.

単調に増加する。即ちこの鋼板の場合、2.0 mJ/mm²程 度のレーザー照射をする事により、磁歪振動の振幅は1.8 Tまでの磁束密度で、小さく抑えられる事が分かる。

 B_m が1.7 Tの時の磁 変波形のゼロ-ピーク値 λ_{0p} とピー ク-ピーク λ_{pp} のレーザーエネルギーによる変化をFig.3 に示す。測定時の鋼板への圧縮応力がないときと、3 MPaの場合とを示している。圧縮応力の有無に関わらず $Ua = 2 \text{ mJ/mm}^2$ 程度で λ_{0p} は0 を切り、 λ_{pp} も最小と なる。一方Fig.4には B_m が1.9 Tの場合を示す。傾向は 1.7 Tの場合と同じであるが、 λ_{0p} が0を切り、 λ_{pp} が最 小となるレーザーエネルギーは B_m が1.7 Tの時よりも小 さい。 B_m =1.8 Tを境にして、磁歪振動振幅を最小にする レーザー条件が異なることが分かった。

ここまでは振動の振幅だけに注目してきたが、トラン ス騒音に対する磁歪の影響をみるためには、磁歪波形が 含有する周波数成分についても考慮する必要がある。磁 歪波形から磁歪速度を求め、その各周波数成分に人間の 可聴周波数領域を考慮した重み付け(A補正)を施す磁歪 速度レベルLvaは、トランスの騒音に対する磁歪の影響を 評価するのに有用であるとされている⁶⁾。Fig.5には各磁



Fig. 4 Magnetostriction λ_{OP} and λ_{pp} as functions of the density of laser energy. The maximum induction $B_m = 1.9$ T.



Fig. 5 Magnetostriction velocity level as a function of the density of laser energy.

日本応用磁気学会誌 Vol. 25, No. 4-2, 2001

東密度*B_m*における*Lva*の照射エネルギー依存性を示す。ど の*B_m*でも*Lva*は、*Ua*増加と共に小さくなり1~2 mJ/ mm²で最も小さくなる。その後エネルギーが高くなるにつ れ、増加し続ける。レーザーによる基本波の振幅の低減 が、*Lva*の低減にある程度効果的に働いているといえる。 レーザーエネルギーが過剰になると*Lva*は増加してしまう が、レーザー照射を適切に行えば、磁歪速度レベル*Lva*は 照射のない状態よりも小さくなり、トランスの騒音低減に 有効に働く可能性がある。

4. 考察

レーザー照射により磁歪が変化する原因を考察する。 磁歪の表現では、消磁状態を長さの基準にとることが多いが、単磁区構造となっている飽和磁化状態を長さの基準 にとると、各磁化状態の磁区構造を理解するのに有効であ る。方向性電磁鋼板ではbcc-3%Si-Feの{110}面が板面 に、磁化容易方向の<001>軸が圧延方向に集積しており、 磁歪定数入100は正の値である。従って圧延方向に磁化飽 和した状態を長さの基準にとれば、もし圧延方向とは別の 方向の磁化成分が発生すれば鋼板は収縮し、磁歪は負の値 をとることになる。

Fig.6は照射エネルギーが0.2、2.0、5.0 mJ/mm²の材料において、 λ_{0p} の磁東密度変化から求めた、圧延方向に磁化飽和した状態を長さの基準にした磁歪、 λ_{sp} の励磁磁東密度に対する変化である。縦軸 λ_{sp} が負の値を持ち収縮するほど、圧延方向の以外の磁化成分を含む還流磁区の体積が大きい事を表している。図の中で、Uaが0.2 mJ/mm²の λ_{sp} は、消磁状態から励磁と共に減少し、極小をとった後に増大することが分かる。この変化は、レーザー照



Fig. 6 Effect of laser irradiation on the $B_m - \lambda_{sp}$ curve, which is normalized at Bs.



Fig. 7 Magnetic domain structure model for Si-Fe with a slightly misoriented (110) surface. Lancet-type domains with internal tranverse domains occur.



Fig. 8 Effect of laser irradiation on λ_{sp0} which is the difference between *Bs* and the demagnetized state in the magnetostriction λ_{sp} .

射のない通常の方向性電磁鋼板における変化として知ら れている^{7),8)}。結晶の<001>軸が理想的な方位から板厚 方向に傾いている場合、Fig.7に示すような板厚方向に磁 化成分をもつランセット磁区が発生する。消磁状態から 磁化進行にともなって主磁区が広がり鋼板表面での静磁 エネルギーが増加すると、静磁エネルギーを低下させる ためにランセット磁区の体積が増加するため、鋼板は圧 延方向に収縮する。磁束密度が更に増加し主磁区の移動 が終了すると、ランセット磁区は消滅するため鋼板は伸 張する。

磁束密度が0の時の入_{sp}の値(入_{sp0}とする)は消磁状 態の環流磁区体積を表すが、Uaが増大するに従って入 sp0は負に大きくなる事が分かる。その変化をより詳し く示したのがFig.8である。レーザーエネルギーUaの増 加とともに入_{sp0}が負の方向に大きくなり、消磁状態の 環流磁区体積が増加していくのが分かる。ここで、今回 の供試材にはB₈が同程度のものを選択しており方位集積 度はどの試料でも同等であるから、消磁状態で存在するラ ンセット磁区の体積はどの材料でもほぼ同等である。従っ て、レーザーエネルギーに伴うこの変化は、レーザー照射 によって鋼板に導入される歪みに起因しているといえる。 また、導入された歪みが大きいであろうUa=5 mJ/mm² のえ_{sp}はFig.6では磁東密度と共に単調に増加している。 このことから歪みに起因する環流磁区は磁東密度増加に伴 い減少すると考えられる。

以上から、レーザー照射した材料の入_{sp}の磁束密度によ る変化は、磁束密度増加に伴って増大するランセット磁区 体積と、減少する歪み起因の環流磁区体積の割合で決定さ れると推測される。即ち5 mJ/mm²の場合は、ランセッ ト磁区の体積に対して、レーザーで導入された環流磁区の 体積が過剰であり磁歪は単調に増加するが、2 mJ/mm² 程度では、ランセット磁区の体積と還流磁区の体積が同等 であり、磁化過程での磁歪の変化は平坦になる。

まとめ

方向性電磁鋼板にレーザーを適切に照射することにより、磁歪振動を小さくすることができる。このことは、トランスの低騒音化に有効である可能性がある。

方位に依存するランセット磁区の体積は磁化過程で増大 するが、レーザーによって導入された環流磁区の体積は減 少する。レーザーエネルギーを最適にすると、ランセット 磁区と環流磁区の磁歪に対する効果が同等となり、磁歪の 磁化による変化は平坦になる。

参考文献

- T.Iuchi, S. Yamaguchi, T. Ichiyama, M. Nakamura,
 T. Ishimoto and K. Kuroki : J. Appl. Phys. 53, 2410, (1982)
- 2)磁性材料常置専門委員会:電気学会技術報告(I)第101号 (1971)
- 3) M. Yabumoto : Japanese Patent H2-105221, (1990)
- T. Nakata, N. Takahashi, M. Nakano, K. Muramatsu and M. Miyake : *IEEE Trans.*, 30, 4563, (1994)
- M. Yabumoto, S. Arai, R. Kawamata, M. Mizokami and T. Kubota : *J. Mater. Eng. Perform.*, 6, 713, (1997)
- 6) E.Reiplinger : J. Magn. Magn. Mat., 21, 257, (1980)
- M. Imamura, T. Sasaki and A. Saito : *IEEE Trans Magn.* 17, 2479, (1981)
- A.Hubert and R. Schafer : Magnetic Domains, p428 (Springer, Heidelberg, 1998)