無方向性電磁鋼板のヒステリシス損に及ぼす 結晶磁気異方性の影響

多田 裕俊^{1)*}・藤村 浩志¹⁾・屋鋪 裕義¹⁾

Influence of Magnetic Anisotropy on Hysteresis Loss of Non-oriented Electrical Steel Sheet

Hiroto TADA, Hiroshi FUJIMURA and Hiroyoshi YASHIKI

Synopsis : To reveal the influence of magnetic anisotropy on hysteresis loss of electrical steel sheet, hysteresis loss of non-oriented electrical steel sheet with various Si and Al contents and same grain diameter, 100 μm , was analyzed by the hysteresis loss model we advanced in other times. In the result, the influence of magnetic anisotropy was able to be evaluated in isolation from the influence of inner stress or texture etc. on hysteresis loss. Hysteresis loss was proportional to magnetic anisotropy constant. This reason was inferred that as the magnetic anisotropy constant decreases, the energy of magnetic wall decreases, then the magnetic wall was difficult to be pinned by precipitates or grain boundaries.

Key words : non-oriented electrical steel sheet; hysteresis loss; magnetic anisotropy; magnetic wall motion.

1. 緒言

変圧器やモータの効率向上のため、鉄心材料である電磁鋼板の鉄損低減が要求されている。鉄損は渦電流損とヒステリシス損の和であり、それぞれに低減する手段がある。渦電流損は交流で磁化された鋼板内で発生する渦電流によって生じるジュール熱であり、その低減には板厚低減、SiやAlなどの合金含有量増加による比抵抗増加および磁区幅の減少が有効である。一方、ヒステリシス損は交番磁界の増減に伴う磁束密度の増減の軌跡が異なることによって生じるエネルギー損失であり、その低減には結晶粒径の大径化、析出物や介在物の低減および集合組織制御などが有効である。

渦電流損は、電磁鋼板内の磁化変化が均質であれば、板厚の2乗に比例し比抵抗に反比例するいわゆる古典的モデル¹⁾で表すことができ、磁区幅が大きく、磁化変化が不均一な場合には磁壁近傍の局所的な磁化変化を考慮した渦電流損モデル²⁾でおおよそ記述できる。一方、ヒステリシス損への影響因子としては、粒径、析出物および集合組織など冶金的な要因に加え、飽和磁歪定数、結晶磁気異方性および応力などがある。従来個々の影響因子について検討した例は多数報告されている³⁻¹⁰⁾。例えば、Steinmetzはヒステリシス損が磁束密度の1.6乗に比例するというモデル¹¹⁾を、Kerstenは保磁力が結晶磁気異方性や非磁性不純物の存在率に比例し、非磁性不純物の直径に反比例するというモデル¹²⁾を提唱している。しかしながら、Steinmetzのモデル

はヒステリシス損と磁束密度の関係の経験則に基づいたモデルであり、それ以外の影響因子を分離して評価できない。また、Kerstenのモデルは、析出物のサイズや存在比率および結晶磁気異方性の影響を取り入れたモデルであるが、結晶粒径、集合組織や応力などの影響は考慮していない。

筆者らは、交番磁化過程において磁壁が移動した部分の体積とヒステリシス損の間に相関がある¹³⁾ことに着目し、ヒステリシス損の各影響因子が、磁壁が移動した部分の体積に寄与するものと、その移動の阻害因子に寄与するものに分類できると考えた。筆者らが提案するモデルでは、磁壁が移動した部分の体積 V [m^3]は 180° 磁壁と 90° 磁壁が移動した部分の体積の和として式(1)のように表される。この式(1)を用いて、ヒステリシス損は式(2)のように記述できる。

$$V = c \times \left(1 + \frac{\lambda_{p-p} \times B_s}{\lambda_{100} \times B_m} \right) \frac{B_m}{B_s \cos \theta} \quad \text{..... (1)}$$

$$\text{Wh} = (V/c)^{1.6} / M \quad \text{..... (2)}$$

ここで、式(1)の c [m^3]は磁気測定サンプルサイズなどによって変化する定数、 λ_{p-p} [—]は磁気歪み量、 λ_{100} [—]は飽和磁歪定数、 B_s [T]は飽和磁束密度、 B_m [T]は励磁磁束密度、 θ [°]は励磁方向と励磁方向に最も近い[100]のなす角である。ここで、 λ_{100} と B_s は成分によって決まる定数、 θ は結晶方位によって決まる定数、 B_m は磁気測定条件で

平成26年9月22日受付 平成26年12月10日受理 (Received on Sep. 22, 2014; Accepted on Dec. 10, 2014)

1) 新日鐵住金(株) 広畑技術研究部 (Hirohata R & D Lab., Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 1 Fuji-cho Hirohata-ku Himeji Hyogo 671-1188)

* Corresponding author : E-mail : tada.547.hiroto@jp.nssmc.com

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.101.269>

あるため、式 (2) における V/c は λ_{p-p} を測定することで算出できる。また、式 (2) における $1/M$ は、 $(V/c)^{1.6}$ に対して Wh をプロットした際の傾きに相当する。 V/c が無次元であるため、 $1/M$ の単位はヒステリシス損と同じ $[W/m^3]$ である。つまり、 $1/M$ は、磁壁が移動した部分の体積が一定値 ($V/c = 1$) に達するために必要なエネルギーに相当し、 $1/M$ が小さくなるほど磁壁が移動し易くなることを意味する。以下では M を磁壁易動度と表記する。

式 (1) に示すように、励磁磁束密度、結晶方位および磁気歪み量に影響を及ぼす応力は、磁壁が移動した部分の体積に影響を及ぼすと考えられ、前報¹³⁾にてこの点を検証した。一方、磁壁易動度 M は結晶粒径、析出物、介在物、結晶磁気異方性の影響を受けると考えられるが、前報では、これらの条件は揃えて実験しており、未検証である。そこで本検討では、磁壁易動度 M への影響因子として結晶磁気異方性に着目した。

結晶磁気異方性を低下させることで、透磁率などの磁気特性が向上することが知られている。例えば、4% 程度の Si が含有された無方向性電磁鋼板の透磁率は純鉄の透磁率よりも優れている¹⁴⁾。これは、Si 含有量増加による結晶磁気異方性定数の低下が一因であると考えられる。また、センダスト、Fe-10% Si-5% Al は結晶磁気異方性定数 K_1 と飽和磁歪定数 λ_{100} を共にほぼゼロとした軟磁性材料であり、その透磁率は 120000 にも達する¹⁴⁾。

本研究では、磁壁移動度 M に影響を及ぼすと想定される結晶磁気異方性を取り上げ、電磁鋼板のヒステリシス損と結晶磁気異方性の関係を、提案モデルを用いて解析した。

2. 実験方法

ラボの真空溶解炉にて Table 1 に示す成分の Si, Al 含有量が異なるインゴッドを作製した。以下では、Table 1 に示すように、それぞれ 0Si-4Al 鋼, 4Si-0.3Al 鋼, 5Si-0.3Al 鋼と表記する。これらのインゴッドを 1150℃ に加熱した後、熱間圧延によって板厚 2.0 mm の熱延板とした。熱延板に酸洗および 800℃ で 4 時間保持する熱延板焼鈍を施した後、冷間圧延によって板厚 0.30 mm とした。冷延板に 1100℃ で 1 秒保持する仕上げ焼鈍を施して、結晶粒径を約 100 μm に揃えた。その後、圧延方向が長手となるよう 30 mm $\times$ 150 mm の単板磁気測定用サンプルに打抜き加工した。これらのサンプルを用いて、 $-5 \sim +5$ MPa の応力下で、励磁磁束密度 B_m が 1.0 T、周波数が 50, 400 Hz での圧延方向の鉄損

および B_m が 1.0 T、周波数が 400 Hz での圧延方向の磁気歪み量 λ_{p-p} を測定した。400 Hz と 50 Hz の鉄損を用いた 2 周波法により、400 Hz でのヒステリシス損 ($Wh_{10/400}$) を算出した。

3. V/c の算出

磁壁が移動した部分の体積 V/c を算出するためには、Si, Al 含有量に応じて変化する飽和磁歪定数 λ_{100} 、飽和磁束密度 B_s 、励磁方向と励磁方向に最も近い $[100]$ のなす角 θ を与える必要がある。以下では、これらの算出方法について述べる。

3.1 λ_{100}

Fig.1 に示すように、 λ_{100} は Si, Al 含有量の影響を受けることが知られている^{15,16)}。本検討では、Si と Al の相互作用がないと仮定し、式 (3) に示すように、Fe の λ_{100} (20.7×10^{-6}) に Si, Al 含有量増加による λ_{100} の変化量 $\Delta\lambda_{Si}$, $\Delta\lambda_{Al}$ を加えることで、Table 1 に示す成分の鋼の λ_{100} を算出した。

$$\lambda_{100} = 20.7 \times 10^{-6} + \Delta\lambda_{Si} + \Delta\lambda_{Al} \dots\dots\dots (3)$$

3.2 B_s

Fig.2 に示すように、 B_s は Si, Al 含有量が多くなるほど低下することが知られている^{17,18)}。本検討では、Si と Al の相互作用がないと仮定し、式 (4) に示すように、Fe の B_s (2.16

Fig. 1. Influence of Si and Al content on λ_{100} .

Fig. 2. Influence of Si and Al content on B_s .

Table 1. Chemical composition of NOs (mass%).

Mark	C	Si	Mn	S	Al	N
0Si-4Al	0.002	0	0.2	0.003	4.0	0.002
4Si-0.3Al	0.002	4.3	0.2	0.003	0.3	0.002
5Si-0.3Al	0.002	5.2	0.2	0.003	0.3	0.002

T) にSi, Al含有量増加による B_s の変化量 ΔB_{Si} , ΔB_{Al} を加えることで, Table 1に示す成分の鋼の B_s を算出した。

$$B_s = 2.16 + \Delta B_{Si} + \Delta B_{Al} \dots\dots\dots (4)$$

3・3 $\cos \theta$

前述の通り, 方向性電磁鋼板を用いた検討では, θ は, 励磁方向と, 励磁方向に最も近い磁化容易軸 [100] のなす角とした。方向性電磁鋼板はGoss方位と呼ばれる {011} 〈100〉 方位の単結晶に近い組織を有するため, θ を容易に決定できる。例えば, 方向性電磁鋼板を圧延方向に平行に磁化する場合は, 励磁方向が [100] と平行であるので θ は 0° となる。しかし, 本検討で用いた無方向性電磁鋼板には様々な方位, つまり θ の結晶粒が存在するため, 集合組織からは θ を決定できない。そこで本検討では, 以下のような手段で θ を決定した。

集合組織の評価指標として, 磁化力5000 A/mで磁化した際の磁束密度 B_{50} を B_s で規格化した値 (B_{50}/B_s)に着目した。なお, B_{50}/B_s が1に近いほど磁気特性に有利な集合組織であることを意味する。

方向性電磁鋼板の B_{50}/B_s と $\cos \theta$ の関係をFig.2に示す¹⁹⁾。ただし, 方向性電磁鋼板の B_s は, 方向性電磁鋼板を圧延方向に平行に, 磁化力10000 A/mで磁化した際の磁束密度 B_{100} (2.02 T) を代用した。Fig.3に示すように, $\cos \theta$ が増加するほど B_{50}/B_s は増加する。本検討で用いた無方向性電磁鋼板の圧延方向の B_{50}/B_s はSi, Al含有量にかかわらず約0.88であったため, Fig.3に示すように, 本検討にて使用した無方向性電磁鋼板の $\cos \theta$ は成分にかかわらず0.9とした。なお, これは, 本検討にて使用した無方向性電磁鋼板を圧延方向に磁化する場合, 各結晶粒の $\cos \theta$ の平均値が0.9であったことを意味していると考えられる。

4. 実験結果

Fig.4, 5にヒステリシス損と磁気歪み量に及ぼす応力の影響を示す。なお, 応力が負の値の場合は圧縮応力を意味

Fig. 3. Relation between B_{50}/B_s and $\cos \theta$ of grain oriented electrical steel sheet.

し, 正の場合は引張応力を意味する。圧縮応力によってヒステリシス損と磁気歪み量が増加し, 引張応力によって減少した。

Fig.6にヒステリシス損と磁壁が移動した部分の体積の関係を示す。なお, 切片をゼロとして直線近似したのは, 磁壁移動距離 V/c がゼロの場合, ヒステリシス損もゼロとなると考えられるためである。また, 同じ形状のプロットが5点ずつあるのは, 印加した応力が異なるためであり, 圧縮応力によってヒステリシス損が増加し, 引張応力によって減少するのを V/c の変化で説明できた。Fig.6の傾きが磁壁移動度の逆数 $1/M$, 言い換えると, 磁壁が移動した部分の体積が一定 ($V/c=1$) の場合に必要エネルギーに相当し, 0Si-4Al鋼の傾きが最も大きく, 5Si-0.3Al鋼の傾き

Fig. 4. Influence of stress on hysteresis loss.

Fig. 5. Influence of stress on magnetostriction.

Fig. 6. Relation between hysteresis loss and V/c .

が最も小さかった。

Fig.6に示した傾き $1/M$ と各成分の K_1 の関係を Fig.7に示す。なお、Fig.8に示す K_1 に及ぼす Si と Al 含有量の影響²⁰⁾をもとに、式 (5) に示すように、Si と Al の相互作用がないと仮定して各成分の K_1 を算出した。Fig.7に示すように、 K_1 が低下するほど $1/M$ が減少した。これは、 K_1 の低下によって磁壁が移動し易くなったことを意味していると考えられる。

$$K_1 = 47.5 + \Delta K_{Si} + \Delta K_{Al} \quad (5)$$

5. 考察

磁壁易動度が結晶磁気異方性との相関があったメカニズムを考察する。

磁壁移動は、磁壁が非磁性の析出物などによってピンニングされることによって阻害される。これは磁壁が析出物などの非磁性体上に存在することで磁壁エネルギーもしくは静磁エネルギーが低減されることに起因する。したがって、磁壁エネルギーおよび静磁エネルギーが低いほど磁壁がピンニングされ難くなる、言い換えると、磁壁が動き易くなる。磁壁エネルギー γ は、式 (6) に示すように、 K_1 と B_s の積の 0.5 乗に比例することが知られている²¹⁾。一方、静

磁エネルギー U は式 (7) に示すように、 B_s の 2 乗に比例する²²⁾。

$$\gamma \propto \sqrt{K_1 \times B_s} \quad (6)$$

$$U \propto B_s^2 \quad (7)$$

Fig.6に示した傾き $1/M$ と $\sqrt{K_1 \times B_s}$ の関係を Fig.9に示す。Fig.9に示すように、 $\sqrt{K_1 \times B_s}$ が減少するほど $1/M$ が減少した。一方、傾き $1/M$ と静磁エネルギーの間には、Fig.10に示すように、相関がなかった。これより、Si および Al 含有量を変化させたことによる磁壁易動度の変化は、 K_1 の変化による磁壁エネルギーの変化に起因すると推察された。

磁壁移動度と静磁エネルギーの間に相関がなかったのは、本検討で用いたサンプルの K_1 は 26~41 kJ/m³ と、最大で 60% 程度の差があったのに対し、 B_s は 1.88~1.94 T と最大で 3% 程度しか差がなかったためであると考えられる。したがって、 K_1 が一定で、 B_s だけが異なる供試材を用いれば、磁壁易動度の変化が静磁エネルギーの変化に起因するようになると予想される。しかし、電磁鋼板の実用的な成分の範囲では、成分を変化させることによる K_1 の変化の方が、 B_s の変化よりも大きくなる。したがって、実質的には静磁エネルギーの変化は考慮する必要はなく、本検討結果は妥当であると推察される。

Fig. 7. Relation between $1/M$ and K_1 .

Fig. 9. Relation between $1/M$ and magnetic wall energy.

Fig. 8. Influence of Si and Al content on K_1 .

Fig. 10. Relation between $1/M$ and magnetic energy.

6. 結言

磁壁移動によって生じるヒステリシス損は、磁壁が移動した部分の体積に比例し磁壁易動度に反比例するというモデルを用いて、種々のSi, Al含有量の無方向性電磁鋼板の磁壁移動によって生じるヒステリシス損と結晶磁気異方性の関係を解析した。結果、結晶磁気異方性定数が低下するほど磁壁が移動し易くなることを定量的に評価できた。

文 献

- 1) 山田一, 宮澤永次郎, 別所一夫: 基礎磁気工学, 学献社, 東京, (1975), 67.
- 2) R.H.Pry and C.P.Bean: *J. Appl. Phys.*, **29** (1958), 532.
- 3) K.Matsumura, B.Fukuda, K.Kinoshita, T.Imai, Y.Obata and S.Miyazaki: *Kawasaki Steel Giho*, **15** (1983), 208.
- 4) T.Yamamoto and T.Nozaawa: *J. Appl. Phys.*, **41** (1970), No.7, 2981.
- 5) A.J.Moses and D.Davies: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-16** (1980), No.2, 454.
- 6) M.LoBue, C.Sasso, V.Basso, F.Fiorillo and G.Bertotti: *J. Magn. Mater.*, **215-216** (2000), 124.
- 7) K.Yamamoto, I.Nakama and Y.Yamashiro: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **24** (2000), No.4-2, 671.
- 8) M.Fujikura, C.Kaido and T.Kubota: *IEE Japan*, **MAG-07-31** (2007), 25.
- 9) Y.Tanaka, M.Namikawa, A.Hiura, X.F.Bi and Y.Takada: *T. IEE Japan*, **112-A** (1992), No.6, 507.
- 10) H.Tada, H.Fujimura and H.Yashiki: *CAMP-ISIJ*, **22** (2009), 1274, CD-ROM.
- 11) C.P.Steinmetz: *Electrician*, **26** (1891), 261
- 12) M.Kersten: *Z. Physik*, **124** (1948), 714
- 13) H.Tada, H.Fujimura and H.Yashiki: *Tetsu-to-Hagané*, **99** (2013), 80.
- 14) R.M.Bozorth: *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand Co., Princeton, N. J., (1951), 870.
- 15) W.J.Carr Jr. and R.Smoluchowski: *Physics Review*, **83** (1951), 1236.
- 16) R.C.Hall: *J. Appl. Phys.*, **28** (1957), 707.
- 17) R.M.Bozorth: *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand Co., Princeton, N. J., (1951), 77.
- 18) R.M.Bozorth: *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand Co., Princeton, N. J., (1951), 216.
- 19) 新日本製鐵(株): 方向性電磁鋼帯カタログ Cat. No. DE105, (1998).
- 20) R.C.Hall: *J. Appl. Phys.*, **30** (1959), 816.
- 21) 近角聰信: 強磁性体の物理 (下), 裳華房, 東京, (1984), 174.
- 22) 近角聰信: 強磁性体の物理 (下), 裳華房, 東京, (1984), 221.