方向性電磁鋼板のヒステリシス損モデルに関する一考察

多田 裕俊^{1)*}・藤村 浩志¹⁾・屋鋪 裕義¹⁾

A Hysteresis Loss Modeling of Grain Oriented Electrical Steel Sheet

Hiroto TADA, Hiroshi FUJIMURA and Hiroyoshi YASHIKI

Synopsis : To establish a new model that can explain influence of various factors on hysteresis loss of electrical steel sheet, the hypothesis was formed that hysteresis loss accompanied by magnetic wall motion was expressed as a function of the volume of the area where magnetic walls moved (V) and the mobility of magnetic wall. V was expressed as a function of magnetostriction, magnetostriction constant, magnetic flux density, saturated magnetic flux density and the angle between the axis of easy magnetization and the direction of magnetic field when grain oriented electrical steel sheet was magnetized parallel to $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ and $\langle 111 \rangle$. This model of V was verified by measuring hysteresis loss and magnetosriction of grain oriented electrical steel sheet under stress and revealing that hysteresis loss was proportional to 1.6th power of V.

Key words: hysteresis loss; electrical steel sheet; magnetic wall motion; magnetostriction; stress; crystal orientation.

1. 緒言

電磁鋼板の鉄損を低減する手段として渦電流損の低減とヒステリシス損の低減がある。渦電流損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, 磁区幅の減少が有効である。板厚, 比抵抗および磁区幅の影響を説明するモデルとして, 渦電流損が, 板厚の2乗に比例し比抵抗に反比例する古典的渦電流損¹⁾と磁区幅に比例する1以上の定数の積で表せるというモデル²⁾が確立されている。一方, ヒステリシス損は, 結晶粒の粗大化, 介在物制御, 集合組織制御, Si含有量増加による飽和磁歪定数の低減, 張力被膜の付与などの様々な手段で低減できることが知られている。Matsumuraらは, ヒステリシス損は結晶粒径に反比例し, 介在物量に比例すると報告している³⁾。また, 集合組織の影響については, 磁化容易軸である $\langle 100 \rangle$ を面内に含む(100)や(110)の集積度が高く, 面内に磁化容易軸を含まない(111)や(112)の集積度が低くなるほど鉄損が低下すると報告している³⁾。応力の影響については, 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ことが知られており⁴⁻⁸⁾, Yamamotoらは, 圧縮応力によってヒステリシス損が増加するのは, 圧縮応力によって磁気歪みが生じる際の仕事に起因すると報告している⁷⁾。磁歪の影響については, Tanakaらは, 6.5%Si-Feの磁気特性が良好なのは, 飽和磁歪定数がほぼ0であることに起因すると報告している⁹⁾。また, 筆者らは,

飽和磁歪定数はAl含有量の影響も受ける¹⁰⁾ことに着目して, 種々のSi, Al含有量の無方向性電磁鋼板の, 応力下でのヒステリシス損と磁気歪み量の関係を調査した。その結果, Si, Al含有量および応力に拘わらず, ヒステリシス損は磁気歪み量に比例するという結果を得ている¹¹⁾。しかしながら, ヒステリシス損が磁気歪み量に比例する理由は明らかではない。以上のように, ヒステリシス損に及ぼす様々な因子の影響については, 従来, 個別に検討された例が多く, ヒステリシス損への影響を統一的に説明できるモデルは存在しない。電磁鋼板に外部磁場を印加すると磁壁移動が生じてから磁化回転が生じて飽和磁束密度に達することが知られている¹²⁾。そこでまず本件では, 磁壁移動によって生じるヒステリシス損に及ぼす上記のような様々な因子の影響を説明できるモデルを検討した。

2. 磁壁移動によって生じるヒステリシス損のモデル

磁壁移動によってヒステリシス損(Wh)が生じるのは鋼板中に介在物や結晶粒界などの阻害因子が存在するため, 磁壁移動が非可逆過程になることに起因する。従って, 介在物制御や結晶粒の粗大化によってWhが減少するのは, 磁壁が移動し易くなることに起因すると考えられる。一方, 磁壁の移動し易さ(M)が一定の場合, Fig.1に示すような磁壁が移動した部分の体積(V)が増加するほどWhが高くなると考えられる。例えば, 励磁磁束密度 B_m が高ま

平成24年8月30日受付 平成24年10月22日受理 (Received on Aug. 30, 2012; Accepted on Oct. 22, 2012)

1) 新日鐵住金(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, 1-8 Fuso-cho Amagasaki Hyogo 660-0891)

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

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.99.254>

Fig. 1. Pattern diagram of magnetic wall motion.

るには V が増加する必要がある。Steinmetzによって Wh が $B_m^{1.6}$ に比例するという実験結果が得られている¹³⁾が、これは V が B_m に比例するためである可能性がある。以上のような観点から、 V と M を用いて、 Wh を式(1)のように表せると考えた。

$$Wh = V^{1.6} / M \dots\dots\dots (1)$$

なお、 M が大きくなることは磁壁が移動し易くなることを意味している。式(1)より、 V を明らかにできれば、 Wh を $V^{1.6}$ に対してプロットした際の傾きから M も明らかにできると考えられる。しかしながら、 V を直接測定することは困難である。そこでまず本件では、 V をモデル化し、そのモデルを検証することを目的とした。

3. 磁壁が移動した部分の体積のモデル化

磁壁は 180° 磁壁と 90° 磁壁に分類できる¹⁴⁾。外部磁界を印加すると、これらの移動によって磁束密度が高まる。簡単のため、まずはCube方位($\{001\} \langle 100 \rangle$)を有する電磁鋼板が $\langle 100 \rangle$ に平行に磁化される場合やGoss方位を有する電磁鋼板が圧延方向(RD)に平行に磁化される場合の、 180° 磁壁と 90° 磁壁の移動による磁束密度の増加量の差について述べる。Fig.2 (a), (b)には結晶方位を、Fig.2 (c), (d)には磁区構造の模式図を示す。結晶の対称性から、どちらの場合も、Fig.2 (c)に示す 180° 磁壁とFig.2 (d)に示す 90° 磁壁の移動によって磁束密度が高まる。 180° 磁壁が移動する場合、領域iの体積の増加と領域iiの体積の減少の双方によって磁束密度が高まる。一方、 90° 磁壁が移動する場合、領域ivの体積の減少は磁束密度の増加に寄与しない。従って、ある B_m まで 90° 磁壁移動のみで磁化される場合の磁壁が移動した部分の体積は、 180° 磁壁移動のみで磁化される場合の体積(V_{180})の2倍になると考えられる。しかし、実際には双方の磁壁が移動する。そこで、式(2)に示すように、 B_m を 180° 磁壁移動による磁束密度 B_{180} と 90°

Fig. 2. Crystal orientation and magnetic domain structure of $\{001\} \langle 100 \rangle$ and $\{011\} \langle 100 \rangle$.

磁壁移動による磁束密度 B_{90} の和であると考え、 90° 磁壁移動によって磁化された割合(x)を式(3)のように定義した。ここで、 $x=0$ とは 180° 磁壁移動のみで磁化されることを意味し、 $x=1$ とは 90° 磁壁移動のみで磁化されることを意味する。また、例えば、 B_m が $1.0T$ で $x=0.3$ の場合、 $0.7T$ まで 180° 磁壁移動によって磁化された後、残りの $0.3T$ 分が 90° 磁壁移動によって磁化されて $1.0T$ に達することを意味する。 x が増加するほど V が増加するため、 V は式(4)のように表すことができると考えられる。以降、 x と V_{180} のモデル化について述べる。

$$B_m = B_{180} + B_{90} \dots\dots\dots (2)$$

$$x = B_{90} / B_m \dots\dots\dots (3)$$

$$V = (1 + x) \times V_{180} \dots\dots\dots (4)$$

x のモデル化について述べる。 180° 磁壁移動は磁気歪みを伴わず、 90° 磁壁移動は磁気歪みを伴う。従って、磁気歪み量(λ_{p-p})は x に比例すると考えられる。また、 λ_{p-p} は B_m にも比例すると考えられる。 λ_{p-p} に及ぼす B_m および x の影響を図示するとFig.3のようになる。 $x=0$ 、つまり 180° 磁壁移動のみで磁化される場合は、 B_m に拘わらず $\lambda_{p-p}=0$ である。一方、 $x=1$ 、つまり 90° 磁壁移動のみで B_s まで磁化された場合の λ_{p-p} は飽和磁歪定数 λ_{100} と等しくなると考えられる。これより、 λ_{p-p} は式(5)のように一般化できると考えられる。式(5)を変換することで、 x を式(6)のようにモデル化できる。

Fig. 3. Influence of B_m and x on λ_{p-p} . Fig. 4. Influence of crystal orientation on V_{180} .

$$\lambda_{p-p} = \lambda_{100} \times \frac{B_m}{B_s} \times x \quad (5)$$

$$x = \frac{\lambda_{p-p} \times B_s}{\lambda_{100} \times B_m} \quad (6)$$

V_{180} のモデル化について述べる。 V_{180} は B_m に比例し、 B_s に反比例すると考えられる。また、 V_{180} は結晶方位の影響も受けると考えられる。180°磁壁移動のみで磁化される場合、励磁方向に最も近い磁化容易軸と平行な磁気モーメントを有する磁区の体積が拡大すると考えられる。そこで結晶方位のパラメータとして、励磁方向と、励磁方向に最も近い磁化容易軸の為す角 θ に着目した。Fig.4に示すように、 θ が大きくなるほど、ある B_m に達するのに必要な V_{180} が増加する。具体的には、 V_{180} は $\cos \theta$ に反比例すると考えられる。以上より、 V_{180} は式(7)のように表すことができる。ここで、 c は磁気測定サンプルの体積に比例する定数である。式(4)、(6)、(7)より、 V を式(8)のようにモデル化できる。次章以降では、このモデルを適用できる結晶方位およびモデルの検証結果について述べる。なお、定数 c を決定することは困難であるため、モデル検証には式(9)に示す V/c を用いる。

Fig. 5. Crystal orientation and magnetic domain structure of $\{011\}\langle 011 \rangle$.

$$V_{180} = c \times \frac{B_m}{B_s \cos \theta} \quad (7)$$

$$V = c \times \left(1 + \frac{\lambda_{p-p} \times B_s}{\lambda_{100} \times B_m} \right) \frac{B_m}{B_s \cos \theta} \quad (8)$$

$$V/c = \left(1 + \frac{\lambda_{p-p} \times B_s}{\lambda_{100} \times B_m} \right) \frac{B_m}{B_s \cos \theta} \quad (9)$$

4. モデルを適用可能な結晶方位

式(8)に示した V のモデル式は、ある B_m まで90°磁壁移動のみで磁化される場合の V が、180°磁壁移動のみで磁化される場合の2倍になる場合に適用できる。例えば、前章にて挙げたCube方位($\{001\}\langle 100 \rangle$)を有する電磁鋼板が $\langle 100 \rangle$ に平行に磁化される場合、およびGoss方位を有する電磁鋼板がRDに平行に磁化される場合がある。これら以外に、Goss方位を有する電磁鋼板が圧延直角方向(TD)に磁化される場合もモデルを適用できると考えた。以下ではこの理由を述べる。

Fig.5 (a)にGoss方位の模式図を、Fig.5 (b), (c), (d)には、太線で示した面の法線方向から見た場合の磁区構造の模式図を示す。結晶の対称性から、Fig.5 (b)に示す180°磁壁とFig.5 (c), (d)に示す90°磁壁が移動する。Fig.5 (b)に示す180°磁壁が移動すると、領域iの体積の増加と領域iiの体積の減少の双方によって磁束密度が高まる。Fig.5 (c)に示す90°磁壁が移動すると、領域ivの体積の減少は磁束密度の増加に寄与しない。従って、Fig.5 (c)に示す90°磁

壁移動のみで磁化される場合の V はFig.5 (b) に示す 180° 磁壁移動のみで磁化される場合の2倍になる。一方, Fig.5 (d) に示す 90° 磁壁が移動すると, 領域 v の体積の増加と領域 v_i の体積の減少の双方によって磁束密度が増加する。従って, Fig.5 (d) に示す 90° 磁壁移動のみで磁化される場合の V はFig.5 (b) に示す 180° 磁壁移動のみで磁化される場合と等しくなる。一方, 磁気歪みの観点では, Fig.5 (c) に示す 90° 磁壁移動は磁気歪みを伴うが, Fig.5 (b) に示す 180° 磁壁とFig.5 (d) に示す 90° 磁壁移動は磁気歪みを伴わない。従って, V と λ_{p-p} の観点では, Fig.5 (b) に示す 180° 磁壁移動とFig.5 (d) に示す 90° 磁壁移動は等価と見なすことができる。これより, Goss方位を有する電磁鋼板がTDに平行に磁化される場合に生じるFig.5 (d) に示す 90° 磁壁移動を, Fig.5 (b) に示す 180° 磁壁移動と見なせると考えられる。このように考えることで, Fig.5 (b) に示す 180° 磁壁とFig.5 (c) に示す 90° 磁壁の移動によって磁化されると考えても問題ないことになる。前述した通り, Fig.5 (c) に示す 90° 磁壁移動のみで磁化される場合の V はFig.5 (b) に示す 180° 磁壁移動のみで磁化される場合の2倍である。以上より, Goss方位を有する電磁鋼板がTDに平行に磁化される場合も式 (8) を適用できると考えた。

$\langle 111 \rangle$ に平行に磁化される場合もモデルを適用できると考えられる。この理由は以下の通りである。 $\langle 111 \rangle$ に磁化される場合, 3つの磁化容易軸と $\langle 111 \rangle$ の為す角は約 55° と等しくなる。そのため, 理論的には, $\langle 111 \rangle$ に平行に磁化される場合, 180° 磁壁移動のみで磁化される。従って, この場合の V は式 (4) で算出できる V_{180} に等しくなると考えられる。以上のような理由で, $\langle 111 \rangle$ に平行に磁化される場合もこのモデルを適用できると考えられる。

以上のように, Goss方位を有する電磁鋼板がRD, TDおよびRDから 55° の方向, つまり $\langle 111 \rangle$ に平行に磁化される場合の V は式 (4), (8) を用いて算出できると考えられる。次章では, 方向性電磁鋼板を用いたモデルの検証実験について述べる。

5. モデル検証実験

5・1 実験方法

Goss方位を有し, フォルステライト被膜が付与されていない板厚 0.35mm の方向性電磁鋼板¹⁵⁾ から放電加工によって, サイズが $3\text{cm} \times 15\text{cm}$, 且つ, Fig.6に示すように, サンプルの長手方向とRDの為す角が 0° , 55° , 90° の3種類の磁気測定用サンプルを採取した。歪み取り焼鈍を施すと放電加工した端面から, サンプルとは異なる方位の結晶粒が再結晶する可能性があるため, 歪み取り焼鈍は施さなかった。RDとの為す角が 0° の場合, サンプルの長手方向は $\langle 100 \rangle$ と平行になり, 55° では $\langle 111 \rangle$, 90° では $\langle 110 \rangle$ と平行になる。以後, これらの結晶方位の異なるサンプルをそれ

ぞれ $\langle 100 \rangle$ サンプル, $\langle 111 \rangle$ サンプルおよび $\langle 110 \rangle$ サンプルと表記する。前述したように, これらのサンプルにおける V は式 (4), (8) を用いて算出できると考えられる。

ヒステリシス損は, B_m が $0.5 \sim 1.0\text{T}$, 周波数 50Hz および 400Hz , $-10 \sim +10\text{MPa}$ の応力下で測定した鉄損を用いた2周波分離法によって, 400Hz でのヒステリシス損 (W_h) を算出した。なお, 鉄損測定にはFig.7に示す単板磁気測定枠を使用した。なお, B_m が $0.5 \sim 1.0\text{T}$ では磁壁移動によって磁化されており, 磁化回転は生じていないと考えられる。この理由は以下の通りである。電磁鋼板に外部磁場を印加すると, 磁壁移動が生じたのちに, 磁化回転が生じることが知られている。磁壁移動によって到達する磁束密度は結晶方位によって異なる。磁壁移動のみで到達し得る磁束密度が最も低いのは, $\langle 111 \rangle$ に平行に磁化した場合で, その磁束密度は $B_s \times \cos 55^\circ \approx 0.577B_s$ である。本検討に使用したサンプルを 80000A/m で磁化した際の磁束密度 2.03T を B_s とみなすと, 1.17T までは磁壁移動のみで磁化されると考えられる。

磁気歪み量の測定には, Fig.8に示すようなレーザー光のドップラー効果を用いた単板磁歪測定装置を使用した。磁気歪み量の測定条件は, B_m が $0.5 \sim 1.0\text{T}$, 周波数が 400Hz , 負荷応力が $-10 \sim +10\text{MPa}$ である。

5・2 実験結果

Fig.9に B_m が 1.0T の場合のヒステリシス損 ($W_{h10/400}$) と磁気歪み量 (λ_{p-p}) に及ぼす応力の影響を示す。 $\langle 100 \rangle$ サンプルの $W_{h10/400}$ および λ_{p-p} は圧縮応力によって増加し, 引張応力を負荷しても変化しなかった。 $\langle 110 \rangle$ サンプルの

Fig. 6. Angle between RD and longer direction of samples.

Fig. 7. Measurement apparatus for core loss.

Fig. 8. Measurement apparatus for magnetostriction.

Fig. 10. Relation between Wh and $(V/c)^{1.6}$.

Fig. 9. Influence of stress on hysteresis loss and magnetostriction.

$Wh_{10/400}$ および λ_{p-p} は圧縮応力によって増加し、引張応力によって減少した。〈111〉サンプルのヒステリシス損および磁気歪み量は応力を負荷しても変化しなかった。

Fujikura らは、20MPa 以下の圧縮応力では、Goss 方位を有する方向性電磁鋼板を RD および TD に平行に磁化した際のヒステリシス損は圧縮応力によって増加し、RD と 45° を為す方向に磁化した場合のヒステリシス損は圧縮応力によってあまり増加しなかったという結果を得ている⁸⁾。RD と 45° を為す方向に磁化した場合に、ヒステリシス損が

圧縮応力によってあまり増加しなかったのは、磁化方向が〈111〉に近かったことに起因すると考えられる。従って、本検討にて得られているヒステリシス損に及ぼす圧縮応力の影響は Fujikura らによって得られた結果に近いと考えられ、本検討結果は妥当であると判断される。

λ_{p-p} については、前述したように、理論的には〈111〉サンプルが磁化されても磁気歪みは生じないはずであるが、 1×10^{-6} 程度の磁気歪みが生じた。これは、供試材の結晶方位が完全な Goss 方位ではないことに起因すると推察される。式 (6) から、90° 磁壁移動によって磁化された割合 x を算出すると約 0.1 であった。これは〈111〉サンプルはほぼ 180° 磁壁移動のみで磁化されていることを意味している。そこで本件では、〈111〉サンプルの V は V_{180} とほぼ等しくなると考え、 V の算出には式 (4) を用いた。次節では、式 (8)、(4) から算出した V と Wh の関係を考察する。

5.3 考察

Fig.10 に Wh と $(V/c)^{1.6}$ の関係を示す。なお、 B_s には 80000 A/m で磁化した際の磁束密度 2.03T を代入した。また、 λ_{100} には、 λ_{100} に及ぼす Si 含有量の影響¹⁶⁾ から推定した 30×10^{-6} を代入した。Fig.10 に示すように、結晶方位、応力および励磁磁束密度に拘わらず、 Wh は $(V/c)^{1.6}$ にほぼ比例した。これより、 V のモデル式は妥当であると判断される。また、結晶方位や応力によってヒステリシス損が変化するのは、磁壁が移動した部分の体積変化に起因すると推察された。

Wh を $(V/c)^{1.6}$ に対してプロットした際の傾きが磁壁の移動し易さに相当し、傾きが小さいほど磁壁が移動し易いことを意味していると考えられる。例えば、結晶粒径の影響はこの傾きに影響を及ぼしており、結晶粒径が粗大になるほど傾きが小さくなると予想される。

Fig.10 を詳しくみると、 V が一定の場合、〈110〉サンプルや〈111〉サンプルの Wh の方が〈100〉サンプルよりも大きかった。この理由は明らかではないが、サンプルの結晶方位が完全な Goss 方位でないために θ の見積りに誤りが

あることに起因する可能性がある。もしくは、結晶方位によって磁壁の移動し易さに差があった可能性もある。このように考えた理由は以下の通りである。〈110〉サンプルには鋼板表面と45°を為す磁気モーメントが存在する。また、〈111〉サンプルの磁気モーメントは鋼板表面と55°の角を為している。そのため、〈110〉サンプルや〈111〉サンプルの磁壁は、鋼板表面からの漏れ磁束や、鋼板表面による磁壁移動のピンニングによって、〈100〉サンプルよりも移動し難かった可能性もある。従って、板厚の厚い単結晶を用いることで、鋼板表面の影響や結晶方位の見積もり誤差の影響を低減でき、より精度良くモデルを検証できると考えられる。

6. 結言

電磁鋼板の磁壁移動に伴うヒステリシス損に及ぼす結晶方位や応力などの様々な影響を統一的に説明できる新モデルを確立するため、ヒステリシス損を磁壁が移動した部分の体積(V)と磁壁の移動し易さで表せるという仮説を立てた。本報告では、電磁鋼板を〈100〉、〈110〉および〈111〉に平行に磁化した場合のVを、磁気歪み量、飽和磁歪定数、励磁磁束密度、飽和磁束密度および励磁方向と磁化容易軸の為す角でモデル化した。このモデルを検証するため、Goss方位を有する方向性電磁鋼板を〈100〉、〈110〉および〈111〉に平行に磁化した場合のヒステリシス損と磁気歪み

量を測定し、ヒステリシス損とVの関係を調査した。その結果、ヒステリシス損は $V^{1/6}$ に比例したことから、Vのモデルが妥当であると判断された。また、結晶方位、応力および励磁磁束密度によってヒステリシス損が変化するのは、Vの変化に起因すると推察された。

文 献

- 1) 山田一, 宮澤永次郎, 別所一夫: 基礎磁気工学, (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), 2088.
- 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. 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) R.C.Hall: *J. Appl. Phys.*, **28** (1957), 707.
- 11) H.Tada, H.Fujimura and H.Yashiki: *CAMP-ISIJ*, **2** (2009), 237, CD-ROM.
- 12) 近角聰信: 強磁性体の物理 (下), 裳華房, (1984), 225.
- 13) C.P.Steinmetz: *Electrician*, **26** (1891), 261.
- 14) 近角聰信: 強磁性体の物理 (下), 裳華房, (1984), 178.
- 15) Yashiki and T.Kaneko: *Tetsu-to-Hagane*, **80** (1994), No.8, 659.
- 16) W.J.Carr and R.Smoluchowski: *Phys. Rev.*, **83** (1951), 1236.