ホール磁気センサによるけい素鋼板の磁区および 磁壁分布の自動測定

Automatic Measurements of Magnetic-Domain and Bloch-Wall Distributions on 3% Si-Fe Sheet by Means of Hall Sensor

松原和宣・山口俊尚*・田村良平

福岡工業大学電子機械工学科

*福岡工業大学電気工学科, 福岡市東区和白東 3-30-1 (☎811-02)

K. Matsubara, T. Yamaguchi*, and R. Tamura

Dept. of Electro-Mechanical Engng., Fukuoka Inst. of Techn.,
30-1, Wajirohigashi 3-chome, Higashi-ku, Fukuoka, 811-02

*Dept. of Electric Engng., Fukuoka Inst. of Tech.,
30-1, Wajirohigashi 3-chome, Higashi-ku, Fukuoka, 811-02

The magnetic stray field generated from domains and Bloch walls of 3% Si-Fe sheets have been measured precisely and automatically by using a Hall sensor and an averaging device connected to a personal computer. The results show that the strength of the field normal to the grain surface depend strongly on the main 180° domain width and the grain orientation, which can be explained by the theoretical analysis considering the magneto-static interaction of the sheet. The Bloch wall mappings estimated from the measurements of stray field distributions for single crystal sheets and highly grain oriented sheets (Hi-B) are in good agreement with the practical arrangement observed by means of a colloid displaying device. Furthermore, the influences of thickness, demagnetization frequency, scratching and lamination, as the factors affecting on the stray field, are discussed.

1. ま え が き

(110) [001] 近傍方位を有する 3% Si-Fe 鋼板の表面における漂遊磁界は結晶粒界, 表面欠陥, 磁区および磁壁に局在する磁極によって生じる. 漂遊磁界の定量的な把握は単板磁気試験器 (S.S.T) での磁界測定上の問題^{1), 2)} や結晶粒寸法の非破壊検査の面^{3)~5)} で重要であるため, これまでよく検討されている. 一方, 磁区理論の展開や磁気損失・磁気ひずみ特性に影響を及ぼす鋼板内部に磁化容易軸を持つ $\pm [100]$ と $\pm [010]$ 磁区の振舞について理解する上では, 磁区表面や磁壁近傍からの漂遊磁界を定量的に知る必要がある. しかるに, これについての研究はわずかに Pfützner⁶⁾ らによって報告されている程度で少ない. さらに, 今後応力皮膜を施した鋼板表面に機械的微小歪を付与した磁区制御鋼板⁷⁾ ならびに極薄鋼板⁸⁾ が本格的に活用されるようになると, 鋼板表面性状と漂遊磁界および鋼板の積層間の磁氣的結合・鋼板の表裏面間の磁氣的相互作用などについて正しい知識が要求されると思われる. このような観点から, 磁区

および磁壁から発生する磁界の検出法の確立とその基本データの集積が望まれる.

そこで, 本研究ではホール磁気センサを用いた微小磁界自動精密測定装置を作製し, (110) [001] 近傍に配向した単結晶および各種商用けい素鋼板の漂遊磁界の鋼板表面と法線方向の成分の空間分布を測定した. この結果, 漂遊磁界は主磁区 (180° 磁区) の磁区幅が大きいとき強く, 磁区の中央部で最大となる. 測定された漂遊磁界からブロッホ磁壁の位置が推定可能であること, 漂遊磁界は鋼板の表裏面間および隣接した 180° 磁区表面の自由磁極の静磁的結合を考慮することによって, その基本的性質を説明できることなどが分かった. さらに, 漂遊磁界に影響を及ぼす消磁周波数, スクラッチおよび積層の諸因子についても基本的な検討を行ったので報告する.

2. 試料および測定方法

本研究で使用した試料は, 基本的な 180° 磁区と漂遊磁界の分布を明らかにするため, 温度勾配法で作製され

た (110) [001] 集合組織の巨大結晶粒からなる 3% Si-Fe 圧延板から切り出した単結晶 (寸法: 15 mm×100 mm×0.29 mm) および商用けい素鋼板の結晶配向度の相違に基づく漂遊磁界の強さを検討するため、高配向性 (等級 G6H, G8H) と従来の一方向性 (等級 G9, G10) の各エプスタイン試料を用いた。単結晶試料は [001] 軸の板面からの傾斜角 β が $0.25^\circ \sim 1^\circ$ 近傍方位を選んだ。結晶方位は X 線ラウエ法によって決定した。

Fig. 1 は測定装置の構成を示す。磁界検出用センサには内部抵抗の温度係数が小さく、高感度の GaAs 形ホール素子 (東芝: THS 102, 有効面積約 0.4 mm 0.4 mm) を用いた。センサを試料面に対向させて微小走査させるため、マイクロコンピュータで制御可能な 3 次元位置決め装置を使用した。位置の設定精度は X 軸は 1.25×10^{-3} mm, Y および Z 軸はいずれも 5×10^{-3} mm である。センサの出力電圧はいったん同期検波形センサアンプで増幅・検波されるが、出力電圧にセンサのゆらぎ雑音が残留したため、ボックスカー積分器 (NF 回路設計ブロック; BX530A) を用いてサンプリングと平均化処理を行い雑音を低減した。通常の測定では積分時定数 0.1s, 平均化回数 30 で十分な信号成分の抽出ができた。磁界測定感度は 14 [mV/(A/m)] であった。測定はいずれも消磁状態でを行った。

3. 漂遊磁界分布の測定

3.1 漂遊磁界の空間分布とブロッホ磁壁位置の推定

Fig. 2 は典型的な 180° 磁区から生じる漂遊磁界 (以下 H_z と略記する。) の定量的な分布を示す。センサの走査は試料表面から 0.2 mm 以内の距離で X 方向 0.1 mm, Y 方向 0.5 mm ごとに行なった。図の a~c は単結晶試料 ($\beta \approx 0.25 \sim 1^\circ$, 表面皮膜なし), d は高配向性試料 (G6H, 応力皮膜あり) の場合であるが、いずれも Y 方向に沿って H_z の分布はよく整列していることが分か

Fig. 1 Schematic diagram of measuring system (AMP-sensor amplifier and averaging device, WM-wave memory equipment, S-step motor).

る。また, a および d は H_z の分布が比較的滑らかであるのに対して, b および c のそれは大きな H_z の変化の中に微小な H_z のゆらぎが認められる。この現象は次に示す磁区観察結果より, 180° 磁区表面に存在するランセット磁区の密度の相違によるものと考えられる。

Pfützner は H_z の隣接する最大値または最小値の距離から磁区幅 $2L$ を求めたが、隣接するブロッホ磁壁の間隔は H_z の分布特性から求められていない。そこで、ブロッホ磁壁位置のマッピングを試みた。Fig. 3 はその結果を示す。予備実験より, H_z は磁壁近傍で極性が変化し、磁界勾配 ($\Delta H_z / \Delta x$) も微小ながら変化することが分かったので、この変化位置をコンピュータで解析した。ブロッホ磁壁の推定位置 (図 a, b 参照) と磁性コロイドディスプレイ法 (コロイド液が非磁性金属膜と透明板との狭い間隙に封入された携帯容器を鋼板面に置き磁区観察する簡便な手法)⁹⁾ による磁壁観察結果 (図 c, d 参照) とは磁壁間隔において 10% 以内で一致した。

3.2 漂遊磁界に影響を及ぼす諸因子の検討

A) 消磁周波数の効果 本検討は β が 1° の単結晶試料を消磁周波数 50, 100, 500 H_z で消磁した場合の漂遊磁界分布を記録計に描かせることで行った。消磁周波数の増加で磁区が細分化し, H_z が小さくなる一例を Fig. 4 に示す。平均磁区幅は a および b でそれぞれ 1.84 mm, 1.34 mm であったが, a の場合 [110] (横軸) 方向へ右に進むにつれて磁区幅は 1.2~2.2 mm と拡大しているため H_z もこれに伴って大きく増加している。

Fig. 2 Distributions of stray field normal to sheet surface. a, b-tilting angle (β) $\leq 0.25^\circ$, c- $\beta = 1^\circ$ and d-with stress coating.

b の場合 a に比べて磁区幅が約 73% 小さいため H_z も小さくなったと考えられる。 H_z の更なる減少が 500 Hz 消磁で見られた。

B) スクラッチの効果 鋼板表面へ機械的微小歪を付与して、磁区を細分化した場合の漂遊磁界の定量的測定についての報告は見られない。そこで単結晶試料 ($\beta \leq 0.25^\circ$) にスクラッチを順次付与し、 H_z の変化を測定した。Fig. 5 は測定前に 50 Hz の交流消磁を行い測定した結果を示す。a はスクラッチ前、b および c はそれぞれ間隔が 10 mm, 5 mm のスクラッチを付与し、その中央部における H_z を測定した結果を示す。また、d は b および c の H_z の測定位置にスクラッチを施し、そのスクラッチ線上に沿って H_z を測定した結果である。a で見られた余弦波的 H_z はスクラッチ効果によって磁区の再配列が起こるため乱され、その分布は不規則になるが、横軸の同一場所で H_z のピーク位置が見られるなど、安定した磁区の情報もこの方法で得られる。

C) 積層の効果 鋼板積層においては生じる H_z が鋼板の積層角度で変化することは容易に推察される。そこで $\beta \leq 0.25^\circ$ および 1° の単結晶試料を [001] 方向がそれぞれ $0, 45, 90^\circ$ になるように積層して、上鋼板表面の同一場所における H_z を測定した。その結果、 H_z の分布パターンは基本的には上鋼板の磁区構造に支配されるが、積層角度によって $\pm 15 \text{ A/m}$ 程度の相違が生じた。その傾向は積層角度が $0, 45^\circ$ の場合、下鋼板 ($\beta \approx 1^\circ$) の小さい磁区幅の影響のため H_z は小さく、逆に 90° の場合大きくなることが分かった。これは 90° 磁区の発生のためと思われる。

Fig. 3 Bloch-wall mappings estimated from measurements of stray field and corresponding Bloch-walls observed by a colloid method.

Fig. 4 Effect of demagnetization frequency on stray field distribution.

Fig. 5 Effect of scratching on stray field distribution.

4. 漂遊磁界の解析

漂遊磁界分布の基本的性質を議論するため、鋼板の表裏両面間の自由磁極の静磁的相互作用を考慮した式¹⁰⁾に基づいて解析を行った。解析モデルは補助磁区を含まない 180° 磁区 (飽和磁化 I_s の傾斜角 β) からなるものとする。したがって、鋼板表面 ($z=D/2$) では次式が成立する。

$$\mu_0 \left(\frac{\partial V_0}{\partial z} \right) - \bar{\mu}^* \left(\frac{\partial V_1}{\partial z} \right) = -I_s \sin \beta \quad (1)$$

ここに、 V_0 , V_1 はそれぞれラプラスの方程式を満足する鋼板の外部および内部のスカラーポテンシャル、 μ_0 は

Fig. 6 Typical pattern of calculated stray field at various distances from sheet surface (B.W.-positions of Bloch-wall).

真空の透磁率, $\mu^* = 1 + I_s^2 / (2\mu_0 K_1)$, K_1 は異方性定数 (≈ 44) を表す。したがって, (1) 式を境界条件としてラプラスの方程式を解けば H_z は次式で与えられる。

$$H_z = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4I_s \sin \beta}{n\mu_0\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \times \frac{\exp\left\{\frac{n\pi}{d}\left(\frac{D}{2} - z\right)\right\}}{1 + \mu^* \coth(n\pi D/d)} \quad (2)$$

ここに, d は磁区幅, x および z はそれぞれ磁区中央部から X および Z 方向の距離を表す。

Fig. 6 は解析結果の一例を示す。板表面から z の距離が離れるにつれて H_z は指数関数的に減少する。表面近傍の H_z の変化は磁区中央部で最大となりブロッホ磁壁 (B.W.) の位置で極性が変わる。また, その分布形状は (2) 式からも推測できるように余弦波に近い。

この傾向は漂遊磁界の実測結果と基本的によく対応している。この解析手法に妥当性があるものと考えられる。

5. む す び

[110] (001) 近傍方位を有する 3% Si-Fe 鋼板の漂遊磁界の鋼板表面に対する法線方向成分を正確に測定する手法を確立するとともに, 漂遊磁界とブロッホ磁壁位置との関係, 漂遊磁界に影響を及ぼす諸因子として, 消磁周波数, スクラッチおよび積層の各種効果について基本的な知見が得られた。

本研究を始めるに際し, H. Pfützner 博士 (ウィーン工科大学) に貴重なご意見をいただいた。ここに感謝致します。

文 献

- 1) 中田, 河瀬, 中野, 三浦: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-84-142, 51 (1984).
- 2) H. Tsuchiya: 同上, MAG-84-143, 61 (1984).
- 3) K. Mohri and T. Fujimoto: Proc. SMM-3 Conf. 665 (1977).
- 4) N. Normann and H. Mende: *J. Magn. Magn. Mat.*, **19**, 389 (1980).
- 5) C. Bengtsson and H. Pfützner: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, No. 5, 1478 (1984).
- 6) H. Pfützner, G. Schwarz and J. Fidler: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22**, No. 2, 361 (1983).
- 7) I. Ichijima, M. Nakamura, T. Nozawa and T. Nakata: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-20**, No. 5, 1557 (1984).
- 8) T. Yamaguchi: *ibid.* **MAG-20**, No. 5, 2033 (1984).
- 9) 山口, 松原: 電気学会論文誌, **104**, No. 3, 175 (1983).
- 10) 山口: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-84-57, 19 (1984).

1984 年 12 月 24 日受理, 1985 年 2 月 19 日採録