

B201

球状永久磁石を用いて模擬した磁性鋼板の動的磁区挙動の可視化

大窪 雄亮[○], 遠藤 久, 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学)

堀井 清之 (白百合女子大学)

Visualization of Magnetic Domain Dynamics of Ferromagnetic Silicon Steel Simulated by Ball Permanent Magnets

Yusuke OKUBO, Hisashi ENDO, Seiji HAYANO, Yoshifuru SAITO and Kiyoshi HORII

ABSTRACT

Ball permanent magnets painted black and white colors experimentally simulate magnetic domain structure of Si-Fe steels for domain dynamics visualization. Applying magnetic field to the arrayed magnets visualizes domain dynamics with digital video camera. Local B-H curves can be obtained both pickup coil wound around each magnet and averaged contrast of digital monochrome images. Comparison in terms of the B-H curves shows considerably good agreement. Thus, our visualization can be applied to material evaluation based on image processing methodologies.

Keywords: Magnetic domain dynamics, Silicon steel simulation, Permanent magnet

1. 緒 論

磁性鋼板は電気・電子機器に用いられる重要な磁性材料である。一般に、磁性材料は磁区と呼ばれる微小磁石の集合で構成され、外部磁界に応じて材料中の磁気エネルギーが最小となるように磁区が変化する。すなわち、磁性材料の磁化過程は外部磁界に対する磁区挙動である。所望の磁化特性をもつ新材料の開発には、磁区挙動可視化が重要な役割を担う。磁区挙動の可視化は、磁性コロイド溶液を用いたビッター法、電子顕微鏡に拠る方法、磁気光学効果を利用した方法等で行われる¹⁾。ビッター法は手軽な方法であるが、磁区間の磁壁しか観察出来ない。また、磁気光学的方法是磁性体表面の磁区挙動可視化に限定される。電子顕微鏡に拠る方法は磁性体内部の磁区挙動を観察可能とするが、安価にできない。

本論文は、磁性体表面の磁壁挙動と磁性体内部の磁区挙動の関係を調べるため、球状永久磁石を用いて磁性鋼板の磁化過程を可視化した実験結果を報告する。

本論文の構成は、1章は緒論であり、本研究の社会的な背景と目的について述べた。2章では、球状永久磁石及び、検出コイルをアレイ状に配置し磁性鋼板を模擬する方法を述べる。3章では模擬した磁性鋼板に外部磁界を印加したときの磁化特性探査のために、磁化曲線を描く。4章では、外部磁界を印加したときの球状永久磁石の挙動をデジタルビデオカメラで取得し、得られたモノ

クロ画像から磁化曲線を描くことを試みる。これは、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) を用いて磁性鋼板の磁区を観察したときに得られるモノクロ画像から磁化曲線を描いた報告のハードウェア上のシミュレーションを意味する^{2),3)}。5章はまとめである。

2. 球状永久磁石による磁性鋼板の模擬

2.1 球状永久磁石の配列

球状永久磁石の素材はマンガンフェライトであり、磁束密度は0.075T、半径は0.5cmである。まず、Fig.1(a)の様に球状永久磁石のN極を白、S極を黒に塗り分ける。これは、印加した外部磁界により球状永久磁石がどのような振る舞いをしているかを観察するためである。次に、平面状磁性鋼板を模擬するため、Fig.1(b)の様に球状永久磁石A~Iを3×3個アレイ状に配置する。このとき、球状永久磁石同士は、プラスチックケースで仕切り、5mm間隔で配置する。これは、球状永久磁石間の吸引力の影響で回転しなくなることを防ぐためである。このように配置された球状永久磁石は磁性鋼板の磁区を模擬している[Fig.1(c)]。模擬した磁性鋼板に外部磁界を印加すると、球状永久磁石は、印加された外部磁界に従って回転する。回転の振る舞いを観察することで、磁性鋼板の磁区が外部磁界によりどのような振る舞いをするのか吟味する。また、球状永久磁石を磁極に従って、白と黒に塗り分けたことにより、SEMを用いて磁性鋼板の磁

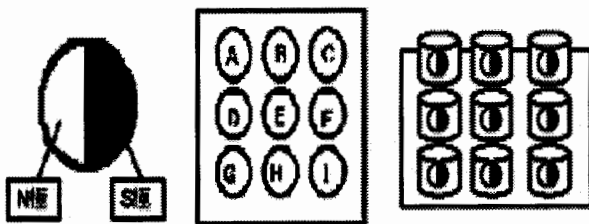
区を観察したときに得られるモノクロ画像と同様のモノクロ画像を得ることができる。

2.2 磁束密度の測定

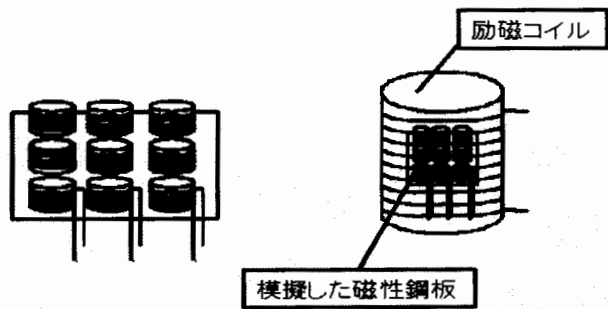
球状永久磁石上に Fig. 2(a) の様に 3×3 個検出コイルをアレイ状に配置する。Fig. 2(b) の様に励磁コイルを用いて模擬された磁性鋼板に外部磁界を印加すると、球状永久磁石は回転する (Fig. 3)。球状永久磁石の回転により、磁束密度の変化が生じる。磁束密度の変化による誘起電圧 $v(t)$ を検出コイルで測定する。(1) 式のファラデーの法則より、測定された誘起電圧波形を積分することで磁束密度の変化を算出することができる⁴⁾。

$$v(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1)$$

9 個の永久磁石それぞれに印加した外部磁界の理論値はソレノイドコイルの中心地点の磁界として、励磁電流から算出する⁴⁾。算出された磁束密度と外部磁界より、磁化曲線を示す。磁化曲線から、模擬した磁性鋼板の磁化特性を吟味することが可能となる。



(a) Ball permanent magnet (b) Positions (c) Simulated model
Fig. 1 Ferromagnetic Silicon Steel Simulated by Ball Permanent Magnets



(a) Target of search coils (b) Excited coil and search coils
Fig. 2 Measurement of Flux Density

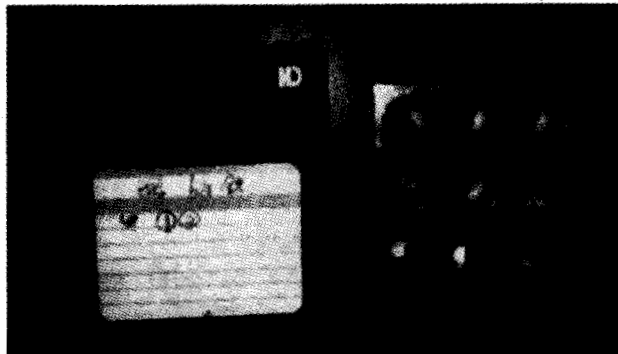


Fig. 3 Photo of the Simulated Model

3. 模擬した磁性鋼板の磁化特性

3.1 測定から得られた磁化曲線

Table 1 に検出コイルと励磁コイルの仕様を示す。励磁電流の周波数は 2Hz、最大振幅は 68.75A の正弦波である。励磁電流から、励磁コイルの形状を考慮して印加した外部磁界の波形を算出する (Fig. 4)。

Fig. 5 は、測定から得られた 9 個の球状永久磁石の磁化曲線である。9 個の球状永久磁石の中で、中心部に位置する E の球状永久磁石の磁化曲線は、ヒステリシスループの幅が大きい。これは、E の球状永久磁石は印加した外部磁界より、周囲の球状永久磁石の影響を強く受けていることを示唆している。

Fig. 6 は、9 個それぞれの球状永久磁石における磁束密度の合計値を求め、平均化した値である。

Table 1 Specification of Search Coil and External Coil

	半径 [mm]	全長 [mm]	巻数 [turn]	線 [mm]	巻線抵抗 [Ω]
検出 コイル	11	15	67	0.4	0.7
励磁 コイル	120	600	750	0.6	20

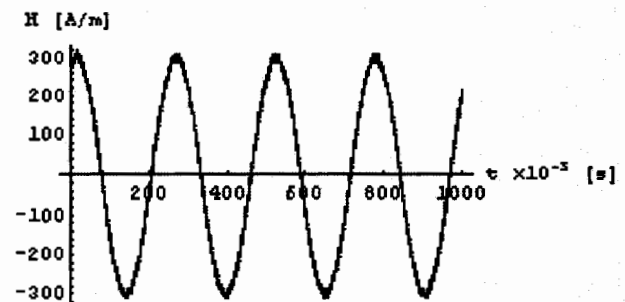


Fig. 4 External Magnetic Field

3.2 球状永久磁石の振る舞い

Fig. 7 は、外部磁界を印加時における球状永久磁石の振る舞いの一例である。撮影に使用したデジタルビデオカメラのサンプリング周波数は 29.97Hz である。外部印加磁界がゼロの状態から、球状永久磁石の向きがすべて揃う飽和領域、そして逆方向に外部磁界を増加したときの一連の外部磁界に伴う球状永久磁石の動作の傾向が窺える^{5),6)}。

4. 球状永久磁石画像と磁化曲線

前章では局所的な磁化曲線と巨視的な磁化曲線を測定値から描いた。本章では、測定値から得られた巨視的な磁束密度分布から球状永久磁石のモノクロ画像を用いて局所的な磁化曲線を計算する。9 個の検出コイルを直列に接続し、誘起する電圧を測定する。測定された電圧からファラデーの法則より、全体の平均の磁束密度分布を算出する。全体の磁束密度の平均値をモノクロ画像の濃

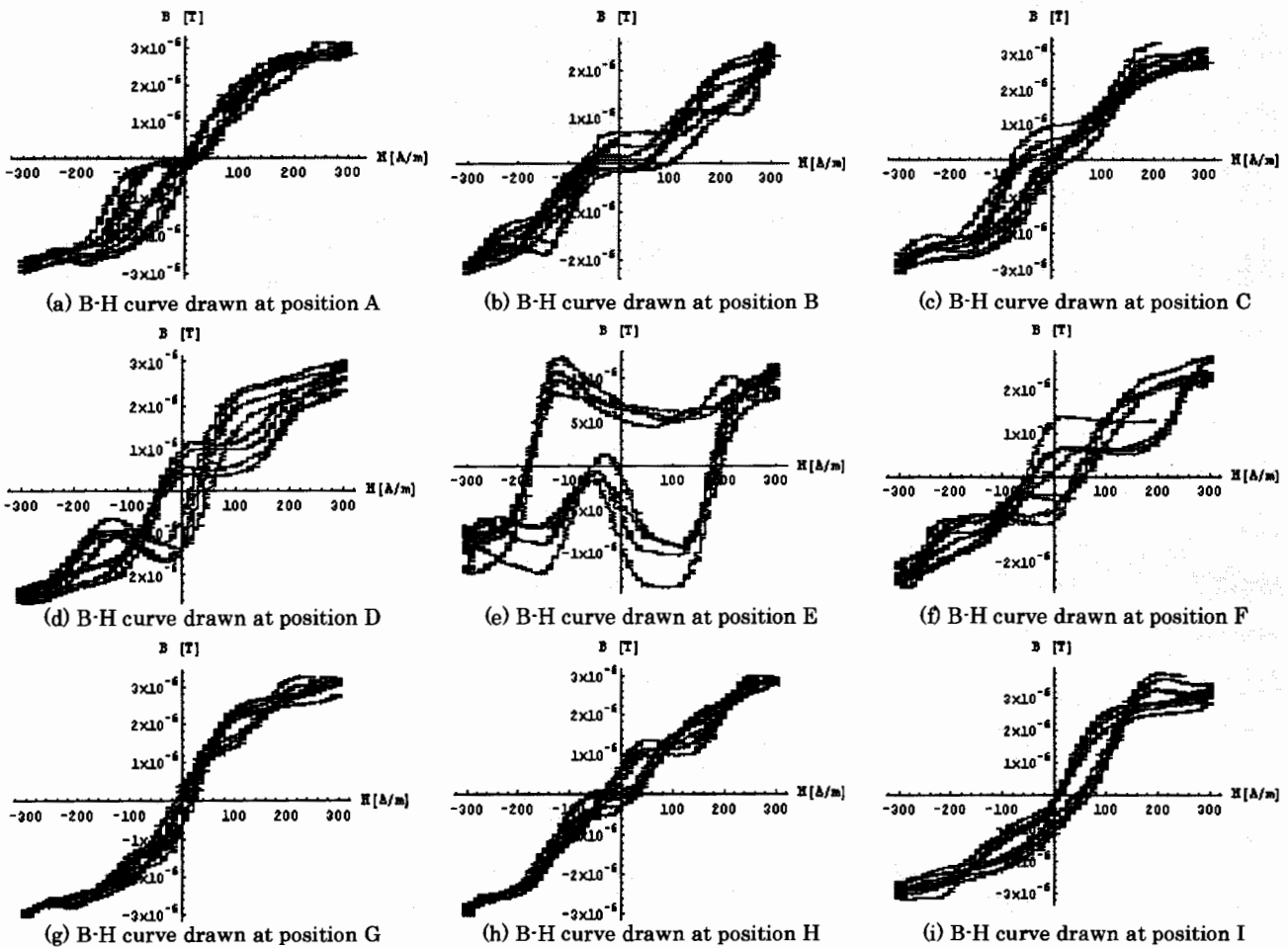


Fig. 5 B-H Curves Drawn from Measurement Values

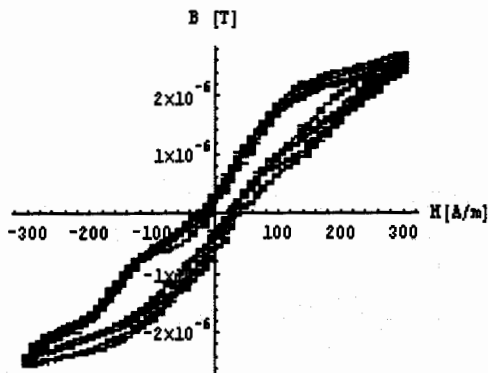


Fig. 6 B-H Curve (Averaged)

淡の平均値とみなし、各磁化状態における局所的な磁束密度を全体のモノクロ画像の濃淡と局所的なモノクロ画像の濃淡との比から算出する。印加した外部磁界の周波数が2Hzで、動画の撮影に用いたデジタルビデオカメラのサンプリング周波数が29.97Hzであるため、印加した外部磁界の1周期で15枚のフレーム画像しか得ることができない。そこで、外部磁界を10周期にわたって印加する。2周期目から9周期目に撮影される画像を1周期目に補完することで、滑らかな磁化曲線を描くことができる。Fig. 8に、モノクロ画像の濃淡から算出された磁化

曲線を示す。Fig. 8において、位置Eにおける磁化曲線

はFig. 5の位置Eにおける磁化曲線同様、ヒステリシスループ幅が広がっており、周囲の球状永久磁石の振る舞いと相互作用を確認することができる。

5. まとめ

本論文では、球状永久磁石配列を用いて磁性鋼板を模擬し、磁区の動的挙動を可視化した。磁化特性の評価に有用である局所的磁化曲線を描くことを試みた。磁束密度を算出する方途として、二つの方法を吟味した。

1. 検出コイルに誘起する電圧からファラデーの法則を用いて磁束密度を算出する方法。
2. あらかじめ与えられた全体的な磁束密度をモノクロ磁区画像の濃淡と対応させて、局所的なモノクロ画像の濃淡との相対値で算出する方法。

両者の磁化曲線を比較すると、大規模なハードウェアのシミュレーションであるにも関わらず、磁性鋼板上の位置による磁区の挙動が明確に現れた。したがって、球状永久磁石を用いて磁性鋼板の磁区の挙動を可視化することが可能であり、これに拠って、可視化画像から磁化特性を測定する方法の妥当性が検証された。

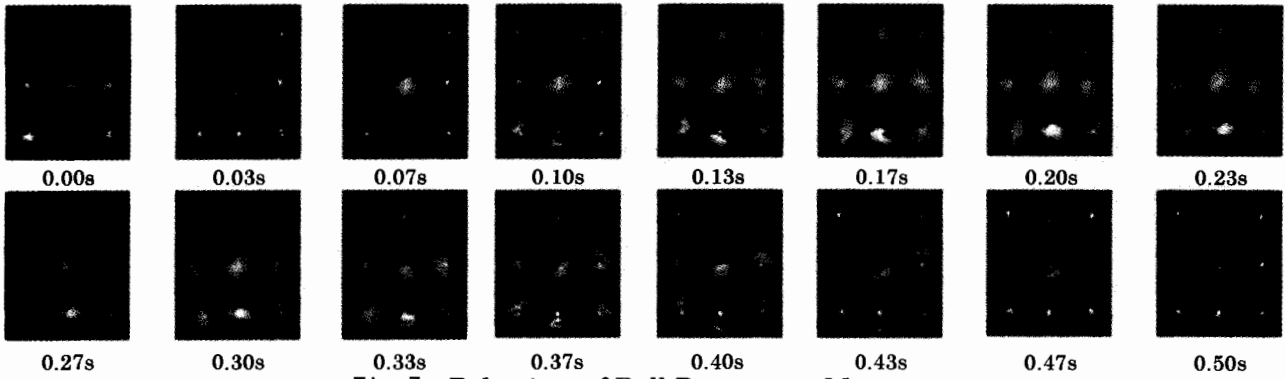


Fig. 7 Behaviors of Ball Permanent Magnets

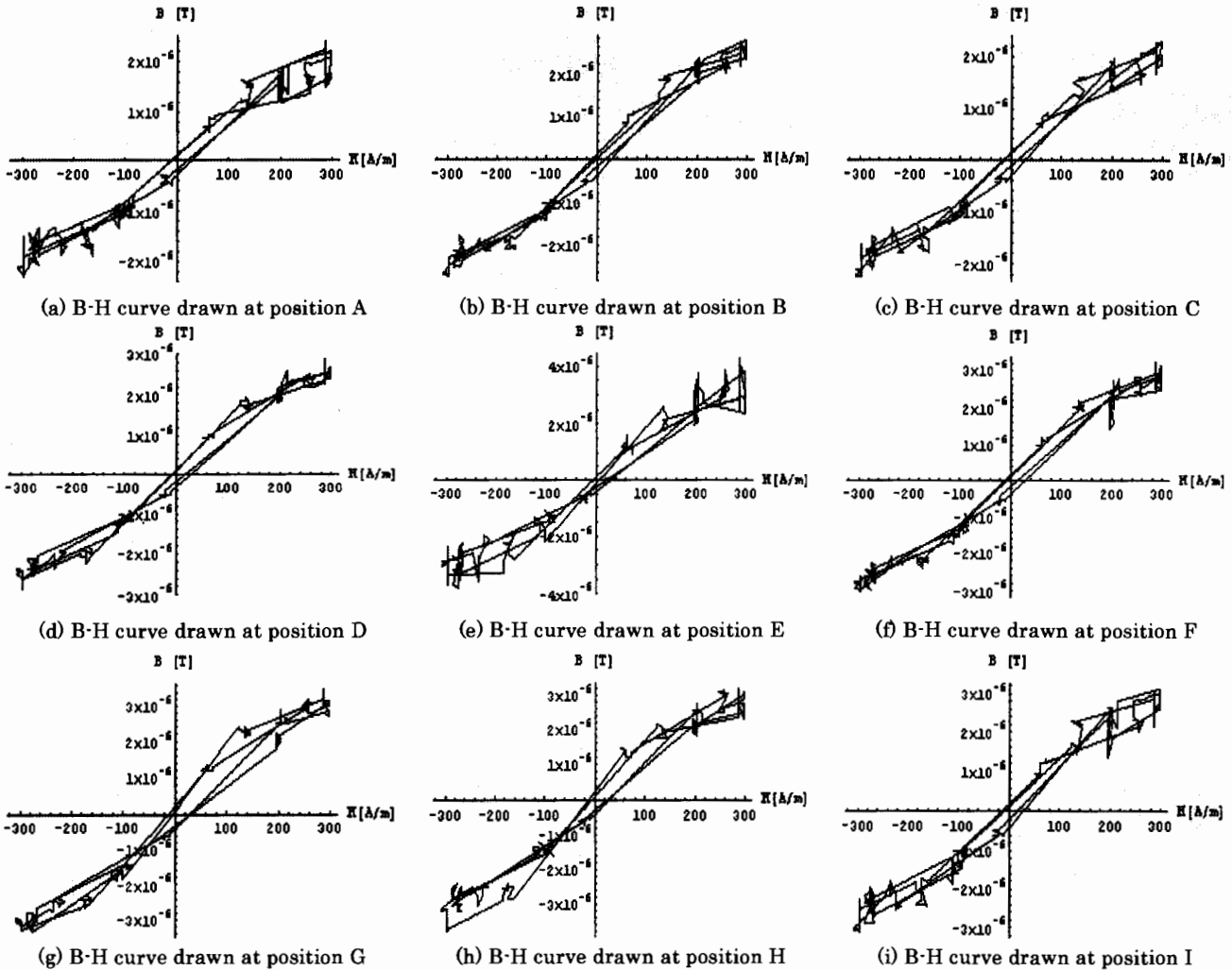


Fig. 8 B-H curves Drawn from Visualized Images

参考文献

- 1) Hubert, A., Schäfer, R.: Magnetic Domains, Springer, Berlin, (2000).
- 2) Endo, H., Hayano, S., Saito, Y., Kaido, C., and Fujikura, M.: Magnetization Curve Plotting From the Magnetic Domain Images, IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 10 (2001) pp. 2727-2730.
- 3) 遠藤久, 早野誠治, 藤倉昌浩, 開道力, 斎藤兆古: 磁区動
- 4) 山田直平: 電気磁気学, 電気学会, オーム社.
- 5) Borzoth, R. M.: Ferromagnetism, Van Nostrand, Princeton, NJ (1951).
- 6) Saito, Y., Hayano, S., and Sakaki, Y.: A Parameter Representing Eddy Current Loss of Soft Magnetic Materials and Its Constitutive Equation, J. Appl. Phys., Vol. 64, No. 10, (1988) pp. 568