

## Development of Advanced Magnetizing Techniques by Means of an Improved VMSW Method

Y. Takino, Y. Nakahata, T. Todaka, and M. Enokizono

Faculty of Engineering, Oita Univ., 700 Dannoharu, Oita 870-1192, Japan

Recently, many improvements in electrical machines have been achieved by replacing conventional permanent magnets with high-performance rare-earth magnets made from materials such as NdFeB. However, the distribution of residual magnetization in permanent magnets is usually non-uniform, and the residual magnetization cannot be measured directly. Thus far, predictions of residual magnetization in permanent magnets have only been possible by using cut-and-try methods. To overcome this difficulty, this paper investigates the establishment of a magnetization estimation method using numerical techniques. The results of simulated magnetization using the improved variable magnetization and Stoner Wohlfarth equation (VMSW) method are compared with actual measurements.

**Key words:** VMSW method, permanent magnet, residual magnetization

## 改良 VMSW 法を用いた高度着磁技術の開発

滝野裕介・中畠 和・戸高 孝・榎園正人

大分大学工学部, 大分市大字旦野原 700 番地 (〒870-1192)

### 1. はじめに

今日、永久磁石は HDD や MRI 等、様々な機器に使用されている。HDD ではアクセス時間の短縮が強く求められ、高加速度化が求められている。また、MRI では磁場の均一度が重要となって来る。このように永久磁石は更なる磁束密度の向上、均一性が求められている。近年開発されている希土類永久磁石はエネルギー積が非常に大きく、機器の小型化・高性能化には欠かせない素材となっている。磁石材料を磁石として用いる為には着磁する必要があるが、パルス磁場で着磁する際、導電率の大きな被着磁材料中には渦電流が誘起され磁場の浸透が妨げられることがあり問題となっている。また永久磁石が完全着磁されていない場合もある。よって永久磁石の性能向上の為には着磁状態の把握が必要となる。しかし、永久磁石内部の残留磁化分布の予測は困難であるばかりか測定することもできない。永久磁石内部の残留磁化分布は着磁解析により推定することが必要であり、永久磁石の実際の磁気特性を考慮した解析を行うことが重要となる。従来の解析手法では永久磁石の異方性を考慮して着磁解析することができなかった。

異方性硬質磁性材料の磁界解析法の確立が遅れている原因としては、磁化がベクトル量であるにもかかわらず、ベクトルとして測定することが困難であった点が挙げられる[1]。そのため、磁性体の磁化挙動の把握も不十分であったと思われる。しかし近年、珪素鋼板のベクトル磁気特性が測定され、異方性材料の磁界解析が可能となってきている[2]。しかし、永久磁石材料についての測定方法はパルス磁場を用いたスカラー測定が一般的で任意方向の測定はまだ確立されていない。

この問題を解決する為、回転磁化モデルを基とした改良 VMSW(Variational Magnetization & Stoner-Wohlfarth equation Method)法を提案した[3]。VMSW 法のポイントは未知数を磁化的絶対値と回転角に採ったことである。これはスカラー磁化特性の有効磁界と磁化の絶対値との関係を表しており、異方性現象を特

徴づけるのは磁化の回転である。また、この手法は初期磁化曲線( $M-H_0$  曲線)のデータさえあれば着磁解析を行うことができ、任意方向のベクトル磁気特性の測定データを必要としない。これらのことより、異方性硬質磁性材料の着磁解析が行える有用な磁界解析手法であると考えられる。

本論文では、改良 VMSW 法を用いた着磁解析を行い、永久磁石の外部磁場分布の測定結果と比較検討した。また、永久磁石内部の磁化が均一になるよう着磁コイルの最適構造化の検討を行った。

### 2. 改良 VMSW 法

#### 2.1 初期磁化過程の計算

Fig. 1 のように、単位体積の磁性体に外部磁界  $H_0$  が印加され、平均磁化  $M$  が誘起されたときの磁化の大きさ  $M$  及び角度  $\theta$  は式(1)～(3)によって与えられる。ただし熱的、力学的效果等は考えない。

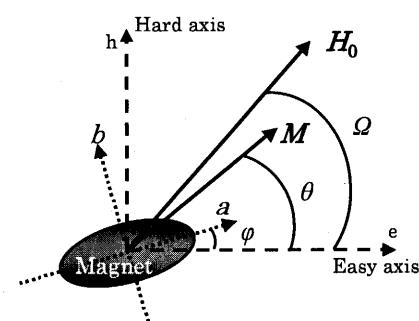


Fig. 1 Definition of magnetization vector and outer magnetic field vector.

$$\left\{ N_a + (N_b - N_a) \sin^2(\theta - \phi) \right\} \frac{M}{\mu_0} + \left( \frac{1}{\chi_e} + \beta \sin^2 \theta \right) M - H_0 \cos(\Omega - \theta) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{M}{2\mu_0} (N_b - N_a) \sin 2(\theta - \phi) \quad (2)$$

$$+ \frac{1}{2} \beta M \sin 2\theta - H_0 \sin(\Omega - \theta) = 0$$

$$\beta = \frac{1}{\chi_h} - \frac{1}{\chi_e} \quad (3)$$

ここで磁化の回転の起点は磁化容易軸にとる。その磁化容易軸を  $e$  軸、困難軸を  $h$  軸とする。反磁界係数テンソルの主軸と主値はそれぞれ  $a$  軸、 $b$  軸、 $N_a$ 、 $N_b$  ( $N_b > N_a$ ) とする。また  $\chi_h$ 、 $\chi_e$  はそれぞれ磁化困難軸と容易軸方向の磁化率であり、磁化ベクトルの  $e$  軸からの回転角を  $\theta$ 、外部磁界  $H_0$  と  $e$  軸とのなす角を  $\Omega$ 、 $e$  軸と  $a$  軸とのなす角を  $\phi$  とする。(2)式は 2 つの異方性磁界を持つ系に対する Stoner-Wohlfarth 方程式(SW 方程式)[4]である。 $\beta M$  は固有異方性に由来する異方性磁界である。全分割要素の  $M$ 、 $\theta$  を決定するために、各要素の未知数を  $M$  と  $\theta$  とし、2 変数のニュートン・ラフソン法を用いて解が収束するまで反復計算を行う。

## 2.2 残留磁化過程の計算

Fig. 2 に示すように外部磁界  $H_0$  を取り除くと、磁化  $M$  の大きさは減少し、角度は磁化容易軸の方に傾く。このときの磁化を残留磁化と呼び  $M_r$  で表し、磁化容易軸からの角度を残留角と呼び  $\theta_r$  で表す。被着磁材の初期磁化曲線の飽和領域から減磁曲線の急降下部寸前までの範囲を Stoner-Wohlfarth 方程式(SW 方程式)で表現すると次式となる。

$$\frac{1}{2} H_a \sin 2\phi - H \sin(\omega - \phi) = 0 \quad (4)$$

$$M = M_s \cos(\omega - \phi) \quad (5)$$

ここで  $H_a$  は異方性磁界であり、 $M_s$  は飽和磁化、 $\omega = \cos^{-1}\{R_s(e)\}$  である。

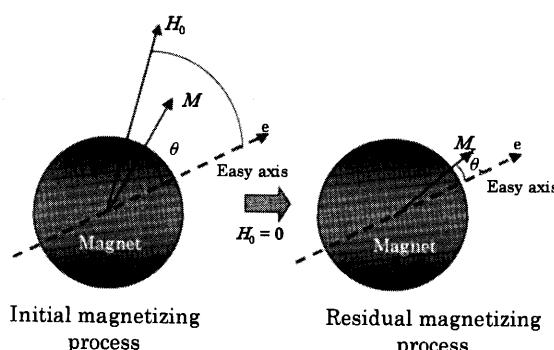


Fig. 2 Occurrence of a residual angle.

残留角が生じないときの残留磁化  $M_r(0)$  は次のように表される。

$$M_r(0) = \frac{M_m R_s}{\cos(\omega - \phi)} \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} H_a(M_m) \sin 2\phi - H_m \sin(\omega - \phi) = 0 \quad (7)$$

次に残留角が生じると磁性粒子の磁化容易方向が  $\theta$  だけ印加磁界方向に傾くと考える。この考えに従い  $(\omega - \phi)$  を  $(\omega - \theta_r - \phi)$  で置き換える。また、(6)式の  $R_s(e)$  も  $\theta$  方向の値  $R_s(\theta)$  に置き換える。この値は、容易方向の角形比  $R_s(e)$  と困難方向の角形比  $R_s(h)$  を用いて次式で近似する。

$$R_s(\theta_r) = \sqrt{R_s^2(e) \cos^2 \theta_r + R_s^2(h) \sin^2 \theta_r} \quad (8)$$

以上より、残留角が生じた場合の残留磁化  $M_r(\theta_r)$  は次式で表される。

$$M_r(\theta_r) = \frac{M_m R_s(\theta_r)}{\cos(\omega - \theta_r - \phi)} \quad (9)$$

$$\frac{1}{2} H_a(M_m) \sin 2\phi - H_m \sin(\omega - \theta_r - \phi) = 0 \quad (10)$$

ここで、 $H_a(M_m)$  は最大磁化点( $H_m, M_m$ )を通る減磁曲線における異方性磁界であり、次式で表される。

$$H_a(M_m) = \frac{M_m}{M_s} H_a(M_s) \quad (11)$$

式(10)をまず  $\phi$  について解き、その  $\phi$  を式(9)に代入することで目的の残留磁化ベクトルの大きさが求められる。

## 3. 改良 VMSW 法による残留磁化の解析及び測定結果の比較

測定結果と比較するため、改良 VMSW 法を用いた着磁解析を行った。Fig. 3 に解析モデルを示す。被着磁材は Nd-Fe-B 磁石である。Fig. 4 に初期磁化曲線、Fig. 5 に着磁解析に用いた着磁電流波形を示す。解析条件として、飽和磁化  $M_s = 1.33$  T、異方性磁界  $H_a = 19.5 \times 10^6$  A/m、磁化容易軸方向の角形比  $R_s(e) = 0.84$ 、磁化困難軸方向の角形比  $R_s(h) = 0.35$ 、導電率  $\sigma = 0.69 \times 10^6$  S/m とした。

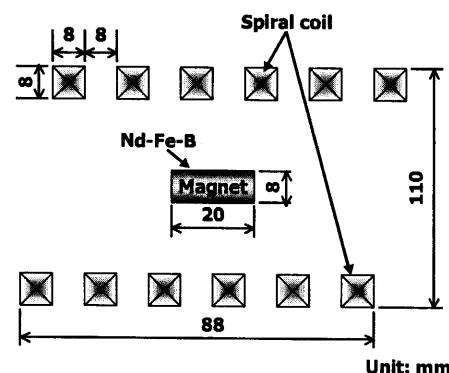


Fig. 3 Model used in the analysis.

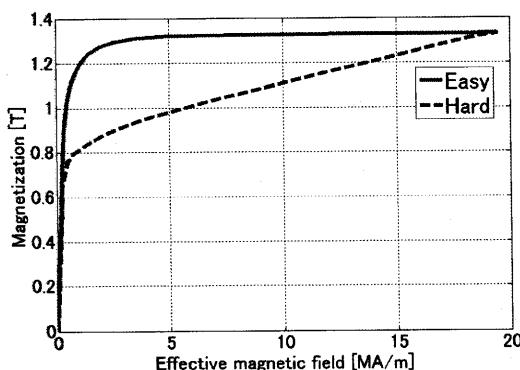


Fig. 4 Initial magnetizing curve (Nd-Fe-B).

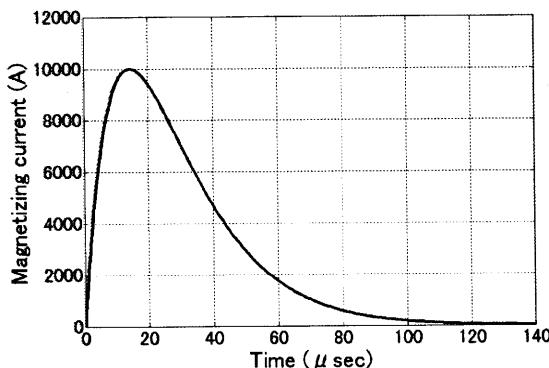


Fig. 5 Magnetizing current waveform.

Fig. 6 に磁束分布を示す。図のように磁石の部分において磁束線は斜めに傾いていることがわかる。これはコイルが螺旋状である為である。Fig. 7(a)に残留磁化分布の全体図、(b)に右上の角の部分を拡大した図を示す。この結果より残留磁化分布が磁束線の方向に傾いており螺旋コイルの影響を受けていることが分かる。また残留角は磁石領域全体の平均が 1.4 degree、最大が 3.6 degree であり、残留磁化ベクトルは磁化容易軸方向から傾いている。通常、モータなどの解析を行う場合、磁化は磁化容易軸方向に一様に向いているとして解析するが、この結果より残留磁化は磁化容易軸方向に一様ではないということが分かる。Fig. 8 に永久磁石の磁束密度分布を測定した結果を示す。測定には「株式会社アイエムエス製 3 次元磁界ベクトル分布測定装置」を用い、着磁を施した磁石の表面から高さ 1 mm のところの磁束密度を測定した。測定した範囲は  $10 \times 10 \text{ mm}$  である。Fig. 9 に磁束密度分布の 3 次元解析結果を示す。現状の改良 VMSW 法では 2 次元場の計算しかできないため、磁石の厚み方向を考慮することができない。そこで、厚み方向の分布を一定とし改良 VMSW 法の計算により得られた残留磁化の値を用いて擬似的に 3 次元の計算を行い測定結果と比較した。この結果より解析結果と測定結果の残留磁化の大きさ、角度が同程度であることがわかる。

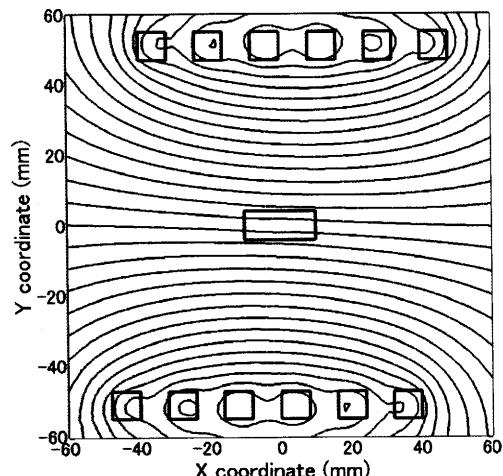
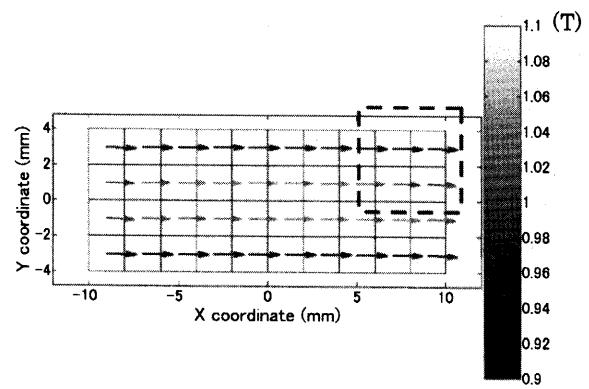
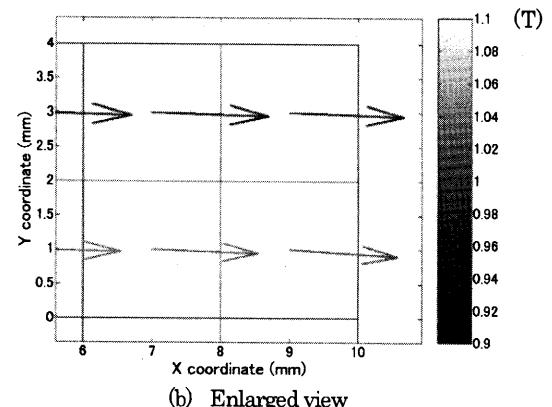


Fig. 6 Magnetic flux distribution.



(a) Full model



(b) Enlarged view

Fig. 7 Residual magnetization vector distributions.

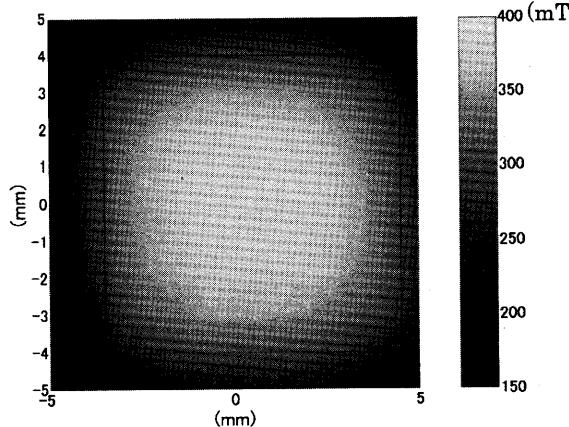


Fig. 8 Flux density distribution measured with the three-dimensional magnetic field measuring devices.

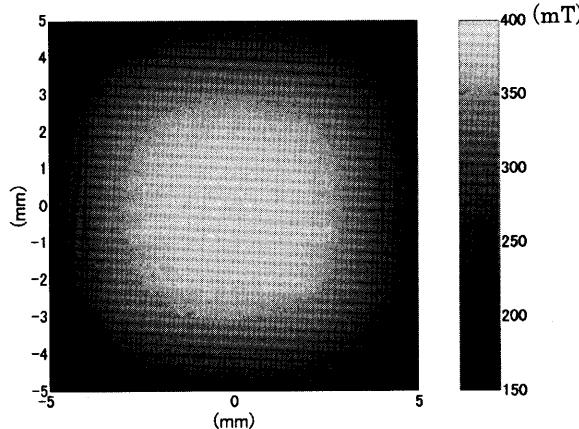


Fig. 9 Flux density distribution calculated with the improved VMSW method.

Table 1 Conditions of the magnetizing coils.

Pattern	Dimension (mm)				
	Diameter	100 const.			
1	Length	52	84	110	132
2	Diameter	36	70	110	170
Length					110 const.

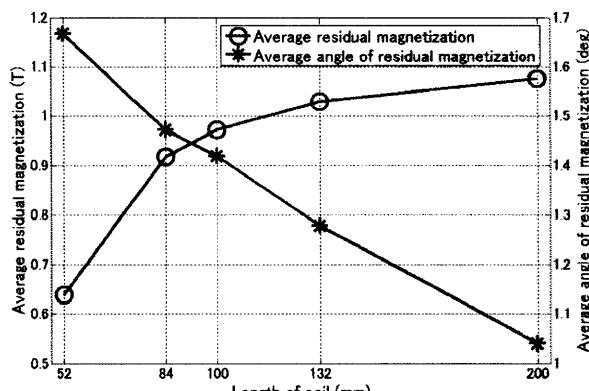


Fig. 10 Comparison of residual magnetization features in function of coil length.

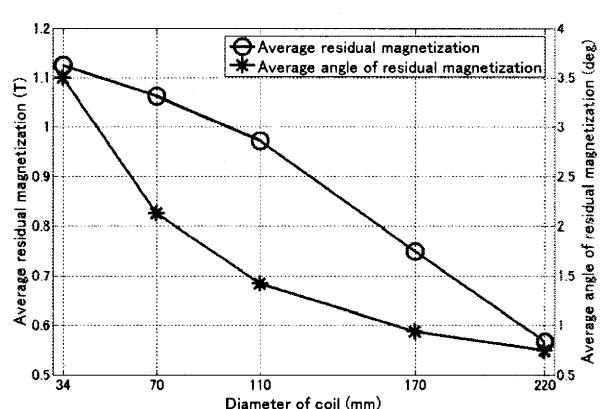


Fig. 11 Comparison of residual magnetization features in function of coil diameter.

#### 4. 均一な残留磁化のための着磁コイルの最適化

##### 4.1 着磁コイルの最適化

着磁コイルの最適化を考えると、大きく分けて以下に示す 2 つの条件を満たす程より良い着磁コイルと考えられる。

- (1) 残留磁化の値が大きい。
- (2) 残留磁化が均一に分布している。

残留磁化の大きさは着磁電流が大きく、着磁コイルの巻数が多いほど残留磁化の値も大きくなると考えられる。また、残留磁化の均一性には残留磁化の角度の均一性と大きさの均一性があり、両方とも均一であることが望ましい。そこで本論文では、残留磁化の均一性に着目し、より均一な残留磁化分布を得るために、着磁コイルの形状を変化させて着磁解析を行った。Table 1 に比較検討した寸法を示す。

##### 4.2 残留角度の均一性と残留磁化の大きさの均一性

Fig. 10 に着磁コイルの長さを変化させた場合の残留磁化の平均値と残留角の平均角度を示す。この結果より、着磁コイルの長さが長くなると残留磁化の値は増加し、残留角は減少していることがわかる。これは着磁コイルが長くなるに伴いコイルの巻数が増えるため、発生する磁場並びに残留磁化が増えることになる。また、着磁コイルが長くなれば、磁束が磁石に対してより平行に入るため残留角が減少した。Fig. 11 に着磁コイルの直径を変化させた場合の残留磁化の平均値と残留角の平均角度を示す。この結果より着磁コイルの直径が短くなれば、残留磁化の大きさは増加するが、残留角も増加していることがわかる。これは着磁コイルの直径が短くなると磁石付近の磁場が増加し残留磁化の値が増加するが、螺旋コイルの影響を大きく受けて磁束が磁石に対してより斜めに入るために、残留角が増加することになる。Fig. 10 より、着磁コイルの長さが 200 mm の場合が残留磁化の値が最も大きく、残留角も最も小さくなっている。また Fig. 11 より、着磁コイルの直径が 110 mm の場合、残留磁化の値が大きく、残留磁化の残留角も小さい。よってこの寸法で着磁解析を行い、従来の着磁コイルの寸法との比較検討を行った。

Table 2 に従来コイルと最適コイルでの残留角の均一性を比較した結果を示す。最適コイルのほうが最大角度で 0.77 degree, 平均角度で 0.44 degree 残留角が小さくなっている。最適コイルのほうが従来コイルと比べてより均一化が実現できる。Table 3 に従来コイルと最適コイルの残留磁化の大きさの均一性を比較した結果を示す。残留磁化の大きさの最大値と平均値の差が少ないほど残留磁化の大きさが均一であると考えられる。最適コイルにおける残留磁化の大きさの最大値と平均値の差が 0.02 T で、従来コイルと比べて 0.03 T 小さくなっている。また、残留磁化の大きさも最大値が 0.06 T、平均値も 0.09 T 大きくなっていることが分かる。

**Table 2** Comparison of the conventional residual angle with the optimized one.

Coil dimension (mm) (length × diameter)	Maximum (deg.)	Average (deg.)	Difference (deg.)
(Conventional) 100 × 110	3.61	1.42	2.19
(Optimum) 200 × 110	2.84	0.98	1.86
Difference (deg.)	0.77	0.44	0.33

**Table 3** Comparison of the conventional residual magnetization with the optimized one.

Coil dimension (mm) (length × diameter)	Maximum (T)	Average (T)	Difference (T)
(Conventional) 100 × 110	1.02	0.97	0.05
(Optimum) 200 × 110	1.08	1.06	0.02
Difference (T)	0.06	0.09	0.03

## 5. まとめ

本論文では改良 VMSW 法を用いて着磁解析を行い、測定結果と解析結果の比較検討を行った。また、着磁コイルの最適構造の比較検討を行った。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 改良 VMSW 法を用いた着磁解析結果を用いて三次元解析した磁場分布は測定結果とほぼ一致した。
- (2) 着磁コイルの最適化を行い、従来モデルと比べて残留磁化の残留角と大きさの両方においてより均一性を高めることができることを示した。

## References

- 1) F. Mohri: A new method for magnetic field computation on anisotropic permanent magnets, *The Papers of Technical Meeting on Magnetics*, IEE Japan, SA-91-6, RM-91-15 (1991).
- 2) M. Enokizono: Two-Dimensional Vector Magnetic Property, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 27, No. 2, pp. 50 (2003).
- 3) M. Enokizono, K. Matsumura and F. Mohri: Magnetic Field Analysis Permanent Magnet Problems by Finite Element Method, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 33, NO. 2, pp.1612-1615, (1997).
- 4) B.C. Stoner and E.P. Wohlfarth: *Phil. Trans. Roy. Soc.* 240, pp. 599, (1948).

2005年10月19日受理, 2006年1月16日採録