

永久磁石回転式脱磁法の動作解析

Performance Analysis of Rotating Permanent-Magnets Demagnetization

水野 勉, 川井 政志, 田代 智治, 白鳥 秀明*, 山田 洋*, 山田 一**

信州大学工学部, 長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

* 山信金属工業, 港区芝 5-27-3 (〒108-0014)

** 博士国際協同研究所, 長野市若里 3-10-39 (〒380-0928)

T. Mizuno, M. Kawai, T. Tashiro, H. Shiratori*, H. Yamada*, and H. Yamada**

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553

*Sanshin Metal Industry Co., Ltd., 5-27-3 Siba Minato-ku 108-0014

**Doctoral International Collaboration Institute, 3-10-39 Wakasato, Nagano 380-0928

Rotating permanent-magnets demagnetization is able to demagnetize a magnetized sample on the moving belt within comparatively short time. However, the operation principle of the demagnetization has not clarified yet. This paper discusses the mechanism of demagnetization and the relationship between structure of the demagnetizer and effect of demagnetization. The following points are obtained. (1) It is clarified experimentally that the mechanism of the demagnetization can be accounted for loop-attenuation demagnetization. A reasonable relationship between the demagnetizing frequency and the velocity of a sample is also proposed. (2) An empirical equation for demagnetization is shown analytically that three important parameters are closely related to the magnetized energies and the magnetic poles of the permanent-magnets.

Key words: demagnetizer, loop-attenuation demagnetization, demagnetizing curve, permanent-magnet, magnetized energy

1. まえがき

生産ラインの磁性体(以下, 試料と呼ぶ)の加工工程においては, 一般に把持装置としての電磁チャックなどの磁気を応用したハンドリング機器が広く活用されている。このハンドリング機器の使用によって, 試料には残留磁気による吸着力が残存するために離脱が困難となり, 作業効率を低下させるといった欠点がある^{1), 2)}。電子機器部品や自動車部品では, 材質にもよるが一般に $B_r = 2 \sim 3$ mTの残留磁気が生ずる。この残留磁気が次工程に影響を与えないためには $B_r = 0.3 \sim 0.5$ mT以下に脱磁する必要がある。

本論文で述べる脱磁法は, 脱磁ロールで形成される交番磁界中を試料が一方から他方へ移動することによって試料に所定の脱磁を短時間で実現できる特徴を有している。新規に開発されたこの脱磁装置は, 現場でのノウハウによって「ある特性の条件下では試料をよく脱磁できる」ことがわかっている。しかし, この脱磁のメカニズムの物理的な究明が不十分であるために, その条件が何に起因するかがわかっていなかった。そこで本論文ではこの“永久磁石回転式脱磁法”の下記の事項を討論し, その脱磁のメカニズムを明らかにする。

- (1) 脱磁メカニズムの解明
- (2) 脱磁曲線の半経験式

本論文において試料の材質は構造用炭素鋼(S45C)でありS45Cに対する脱磁効果だけに限定して議論している。

2. 永久磁石回転式脱磁装置の構成

本脱磁法に利用する永久磁石回転式脱磁装置は, Fig. 1に示したように大別してベルトと脱磁ロールからなっている。同図において, ベルト上に置かれた試料はベルトの移動速度 v で y 方向の左端から右端へと移送される。

脱磁ロールは六角状の磁性体構造物であり, 各辺には平板状の磁石が合計6個装着され, 各磁石は極性が互いに異なるように配置されている。また, 脱磁ロールは回転数 n (脱磁磁界の周波数: $f = np/60$, p : 磁極対数)の一定速度で回転されている。すでにFig. 1に示したように, 脱磁ロールが回転するとベルト上には脱磁磁界 H_y が形成される。脱磁磁界 H_y は y 軸上に形成される y 方向の磁界である。試料はその脱磁磁界 H_y の作用を受けながら左端から右端へ移送される間に, 脱磁を完了することとなっている。Fig. 1において $x-y-z$ 座標系を同図に示したように定め, 原点0は脱磁ロールの回転軸の垂直方向である z 軸とベルト上面の中心位置との交差点とした。また, ベルトの幅方向を x 軸, ベルトの移動方向を y 軸とした。

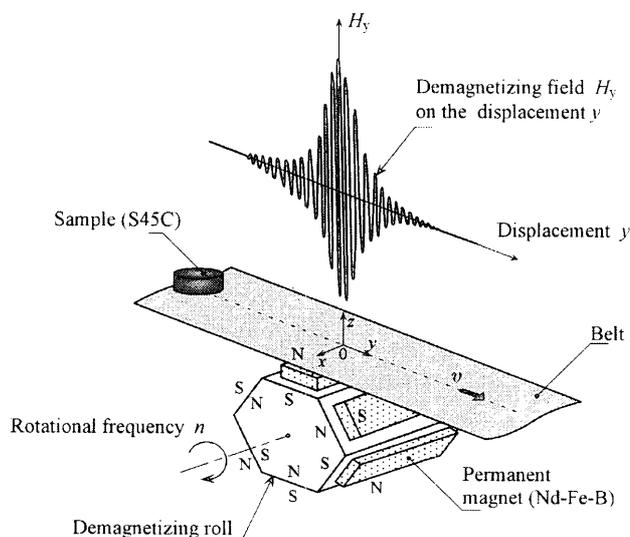


Fig. 1 Fundamental structure of the rotating permanent-magnets demagnetizer.

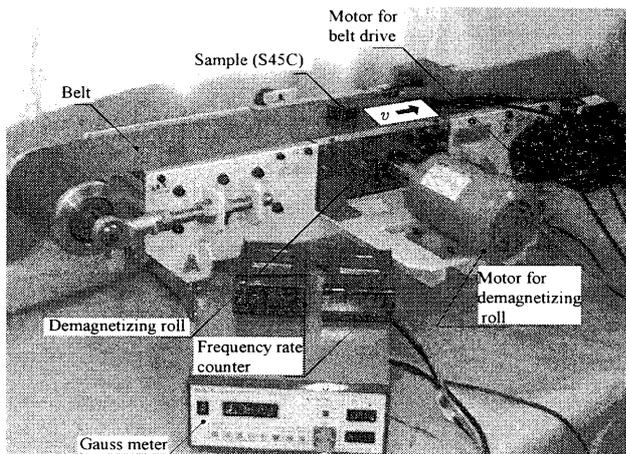
Table 1 Principal specifications of the demagnetizer.

Item	Symbol	Value	[Unit]
Belt velocity	v	1 - 200	[mm/s]
Rotational frequency	n	500 - 1300	[min ⁻¹]
Frequency of demagnetizing field	f	25 - 65	[Hz]*
Shape			
Number of pole pairs	p	3	

$$* f = np/60$$

Table 2 Specifications of the magnet on the demagnetizing roll.

Item	Symbol	Value	[Unit]
Residual magnetic flux density	B_r	1.16	[T]
Coercive force	H_c	780	[kA/m]
Length	l	116	[mm]
Width	w	20	[mm]
Thickness	d	10	[mm]
Maximum energy product	$(BH)_{\max}$	255	[kJ/m ³]
Material		Nd-Fe-B	

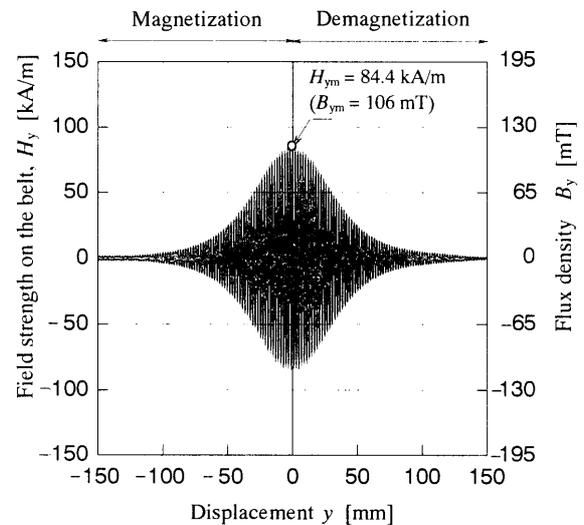
**Fig. 2** Rotating permanent-magnets demagnetizer (the length and width of the belt are 900 mm and 150 mm, respectively).

本脱磁装置の主な仕様は、Table 1 のようになっている。ベルトと脱磁ロールはそれぞれ独立したモータによって駆動され、ベルトの移動速度 v と脱磁ロールの回転数 n は、それぞれの範囲において可変できるように設定されている。脱磁ロールの表面に装着された永久磁石には、Table 2 に示したように希土類磁石 Nd-Fe-B が使用されており、その磁極数は合計6で磁極対数が $p=3$ となっている。永久磁石回転式脱磁装置の外観を Fig. 2 に示した。同図において、試料が置かれたベルトの直線長さは 900 mm、ベルト幅は 150 mm である。

3. 脱磁メカニズムの解明

3.1 ベルト上面に形成される磁束密度

脱磁メカニズムを解明するために、まずベルト上面の y 方向に形成される磁束密度 B_y の測定を行った。磁束密度 B_y の

**Fig. 3** Distribution of the field strength H_y and flux density B_y on the belt ($v = 50$ mm/s, $f = 25$ Hz, $x = 0$ mm, without a sample).

測定にはガウスメータを用い、プローブの位置は $x = z = 0$ mm として、ベルトの駆動により y 方向だけを変化させた。

測定条件は、ベルトの移動速度 $v = 50$ mm/s、脱磁ロールの回転数 $n = 500$ min⁻¹ (脱磁磁界の周波数 $f = 25$ Hz) であり、試料のない状態でベルト上面に形成される磁束密度 B_y を測定した。この B_y を用いて磁界の強さ H_y は次式より求まる。

$$H_y = \frac{B_y}{\mu_0} \quad [\text{A/m}] \quad (1)$$

ここに、 μ_0 : 真空の透磁率 ($= 4\pi \times 10^{-7}$) [H/m]

Fig. 3 にはベルト上面に形成される磁界の強さ H_y と磁束密度 B_y の分布を示した。ベルト上面に形成される磁界 H_y は、着磁領域において徐々に増加していき、脱磁ロールの中心位置 ($y = 0$) において最大値 $H_y = H_{ym}$ となる。その後、脱磁領域において徐々に減衰していく。Fig. 3 における磁界の中を試料が通過した際、試料は下記の2つの領域において着磁と脱磁の作用を受けることになる。

- (1) 着磁領域: $-150 \text{ mm} \leq x \leq 0, 0 \leq |H_y| \leq H_{ym}$
- (2) 脱磁領域: $0 \leq x \leq 150 \text{ mm}, 0 \leq |H_y| \leq H_{ym}$

H_{ym} は、試料に作用する磁界の強さの最大値であり、脱磁ロールに装着された永久磁石の着磁状態に依存している。Fig. 3 に示した実測値では、磁束密度の最大値は $B_{ym} = 106$ mT、これに対応する磁界の強さは $H_{ym} = 84.4$ kA/m であった。

3.2 脱磁メカニズム

Fig. 4 は本脱磁法の脱磁メカニズムを図解したものである。試料に脱磁磁界 H_y が作用すると残留磁束密度 B_r は同図中に示したようにヒステリシスループに沿って原点 0 に近づいていく。このことから、本脱磁装置の脱磁メカニズムは、“ループ減衰脱磁法”そのものであることが明らかになった^{1), 3) ~ 6)}。

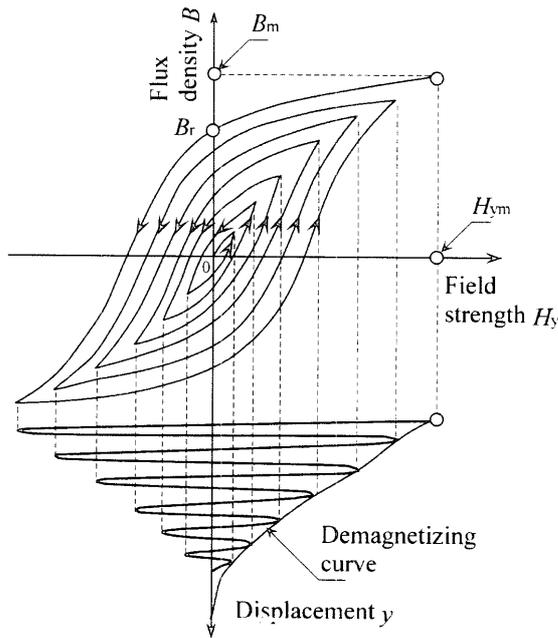


Fig. 4 Demagnetizing mechanism of the demagnetizer.

4. 脱磁と脱磁曲線の近似

4.1 試料の着磁

本実験に使用した試料と試料における残留磁束密度の座標系を Fig. 5 に示した。試料の形状は、 $\varnothing 50$ mm の円板形で、厚さは $d=20$ mm、材質は構造用炭素鋼 (S45C) である。

本論文では脱磁対象はこの試料の1種類に限定してある。試料上に形成される着磁後の残留磁束密度は、Fig. 5 に示したように試料の表面上の B_{rx} , B_{ry} , B_{rz} の3方向とした。ここで、 B_{ry} は試料の移動方向でもある。

Fig. 6 に S45C のリング試料から実測した初期磁化曲線を示した。磁界の強さ $H_m = 5$ kA/m のとき磁束密度 $B_m = 1.58$ T であった。

電磁石を用いた試料の着磁方法を Fig. 7 に示した。同図において、電磁石の巻数 $N = 500$ 回の二つのコイルを並列に接続し、直流電源よりそれぞれのコイルに電流 $I = 2.5$ A を流して試料を y 方向に着磁した。一度着磁した後、 $I = 0$ A となるまで電流を徐々に減少させてから、試料を電磁石から取り外した。試料を取り外した後の残留磁束密度 B_{ry} を着磁後の残留磁束密度とした。着磁実験は3回行い、ガウスメータを用いて測定し、その平均値を用いた。

y 方向の磁束密度の最大値は $B_{ry} = 2.98 \sim 3.01$ mT であり、ば

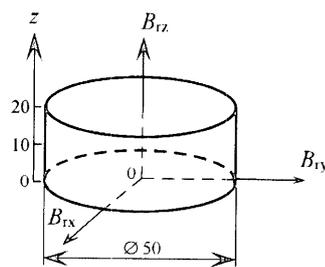


Fig. 5 Structure of the sample and distribution of the 3-dimensional residual flux density B_{rx} , B_{ry} , and B_{rz} (unit : mm).

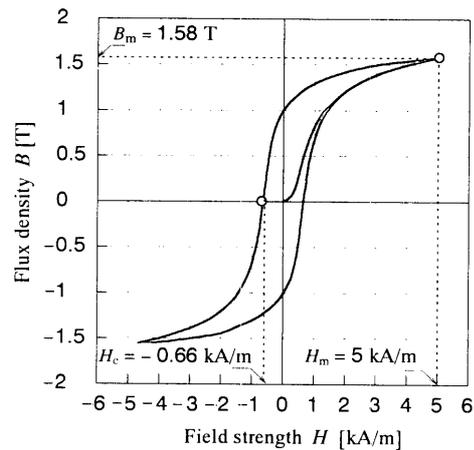


Fig. 6 Initial magnetization curve of S45C ($H_m = 5$ kA/m, $B_m = 1.58$ T, $H_c = 0.66$ kA/m).

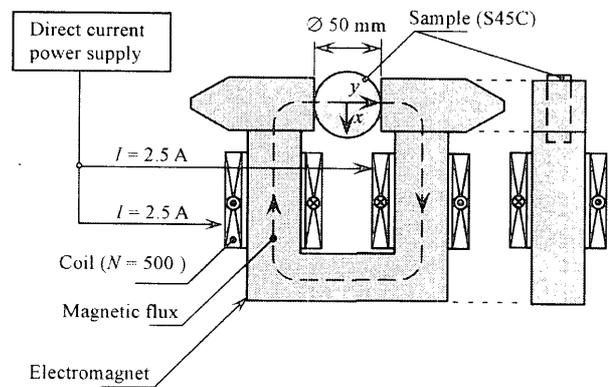


Fig. 7 Method of magnetizing the sample.

らつきは $z=0$, $y=-25$ mm において最大 0.16 mT で再現性がみられた。 x , z 方向の磁束密度 B_{rx} , B_{rz} については B_{ry} よりも小さかったため脱磁効果の評価には y 方向の磁束密度だけを用いることにした。

4.2 試料の脱磁

ここでは前章の 4.1 で述べた“着磁試料”を本脱磁法を用いて脱磁した結果について考察してみる。

Fig. 8 には、脱磁前 (Before demagnetization) および脱磁後 (After demagnetization) の試料の移動方向 (-25 mm $\leq y \leq 25$ mm) における試料の底辺 ($z=0$ mm)、試料の周辺 ($z=10$ mm) および試料の上辺 ($z=20$ mm) における残留磁束密度 B_{ry} の測定結果を示した (Fig. 5 参照)。同図から明らかなように、脱磁前は試料の端面 ($y = \pm 25$ mm) においてその残留磁束密度は $B_{ry} = 3$ mT と高い値を示している。また、試料の周辺 ($z = 10$ mm) では $B_{ry} = 1.5$ mT となっている。

試料の移動速度 $v = 200$ mm/s、脱磁磁界の周波数 $f = 25$ Hz の実験条件で脱磁を行ったところ、同図に併せて描いてあるように、試料の全表面での残留磁束密度は $B_{ry} = 0.27$ mT と一定値に落ち着き、脱磁前の 1/10 以下に脱磁された。脱磁後の残留磁束密度 B_{ry} は 3 回の実測値の平均値である。

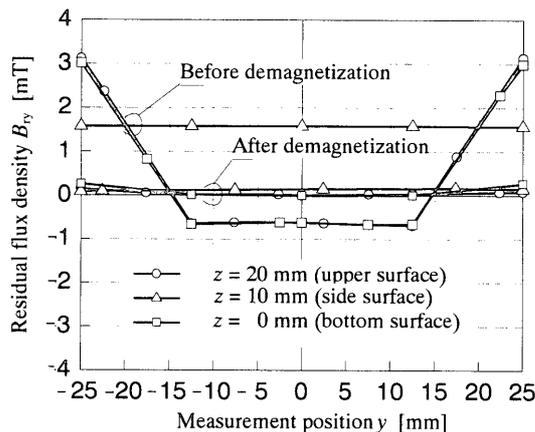


Fig. 8 Distribution of the residual flux density B_{ry} on the surface of the sample before and after demagnetization ($v = 200$ mm/s, $f = 25$ Hz).

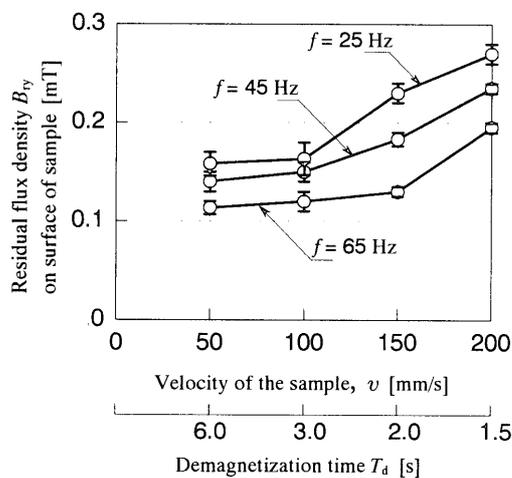


Fig. 9 Dependency of the residual flux density B_{ry} on the surface of the sample on the velocity of the sample as a parameter of the demagnetizing frequency f .

4. 2. 1 脱磁磁界の周波数 f

Fig. 9は、脱磁磁界の周波数($f = 25, 45, 65$ Hz)をパラメータとして、試料にある残留磁束密度 B_{ry} の移動速度 v への依存性を実験から明らかにしたものである。実測値は、すべて実験3回の平均値である。同図のデータから脱磁磁界の周波数 f が高いほど残留磁束密度 B_{ry} は小さくなる傾向がある。例えば、試料の移動速度 $v = 50$ mm/sにおいて周波数 $f = 25$ Hzでは $B_{ry} = 0.16$ mTであったが、周波数 $f = 65$ Hzになると $B_{ry} = 0.12$ mTに減少し、より脱磁されていることが判明した。

さらに、さぐりコイルを用いて試料内の磁束密度を測定した結果、周波数依存性は見られなかった。すなわち、本脱磁装置の周波数 $f = 25 \sim 65$ Hzの範囲では渦電流による表皮効果の影響を受けないことを確認した。

4. 2. 2 移動速度 v

Fig. 9から試料の移動速度 v が遅いほどより脱磁が行われることがわかった。同図において、例えば $v = 50$ mm/sにおいて $f = 65$ Hzでは $B_{ry} = 0.12$ mTまで脱磁されている。しかし、 $v =$

200 mm/sと早くすると $B_{ry} = 0.19$ mTとなり、遅い速度の $v = 50$ mm/sの場合の $B_{ry} = 0.12$ mTと比較して約2倍近くの大きな値となっている。すなわち、試料はできるだけ遅い速度 $v = 50$ mm/sで移送させ、脱磁磁界の周波数 $f = 65$ Hzと高い方がより脱磁されることが判明した。

4. 2. 3 脱磁時間 T_d

Fig. 9において、例えば脱磁基準を $B_{ry} \leq 0.3$ mTに設定した場合、どの条件でもよく脱磁できることが判明した。作業効率の観点から脱磁時間 T_d は当然短い方が望ましい。本実験では試料の移動距離は、いずれの場合も $y = 300$ mm ($-150 \leq y \leq 150$ mm)に限定されているので脱磁時間 T_d は下記の範囲となる。

$$T_d = \frac{y}{v} = \frac{300}{50} \sim \frac{300}{200} = 6 \sim 1.5 \quad [\text{s}] \quad (2)$$

4. 3 脱磁曲線の近似

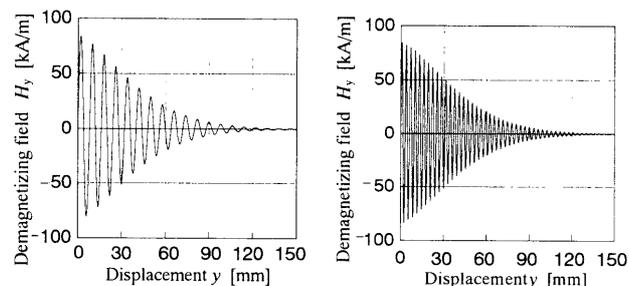
Fig. 10は、試料の変位(移動距離) $y = 0 \sim 150$ mmの範囲におけるベルト上に形成される脱磁磁界の強さ H_y の分布を示したものである。Fig. 10の実験条件は、ベルトの移動速度 $v = 200$ mm/s = constで、交番磁界の周波数を $f = 25$ Hz(図(a)), $f = 65$ Hz(図(b))に変化させたものである。これらの両分布は、変位においていずれも一定の減衰率をもつ包絡線を形成している。

Fig. 10に示した磁界分布は、前述したように試料に対する脱磁磁界 H_y でもある。便宜上、第一象限だけとした変位 y 軸上の脱磁曲線 H_y をFig.11に示した。Fig.11においては、脱磁曲線 H_y の振幅の実測値(Measured)、計算値(Calculated)および近似値(Approximated)を示した。計算値は有限要素法(FEM)による磁界解析プログラム“JMAG-Studio Ver. 6.1”を使用して求めた。実測値に対する計算誤差は、 $y = 40$ mm付近の位置において最大となり、8.1%であった。

さらに、同図中の近似値はグラフ作成ソフト“Origin Ver. 6.1”の近似値計算機能を用いて導出した。変位の領域 $y \geq 0$ において、脱磁曲線 H_y は次式で近似できる。

$$H_y = H_{ym} \exp\{-\alpha(vt + y_0)\} \cos 2\pi ft \quad [\text{A/m}] \quad (3)$$

ここに、 H_{ym} : 最大脱磁磁界の値 (= 84.4) [kA/m],



(a) $v = 200$ mm/s, $f = 25$ Hz (b) $v = 200$ mm/s, $f = 65$ Hz
Fig. 10 Distribution of the field strength H_y on the belt at a displacement of $y = 0-150$ mm.

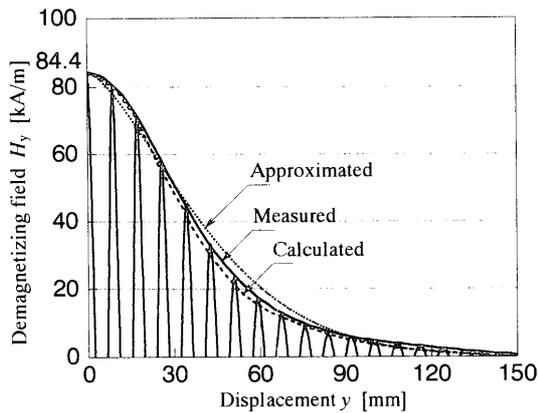


Fig. 11 Approximation of the demagnetizing curve H_y on the displacement y ($d = 10$ mm, $l = 116$ mm, $w = 20$ mm, without a sample).

α : 脱磁ロールの磁極数に関する係数 ($= 11 \times 10^{-3} [\text{m}^{-1}]$, t : 時間 [s], y_0 : $t = 0$ (脱磁開始時) における変位 [m], δ : 脱磁ロールの磁極数に関する係数 ($= 1.24$), f : 脱磁磁界の周波数 ($= n p / 60$) [Hz], n : 脱磁ロールの回転数 [min^{-1}])

上式の近似曲線は、実測曲線に対して誤差 8% 以内であった。また、試料の移動速度 v と t , y には次の関係がある。

$$t = \frac{y}{v} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

上式 (4) を式 (3) に代入し、脱磁は $y_0 = 0$ から開始されるため、式 (4) は半経験式として次の形で与えることができる。

$$H_y = H_{ym} \exp\{-\alpha y^\delta\} \cos 2\pi f \frac{y}{v} \quad [\text{A/m}] \quad (5)$$

4. 4 H_{ym} と係数 α , δ の物理的意味

前出した式 (5) に含まれている係数 H_{ym} と α , δ の物理的意味について以下に考察してみる。

4. 4. 1 最大脱磁磁界の強さ H_{ym}

Fig. 12 は、脱磁曲線 H_y の変位 y への依存性を FEM でシミュレーションした結果を示したものである。同図において、パラメータとして永久磁石の寸法を、長さ $l = 116$ mm, 幅 $w = 20$ mm, 厚さだけを $d = 15, 10, 5$ mm と変化させている。すで

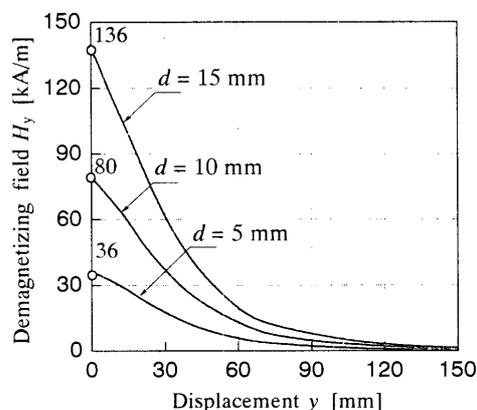


Fig. 12 Dependency of the demagnetizing curve H_y on the displacement y as a parameter of the thickness d of the magnet ($l = 116$ mm, $w = 20$ mm).

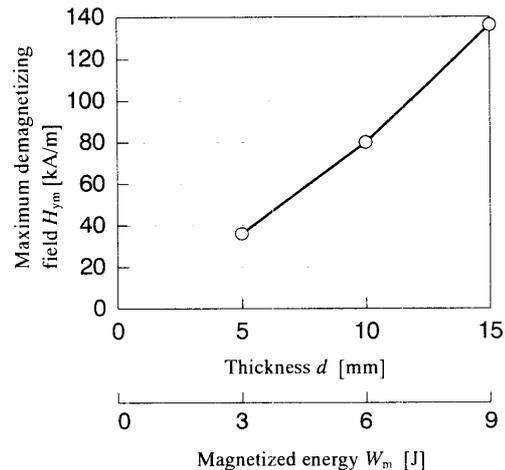


Fig. 13 Relationship between the maximum demagnetizing field H_{ym} and the magnetized energy W_m of the magnet ($l = 116$ mm, $w = 20$ mm).

に前述したように、永久磁石は脱磁ロールに装着されており、永久磁石の厚さ d の増大によって最大脱磁磁界の強さ H_{ym} も大きくなることが考えられる。現に永久磁石の厚さを $d = 5, 10, 15$ mm と変化させた場合、最大脱磁磁界の強さ H_{ym} はそれぞれ $H_{ym} = 36, 84, 136$ kA/m となった。さらに、本論文ではデータを提示していないが永久磁石の長さ $l = 116$ mm, 厚さ $d = 10$ mm にして永久磁石の幅だけを $w = 10, 20, 30$ mm と変化させた。この場合も H_{ym} の変化の傾向は同一であった。このシミュレーションの結果に基づいて最大脱磁磁界の強さ H_{ym} と永久磁石の厚さ d との関係を整頓すると、Fig. 13 のようになった。同図中の横軸に併記した着磁エネルギー W_m は次のように定義したものである。

$$W_m = (BH)_{\max} \cdot V \quad [\text{J}] \quad (6)$$

ここに、 $(BH)_{\max}$: 最大エネルギー積 [J/m^3], $V = lwd$: 永久磁石の体積 [m^3]
このデータから次式が導かれる。

$$H_{ym} = kW_m \quad [\text{A/m}] \quad (7)$$

ここに、 k : 着磁エネルギーに関する比例定数 (≈ 15.1) [$\text{kA}/(\text{m} \cdot \text{J})$]

Fig. 13 において H_{ym} は d に対してほぼ一次関数的に増加することから、所定の H_{ym} に対する d を決定することができる。

4. 4. 2 磁極数と関係する係数 α と δ

式 (5) の右辺に含まれる $\exp(-\alpha y^\delta)$ は減衰項であり、脱磁曲線 H_y の減衰の具合を示すものである。Fig. 14 は、永久磁石の長さ $l = 116$ mm, 幅 $w = 20$ mm とし、3種類の厚さ $d = 5$ mm, 10 mm, 15 mm をパラメータとして変位 y 軸上における最大脱磁磁界の強さの相対値 H_y/H_{ym} の変化を FEM でシミュレーションした結果である。同図中における3曲線は、いずれも $\alpha = 11 \times 10^{-3} [\text{m}^{-1}]$, $\delta = 1.24$ として算出したものである。このデータから減衰項 $\exp(-\alpha y^\delta)$ は、永久磁石の厚さ d には関係ないことがわかった。

次に減衰項に起因するパラメータを調べるために、脱磁ロールの断面構造に注目した。Fig. 15 は、脱磁ロールの3種

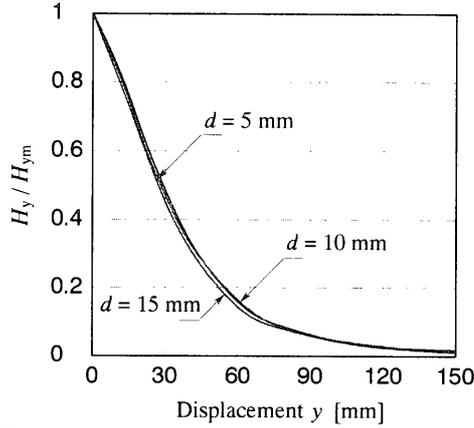


Fig. 14 H_y/H_{ym} - y characteristics as parameters of the thickness of the magnet, d ($l = 116$ mm, $w = 20$ mm).

類の断面構造を示したものである。同図の6磁極(6面体)は、本脱磁装置の実機である。実機においては、永久磁石の厚さ $d = 10$ mm, 長さ $l = 116$ mm, 幅 $w = 20$ mm, 1辺の長さ $w_0 = 33.5$ mmであり、それにロールの原点Oから各頂点までの長さが $r = 33.5$ mmであるため、比率 $w/w_0 = 0.6$ に設定されている。そこで、Fig. 15に示したように、 $w/w_0 = 0.6 = \text{const}$ として、新たに4磁極(4面体)と12磁極(12面体)の二つのモデルを考えた。これら3機種の脱磁曲線をFEMによって数値解析した結果をFig. 16にまとめた。

Fig. 16に示した解析結果から脱磁曲線の減衰項 $\exp(-\alpha y^\delta)$ は、脱磁ロール上の磁極数に深く関係していることが究明できた。すなわち、同図から脱磁波形の減衰の仕方は磁極数が増加すると大きくなることが判明した。Fig. 17には、Fig. 16

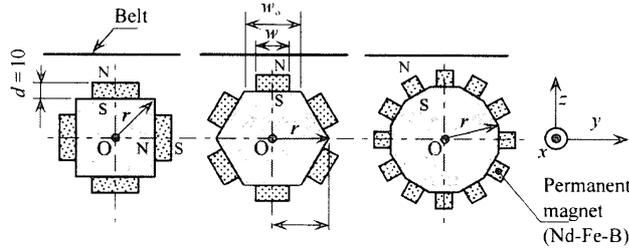


Fig. 15 Three cross-sections of the demagnetizing roll.

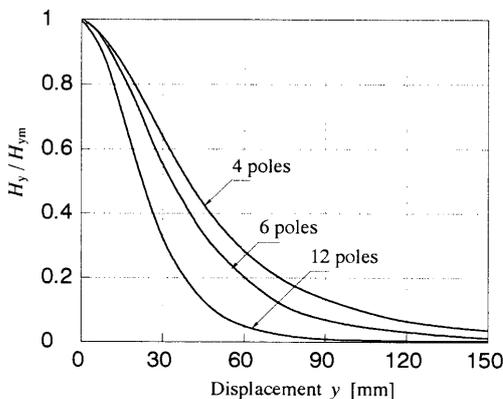


Fig. 16 Demagnetizing curves of three kinds of roll ($x = 0$ mm, without a sample).

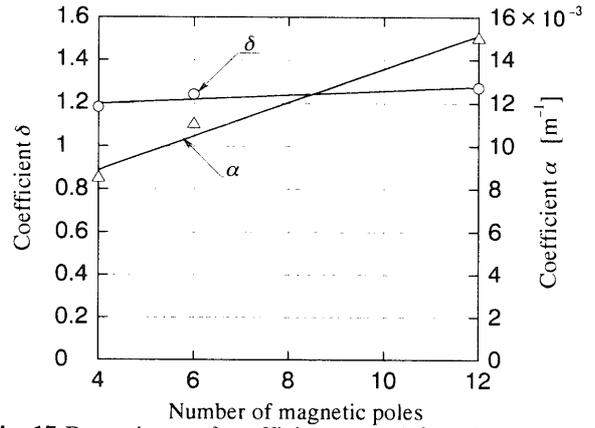


Fig. 17 Dependency of coefficients α and δ on the number of magnetic poles.

に基づいて係数 α と δ の磁極数への依存性をまとめて示した。同図から脱磁曲線の半経験式(5)の減衰項 $\exp(-\alpha y^\delta)$ に含まれている係数 α は、磁極数が $4 \rightarrow 12$ 極へと多くなると、 $\alpha = 8.51 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \rightarrow 15 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ と増大する傾向があることがわかった。さらに、係数 δ は、同様に磁極数が $4 \rightarrow 12$ 極へと多くなると、 $\delta = 1.18 \rightarrow 1.27$ へと漸増することがわかった。

5. あとがき

新規に開発した永久磁石回転式脱磁法を研究した結果をまとめると次の事項となった。

(1) 脱磁メカニズムの解明

本脱磁法は、実機による検証から従来の“ループ減衰法”であることが解明できた。本脱磁法では $\phi 50$ mm の円板形で、厚さが $d = 20$ mm の試料(S45C)を6s程度で脱磁させるためには、 $v = 50$ mm/s, $f = 65$ Hz が好適であることが判明した。さらに、試料の残留磁気が次工程に影響を与えない0.3 mT以下となる脱磁条件もあわせて示せた。

(2) 脱磁曲線の半経験式

本脱磁法で実現している脱磁曲線は、前出の半経験式(5)で表現できることを示した。同式における最大脱磁磁界の強さ H_{ym} は、磁石の厚さ d に依存していることが明らかになった。さらに、同式の減衰項 $\exp(-\alpha y^\delta)$ に含まれる係数 α と δ は、脱磁ロールの磁極数に深く関係があることをFEMを用いたシミュレーションで確認した。

文 献

- 1) H. Yamagami and H. Yamada : *Technical Report on Application Magnetics*, No. AM-74-40, pp. 1-12, (1974) (in Japanese).
- 2) John S. Sohre and Paul I. Nippes. : *The 7th Turbomachinery Symposium*, pp. 13-33, (1978).
- 3) H. Yamada, S. Takeuchi, T. Ota and S. Hashimoto : *Electricity Four Societies Union Convention*, 477, p. 563, (1970) (in Japanese).
- 4) T. M. Baynes, G. J. Russell and A. Bailey : *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, No. 4, pp. 1753-1758, (2002).
- 5) M. Enokizono, T. Todaka and M. Kumoi : *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 112, pp. 207-211 (1992).
- 6) S. Chikazumi : *Physics of Magnetism*, p. 258, (1964).

2002年11月28日受理, 2003年3月26日採録