鉄系軟質磁性材料における磁化の遅れ現象に及ぼす抵抗率の影響

加藤哲男*, 水野正志**, 金沢洋忠***

Influence of Resistivity on the Delayed Magnetization in Iron-base Soft Magnetic Materials

Tetsuo Kato, Masashi Mizuno and Hirotada Kanazawa

Synopsis

There is a phenomenon at DC magnetic measurement of soft magnetic material that the larger relative permeability and quicker measuring speed for hysteresis loop cause an increase in the apparent coercive force. It was recognized that the increase in the coercive force was caused by the delay of magnetization, and depended on the permeability in the magnetic soft iron. Then the study was performed to investigate the coercive force as a function of the resistivity in iron-base soft magnetic material. The delayed magnetization depended on the resistivity as well as the permeability of the material. Furthermore it changed with the thickness of specimen. Such a phenomenon can be explained from a view point of the penetration depth of magnetic field. Finally a method to evaluate the intrinsic value of coercive force was proposed.

1. はじめに

軟質磁性材料の直流自動磁気測定において、ヒステリシス曲線を一周する測定時間により、その形状が変化し、測定時間が短くなるほど見掛け上の保磁力が大きくなるという現象がある¹⁾。このような現象は工業的に材料の磁気特性を求める上で注意が必要となる極めて重要な事項と考えられ

るにもかかわらず、これまでほとんど知られていないのが実状である。そのため、この状況について詳細に調べるため、さきに試料として実用磁性材料のなかで比較的使用量の多い電磁純鉄²⁾を取り上げ、測定実験を進めたところ、この現象は磁化の遅れ現象によるものであるということが明らかとなった。また、この磁化の遅れの大きさは、試料の板厚が厚くなるほど、また試料の透磁率が高くなるほど増大するという傾向が認められた³⁾。また、これらの現象について磁界の浸透深さの関係式を用いて簡単な計算を行って考察したところ、実験結果の傾向と計算値とが比較的良く合致し、これにより十分説明できることが確認された。

1994年11月1日受付

*大同工業大学、工博

**大同特殊鋼(株)技術開発研究所、工博

***大同工業大学大学院工学研究科、現鈴鹿富士ゼロックス(株)

Table 1. Chemical composition (mass %) and resistivity of specimens.

Alloy	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	O	Resistivity [$\mu\Omega\cdot\text{cm}$]
Magnetic soft iron	0.005	0.01	0.17	0.009	0.003	<0.01	<0.01	0.03	—	0.030	0.0010	11.0
13Cr-0.8Si-Fe	0.012	0.77	0.30	0.025	0.002	0.03	0.11	13.32	—	0.26	—	71.6
13Cr-2.5Al-Fe	0.007	0.05	0.21	0.020	0.001	0.04	0.08	12.80	0.01	2.57	—	99.2
13Cr-6Al-Fe	0.001	0.21	0.01	<0.001	0.003	<0.01	<0.01	13.20	0.10	6.10	0.0011	131.9

以上のような経過から、この磁化の遅れ現象について、磁界の浸透深さに関連するもう一つの要素である抵抗率変化の観点からもさらに調べて、その影響を明らかにしてゆくことが重要であると考え、さらに実験・検討を進めて保磁力の変化と磁化の遅れ現象についての確認を行うこととした。詳しい知見が得られたのでその結果について報告する。

2. 試料および実験方法

実験に使用した試料の化学成分、抵抗率を Table 1 に示す。Cr や Al を添加することにより、抵抗率を $11\mu\Omega\cdot\text{cm}$ から $131.9\mu\Omega\cdot\text{cm}$ まで変化した。抵抗率の測定は長さ100mm、幅10mm、厚さ1mmの試験片を用い、4端子法により測定した結果である。磁気測定試料は約200kg鋼塊を熱間で鍛造し続いて約10mmの厚さまで圧延した材料を用い、切削により外径45mm、内径35mmの環状試料を製作した。その板厚は1mmから7mmまで2mmおきに4段階に変化させた。その後、750℃と850℃でそれぞれ4時間、および1150℃で2.5時間後続いて850℃で2時間（以下1150℃と記述する）の3条件で焼きなましを行い、いずれも炉中冷却した。

使用した自動磁気測定装置は B-H カーブトレーサー（理研電子製）である。磁気測定には試料の一次巻線に100回、二次巻線に40回コイルを巻き、測定を行った。これによる磁化およびヒステリシス曲線の測定において、曲線一周の時間を7.8, 11.8, 23.8, 39.6および71.6秒の5段階に変化させた。初磁化曲線の測定に当たっては予め十分な交流消磁を行った。ヒステリシス曲線は十分飽和となっている50Oe以上の磁界まで磁化することによって測定した。また実験の途中において

Fig. 1 Delay of magnetization in relation to coercive force.

Fig. 1 に示すように、ヒステリシス曲線測定の途中保磁力点 H_c のところで磁界の変化を止めたと、a-b のように直線的に推移する磁束密度の変化が観測されたので、その測定を行い、得られた飽和の値をとって磁束密度の遅れの大きさ B_0 とした。

3. 実験結果

まず、Fig. 2 および Fig. 3 に、それぞれ1150℃の焼きなましを行った環状試料の板厚が7mmの13Cr-0.8Si-Fe合金、および850℃焼きなましを行った厚さ7mmの13Cr-2.5Al-Fe合金について、それぞれ測定の時間を変化して自動測定により描いた磁化およびヒステリシス曲線を示す。いずれも磁化およびヒステリシス曲線が測定時間によって変化する。測定時間が短くなるに従って明らかに見掛け上の保磁力が増大し、透磁率が減少していることが認められる。各試料について行ったこれらの測定のうち、測定時間と見掛け上の保磁力との関係についてまとめた結果の一例を Fig. 4 に

Fig. 2 Change in the magnetization and hysteresis curves with measuring time in 13Cr-0.8Si-Fe alloy annealed at 1150 °C.

Fig. 3 Change in the magnetization and hysteresis curves with measuring time in 13Cr-2.5Al-Fe alloy annealed at 850 °C.

Fig. 4 Change in the apparent coercive force with measuring time in 13Cr-0.8Si-Fe alloy annealed at 1150 °C.

示す、これは1150℃焼きなましをした13Cr-0.8Si-Fe合金についての結果であるが、測定時間による見掛け上の保磁力の変化の傾向はさきの研究^{1),3)}において見られたのと同様で、測定時間が短くなるにしたがい、また試験片の板厚が厚くなるほど見掛け上の保磁力が増大している。他のいずれの試料においても同様の傾向の結果が得られた。以上の結果を踏まえて、見掛け上の保磁力に及ぼす抵抗率の影響について測定を進めた。

Fig. 5にその両者の関係についてまとめた結果を示す。図は焼きなまし温度が1150℃、試料の板厚が7mmの場合についてであるが、総体的に見て抵抗率が増加するにしたがい、見掛け上の保磁力がほぼ減少する傾向を示している。次に、実験したヒステリシス曲線測定のために7.8秒と

Fig. 5 Change in the apparent coercive force with resistivity in the alloys annealed at 1150 °C.

Fig. 6 Relation between the resistivity and the changing width of apparent coercive force.

71.6秒の範囲において保磁力が変動する幅を取り、抵抗率との関係についてまとめた。その結果をFig. 6に示す。それぞれ焼きなまし温度が(a) 1150℃および(b)850℃の場合について示しているが、抵抗率の増加に伴い、また板厚が薄くなるにしたがい、見掛け上の保磁力の変動幅が減少する傾向を示すことが認められる。

このような見掛け上の保磁力の変動は、磁化の遅れ現象によるものではないかと考えられたことから、実験方法のFig. 1のところで記したような磁界の変化を止める実験を行った。Fig. 7に磁界

Fig. 7 Change in the delayed magnetic flux density with measuring time in 13Cr-6Al-Fe alloy annealed at 850 °C.

の変化を止めた後の経過する時間 t に伴う磁束密度 B_0 の変化の測定例を示す。図は試料が13Cr-6Al-Fe、焼きなまし温度が850℃、板厚が7mmの場合であるが、緩和時間 τ による緩和追従を示す関係式と良い一致を示している。

$$B_n = B_0(1 - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 8はこのようにして測定した抵抗率による磁化の遅れの大きさ B_0 の変化についてまとめた結果を示す。図は焼きなまし温度が(a)1150℃、(b)850℃および(c)750℃で、試料の板厚が7mmの場合における各合金に対する結果である。1150℃焼きなましの場合において、抵抗率の増大に伴い、ほぼ磁化の遅れの大きさが減少する状況が見られるが、その他については抵抗率による磁化の遅れ量の変化の傾向が試料条件により異なっており、必ずしも明確な傾向の変化を示さない。

4. 考 察

始めにFig. 6およびFig. 8において観察された抵抗率による見掛け上の保磁力の変動巾および磁化の遅れの大きさの変化の実験結果について考察する。そのためまず各試料と測定条件ごとに、Fig. 9に見られるような保磁力点付近の磁束密度の変化が急峻になっている区間の平均比透磁率 μ_r を求め、その値を測定時間の逆数 $1/T$ に対する関係として図上に画いて見た。例として1150℃焼きなましを行った13Cr-0.8Si-Fe合金における測定時間の逆数に対する比透磁率の値の変化を

Fig. 8 Change in the delayed magnetic flux density with resistivity in the alloys of thickness 7 mm.

Fig. 9 Method of determination for relative permeability and frequency.

Fig. 10 Change in the relative permeability with the inverse of measuring time in 13Cr-0.8Si-Fe alloy annealed at 1150°C.

Fig. 10 に示す。図において、 $1/T$ が零となるときの比透磁率の点をそれぞれ外挿すると、一点に収斂するようになった。このように外挿により求められた $1/T$ が零となる点における比透磁率の値をそれぞれの材料本来の比透磁率と設定した。この値を Table 2 に示す。このようにして求めた材料本来の透磁率 $\mu = \mu_0 \mu_r$ を用いて、まず保磁力の変動幅を透磁率と抵抗率との比 μ/ρ に対して整理してみた。その結果が Fig. 11 である。図は環状試料の板厚が5mm の場合の全焼きなまし条件について示している。横軸 μ/ρ は対数目盛りとしてとってあるが、抵抗率に対して整理した Fig. 6 と比べて両者はばらつきの少ない直線的な関係を示した。Fig. 12 は同様に磁化の遅れの大きさ B_d を透磁率と抵抗率との比 μ/ρ に対して整理したもので、ヒステリシス曲線一周の測定時間が7.8秒の

場合について示しているが、Fig. 8 の結果と比べ両者はばらつきの少ない相関関係を示した。

続いて磁界の浸透深さに関連して考察することと、表皮効果における表皮深さ δ を以下の計算式により計算することを試みる。

$$\delta = \sqrt{\rho / \pi \mu f} \quad \dots \dots \dots (2)$$

f 、 μ および ρ はそれぞれ周波数、透磁率、抵抗率を表す。周波数 f については Fig. 9 に示すようなヒステリシス曲線において、保磁力点付近の磁束密度の変化が急峻となっている時間を $(1/2) T_L$ として、その周期 T_L の逆数として求めた。また(2)式は正弦波交流において成り立つ式であるため、さきの研究³⁾におけると同様に、磁化波形を三角波と仮定し、それについてフーリエ級数展開を行って正弦波に分解する計算を行った。それにより基本波、第三高調波および第五高調波までを求め、

Table 2. Mean relative permeability for specimens.

Alloy	Annealing temperature		
	850℃	850℃	1 150℃ + 850℃
Magnetic soft iron	20 000	44 200	52 500
13Cr-0.8Si-Fe	6 400	11 300	41 000
13Cr-2.5Al-Fe	6 600	22 600	21 500
13Cr-6Al-Fe	9 000	14 100	12 800

Fig. 11 Relation between ρ/μ and changing width of apparent coercive force in the alloy of thickness 5 mm. Fig. 12 Relation between ρ/μ and delayed magnetic flux density in the thickness 5 mm.

それらの合成した波として取り扱った。これにより磁束密度の遅れの大きさの計算を行った。計算された基本式の周波数はヒステリシス曲線一周の測定時間7.8～71.6秒に対し0.028(Hz)～0.256(Hz)の範囲となっている。

以上のように設定した周波数 f 、さきに求めた材料本来の透磁率 $\mu = \mu_0 \mu_r$ および測定により求めた抵抗率 ρ を用いて、表皮深さ δ の計算を行った。その計算結果と磁束密度の遅れ量 B_0 との関係についてまとめた結果をFig. 13に示す。図は板厚が7mmの場合についてまとめている。総体的に、表皮深さに対する磁束密度の遅れの大きさが指数関数的に変化しており、得られた表皮深さの値はほぼ実験試料の厚さに対応する数～数十mmのオーダーとなった。このように磁束密度の遅れの変化の傾向は周波数、透磁率および抵抗率の三者の関連において表皮効果の計算式に沿った明確な変化の傾向が得られた。

続いてさきの研究³⁾と同様に、磁束密度の遅れの大きさについて表皮効果の表現式を用いて計算を試みた。

$$H_{(z)} = H_0 \exp(-z/\delta) \dots\dots\dots (3)$$

ここで H_0 は磁性体表面の磁界の強さ、 $H_{(z)}$ は表面から距離 z の磁界の強さである。この関係式によりさきと同様に f 、 μ および ρ を代入して計算を行った。計算にはさきの研究³⁾におけると同様に環状試料の断面に対して横および厚さの二方向からの磁界の浸透を考えることとした。まず試料断面を6万点まで微少細分化し、それぞれの部分の磁界による磁束密度の値を求め、それらを累積していくことにより磁性体内部における磁界の浸透状況を計算した。この場合磁界の強さと磁束密度の変化は直線関係を持つと仮定した。Fig. 14はこのように試料断面形状を考慮した二次元的な磁界の浸透状況について計算した結果を示す。図は試料断面形状が幅5mm、板厚 t mmの場合で、縦軸

に試料断面積に対する磁界の浸透率、横軸に $f \times \mu / \rho$ を取り、それぞれの環状試料の板厚について計算を行った結果である。板厚による磁界浸透率の影響について見ると、板厚が1mm以下に薄くなると磁界浸透率が急速に大きくなる傾向となっている。このように、各試料および測定条件における磁界の浸透状況を計算して磁束密度の遅れ量を求めた。

以上のようにして求めた、焼きなまし温度が1150℃および850℃、試料の板厚が(a)7mmおよび(b)5mmの場合における周波数と磁束密度の遅れ

Fig. 13 Relation between skin depth and delayed magnetic flux density in the alloys of thickness 7 mm.

との関係について計算値と測定値を比較して Fig. 15 に示す。測定値に比べ、計算値が若干下回

Fig. 14 Change in the penetrating ratio of magnetizing force with $f \times \mu / \rho$ in sectional size 5 mm $\times$ t mm.

Fig. 15 Relation between frequency and delayed magnetic flux density.

Fig. 16 Change in the apparent coercive force with inverse of measuring time in magnetic soft iron.

る結果となったが、磁束密度の遅れに対する周波数変化と良く相似した傾向の結果が得られた。この計算については、周波数や透磁率の値の仮定などのほか、予想される磁壁移動による影響などについても考慮されていない。それにもかかわらず測定値と計算値とが比較的良好に相似した傾向の変化を示したことから、この磁化の遅れ現象について磁界の浸透深さの観点から大筋の説明をすることができるものと考えられる。750℃焼きなましの試料についてもほぼ同様傾向の結果が得られている。

ここで最後に、軟質磁性材料の磁気測定に際して材料本来の保磁力を求める方法について提案したい。Fig. 10においてヒステリシス曲線一周の測定時間の逆数 $1/T$ が零となるときに平均比透磁率が一点に収斂すること、およびFig. 12において、磁化の遅れの飽和値が ρ/μ の対数に比例することの2つの現象から以下の発想が生まれた。Fig. 16は板厚の異なった電磁純鉄について測定した見掛け上の保磁力を $1/T$ に対してまとめた結果であり、850℃と1150℃で焼きなました二つの

場合について示している。図中の実線は実験試料の最も薄いところ(1mm)と最も厚いところ(7mm)の範囲における変化を表している。両者とも $1/T$ が大きいくところでは試験片の板厚による差が大きく現れているが、 $1/T$ が零となるところでいずれもほぼ一点に収斂するように見られる。この値が材料本来の保磁力であるということができると思われる。理論的な検討はまだ必ずしも十分ではないが実際の磁気測定に当たり、保磁力の評価にはこのように測定時間を無限大に外挿することにより値を求めることが必要になってくると考えられる。

5. ま と め

実用電磁純鉄の直流自動磁気測定において、測定速さによりヒステリシス曲線の形状が変化するという現象がある。これは環状試料の板厚および透磁率に依存する。この現象の確認を行うため、さらに抵抗率による特性変化の影響について詳しく調べる実験研究を行った。

(1) 抵抗率が高くなるにしたがい、また試験片の板厚が薄くなるほど、測定時間による見掛け上の保磁力の変動幅は低下の傾向を示した。磁化の遅れの大きさについては必ずしも抵抗率との間で明確な変化の傾向を示さないが、 μ/ρ との関係についてまとめ直してみたところ、 μ/ρ の対数値と良い直線関係の変化を示した。

(2) 測定したヒステリシス曲線より、比透磁率および周波数を求め、それぞれの抵抗率を使って表皮深さを算出したところ、その表皮深さはほぼ実験試料の厚さに対応する数～数十mmのオーダーとなり、表皮効果の計算式に沿った明確な変化の傾向が得られた。

(3) 磁化の表皮効果の関係式より、計算により磁束密度の遅れの大きさを求めたところ、周波数による磁束密度の変化について測定値とよく相似する結果が得られた。

(4) 以上のように鉄系軟質磁性材料の磁気測定において見られるヒステリシス曲線の変化は磁化の遅れ現象に起因しており、抵抗率変化の実験によっても磁界の浸透深さの観点から大略説明することができる。

(5) 最後に、軟質磁性材料における材料本来の保磁力の値を求めるために、ヒステリシス曲線を

一周する測定時間の逆数が零となるように外挿する方法を提案した。

6. 謝 辞

終わりに本研究についてご協力を頂いた大同特殊鋼(株)技術開発研究所小島勝洋氏, 大同工業大学電気工学科尾畑智光氏, ならびに工学研究科(修士)学生吉野修司君を始め, 大野隆行君, 大崎久司君に謝意を表する。

(文 献)

- 1) 加藤, 尾畑, 永江, 水野, 小島: 電気製鋼, **63** (1992), 259
- 2) 加藤, 富岡: 電気製鋼, **38** (1967), 2; **39** (1968), 209; **40** (1969), 296
- 3) 加藤, 金沢, 永江, 水野: 日本応用磁気学会誌, **17** (1993), 205