日本応用磁気学会誌 22,889-892 (1998)

継鉄法による棒状磁性材料の自動磁気測定と測定時間による保磁力値の変化

Automatic Magnetic Measurement for Bar Magnetic Materials by the Yoke Method, and Change in the Value of the Coercive Force with the Measurement Time

> 加藤哲男・辻本虎太・鈴木智也・草加勝司 大同工業大学電気工学科,名古屋市南区大同町 2-21 (Φ457-8531)

T. Kato, T. Tsujimoto, T. Suzuki, and K. Kusaka Daido Institute of Technology, 2-21 Daiodo-cho, Minami-ku, Nagoya 457-8531

Automatic magnetic measurement for bar specimens of soft magnetic materials was studied by means of the yoke method. A new magnetizing apparatus was designed to reduce to zero the difference between the magnetic flux densities induced in the center and the end search coil, in order to correct the self-demagnetization. This method allows accurate, magnetic measurements to be made for bar specimens of magnetic pure iron, as well as for the conventional ring specimens. On the other hand, a quicker measurement speed of the hysteresis loop and a larger sectional area shows an increase in the apparent coercive force due to the phenomenon of the delay of magnetization in this measurement method.

Key words: automatic magnetic measurement, magnetic pure iron, yoke method, quicker measurement speed, hysteresis loop, apparent coercive force, delay of magnetization

1. まえがき

軟質磁性材料のうち、電磁純鉄、けい素鉄、および 47% Ni-Fe 磁性合金などは工業的に棒状に製造され、特性検査の ため、その形状において磁気測定が必要とされる場合が少なく ない、そのために古くから、継鉄を用いて反磁界を補正しなが ら測定を行う各種の方法が提案されている¹⁾.

しかしながら、この方法によっては、最近普及が進んできて いる自記磁束計などによる磁化曲線およびヒステリシス曲線な どの測定を行う場合に、曲線の全般にわたって完全に反磁界の 補正を行うことは事実上困難である。そのため、新しい継鉄法 として、反磁界によって生ずる試料両端における磁束の変化を サーチコイルを用いて検出し、中央部サーチコイルにおける磁 束との差が零になるように制御して補償コイルに励磁電流を流 すことにより、反磁界補正を行う方法について電磁純鉄を用い て検討を進めた。その結果ほぼ実現可能な成果が得られたの で、ここに報告する。

なお、軟質磁性材料について通常の静的とされる直流磁気測 定を行う場合、ヒステリシス曲線を一周するための時間によっ てその形状が変化し、保磁力の値が異なってくるという現象が 見られる^{2)~6)}. これについて、たとえ直流状態としての測定で はあっても、測定には速さが伴うため、ごく低周波の交流状態 になっていることによるものと考えられる. しかし、この現象 は技術上極めて重要な事項であるにもかかわらず、なおほとん ど一般に知られていないのが実状である. そのため、この継鉄 法による棒状試料の自動磁気測定においてもこの現象について 検証し考察することとした.

2. 実験装置および方法

Fig. 1 に試作した継鉄法による棒状試料磁気測定装置の概要について示す. 継鉄は被測定材とほぼ同様特性の電磁純鉄の 鍛造材を切削加工によって仕上げ,850℃で4時間の焼きな まし処理を施して,図のようにコの字状に組上げた.その寸法 は図中に記したとおりである.主磁化コイルは円筒状に720 回巻き,さらにその両端部に,反磁界による漏れ磁束を補うた めの補助コイルを各50回巻いている.試料の磁束密度を測定 するための中央部サーチコイルの巻数は20回で,またそれと は別に端部サーチコイルをそれぞれ両端に各10回巻き,直列 に接続している.

Fig. 2 は自動磁気測定回路の概要について示す. 磁化コイ ルによる磁界の強さは励磁電流による分流抵抗の電圧降下分を A/D変換し, 演算制御装置によって算出される. この磁界の 強さの値は,磁化コイルの巻数を N,電流 I [A],継鉄両翼間 の試料の長さ L [cm] としたときの計算式

 $H=4\pi NI/10L$ [Oe]

によって求めた. なおこれについては, あらかじめ磁化コイル の中央部に巻いた空心サーチコイルを用いて行った積分型の磁 束計による測定結果と一致することを確認している. 試料の磁 束密度は中央部サーチコイルによる出力信号を高利得直流増幅 器を介して積分し, A/D変換して同様に算出される. 併せて, これと端部サーチコイルとによる出力信号との差が零になるよ うに制御し, 端部補助コイルに追加の励磁電流を流して, 反磁 界補正するようになっている. なお反磁界補正後も, 磁界の強



Fig. 1 Yoke method apparatus for automatic magnetic measurement.

さは主磁化コイルの電流から算出している. それはこの実験に おいて反磁界の強さは実質的に,主磁化コイルによる磁界の強 さの約 35% 以下となるが,これを補正する端部補償コイルは 中央部から十分離れて配置され,それによって中央部サーチコ イルが受ける磁界の強さは主磁化コイルによる磁界の1×10⁻² 以下に低く抑えられていることによっている. 自動磁化の自記 磁束計として,理研電子(株)製の BH カーブトレーサを利用し た. これによって,磁化およびビステリシス曲線の自動測定を 行った.

実験に使用した電磁純鉄の化学成分を Table 1 に示す. 試 料の寸法は直径 5,7.5,および 10 mm で各長 250 mm であ る. いずれも圧延材から切り出し,その後 850℃ で 4 時間の 熱処理を行っている. なお比較のために外径 45 mm,内径 33 mm,厚さ 7 mm の環状試料を作製し,棒状試料と同様に熱処 理して,同様の測定を行った.

3. 実験結果および考察

3.1 自動磁気測定について

初めに,試作した継鉄法装置による電磁純鉄棒状試料の測定 結果についてまとめる.

まず端部補償コイルによる反磁界補正を行わずに、磁化コイ ルのみの磁界によって自動磁気測定を行った.なお、以下の測 定時間はヒステリシス曲線の一周をすべて約90秒としてい る.Fig.3は各寸法の試料について、磁界の強さ5Oeまでの 印加磁界により測定した磁化およびヒステリシス曲線を示す. 直径が10mmから5mmまで細くなるに従って磁化およびヒ ステリシス曲線が少しずつ横に傾くようになっている.

Fig. 4 はこの状態における棒状試料について、その長さ方 向2 cm 間隔の各位置にサーチコイルを巻いてそれぞれ磁化曲 線を測定することによって磁東密度の分布を測定した結果であ る.磁界の強さ 1,3,および 5 Oe における磁化曲線上の磁東 密度について示しているが、どの磁界の強さに対しても、全体 として、直径 10 mm において最も磁東密度が高く、それから 5 mm まで細くなるに従って低くなっている.また、直径が細 くなるほど試料の両端部において、中央部に比べ磁東密度が低 くなっていることが認められる.これは直径が細くなると継鉄



Fig. 2 Automatic magnetic measurement circuit for the bar specimen.





と試料間の空隙が増すようになるので、反磁界の強さが増大 し、それによる影響が現れたものと考えられる。

次いで,端部補償コイルによる反磁界補正を行いつつ,自動 磁気測定を行った.

Fig. 5 は先と同様に,各寸法の試料について測定した磁化 およびヒステリシス曲線を示す.Fig. 3 の各結果に比べてい ずれも磁化およびヒステリシス曲線が立ち上がって,電磁純鉄 特有の角型性が現れ,試料の直径による差が見られなくなって いる.補正によってはほぼ同様の形³にまで回復している.

Fig. 6 はこの状態における試料の長さ方向の磁束密度の分 布について測定を行った結果について示す.磁界の強さ1 Oe に対しては若干のばらつきも見られるが,どの磁界の強さに対 しても,試料の直径による磁束密度の差が明らかに消失してい る.また,試料中央部と端部の間の差もなくなり,全体にわ たって磁束密度の値が均一になっていることが認められる.

これらの結果から、明らかに本装置と回路とによって、反磁 界を補正した全磁化およびヒステリシス曲線の自動測定が可能 になっていることが認められる.

3.2 測定時間による保磁力値の変化について

ここで、本継鉄法による棒状試料に関し、ヒステリシス曲線 を一周するための測定時間による保磁力値の変化について調べ る実験を行うこととした.なおこの場合励磁電流の時間変化は 等速であるため、磁界の強さの変化は実質的に三角波³⁰になっ ている.

Fig. 7 は 7.8~71.6 秒の間の各測定時間によるヒステリシス 曲線を測定し,その変化の状況についてまとめた結果である. 直径 7.5 mm の棒状試料について,反磁界補正前および後の場 合について示している.このように直径 5~10 mm のいずれ の場合についても,先の研究³において見られたと同様に,測 定時間が短くなるに伴い,明らかに見かけ上保磁力の値(以下



Fig. 3 Magnetizing and hysteresis curves before compensation for the demagnetization.





日本応用磁気学会誌 Vol. 22, No. 4-2, 1998

H_{cap})が大きくなる変化が認められる.反磁界補正前と後の場合について比べてみると,いずれも全体として,反磁界補正後 ヒステリシス曲線の傾斜が小さくなっているほか,*H_{cap}がや* や大きくなっているような傾向が認められる.

Fig. 8 はこのようなヒステリシス曲線から H_{cap} と磁気測定 時間との関係について求めた結果である.反磁界補正前と後の 場合について示している. どちらも測定時間が長くなるに従っ て全体的に H_{cap} は小さくなっており,約80 秒を超えるところ でそれぞれやや安定した保磁力の値となっているようである. 反磁界補正の前後では後においてやや H_{cap} が大きくなる傾向 が見られる. また試料の直径が太くなるほど H_{cap} は大きく なっている.

Fig. 9 は先の研究^{51,69}において行った考察と同様に、測定時間の逆数を求めて H_{cap} との関係について求めた結果である. 各試料について反磁界補正前および後の結果について示しているが、測定時間の逆数が小さくなるに従って、いずれの場合においても H_{cap} が小さくなっている.ここで、測定時間の逆数 が零になるところについて注目してみると、反磁界補正後において、直径の大きさによらず、明らかに一点に収斂していることが認められる.これが材料本来の保磁力になるということができるように思われる.反磁界補正前では特に収斂が見られない.

以上の磁気測定時間による H_{cap} の変化について考察するため、先の環状試料における場合に倣って、磁化の遅れ⁵¹による 磁束密度の変化について測定した。

Fig. 10 は各測定時間ごとに、それぞれヒステリシス曲線を 描く途中、保磁力点において磁界の変化を止め、その時に生ず る磁束密度の時間変化の測定を行った結果である。直径 7.5 mmの試料における反磁界補正前および後の場合について示 しているが、いずれも、磁束密度 B_nの変化はその最大値 B₀



Fig. 5 Magnetizing and hysteresis curves after compensation for the demagnetization.



Fig. 6 Distribution of the magnetic flux density after compensation for the demagnetization.

に対し,時間 t としたときの緩和時間 τ による関係式

 $B_n = B_0 \{l - \exp(-t/\tau)\}$

による計算式と良い一致を示している。測定時間が短いほど、 明らかに大きい磁化の遅れが起こっている。

Fig. 11 はこの磁束密度の遅れの最大値 B₀(以下磁束密度の 遅れ)と測定時間との関係について示している。測定時間が長 くなるほど磁束密度の遅れは小さくなっており、また、いずれ も試料の直径が小さくなるほど小さくなっている。また反磁界 補正後、全体として磁束密度の遅れが長時間側において大きく なっていることが認められる。

Fig. 12 はそれぞれ測定した H_{cap} について、測定時間による その変化の幅 ΔH_c との比を求め、磁束密度の遅れとの関係と してまとめた結果である。各試料の直径に対し、反磁界補正前 および後の場合について比較して示している。いずれも磁束密 度の遅れが大きいほど H_{cap} の変動幅が大きくなっている。こ こで、反磁界補正後において、磁束密度の遅れと H_{cap} 変動幅



Fig. 7 Change in the hysteresis curves with the measurement time before and after compensation for the demagnetization.



Fig. 8 Relation of the apparent coercive force and the measurement before and after compensation for the demagnetization.



Fig. 9 Relation of the apparent coercive force and the reverse of the measurement time before and after compensation for the demagnetization.



Fig. 10 Delay of the magnetization with the keeping time before and after compensation for the demagnetization.



Fig. 11 Relation between the dalay of the magnetic flux density and the measurement time before and after compensation for the demagnetization.



Fig. 12 Relation between the changing ratio of the apparent coercive force and the delay of magnetic flux density before and after compensation for the demagnetization.

との先の研究⁶におけると同様に、ほぼ直線的な関係になって いることが認められる、このように、反磁界補正後における磁 気測定時間による見かけ上の保磁力は明らかに磁化の遅れ現象 に依存して変化しているということができる。

4. む す び

継鉄法による軟質磁性材料棒状試料について,反磁界補正を 行いつつ自動的に磁気測定する方法について研究し,その実用 性について検討した.

1) 棒状試料の中央部サーチコイルと端部サーチコイルとに よる磁束密度の差を検出し、その差が零となるように端部補償 コイルに励磁電流を流すことによって反磁界補正を行いつつ、 全磁化およびヒステリシス曲線を自動測定する装置と回路を試 作した。

2) これについて,直径 5~10 mm,長さ 250 mm の電磁 純鉄棒状試料を用いて実験を行い,環状試料におけると同様の 磁化およびヒステリシス曲線の自動測定が可能であることを確 認した.この方法は一般に軟質磁性材料棒状試料のほか帯状試 料についても適用することができるものと考えられる.

3) この測定においても、環状試料におけると同様に磁気測 定時間による保磁力値の変動が見られ、測定時間が短くなるほ ど、また試料の直径が大きくなるほど見かけ上の保磁力が大き くなっている。

4) 磁気測定時間によるこの保磁力値の変化は磁化の遅れ現 象に依存している.

この継鉄法自動磁気測定が広く工業的に利用されることを期 待している.

謝辞本研究は大同工業大学大学院工学研究科電気電子工 学専攻の学生であった永江秀樹君(現デンソー(株))および金 沢洋忠君(現鈴鹿富士ゼロックス(株))により端緒が開かれた もので、ここに記して厚く感謝申し上げる.また、ご指導ご協 力を頂いた大同工業大学電気工学科の尾畑智光氏に深く感謝申 し上げる.

文 献

- 1) 例えば, 電気学会大学講座電気材料改訂版, p. 129 (1995).
- 2) 加藤, 尾畑, 永江, 水野: 電気製鋼, 63, 259 (1992).
- 加藤,金沢,永江,水野:日本応用磁気学会誌,17,205 (1993).
- 4) 加藤,水野,金沢:電気製鋼,66,251 (1995).
- 5) 加藤, 窪野: 大同工業大学紀要, 31, 65 (1995); 32, 59 (1996).
- 加藤,窪野,鷹森,大竹,草加:粉体および粉末冶金,43, 1007 (1996).

1997年10月28日受理, 1998年2月2日採録