

巻線応力が環状試料の直流磁気特性に及ぼす影響

Effect of Winding Stress on DC Magnetic Properties of Ring Sample

馬場康壽

神奈川県立産業技術総合研究所, 神奈川県海老名市下今泉 705-1 (〒243-0435)

Y.Baba

Kanagawa Institute of Industrial Science and Technology, 705-1 Shimo-imaizumi Ebina, Kanagawa 243-0435, Japan

Ring samples are often used for measuring the DC magnetic characteristics of magnetic material. In this measuring method, stress and strain are induced into a specimen by winding coils on the ring samples. The magnetic characteristics of the samples might be affected by the inverse-magnetostriction phenomenon, which is caused by compressive stress on the ring samples. Hence, by using ring sample of a material with a positive magnetostriction constant, DC magnetic characteristics were measured both with and without the polymer case in order to prevent winding stress. As a result, it was confirmed that the magnetic characteristics of the ring samples were changed by the inverse-magnetostrictive effect induced by compressive stress.

Key words: DC magnetic measurement, ring samples, inverse magnetostriction phenomenon, winding stress

1. はじめに

軟磁性材料には数多くの種類があり、モータ、発電機や電磁弁などの鉄心や磁気回路を構成する材料として、電機工業分野、電子機器分野や電子部品分野など様々な分野で広く使用されている。最近では、環境負荷低減のために再生可能エネルギーである風力発電の導入や、自動車においては動力源が内燃機関だけのものから電気自動車やハイブリッド車のようにモータを使用するものへ転換を進めている国が増え、モータや発電機の需要は高まっている。そして、これらの機器や部品には省電力化、高性能化及び軽量・小型化が求められている。中でも日本国内におけるモータの電力消費量は、電力10社の年間販売電力量と自家発電の合計に対して占める割合が55%程度と推測されており、世界的に関心が寄せられている地球温暖化防止のためにも高効率化による省電力化が強く求められている¹⁾。これを解決するための手段として、用途に最適な磁性材料の選定や高性能な磁性材料の新開発および磁場解析による機器内部の磁気回路の最適化などがあるが、そのためには材料の磁気特性を把握する必要がある。

磁性材料の直流磁気特性を測定する方法の一つとして、IEC国際規格やJIS規格で規定されている環状試料を用いた積分方式の磁気測定方法がある²⁾⁻⁴⁾。しかし、この方法は環状試料に励磁用の一次コイルと誘起電圧を測定するための二次コイル及び絶縁用のテープを巻きつけるので、試料を締め付ける圧縮応力が多少なりとも発生する。そのため、この応力によって逆磁歪現象が起こる可能性があり、測定結果が材料本来の磁気特性と異なることが懸念される。環状試料の磁気特性に及ぼす応力の影響については、PCパーマロイの環状試料に対して高さ方向の一方方向だけに圧縮応力を印加させた結果、特性が磁化困難に変化したという報告⁵⁾がある。

そこで、本研究では環状試料を用いた積分方式の直流磁気測定において、手巻き程度の強さの巻線応力が磁気特性に及ぼす影響について調べたので報告する。

2. 測定方法

環状試料の材料に正磁歪の大きいパーメンジュール (FeCoV)を

用いて、環状には残留歪が比較的少ない放電ワイヤーカットで加工し、その後850℃の水素雰囲気中で3時間の熱処理を行って加工歪を除去した。巻線応力が磁化特性に及ぼす影響を調べるために、試料を環状の樹脂ケースに入れてから巻線をして試料に圧縮応力を与えない場合と、試料にコイルと絶縁用テープを直接巻いて圧縮応力を与えた場合の磁化特性を測定して両者を比較した。ここで、巻線応力の影響が顕著になるように、試料に直接手巻きする時は意図的に強く巻き込んだ。測定には同一の試料を用いて、先に樹脂ケースに入れた状態で測定し、次にケースから試料を取り出して直接巻線した状態を測定した。環状試料は外径45mm、内径37.5mm、高さ3mm、樹脂ケースは外径48mm、内径34.5mm、高さ6.5mmのものを用いて、絶縁用テープを巻いた後に二次コイルを161ターン巻き、その上から再び絶縁用テープを巻いて、最後に一次コイル50ターンを手巻きした。ここで、コイルと絶縁テープを直接手巻きした環状試料をFig.1に示す。測定には市販の積分方式直流B-H特性測定装置を用いて、最大磁界強度 $H=10\sim 1000$ A/mの範囲で直流B-Hループを測定して諸特性を求めた。ただし、試料をケースに入れたときの測定結果については、二次コイルと試料間の磁束について空隙補償を行った。補償後の磁束密度 B は

$$B = B_0 - \mu_0 H (S_c - S_s) / S_s \quad (1)$$



Fig. 1 Winding coil on ring sample without polymer case (photo).

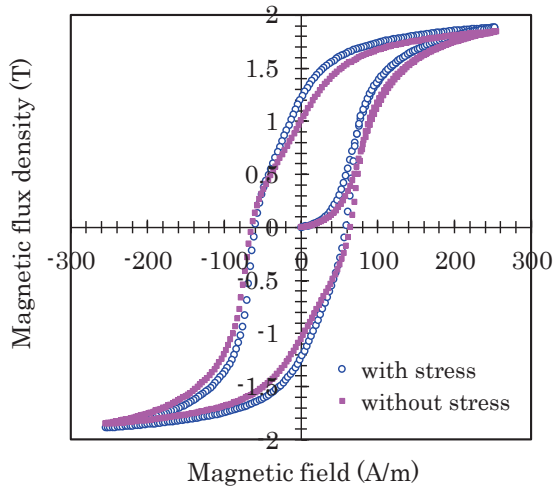


Fig. 2 B-H loops (○) with and (■) without winding stress.

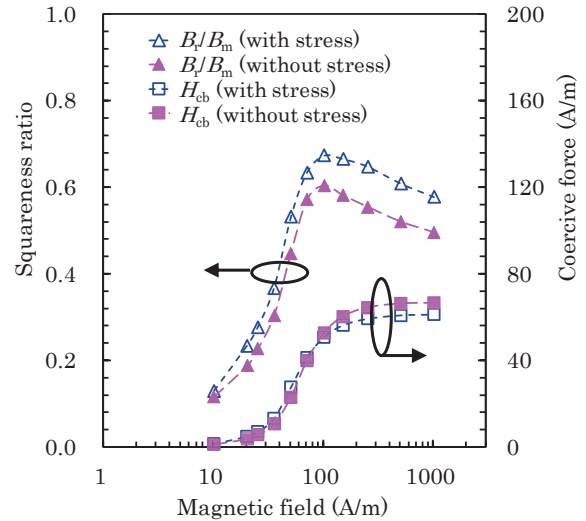


Fig. 4 Characteristics of squareness ratio (B_r/B_m) and coercive force (H_{cb}) with varied magnetic fields.

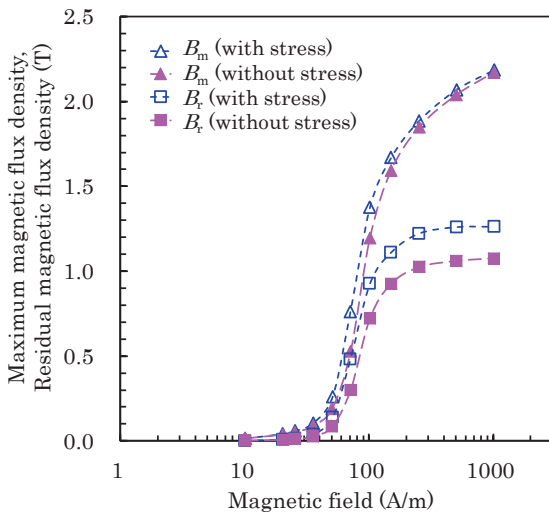


Fig. 3 Characteristics of maximum magnetic flux density (B_m) and residual magnetic flux density (B_r) with varied magnetic fields.

で求めた。ここで、 B_0 は二次コイルで検出した空隙を含む磁束密度、 S_a は環状試料の断面積、 S_c はケースの断面積である。

3. 結果と考察

磁界強度 $H=250$ A/m の時の B-H 曲線を Fig.2 に示す。コイルを直接巻いて環状試料に巻線応力を与えたときは、初磁化曲線の傾きと最大磁束密度 B_m が大きくなり B-H 曲線は磁化容易に変化し、残留磁束密度 B_r も大きくなった。ここで、環状試料の磁化方向は円周方向であり、コイルや絶縁テープによる締め付ける力は環状試料に対して上下及び径方向に加わるので、環状試料の円周を伸ばすように作用すると考えられる。つまり、巻線応力によって正磁歪材料を磁化方向に引っ張った状態に近くなるので、この結果は逆磁歪現象に合致している。これに対して、前述した環状試料の高さ方向だけに圧縮応力を与えた実験では、加圧器具の外

側から巻線をして試料に巻線応力が加わらないようにしているので、試料を制約の無い径方向に押し出すように作用する。この作用は内径方向と外径方向に引っ張った状態に近く、これが磁化方向と直交方向であるため磁化困難に変化させるように働く。この時の円周方向成分としては、外径側と内径側の膨らみは同程度なので中間点における円周の長さには変化が無く、外径側では引張りに作用して磁化容易に、内径側では圧縮に作用して磁化困難に働く。その結果、試料全体としてはこれらの要因の総和によって磁化困難に変化したと思われる。

測定磁界強度を変化させたときの B_m と B_r の巻線応力による影響を Fig.3 に、角形比 (B_r/B_m) と保磁力 H_{cb} の巻線応力による影響を Fig.4 に示す。これらの磁気特性値は逆磁歪効果によって全ての磁界強度において変化した。

巻線応力を与えたことによって生じた各磁気特性値の誤差と測定磁界強度との関係を Fig.5 に示す。各特性値の誤差率 E_r (%) は

$$E_r = \left(\frac{[\text{応力有り}] - [\text{応力無し}]}{[\text{応力無し}]} \right) \times 100 \quad (2)$$

で求めた。ここで、応力がある場合と無い場合の磁気特性値の差について、大小関係が分かるように絶対値をとっていない。最大磁束密度 B_m の誤差率は測定磁界を強くすると減少して $H=1000$ A/m のときは 0.6 % であった。これは、測定磁界を強くしていくと巻線応力の有無に関係なく磁化が飽和に近づいて B_m の差が小さくなるからである。したがって、巻線応力が無い状態で磁化が飽和に近くなるような強さの磁界で測定した場合は、 B_m については巻線応力の影響による誤差は無視できる。測定磁界強度が 250 A/m 以上のときは残留磁束密度 B_r と保磁力 H_{cb} の誤差率の変化が小さくなった。これは、Fig.3 と Fig.4 から分かるように測定磁界が強い時は、巻線応力の有無に関係なく磁界強度の増加に伴う B_r と H_{cb} の増加が少なくなるからである。また、測定磁界強度が 100 A/m 以下のときは巻線応力の影響を強く受けて、全ての磁気特性値の誤差率は非常に大きくなる極大点を示した。さらに、 H_{cb}

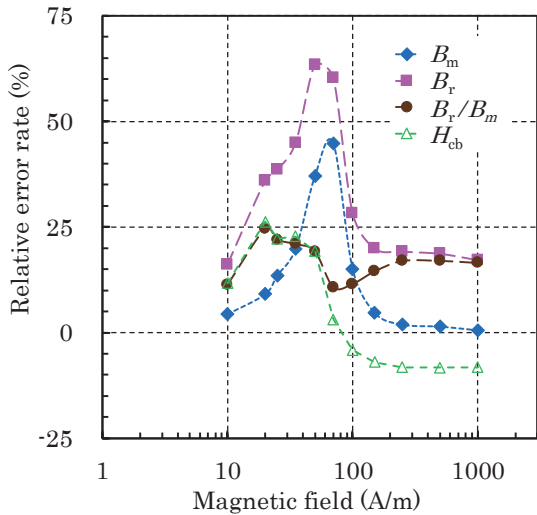


Fig. 5 Characteristics of relative error rate of maximum magnetic flux density (B_m), residual magnetic flux density (B_r), squareness ratio (B_r/B_m), and coercive force (H_{cb}) with varied magnetic fields.

の誤差率は磁界強度が 70 A/m 以下では正の値を示し、100 A/m 以上では負の値を示した。つまり、弱磁界領域では巻線応力の影響で保磁力が大きくなっている。ここで、弱磁界領域において磁界強度を変化させたときの B-H 曲線の変化を Fig.6 に示す。この領域では磁界強度の少しの増加で B_m が非常に大きくなり、それに伴って B_r と H_{cb} も大きく増加しており、 B_m の増大が H_{cb} の変化に大きく影響している様子が分かる。

そこで、磁束密度は磁性体の磁化成分の他にも磁性体内の磁界成分を含んでいることから、純粋に試料が磁化された量である磁気分極 J と保磁力 H_{cj} の関係について調べた。測定した磁束密度 B から磁気分極 J を算出し、巻線応力の有無において測定磁界強度毎に J-H 曲線を求めて各磁気特性値を導出した。測定磁界強度の増加に伴う保磁力 H_{cj} の増加量 ΔH_{cj} と最大磁気分極の増加量 ΔJ_m の比 ($\Delta H_{cj}/\Delta J_m$)、及び (2) 式で求めた H_{cj} の誤差率 $E_r(H_{cj})$ について測定磁界強度を変化させた時の様子を Fig.7 に示す。測定磁界強度が弱い領域ではこの増加量の比 ($\Delta H_{cj}/\Delta J_m$) が非常に大きくなり、極大点を持つ $E_r(H_{cj})$ と同様の傾向を示し、強磁界領域では $\Delta H_{cj}/\Delta J_m$ が小さくなった。このことから、弱磁界領域では磁気分極の少しの増加で保磁力が非常に大きくなり、強磁界領域では磁気分極が増加しても保磁力の増加は少ないと言える。したがって、弱磁界領域において同じ磁界強度で励磁した場合は、巻線応力を与えると逆磁歪効果によって巻線応力を与えない時よりも強く磁化されるので、保磁力が巻線応力を与えないときよりも大きくなる現象が起こる。これに対して強磁界領域において同じ磁界強度で励磁した場合は、応力の有無による磁化量の差が小さくなって、この保磁力の増加作用も小さくなるため、巻線応力が磁壁の移動を容易にして保磁力を減少させる作用の方が勝り、巻線応力が有るときの方が保磁力は小さくなったと考えられる。

最大磁気分極 J_m を変化させたときの保磁力 H_{cj} と残留磁気分極 J_r を Fig.8 に示す。試料を励磁した時の最大磁気分極 J_m が 0.26 T

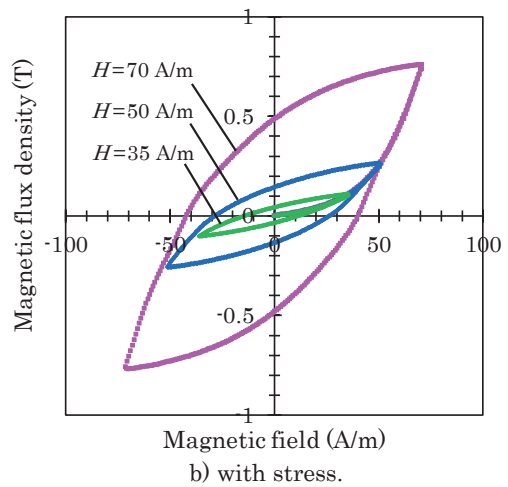
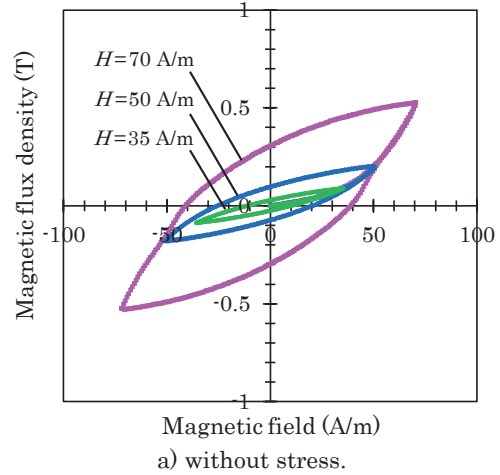


Fig. 6 B-H loops with varied magnetic fields.

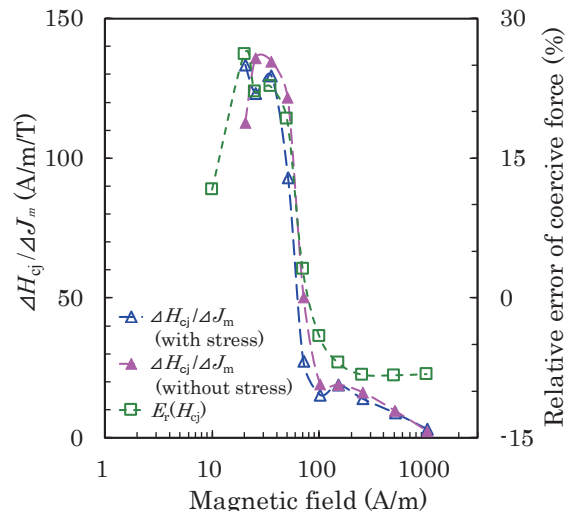
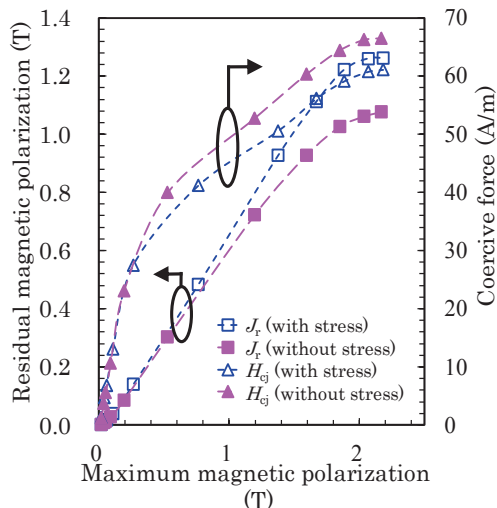
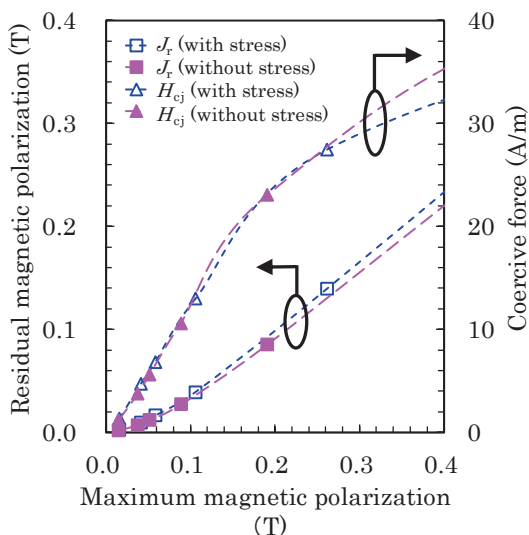


Fig. 7 Characteristics of ratio of increase in coercive force and increase in magnetic polarization ($\Delta H_{cj}/\Delta J_m$) and relative error rate of coercive force [$E_r(H_{cj})$], with varied magnetic fields.



a) Maximum magnetic polarization upto 2.2 (T).



b) Expansion of region with lower maximum magnetic polarization.

Fig. 8 Characteristics of residual magnetic polarization (J_r) and coercive force (H_{cj}) with varied maximum magnetic polarization.

以下の場合では H_{cj} の二つの特性は重なり、 J_m が強いときは巻線応力が有る場合の方が H_{cj} は小さくなった。これに対して、残留磁気分極 J_r は J_m が弱い領域でも巻線応力が有る場合の方が僅かに大きくなる傾向を示し、 J_m が強い領域ではその傾向が顕著になった。

励磁された試料の最大磁気分極 J_m を変化させた時の J-H 曲線の面積の特性を Fig.9 に示す。巻線応力が有る場合と無い場合の特性は J_m が弱い領域から強い領域までの全域で差異は非常に小さかった。したがって、試料を同じ磁気分極の強さに励磁したときは、巻線応力の有無に関係なく J-H 曲線の面積はほぼ同じであるため、巻線応力によるヒステリシス損失への影響は非常に小さいと言える。

4. まとめ

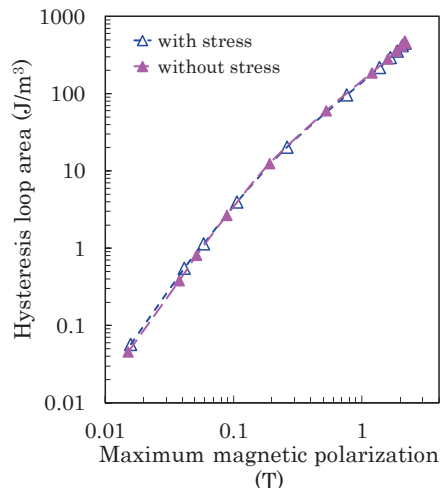


Fig. 9 Characteristics of hysteresis loop area with varied maximum magnetic polarization.

環状試料を用いた積分方式の直流磁気測定方法において、巻線コイルによる圧縮応力が正磁歪材料の磁気特性に与える影響について調べた。その結果、磁化特性は手巻き程度の巻線応力でも初磁化曲線の傾きは大きくなり磁化容易に変化し、これに伴って最大磁束密度と残留磁束密度も大きくなった。しかし、保磁力は弱磁界領域で大きくなったのに対して強磁界領域では小さくなった。また、励磁による磁化変化率が大きい弱磁界領域において、これらの磁気特性値は巻線応力により非常に大きく変化した。これに対してヒステリシス損失には大きな差異は見られなかった。

今後として巻線応力による環状試料の交流磁気特性への影響について調べる予定である。直流磁化時ではヒステリシス損に影響が小さかったことから、特に交流磁化時の損失への影響について測定する。また、環状試料や環状に隙間を形成した試料に対して、高さ方向の一方向に圧縮応力を与えた場合の鉄損特性の変化について報告^{6)~7)}されており、巻線応力時の特性変化との違いについても検討する。

References

- 1) http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/general/more/pdf/h21_houkokusho.pdf, p.28 (As of December 1 2017).
- 2) Magnetic materials, Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel, *IEC 60404-4* ed2.2 (in English), p.9 (The IEC Central Office, Geneva, 1995)
- 3) Soft magnetic irons, *JIS C 2504* (in Japanese), p.5 (Japanese Standards association, Tokyo, 2000)
- 4) Nickel iron soft magnetic metallic materials, *JIS C 2531* (in Japanese), p.9 (Japanese Standards association, Tokyo, 1999)
- 5) M.Mimura, R.Nakamichi, T.Sasayama, M.Nakano and N.Takahashi: *The 2013 Annual Meeting Record Institute of Electrical Engineers of Japan*, **2**, 179
- 6) M.Kawabe, T.Nomiyama, A.Shiozaki, M.Mimura, M.Nakano and N.Takahashi: *IEEE Tran.Magn.*, **48**, 3462 (2012)
- 7) M.Kawabe, T.Nomiyama, A.Shiozaki, T.Morohoshi and T.Sasayama: *The 2014 Annual Meeting Record Institute of Electrical Engineers of Japan*, **2**, 170

2018年10月12日受理, 2019年1月9日採録