

小型磁性材料の測定技術の開発(第1報)

佐竹幸栄・下地広泰・沓掛暁史・城門由人・池田哲
電磁力担当

Development of measurement technology for small magnetic materials (1st Report)

Yukiharu SATAKE・Hiroyasu SHIMOJI・Akifumi KUTSUKAKE・Yukihito・KIDO・Tetsu IKEDA
Electromagnetic Section

要 旨

当センターでは、モータやトランスなどの電気機器の高効率高出力化のため必要な磁性材料の磁気特性測定装置を開発してきたが、いずれも規格サイズに準拠した試料形状での測定であり、モータィースや線形状といった規格サイズ外には対応できていなかった。本研究では規格サイズ以外の小型磁性材料として線形材料を選択し、その測定法としてヨークのない開磁路測定と同軸Hコイル法を組み合わせた測定法を提案し、この測定法の可能性を測定再現性の観点から検討した。初期実験では同軸Hコイルで測定した誘導起電力の安定性に課題があることがわかり、Hコイル引き出し線の巻き方、Hコイル引き出し線の設置位置、データ通信接合部分を変更した結果、相対標準偏差で $H_{max}1.05\%$ 、比透磁率 1.06% 、鉄損 1.78% まで測定再現性を向上できたので報告する。

1. はじめに

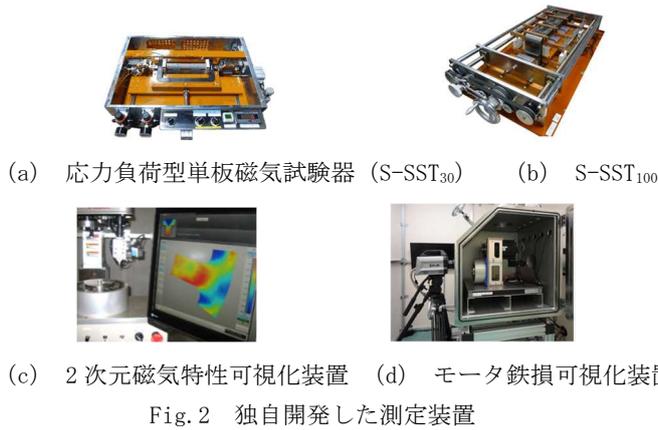
当センターには、Fig.1に示すIECやJISで規格されたエプスタイン試験器や単板磁気試験器などの標準測定器から、Fig.2に示す独自開発した応力負荷型単板磁気試験器、2次元磁気特性可視化装置、モータ鉄損可視化装置といった高精度測定装置など多種多様に存在する。しかし、自動車メーカーなどによっては、標準試料サイズと異なるサイズ、形状、例としてモータィース部分などの小型磁性材料を測定したいというニーズがある。そのため、小型磁性材料の磁気特性を正確に測定するため同軸Hコイル法を用いた開磁路測定法を開発した。

測定対象とする小型磁性材料は、断面の大きさが異なる長さ100mmサイズの線形材料である。Fig.3に線形材料を示す。同軸Hコイルは通常のHコイルと同様に線形材料に近づけるように円筒状の形にコイルを2層巻いて作っています。同軸Hコイルは、測定する線形材料に合わせて円筒の形を変える。Fig.4に同軸Hコイルの断面図を示す。Fig.5に開磁路と閉磁路を示す。開磁路測定法の問題点は、閉磁路ではヨークで単板を挟み、磁路を形成し測定する。線形材料の磁気特性を測定する場合は励磁棒を開磁路に行っている。開磁路とは、閉磁路と違い、ヨークがない状態である。ヨークの有無によって、まず発生した磁界は、ヨークがある場合では全て戻ってくるが、ない場合は外に出てしまう。この磁束を漏れ磁束と

いう。また発生した磁界によって、磁化された材料は内部で外部磁界の向きと逆向きに磁界を発生させる、この磁界を反磁界といい、反磁界は材料の形状に影響し、ヨークがある場合は、リング形状と同じになり、反磁界の影響を無視できるが、ない場合は反磁界影響を受ける。そして現状の課題としては、測定再現性が低いという問題がある。本稿では、その課題の原因調査を行い、開磁路測定法の測定再現性を確立させたのでそれについて報告する。



Fig.1 標準測定器



2. 開磁路測定法の課題と原因調査

2.1 現状の課題

Fig. 6 開磁路の測定システムを示す。アナログデジタル変換器 A/D 変換器, D/A 変換器にはブライテック社の Bcon-01, パワーアンプには (株) エヌエフ回路設計ブロック社のバイポーラ電源 BP4610 を使用する。使用する測定試料は□0.9 を 800°C に熱処理した線形材料で、同軸 H コイルに使用する円筒の大きさは外径 $\phi 3$, 内径 $\phi 2$ であり、コイルの巻き数は 2 層とも 60 回である。同軸 H コイル法では、1 層分の H コイル 1 を B コイルとして使用する。測定する前に治具に同軸 H コイルを取り付け、測定試料の中心が取り付けられた同軸 H コイルの中心と重なるように固定する。そして、試料の中心と同軸 H コイルの中心が励磁コイルの中心部分になるよう治具を設置する。測定法は、PC から Bcon-01 で任意波形を発生させ、DA 信号を送る。アナログ変換後パワーアンプによって信号を増幅させる。その信号により励磁コイルに電流を流し、磁界を発生させる。発生した磁界が試料を励磁し、この磁界が変化することでファラデーの電磁誘導の法則により試料に発生する誘導起電力を B コイルで測定する。同様に発生する誘導起電力を H コイル 2 と H コイル 1 で測定し、それぞれ測定した誘導起電力の差を AD 変換後、磁界強度に変換する。B コイルで測定した誘導起電力は AD 変換後、磁束密度に変換し、所定の磁束密度が設定した振幅率、ひずみ率を満足する正弦波波形に収束するまで、制御を行う。測定条件は磁束密度 $B=0.4\sim 1.5\text{T}$ とし、収束条件は振幅率 0.1%, 歪率 0.1% として測定した。この測定を 5 回繰り返した。1 回測定するたびに治具を取り出し、測定試料を取り外しまた設置し直している。この 5 回分の測定の相対標準偏差を 3 つのパラメータ H_{\max} , 比透磁率, 鉄損で Fig. 7 に示す。それぞれの相対標準偏差 σ の平均値は、 $H_{\max} 30.8\%$, 比透磁率 35.3%, 鉄損 16.7% となり、測定再現性が低いことが分かった。

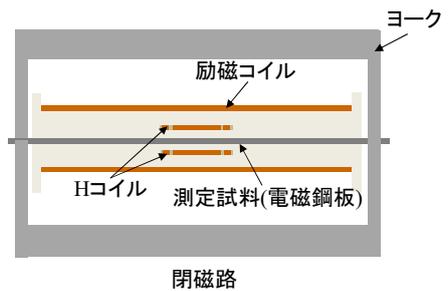
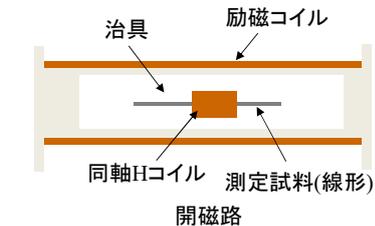
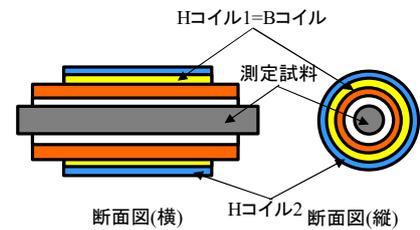
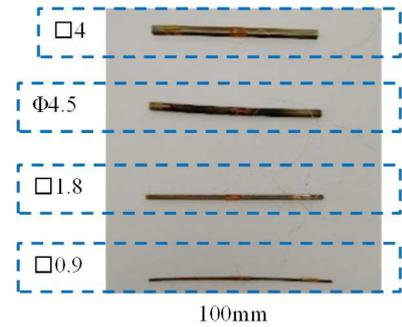
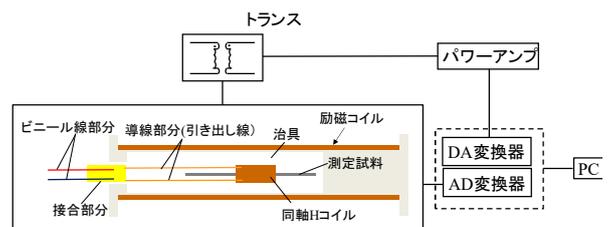


Fig. 5 開磁路と閉磁路



2.2 課題の原因調査

Fig. 7の結果から同軸Hコイルで測定した誘導起電力が不安定であると分かり、その原因は測定システムか測定者の設置作業である。測定システムの問題としては、測定した誘導起電力の差分がBcon-01のAD分解能より小さい可能性があるため、調査を行った。Bcon-01のAD分解能は $3.1 \times 10^{-4} \text{V/bit}$ である。Bcon-01はAD変換する前に利得10000倍している。10000倍した場合のHコイルで測定した誘導起電力の差分はBcon-01のAD分解能より100倍近く大きかったため、測定システムに問題はないと分かった。次に設置作業に問題があるか調査を行ったところ、設置作業をするたびに測定結果が変化し、特にFig. 6に示す同軸Hコイルの導線部分(引き出し線部分)の設置場所を変えただけで測定結果が変化することが分かった。Fig. 8に引き出し線の設置場所を3パターン変えた時の磁界強度のグラフを示す。Fig. 8から引き出し線の設置場所によって同軸Hコイルで測定した誘導起電力の差分が変化し、磁界強度の大きさと位相が変化することが分かった。つまり、Hコイル1とHコイル2で測定した誘導起電力が変化していた。原因として同軸Hコイルで測定した誘導起電力がそもそも小さいため、同軸Hコイル以外で発生した誘導起電力の影響を受け変化したと考えた。同軸Hコイル以外で誘導起電力を発生する箇所としては、引き出し線と引き出し線とビニール線の接合部分である。もしくは、ただ引き出し線の設置場所を変えることが影響している。よって、測定再現性が低い原因は、引き出し線と接合部分で発生する誘導起電力、引き出し線の設置場所であると考えた。

3. 測定再現性への影響調査結果

2.2で考えた測定再現性が低い原因として挙げた引き出し線と接合部分で発生する誘導起電力、引き出し線の設置場所についての影響を調査した。引き出し線で発生する誘導起電力と設置場所について調査するための同軸Hコイルを3つ作成した。Fig. 9に調査用の同軸Hコイルを示す。3つとも接合部分で発生する誘導起電力の影響をなくすため引き出し線の長さを500mmにして、接合部分を励磁コイル外に出した。また、使用する円筒の大きさは外径 $\phi 3$ 、内径 $\phi 2$ であり、コイルは1層巻き、巻き数は60回である。3つの異なる点は引き出し線のより方である。それぞれ密より、粗より、よりなしとした。この3つのコイルを使用して引き出し線の設置場所による粗密の影響調査を行った。Fig. 10に影響調査方法の引き出し線の設置状態を示す。調査方法としては、測定試料は使用せずFig. 10から1つのコイルにつき引き出し線の設置場所を6パターン変え、1パターンごとに測定を行う。

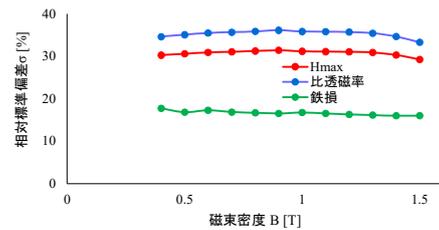
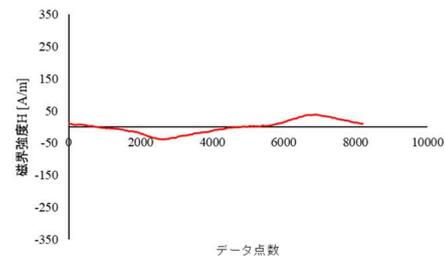
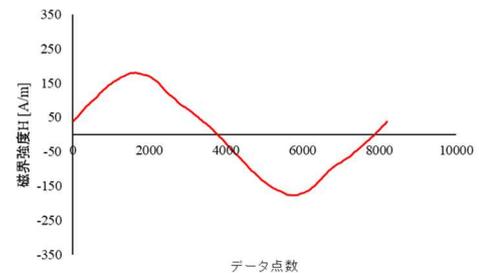


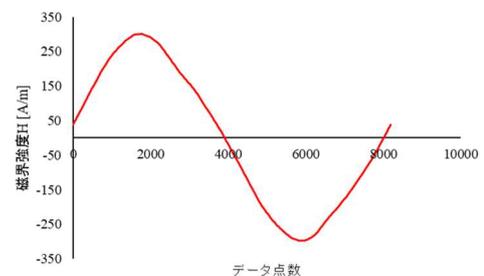
Fig. 7 相対標準偏差 σ



(a) 設置場所 1



(b) 設置場所 2



(c) 設置場所 3

Fig. 8 磁界強度

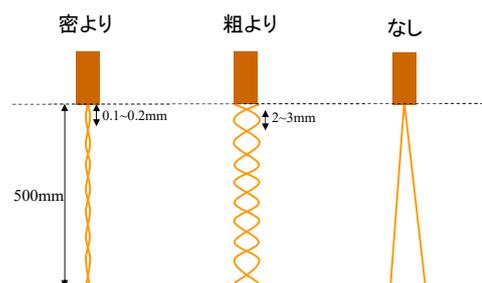


Fig. 9 調査用同軸Hコイル

最後に6パターン分の測定した誘導起電力に対する相対標準偏差を算出する。引き出し線のより方が異なる3つのコイルの相対標準偏差を比較し、相対標準偏差に差があれば引き出し線で発生する誘導起電力の影響となり、差がなければ引き出し線の設置場所と確認できる。Fig. 11にこの調査の測定システムを示す。パワーアンプにはバイポーラ電源 BP4610 を使用する。オシロスコープはTektronix TDS 2024B を使用する。差動アンプには、(株) エヌエフ回路設計ブロック社のMS-523を使用する。測定法は、パワーアンプのCCモードよりトランスを介して任意の電流を励磁コイルに流し、磁界を発生させる。この磁界が変化することで真空中に発生する誘導起電力を同軸Hコイルで測定する。測定した誘導起電力を差動用アンプで利得1000倍にした波形をオシロスコープで平均化し、確認する。Fig. 12に設置場所6パターン分の密よりの同軸Hコイルで測定した誘導起電力を示す。設置場所6パターンの波形は同じ大きさで同じ位相であると分かる。粗より、よりなしも波形では同様であった。Fig. 12の測定結果から実効値を使用し、相対標準偏差を算出する。Fig. 13に設置場所6パターン分の相対標準偏差を示す。Fig. 13から相対標準偏差は、密より0.81%、粗より0.43%、よりなし4.80%となった。この結果から引き出し線のより方によって差が確認できた。よって、引き出し線の設置場所における影響は粗密で発生する誘導起電力となり、測定再現性に引き出し線で発生する誘導起電力が影響すると分かった。この結果から引き出し線のより方を改善した同軸Hコイルを作成した。密よりと粗よりでは、相対標準偏差の差は誤差と考え、引き出し線のより方は密よりにした。円筒の大きさは外径 $\phi 3$ 、内径 $\phi 2$ であり、コイルは2層巻きで、巻き数は60回である。この新たに作成したコイルでFig. 6に示した測定システムを使用し、測定試料も同じ $\square 0.9$ を 800°C に熱処理した線形材料を測定した。測定法、測定条件、収束条件も2.1で記述したのと同じである。この測定も5回繰り返した。5回分の測定の相対標準偏差を3つのパラメータHmax、比透磁率、鉄損で算出した。Fig. 14にそれぞれの相対標準偏差を同軸Hコイルのより方を改善前と改善後で比較した結果を示す。改善前のHmax、比透磁率、鉄損はFig. 7に示した結果と同じである。改善前のそれぞれの相対標準偏差 σ の平均値は、Hmax30.8%、比透磁率35.3%、鉄損16.7%、改善後は、Hmax1.05%、比透磁率1.06%、鉄損1.78%となり、測定再現性が向上したことが分かった。

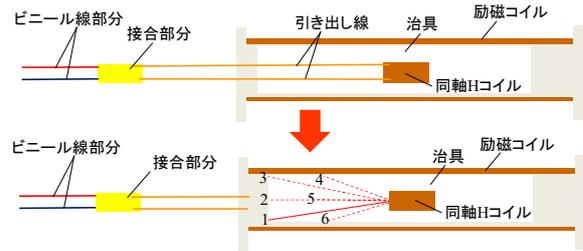


Fig. 10 引き出し線の設置場所6パターン

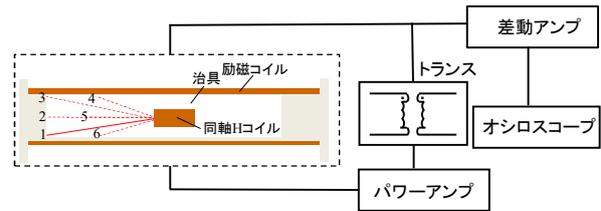


Fig. 11 調査用の測定システム

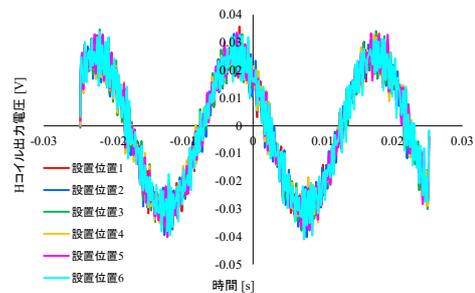


Fig. 12 測定した誘導起電力 (密より)

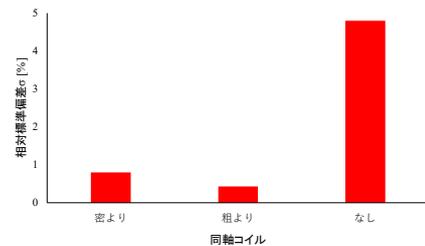
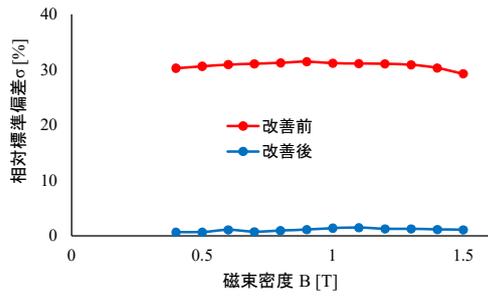
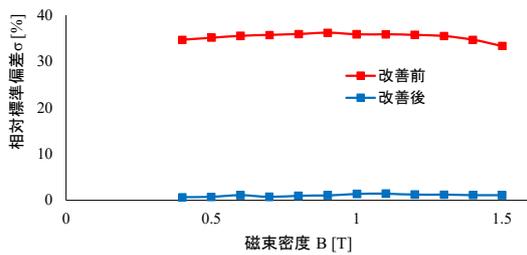


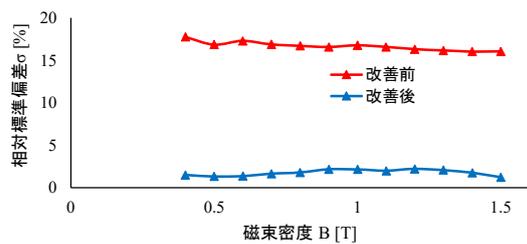
Fig. 13 相対標準偏差 (6パターンの設置場所)



(a) Hmax



(b) 比透磁率



(c) 鉄損

Fig. 14 相対標準偏差 (Hコイルのより方改善前と改善後)

4. まとめ

本稿では、標準試料サイズと異なる小型磁性材料を測定するために、同軸Hコイルによる開磁路測定法を開発した。開磁路測定法の課題として測定再現性が低いことが分かり、その原因調査から引き出し線で発生する誘導起電力の影響であると分かった。同軸Hコイルの引き出し線のより方を改善し、測定再現性が向上したことを明らかにした。今後は、この測定法をモータィース部分などに適用させる。