

薄型磁性シートの透磁率簡易評価法に関する研究

M2014SC014 長屋拓見

指導教員：奥村康行

1 はじめに

薄型磁性シートはフェライトや磁気特性を持った金属を薄く製造し、ポリエチレンテレフタレートフィルムなどで覆ったもので、その薄さから加工を簡単に行うことができ、小型回路やインダクタにも比較的簡単に利用することが出来る。一方で、磁性材料は周波数特性を持ち、企業から公開されているデータだけでは自分の利用する周波数における特性が記載されていないものもある。一般的に、磁性材料における特性である透磁率を測定するには、磁性材料をドーナツ状に加工したトロイダルコアを作製し、このコアに導線を巻きつけたコイルのインダクタンスを測定し、透磁率を計算する必要がある [1]。しかしながら、加工が容易な薄型磁性シートにおいても、ドーナツ型に加工するトロイダルコアの作製は難しく、測定誤差が大きくなる可能性も考えられる [2]。これを受け、薄型磁性シートになるべく加工を加えないで透磁率の検討をする、透磁率の簡易評価法に関する研究を行った。

2 先行研究の課題

先行研究である「EV 充電用無線電力伝送の効率向上についての研究 [3]」では、電気自動車用無線充電に用いる送受電用コイルが車体などの金属から受ける映像電流の影響を減らすための手段として、フェライトシートの利用を考え、任意の周波数におけるフェライトシートの透磁率を評価する方法として研究を行っていた。しかし、この研究で利用していた薄型磁性シートは 1MHz 以降での透磁率しか判明していないもので、透磁率評価法の精度の高さを証明することが出来なかった。また、評価した透磁率も透磁率実部のみで、虚部の評価が行えなかった測定に用いた銅線製方形スパイラルコイルは測定誤差が大きく、再現性の高い測定構成を作ることが出来なかった。これらより、

- 測定する周波数における透磁率が判明している薄型磁性シートを用いての透磁率評価
- 透磁率虚部を含めた複素透磁率の評価
- 再現性が高く、評価精度の高い測定用コイル及び測定構成の実現

を実現することが今回の研究の課題となっている。

3 課題の解決方法

先行研究の際に生じた課題の解決法を以下に示す。

3.1 使用する薄型磁性シート

今回の評価で利用する薄型磁性シートは、東芝材料より販売されているアモルファス磁性シート SS シリーズと DS シリーズ [4] である。この磁性シートの構成を図 1 に示す。アモルファス合金は、液状の金属を急速冷凍して取り出したものであり、結晶磁気異方性 [5] を持たない

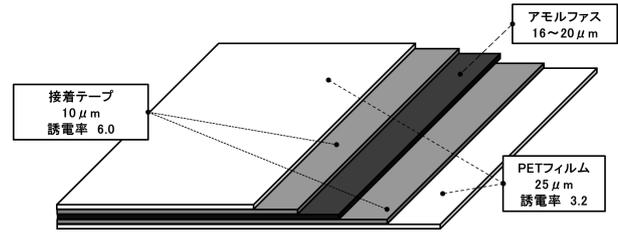


図 1 アモルファス磁性シートの構成 [4]

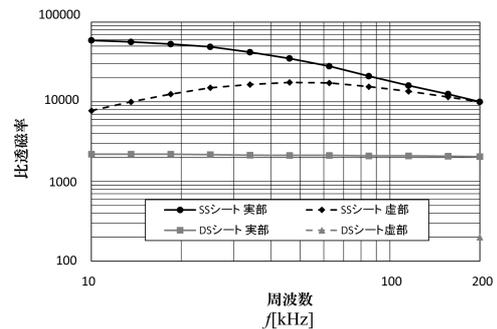


図 2 アモルファス磁性シートの周波数特性 [4]

ため、本来の金属よりも高い磁気特性を持っている。この磁性シートは 10kHz から複素透磁率の周波数特性が公開されている。アモルファス磁性シートの複素透磁率の周波数特性を図 2 に示す。SS シリーズは高透磁率、高損失で、10kHz で比透磁率実部が 60000 という非常に大きな透磁率を持っている。一方で DS シリーズは低透磁率、低損失で、10kHz から 200kHz で透磁率実部が 2000 でほぼ一定となっている。また、このアモルファス磁性シートは厚さの測定法により、磁性層の厚さに $18 \pm 2 \mu\text{m}$ の誤差がある。今回はこの薄型磁性シートの 10kHz ~ 200kHz の複素透磁率を評価し、カタログのデータと比較する。

3.2 OPTFEKO の利用

今回の透磁率評価には先行研究と同様に電磁解析シミュレータ FEKO を利用するが、FEKO に搭載されている機能である OPTFEKO を用いて複素透磁率を評価する。OPTFEKO は滑降シプレックス法と呼ばれる解析法を用いた解析機能であり、多くの数値に関連する変数を取り扱うのに優れている。今回は磁性シートの近傍に設置したコイルのインダクタンスと抵抗値を目標値に設定し、同条件の CAD モデルで磁性シートの透磁率実部 μ' と損失係数 $\tan\delta$ を OPTFEKO を用いて解析し、

$$\tan\delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (1)$$

の式から透磁率虚部 μ'' を導出することで、複素透磁率を評価する。

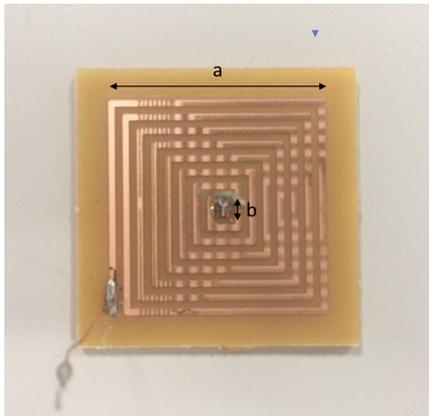


図 3 測定に用いた方形スパイラルコイル

表 1 方形スパイラルコイルの構成

長さ a(mm)	30.0
長さ b(mm)	2.0
巻き数 (回)	8
導線幅 (mm)	2.0

3.3 測定用コイルの作製

先行研究では導線製方形スパイラルコイルを用いていた。このコイルは銅線を万力で固定して曲げて作製したもので、磁性シートに対しての距離が一定にならないという問題があった。これに対し、再現性の高い測定構成を実現するコイルとして、基板製コイルの作製を考えた。

基板は本来素子と接続させることで回路として利用されるが、パターンを渦状にしてスパイラルコイルに、線形パターンを持つ二枚の基板を銅線で接続することでソレノイドコイルとして利用できる。導線製コイルではその歪みから測定誤差が生じていたが、基板製コイルであればこの歪みをなくせ、安定性、再現性の高い測定構成を作ることが出来る。

また、今回は更に測定効率を向上させるため基板製方形スパイラルコイルと基板製方形ソレノイドコイルを作製し、どちらのコイルを利用するのが適切か議論した。

測定に用いる方形スパイラルコイルを図 3 に、この構成を表 1 に示す。今回用いるアモルファス磁性シートの大きさに合わせて、非常に小型の方形スパイラルコイルとなっている。先行研究同様、磁性シートを金属板の渦電流から保護することで、磁性シートの有無でのインダクタンスの変化を大きくするため、上から、方形スパイラルコイル、磁性シート、アルミニウム板と置き、この時のコイルのインダクタンスと抵抗値を測定する。

方形ソレノイドコイルを図 4 に、この構成を図 2 に示す。このコイルでは線形パターンのある二枚の基板をプラスチック製のネジ、ナット、スペーサーで 1.0mm で固定し、パターン同士を導線で接続することで構成されている。このスペーサーの間隔により、コイル内部に薄型磁性シートを出し入れが可能である。

形状磁気異方性の観点で磁性材料を評価すると、薄型磁

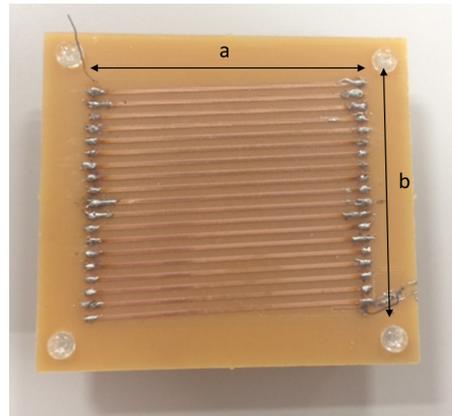


図 4 測定に利用した方形ソレノイドコイル

表 2 方形ソレノイドコイルの構成

長さ a(mm)	5.5
長さ b(mm)	4.75
高さ (mm)	4.2
巻き数 (回)	20
導線幅 (mm)	2.5

性シートに対して垂直方向に磁化されにくく、シートの平行方向に磁化されやすい、という特徴がある。これにより、面方向に磁化するスパイラルコイルに対し、平行方向に磁化する構成である方形ソレノイドコイルでは、反磁界が小さく、インダクタンスの変化が大きくなると考えた。このコイルのインダクタンスは $2.31 \sim 2.32 \mu\text{H}$ となっており、こちらもシミュレーションとの誤差は 1.0 % 未満に抑えられている。

今回はこの二種類のコイルで磁性シートの影響をうける際のインダクタンスを測定し、FEKO でシミュレーションをすることで透磁率実部を評価する。

4 実験と測定

今回はアモルファス磁性シートを用いて三種類の透磁率評価を試みた。

4.1 二種類の構成の評価精度比較

3.3 において今回の評価に用いるコイルとして、方形スパイラルコイルと方形ソレノイドコイルの二種類のコイルを用いることを前述した。この二種類のコイルを用いて、磁性シートを近傍に設置した際のコイルのインダクタンスを測定し、FEKO で磁性シートの透磁率を評価する。この結果をカタログの結果と比較し、どちらの測定構成が透磁率評価するのに優れているか議論する。これによって、先行研究の課題だった、「再現性が高く、評価精度の高い測定用コイル及び測定構成の実現」を解消する。

この評価にはアモルファス磁性シート SS シリーズを利用し、また磁性層の厚さを $18 \mu\text{m}$ として評価する。

4.2 磁性層の厚さを変化させた場合の透磁率評価

今回利用するアモルファス磁性シートについては3.1に示したが、この薄型磁性シートの磁性層の厚さは測定法により誤差がある。磁性層の厚さは磁化される材料の量が変化するため、測定値にも影響がある。これより、厚さの誤差も透磁率評価をすることで、より精密な透磁率評価が行えると考えた。

この評価では、アモルファス磁性シートを使ったコイルの測定値を、シミュレーションのモデルの磁性シートの厚さを16 μm 、18 μm 、20 μm と変化させて複素透磁率を評価する。この幅での透磁率を確認し、カタログとの透磁率を比較する。

この評価ではアモルファス磁性シートのSSシリーズ、DSシリーズを用い、測定には方形ソレノイドコイルを用いる。

4.3 長さが異なる磁性シートでの透磁率評価

透磁率評価の際に誤差が少ない測定構成の条件を得るため、磁性シートの長さを短くした場合のコイルのインダクタンスと抵抗値を測定し、透磁率評価の変化を検証することとした。形状磁気異方性において、薄膜の場合、側面方向へ磁化する場合は面方向に磁化する時よりも反磁界は小さいが、一方でこの薄膜を円柱の磁性体と見立てる場合では、長手方向と断面積の比が大きいほど反磁界が小さくなる。これより、磁性シートの長さを短くした場合には反磁界が大きくなると考えられる。この時、FEKOではどのように透磁率が評価されるかを確認し、透磁率評価の条件を明らかにする。

今回は長さ130mmのアモルファス磁性シートDSシリーズ4枚を裁断し、30mmから100mmの磁性シート8枚に加工した。アモルファス磁性シートは非常に薄型で加工がしやすいため、カッターナイフで裁断することができた。この評価において、長手方向に対し形状磁気異方性の影響を受けやすいコイルとして方形ソレノイドコイルを利用する。また、磁性層の厚さを18 μm として評価する。

5 結果と考察

測定したコイルのインダクタンスと抵抗値から透磁率評価を試みた。以下、透磁率評価結果を記す。

5.1 二種類の構成の評価精度比較

それぞれの透磁率実部の評価結果とカタログとの比較を図5に示す。円形のマーカを持つ実線が方形ソレノイドコイルの透磁率評価結果、四角のマーカを持つ点線が方形スパイラルコイルの透磁率評価結果、三角のマーカの点線がカタログの透磁率となっている。この結果では、方形ソレノイドコイルの評価結果がカタログのデータと近く、対して方形スパイラルコイルの評価結果は大幅に小さくなる結果となった。また、スパイラルコイルの評価結果は周波数でなだらかにならなならず、80kHzで透磁率が小さくなっていることなど歪な変化も見られた。これは測定したデータが歪なものだったこととの関連だと考えられる。一方で、方形ソレノイドコイルの評価結果

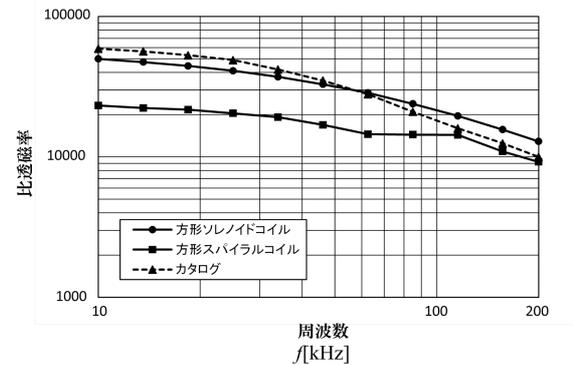


図5 二種類のコイルの透磁率実部評価結果

は1カタログと同様の変化をしているものの、10kHzの時点ではカタログよりも小さかったが、80kHzほどで透磁率が逆転している。100kHz以上の場合にはスパイラルコイルの評価結果のほうが近い値となっている。しかし、方形スパイラルコイルの評価結果の歪さからも、方形ソレノイドコイルを用いたほうが精度の高い評価結果が得られるものと考えられる。

この結果より、先行研究の課題であった「再現性が高く、評価精度の高い測定用コイル及び測定構成の実現」は、基板製方形ソレノイドコイルによって実現できると考えられ、今後の評価にも方形ソレノイドコイルを利用する。

5.2 磁性層の厚さを変化させた場合の透磁率評価

SSシリーズの透磁率実部評価結果を図6に、DSシリーズの透磁率実部評価結果を図7に示す。実部の評価結果はカタログよりも小さくなっているが、カタログと同様の変化を、虚部はカタログの結果と同様に、50kHzを山としたアーチ状の変化をしているが、カタログの結果よりも大きくなっており、その中でも10~30kHzにかけてはカタログの結果よりも誤差が大きいことが分かる。今回は磁性層を16~20 μm で評価しているが、実部虚部ともに、16 μm が大きく、20 μm が小さい結果となっている。これより、インダクタンスや抵抗値に影響した磁性層の量によって透磁率評価結果が変化していることが分かる。一方でDSシリーズの評価結果は、透磁率実部の評価結

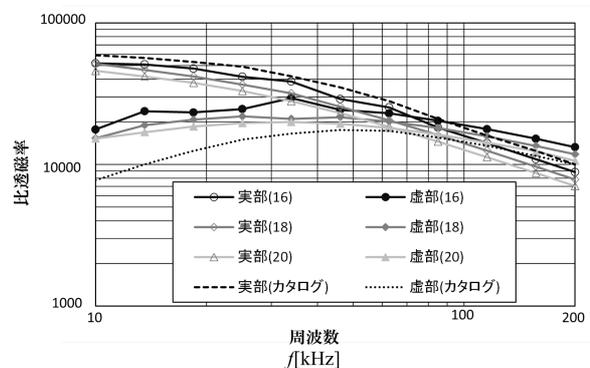


図6 厚さごとのSSシリーズの透磁率評価結果

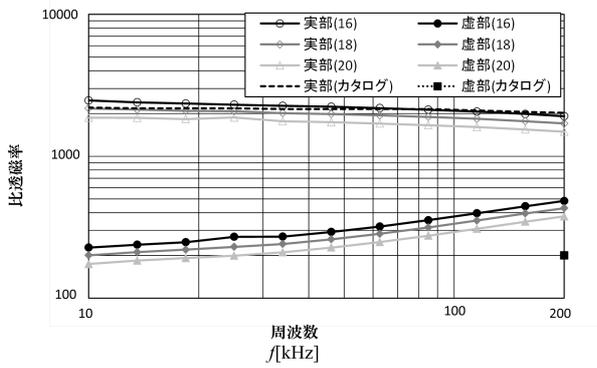


図 7 厚さごとの DS シリーズの透磁率評価結果

果がカタログに近い結果を得ており、16~20 μ mの結果で、カタログの結果を覆うことができている。一方で虚部に関しては、透磁率が判明しているのが200kHzのみとなっているが、評価結果では400~500と二倍以上の大きさとなってしまう。

このように、SSシリーズとDSシリーズで評価結果の変化が異なってしまったが、透磁率変化の傾向が一致していることから、測定に近い透磁率評価を行うことが出来たと考えられる。

5.3 長さが異なる磁性シートでの透磁率評価

30.0~100.0mmの長さの磁性シート利用時の透磁率実部評価結果を図8に、透磁率虚部評価結果を図9に示す。実部虚部どちらも、100mmから60mmにかけて、長さが短くなるほど、透磁率が小さくなっていることが分かる。一方で、70mmの結果が100mmから80mmまでの長さのものに対して極端に小さくなっていること、また60mmの結果が50mmの結果よりも小さくなってしまっている。この変化は虚部部分でも同様の変化が見られることである。今回の磁性シートは130mmの磁性シートを裁断して作製していることから、60mmと70mmの磁性シートは同じものであり、このことから60mmと70mmの磁性シートは他の磁性シートよりも厚さが薄いことが考えられる。

また、40mmと30mmの結果は他の長さの結果に対し

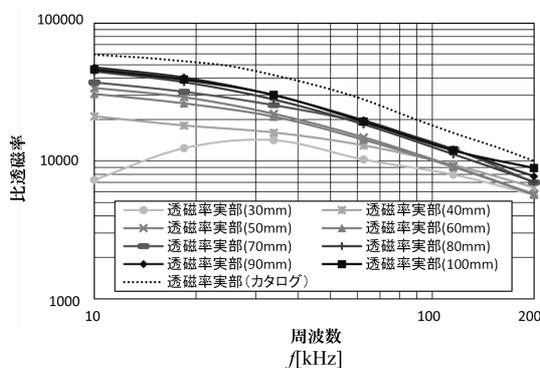


図 8 長さごとの磁性シートの透磁率実部評価

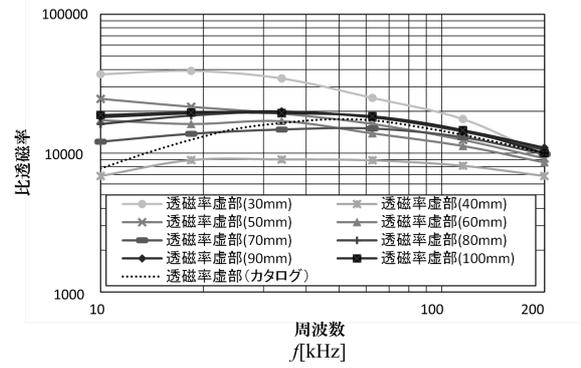


図 9 長さごとの磁性シートの透磁率虚部評価

て実部虚部ともに極端に異なる変化を起こしており、グラフの概形も異なっているものがあつた。この変化の原因が反磁界の影響だけではなく、磁性シートの長さに対してコイルの長さが短い磁性材料を用いていることも原因と考えられる。

6 おわりに

今回の評価結果は二種類の磁性シートで評価精度に違いが生じてしまうことや、虚部の評価誤差が大きくなるなどの結果となってしまったが、カタログの結果に対して近い値を得ることが出来た。現在の透磁率測定では実測値から導出する方法が取られているが、この評価法が更に発展させることができれば、電磁解析による測定法を確立することも可能であると考えられる。また、この評価に用いた磁性シートは測定法により厚さが異なるというものだったが、電磁解析による測定法が発達していけば、特性測定による透磁率評価も可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Keysight Technologies, "LCR メータおよびインピーダンス・アナライザを用いた誘電率/透磁率の測定ソリューション", <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5980-2862JAJ.Pdf?id=1000002028:epsg:apn>, Jan 2016.
- [2] 稲垣 直樹, 長屋 拓見, 奥村 康行, 藤井 勝之, 田端 隆伸, 堀 智, "電磁誘導電力伝送用フェライトシートの透磁率簡易評価法," 電子情報通信学会 アンテナ伝播研究会, 2014-04-AP, Apr 2014.
- [3] 長屋 拓見, 南部 孝幸, 山本 将大, "EV 充電用無線電力伝送のコイル系の特性についての研究," 南山大学 情報理工学部・数理情報学部 2013 年度 卒業論文 要旨集, Jan 2013.
- [4] 東芝マテリアル株式会社, "アルファモス磁性部品", <http://www.toshiba-tmat.co.jp/product/pdf/amo-all2014.pdf>, Jan 2016.
- [5] 佐藤勝昭, "マグネティックス・イントロダクション 1 磁気工学超入門 -よろこそ, まぐねの国へ-", 日本磁気学会 (編), 南條光章, 東京, 2014.