

報告：2024年後期寺子屋BM塾 第36期 BM講座

JABM理事兼寺子屋BM塾長
元・日立金属(株)
徳永 雅亮

2024年度後期のBM塾では、「軟磁性材料の測定・基礎・応用」をテーマに取り上げ、①成田 芳正氏に「軟磁性材料の測定について」、②岡本 聡先生に「軟磁性材料の基礎について」、③太田 元基先生に「軟磁性材料の応用について」の3講義をお願いした。

第1講

日時：2024年9月20日（金）14:00-17:00 @Zoom

講義：各論講義「軟磁性材料の測定について」



講師：成田 芳正（岩崎通信機株式会社 T&Mカンパニー
T&M推進部／担当部長）

概要：

- 軟磁性材料の磁気特性測定の基礎
- トロイダル形状試料磁気特性測定（実機デモ含む）
- シート形状試料磁気特性測定（実機デモ含む）
- 直流重畳により変化する磁気特性測定（実機デモ含む）
- 測定に適した巻線方法

受講生総数：40名

記事：軟磁性材料の磁気特性は $B-H$ カーブで表現できる。初磁化曲線で種々の透磁率（初透磁率、振幅透磁率、最大透磁率）が、 $B-H$ カーブの面積でヒステリシス損失が評価できる。

鉄損（コアロス）のみを測定でき、材料評価を行う2コイル法の測定原理を見てみよう。1次巻線は試料を励磁するための交流電流を印加し、2次巻線は試料内部に発生する磁束密度に応じて発生するコイル端子電圧を検出する。磁束を検出する2次巻線にはほとんど電流が流れないため、鉄損のみを測定できる。1コイル法は磁励用の巻線と磁束を検出する巻線を共通で使用するため、銅損を除いた測定ができないため、部品評価に用いられる。

測定に必要な試料定数として実効磁路長（ L_e ）、実効断面積（ A_e ）及び実効体積（ V_e ）がある。これら試料定数の算出法には2種類ある。トロイダルコアの場合では、(算出1)は単純に内径・外径の中央部の長さを平均磁路長とする。(算出2)はIEC規格(IEC 60205：2016)で定められた方法で、磁心定数 C_1 及び C_2 から試

料定数を求める。Eコアの場合も同様に試料定数が決定できる。

磁気特性を評価するための試料形状が得られる磁気特性に影響を与える。トロイダルコアの場合、同一の L_e と A_e を有していても、内径、外径及び厚みの異なる試料が存在する。試料厚みが小さく、内径と外径の差が大きい場合は内径側に磁束が集中し、磁束分布が不均一になる。

トロイダルコアとEコアの磁路内の磁束分布は比較的磁束密度の高い（100mT）条件では両コアともコア内側は飽和して磁束分布にあまり差異が生じない。一方、磁束密度の低い（25mT）条件ではEコアは内側のエッジ部分に磁束が集中し、磁束分布幅が増加する。従って、コアロスの周波数依存性データにおける低磁束密度条件では両コアのロスに差が現れる。

ギャップのないトロイダルコアでは1次コイル及び2次コイルをコア全体に均一に巻線を施す。ギャップのないEコアではセンターポール部分に巻線を施し、漏れ磁束の影響を避けるため、接続部を跨いで巻線は行わない。

電磁鋼板の磁気特性はエプスタインフレーム又は単板磁気測定装置を用いて測定される。エプスタインフレームでは0.5mm厚の試料では交互積層方式で閉磁路を構成し、12枚が必要となるが、単板磁気測定装置では組合せ磁気回路を1枚の試料を用いて構成する。単板を予め積層してブロック化し、その積層ブロックで4辺の閉磁路を構成して測定する場合もある。

磁性シートはトロイダル形状に加工された試料や、単板磁気測定装置で測定可能な小片試料を用いて測定される。トロイダル試料では最大10MHz、単板測定では20kHzまでの測定が可能である。粉末試料は通常トロイダル形状のケースに充填して測定するが、条件の決め方が難しい。反磁界の影響も大きく、比較測定に限定されることが多い。

鉄損（コアロス）の内容をREVIEWする。鉄損はヒステリシス損失、渦電流損失及び残留損失の和である。ヒステリシス損失は軟磁性材料の $B-H$ 曲線のヒステリシスに由来して発生する損失で、動作周波数の1乗に比例して増大する。渦電流損失はコア内の磁束変化の際の電磁誘導に起因する渦電流によるジュール熱損失で、材料の伝導率と形状に依存し、動作周波数の2乗に比例する。残留損失はコアロス全体からヒステリシス損失と渦電流損失を除いた残りの損失で、熱平衡が変化したとき等の緩和プロセスにより発生する。

渦電流損失は $K_e \cdot (B_m \cdot f \cdot d)^2 [W/m^3]$ で表される。ここで、 K_e は軟磁性材料の定数、 B_m は最大磁束密度、 f は動作周波数、 d は材料の厚みである。単位体積あたりの渦電流損失は厚み d の2乗に比例するため、他の定数が一定の場合コアの厚みを4分割すると単位体積あたりの渦電流損失は1/16になる。交流 $B-H$ アナライザではコアロスから全高調波歪みまで23種の特性パラメータが決定できる。LCRメータやインピーダンスアナライザに対する交流 $B-H$ アナライザのメリットは大信号（～6A）までの実際の駆動条件での測定が可能なことにある。多くの磁気パラメータが計算によって導出される。

軟磁性材料の $B-H$ カーブ測定が可能な測定系には振動試料型磁力計（VSM）、直流 $B-H$ アナライザ及び交流 $B-H$ アナライザがある。各測定系の特徴を把握し、必要な磁気特性を取得できる測定系を選択する。交流 $B-H$ アナライザには測定周波数帯域が

BM インフォメーション

10Hz～10MHz及び10Hz～1MHzの2モデルがある。

トロイダル形状試料の交流B—Hアナライザによる測定手順は以下の通り。

- A) 試料及び巻線の準備
- B) 測定条件の決定
- C) シミュレーション・シート（岩通より提供）による試算
試料定数の確認（ L_e 、 A_e 、 V_e 、 W_e ）
提供がない場合は外径、内径、高さ、重量の実測
- D) シミュレーションのコアファクタ（ C_1 及び C_2 ）で試料定数を算出
- E) 仮の1次巻線の巻数と試料の概略比透磁率を用いてシミュレーション・シートでインダクタンス値を算出
- F) $N_1=N_2$ とし、試料パラメータを代入
測定に用いる測定系及びパワーアンプの機種名を代入（パワーアンプの最大電圧・電流の規定があり、周波数によっても変化するので注意する。）
- G) 周波数と励磁条件を選び、simulateボタンを押すと、結果が表示される。赤字になった項目はNGなので条件を見直す。条件設定によっては測定できない場合があるので、測定系の限界を理解する。
- H) 試料に巻線する。
比透磁率の小さい試料の場合、2次巻線はできるだけ細くし、試料に密着させて等間隔になるよう1次巻線より先に巻く。
- I) 1次巻線は励磁電流に耐えられる線径の線材を2次巻線に重なるように巻く。コアと測定部を繋ぐ線材の長さは高周波測定ではできるだけ短くする。比透磁率の大きい試料の場合（ $N_1=N_2$ ）、1次巻線と2次巻線の2本で平行線を作り、同時に試料に巻く。
- J) 試料定数を入力する。
励磁条件は励磁電流指定で低周波数を選択する。測定を実行し、得られた試料の振幅比透磁率（ μ_a ）を用いて再度シミュレーション[E]～F)を実施する。
- K) シミュレーション・シートで希望の測定ができない場合は、条件変更を行う。例えば、磁界 H_m を大きくしたいときは N_1 巻線を大きくするか試料サイズを変えて L_e を小さくする。
- L) 飽和波形の測定ではBの頂点付近で波形が寝ているためのエラーには最大励磁電流 i_{1m} 設定で対応する。高周波測定では発熱による試料の磁気特性の変化に注意する。

デモの内容を説明する。

低透磁率材料であるカーボニル鉄粉のトロイダル試料をB—Hアナライザ(SY-8218)で測定した。1次巻線径は0.5mmφ、2次巻線径は0.26mmφ、巻数は $N_1=N_2=10$ である。巻線は予め平行線とし、同時にトロイダル試料に巻く。測定系への取付は測定系への悪影響を回避するためにきちっと締め付けて、カバーをセットする。大型のフェライト試料の例では木製の机にセットする。試料定数及び測定条件（ $f=100\text{Hz}$ 、電流規制/ $i_{1m}=0.1\text{A}$ ）をインプットする。得られたB—H曲線は膨らみのない直線形状を示す。次に磁束規制/ $B_m=10\text{mT}$ 、 $f=1\text{MHz}$ で測定するとコアロスも確認できる。

シート形状試料はエプスタインフレームを用いるエプスタイン法及び単板を用いるSST（Single Seet Tester）法がある。SSTには励磁電流法とHコイル法の2種がある。更に小型単板磁気測定

装置（小型SST）も利用されている。異なる材質の特性比較における注意点は、①試料寸法は同じ、②ヨークと試料の接触位置は同じ、③試料の表裏差を確認し、測定面を合わせる、④試料を上からホールドするスライダの加圧値を同一にする等の配慮が必要である。異方性のある試料では30mm x 30mmの試料を用い、測定時のヨークに対する設置方向を0°と90°の2方向で測定すれば異方性のレベルを把握できる。

デモの内容を説明する。

用いた測定系は小型SST測定装置（SY-956）で、試料はFINEMETである。試料形状30mm幅、280mm長さ、20μm厚さを測定した。Bコイルに試料を挿入し、スライダを下げ、試料をU形ヨークに押し付ける。試料定数及び測定条件 $f=10\text{kHz}$ 、 $H_m=200\text{mA/m}$ をインプットし、測定ボタンをプッシュする。なお、8mm幅の試料や30mmx30mmの正方形試料も測定できる。正方形試料では試料の有する磁気特性の異方的な性質を把握できる。

直流重畳によって変化する磁気特性の評価には電気自動車用昇圧リアクトルやチップインダクタがある。昇圧リアクトルでは非常に大きな直流電流が重畳されるため用いられる軟磁性材料は高い飽和磁束密度が要求される。昇圧用リアクトルの評価にはリアクタンス及び電圧・電流波形が用いられる。チップインダクタの例では直流バイアス電流を印加し、パルス励磁してコアロスが測定される。直流バイアスの増加に伴い、B—H曲線は透磁率が下がり、非対称化する。コアロスも直流バイアス依存性がある。トロイダルコア試料の直流バイアス電流は N_3 なる第3のコイルによって印加される。直流バイアス印加時の交流磁気特性の測定用DCバイアステスタが市販されている。フェライトコアでは直流重畳磁界の増加によってコアロスが増加し、増分透磁率が低下し、更に、B—H曲線も非対称化するため、直流重畳する応用には適さないことが理解できる。逆に、鉄粉を用いた圧粉磁心はコアロス及び増分透磁率の直流重畳磁界による変化が小さく、直流重畳を用いる応用に適することが理解できる。

大きな直流電流を流す必要のある測定では巻線の線径に注意する。直流電流量に対応できる線径が大きいため、トロイダルコアに巻くことが困難な場合は巻線を分割して、3ペアとする場合がある。測定の事前にシミュレーション・シートを用いて以下の3つの確認が必要である。①測定に適した試料インピーダンス、②測定回路がパワーアンプから見るとRLC回路であるため、RLC回路の共振周波数の10倍以上の測定周波数を用いる、③2巻線法を用いる場合、パワーアンプから見るとLC並列回路となるので、測定周波数をLC回路共振周波数の1/10とする。

デモの内容は以下である。

チップインダクタを1コイル法で測定する。交流は $f=1\text{MHz}$ 、 $i_{1m}=1\text{A}$ 、DCバイアス電流0A及び10Aで測定したが、B—H曲線の変化は小さく、直流重畳する応用に適していることが理解できた。一方、2コイル法で測定したフェライトコアでは $f=100\text{kHz}$ 、バイアス電流1AでB—H曲線は非対称化し、直流重畳する応用に適していないことが理解できた。

測定の巻線方法については、JIS C 2560-2: 2006に規定されている。その内容の一部は、①巻数は測定条件、測定系及び測定精度の兼ね合いで決定、②巻線の抵抗成分及び静電容量は

測定誤差と比較して、無視できるレベル、③線間容量はできるだけ小さく、④100%の結合状態となるよう磁心の近くに巻く、⑤磁心の周囲に均等に巻く、である。

低透磁率で低損失トロイダルコアの巻線に起因する誤差要因の検討（山本健一、成田芳正、石山和志：電学誌A、Vol. 143 No. 6 pp. 216-221）の結果は以下である。①1次巻線と2次巻線の数を同時に減らすと、巻き方によっては測定値のバラツキが増加、②このバラツキは試料内の磁界の均一性と関係し、1次巻線と試料を離すことで低減可能、③透磁率の正確な測定をするためには、2次巻線に十分に細い銅線を用い、試料と密着して設置する必要がある。

成田先生の講義では測定器メーカーにおけるご経験をベースに軟磁性材料の磁気測定の留意点を丁寧にご指導頂いた。最新の情報として低透磁率材料の磁気測定に関する検討結果を報告頂いた。デモも含めた臨場感あふれるご指導に感謝申し上げます。

第2講

日時：2024年10月11日（金）14:00-17:00 @Zoom

講義：各論講義「軟磁性材料の基礎について」



講師：岡本 聡（東北大学／教授）

概要：

- 軟磁性材料の高周波特性
- 軟磁性材料の高周波損失
- 軟磁性材料の損失解析

受講者数：47名

記事：軟磁性材料の応用の種類は永久磁石や半硬質材料に比較して圧倒的に多い。そのマーケットサイズは2021年22.5 Billion USDである。軟磁性材料はモータ/ドライブ制御や電源/電力制御に用いられ、モータコア、パワーエレクトロニクス用受動素子として広く社会で活用されている。従って、スマート社会やカーボンニュートラルに直結する。パワーエレクトロニクスでは高性能パワー半導体と低損失軟磁性材料が必須である。

軟磁性材料の応用分野は多岐に渡り、モータコア、センサ、RFID、電磁石、磁気ヘッド、ノイズフィルタを挙げることができる。更に、使用される周波数領域が1Hzから1GHzと非常に広範囲に分布する。パワーエレはエネルギーマネージメント、電動モビリティ及びICTに用いられている。使用周波数が高くなるとパワーエレの損失が大きな問題になる。パワーエレでは磁性材料の鉄損と巻線の銅損が主な損失である。パワーエレの動作周波数によって用いられるパワー半導体と軟磁性材料が変化する。Google Little Box Challenge（ソーラー発電用インバータの小型化コンテスト）では磁気受動デバイスの占める体積が38%、損失が42%という結果

が得られており、磁気受動デバイスが大きい体積を占め、大きい損失の原因になっていることが指摘されている。

開発された軟磁性材料を歴史的にリストアップすると、1889年のFe-Niから2017年のナノ結晶Fe-Bまで多くの材質があり、同時に軟磁性材料に関する磁性や鉄損の理論が提案されてきた。例えば、C. Kittelの磁区、W. Shockleyの磁壁、J. B. Goodenoughの磁区生成等の理論がある。

パワーエレ用軟磁性材料に関する要求は①高飽和磁化、②高周波数までの高透磁率、③高周波までの低鉄損である。動作周波数依存性や要求①～③を同時に充足できるか等軟磁性材料には多くの未解決の疑問がある。

ヒステリシス曲線については磁化率 (χ)、透磁率 (μ) が定義され、透磁率は最大透磁率、初透磁率、振幅透磁率、実効透磁率、微分透磁率等多くのパラメータが定義されている。軟磁性体の低磁場のレーリー領域では $B = \mu_i H + vH^2$ で表され、透磁率 (μ) は $\mu = \mu_i + vH$ になる。 v はレーリー定数である。 B の第1項 $\mu_i H$ は可逆範囲での B の変化を表すが、 H の増加に伴い非可逆磁束である第2項の vH^2 が現れる。なお、本領域のヒステリシス損 W_{hys} は vH^3 で近似される。

Bozorthによれば、軟磁性材料の保磁力 H_c は $H_c = (de_w/dx)/(2M_s)$ で表される。ここで、 e_w はポテンシャルエネルギー、 x は距離を表す。 $e_w \approx \lambda_s \sigma \delta$ (λ_s : 飽和磁歪、 σ : 不均一な応力、 δ : 磁壁幅) の関係から $H_c = (\lambda_s \delta / 2M_s)(d\sigma/dx)_{max}$ と表現され、不均一性が改善されると、 H_c を低減することができる。

磁化回転による μ_{ri} は $\mu_{ri} \approx \mu_0 M_s^2 / (3K)$ と表され、 K^{-1} に比例する。純鉄及びFe-6%Siの μ_{ri} を M_s と K を用いて計算すると30及び40になる。従って、 $\mu_{ri} > 10,000$ を得るためには $K < 10J/m^3$ が必要であることが理解できる。一方、直線の180°磁壁移動による μ_{ri} は $\mu_{ri} \approx (2\mu_0 M_s^2 \ell) / (3\pi^2 \lambda \sigma_0 \delta)$ と表され、 λ^{-1} に比例する。ここで、 σ_0 : 内部応力、 ℓ : 応力波長、 δ : 磁壁幅である。 $\sigma_0 = 100MPa$ 、 $\ell / \delta = 100$ を仮定すると、純鉄 ($\lambda = 20ppm$) 及びFe-6.5%Si ($\lambda = 1ppm$) の μ_{ri} は10,000及び170,000と計算される。上記の考察から優れた軟磁性材料を得るためには K 及び λ を最小化するための組成探索が必要であることが理解できる。Fe-Si、センダスト、パーマロイ、アモルファス、FINEMETいずれも上記の手法で材料開発が行われた。ナノ結晶合金では結晶粒径 (D) が交換長 $[(A_{ex}/K)^{1/2}]$ 、 A_{ex} : 交換スティッフネス定数]程度となると、無配向材料では D に対して保磁力が低下する。Hertzerによる結晶粒径 D の無配向材料の平均化された異方性定数は $K_{av} = (K^4/A_{ex}^3)D^6$ で表され、 D の低下によって K_{av} が低下することが分かる。ナノ結晶材料の磁歪は、結晶相 Feの負の磁歪と非晶質母相の正の磁歪 (λ) が相殺し、材料全体で磁歪量がほぼゼロになる。ナノ結晶合金の優れた軟磁気特性は上述の K と λ の低下によって説明されている。

軟磁性材料の鉄損を考えよう。古典的な表式はSteinmetzによって1周期の損失は $W = W_{hys} + W_{cl} + W_{exc}$ と整理されている。ここで、 W_{hys} : ヒステリシスロスで周波数依存性がない、 W_{cl} : 古典的鉄損で、均一な磁束変化に対してMaxwell方程式によって導出され、動作周波数 f の1乗に比例する、 W_{exc} は磁壁移動の静磁気理論から導出され、 $f^{0.5}$ に比例する。 W_{cl} と W_{exc} には渦電流損が含まれる。均一な磁束変化に伴う渦電流損は古典的渦電流損

BM インフォメーション

P_{cl} と呼ばれる。 P_{cl} は f に比例し、渦電流損の最小値に相当する。一方、単一の磁壁移動に伴う磁束変化に伴う渦電流損は異常渦電流損 P_{exc} と呼ばれる。 $P_{exc} = P_{cl}(\ell/2d)$ (ℓ : 応力波長、 d : 試料厚み)と計算され、渦電流損の最大値を与える。例えば、 $\ell = 10\text{mm}$ 、 $d = 25\mu\text{m}$ では $P_{exc} / P_{cl} = 200$ となり、 P_{exc} の重要性が認識できる。鉄損 $P(W/kg)$ には動作周波数 f が掛かっており、鉄損 $W(J)$ と区別することが必要である。

静的に優れた磁気特性を有する材料が高周波数領域で優れた特性を示す訳ではない。静的に優れた材料は高周波数領域で大きな鉄損を示す。最低の鉄損を示すのは磁化が磁化回転に支配される場合であるが、磁化回転メカニズムでは得られる透磁率が低い。高 M_s 、高 μ 、低鉄損を同時に満たす材料の存在は物理的には難しいため、最適化によって応用に適した材料を選択する必要がある。一般に、この最適化は変数が多いので、難しい。

古典的な鉄損解釈に関する疑問を見ていこう。

Q1: W_{cl} と W_{exc} は同時に存在するか? →物理的にはNOである。静的理論でこの問題が扱われているため、その適用は低周波領域のみに限定される。物理を基本とした解析が必要になる。

Q2: W_h は周波数に依存せず、定数か? 真に W_h を理解しているか? →Floere(2006)は、高 K 材料と低 K 材料に対する50Hz~10kHzにおける磁区の形態が大きく異なることを報告している。磁区の形状には周波数依存性があるため、高周波領域では W_h は定数ではない。

Q3: 真に W_{cl} を理解しているか? →角周波数 ω を持つ交流磁界の時には、磁界は表面から $\delta = (2/(\sigma\mu\omega))^{1/2}$ (σ : 電気伝導率)の深さで $1/e$ に減衰する(表皮効果)。従って、古典的渦電流損は表皮深さを考慮した解析が必要になる。Maxwell方程式から渦電流を考慮した磁界を導出し、LLG方程式を連成して解くことにより磁性体内の動的磁化挙動が解析できる。この時非常に大きな1に近い減衰定数 α が必要で、渦電流に起因する鉄損と減衰による鉄損の両方を考慮すべきことが分かる。

Q4: W_{exc} を真に理解しているか? → $\text{Fe}_{86}\text{B}_{13}\text{Cu}_1$ やMetglassのコアロス測定すると、 W_{exc} を渦電流によると説明するのは難しく、 λ との関連が大きい。従って、 λ を起因とする鉄損と考えるべきで、動的効果である。異常渦電流損というべきではなく、「Excess(過剰)ロス」と表現するのが適切である。磁歪は結晶格子の歪みを通して、外部磁界に対する磁化の位相遅れを引き起こす。超急冷薄帯におけるExcessロスと λ_s の相関関係が実験的に確認されており、ダンピング定数 α が λ_s に依存して増加することも計算されている。高周波領域における鉄損メカニズム解明は現在進行中の重要テーマである。

物理をベースとした鉄損解析の現状を見てみよう。既にSteinmetz(1892)による解析は説明したが、高周波領域での物理的な正当性が周波数によって磁区構造が変化することから疑問視されている。他にFiorillo(2017)による「磁化反転分解モデル」、Bertotti(1985)による「静的モデル」、Sakaki(1980)による「有効磁壁モデル」がある。

鉄損成分のべき乗則を B_m と f を中心に整理する。 W_{hys} はレーリー領域で B_m^3 に、又、教科書的には $B_m^{1.6}$ に比例するとされる。古典的渦電流損 W_{cl} は $B_m^2 f$ に比例する。Excessロスである W_{exc} は単磁区の場合 $B_m^2 f$ に比例し、多磁区の場合 $B_m^2 f/n$ (n : 磁壁

の数)に比例する。Bertottiモデルでは $B_m^{1.5} f^{0.5}$ に比例する。実験データは経験的モデルの $W_{hys} \approx B_m^{1.6}$ から乖離し、明快な理論がない。「 W_{cl} と W_{exc} は共存しない」が現状の結論である。しかし、Bertottiによるとヒステシス曲線が多くのバルクハウゼンジャンプからなり、渦電流がバルクハウゼンジャンプから発生するとすると、 $P \propto |i|^2$ (i はバルクハウゼンジャンプによる渦電流)と表現できる。 $|i|^2$ は P_{hys} 、 P_{cl} 及び P_{exc} の和として表現されている。

W_{exc} の静的理論がBertotti(1985)によって提案されている。磁壁に区切られたクラスターをMO(Magnetic Object: 磁気物質)として扱い、低周波リミットで P_{exc} が $B_m^2 f$ に比例することを導出している。これはPry and Beanモデルと一致する。高周波リミットでは $B_m^{1.5} f^{0.5}$ に比例し、実験結果と一致する。

Sakakiは有効磁壁モデルで、動的ロス(P_{dyn})を定義し、 P_{dyn} の周波数依存性を議論した。実験的には $P_{dyn} \propto f^{1.5}$ である。有効磁壁数 n を仮定し、出力電圧 V_m と動的有効磁場 $H_{c,dyn}$ の比 $V_m/H_{c,dyn}$ が $f^{0.5}$ に比例し、実験値にも一致することを示した。本結果はPry and Beanモデルの修正版と考えられる。

鉄損測定は $B-H$ アナライザを測定系とし、2コイル法で測定される。鉄損 P は $P = VA \cos \theta$ で表される。ここで、 V は出力電圧、 A は入力電流、 θ は V と A の間の位相遅れである。測定エラーは $|\Delta P/P| = |\tan \theta \Delta \theta|$ であり、 θ が大きい程、増大する。エラー低減のために共振法(Capacitance cancellation method)が提案されている。共振用キャパシタ C_r を挿入して、検出コイルと共振状態にし、リアクタンス成分を相殺して鉄損のみを検出する。共振用キャパシタには等価直列抵抗(ESR)成分が重畳し、誤差要因になる。対策として $P_j f^2(\Omega)$ をゼロ B_m に外挿する R_0 プロットが考案された。 R_0 はベクトルネットワークアナライザでも測定可能である。 R_0 プロット法は鉄損校正手法として用いることができる。

高周波パワエレに用いられる低透磁率コアの鉄損測定の重要性が増加しているが、その鉄損測定は難しい。測定の前には結合係数100%が求められ、結合係数を高めるためには巻線数を増加する必要がある。巻線数を増加すると自己共振周波数が低下する。試料をセンダスト圧粉コア、巻線数を18ターンから3ターンとして鉄損の周波数依存性を測定すると、得られる鉄損は巻線数によってその周波数依存性が異なる。本現象は巻線数の低下によって結合係数が低下し、漏れ磁束が増加することによって生じ、シミュレーションによっても確認されている。本問題を解決するために補正係数 $\mu_{ri}/\mu_{eff}^{meas}$ を用いる。 μ_{ri} はVNA(ベクトルネットワークアナライザ)またはインピーダンスアナライザで測定される初透磁率、 μ_{eff}^{meas} は測定された実効透磁率である。補正された鉄損 W は周波数に対して一義的に決定される。

ブロードバンド鉄損解析を考える。 $10^2 \sim 10^8 \text{Hz}$ の鉄損測定は2コイル法と共振法の2種の手法で周波数間の接続が可能になった。解析手法としてはFiorilloによる磁化過程による鉄損分離、Bertottiによる統計理論、Sakakiによる有効磁壁モデルがあるが、これらのモデルをパワエレにおいて重要な圧粉磁心において再評価する必要がある。ブロードバンド鉄損測定に用いた試料はMn-Znフェライト、FINEMET及びSendust圧粉コアであり、それらの初透磁率はそれぞれ2,900、50,000、30である。3試料の μ_r 、鉄損及び有効磁壁数(n_{eff})の周波数依存性を測定し、低周波域では磁壁移動、高周波域では磁化回転であることが確認できた。交

流電気伝導率をインピーダンスアナライザで測定し、古典渦電流損 W_{cl} を計算した。 W_{cl} は Fiorillo による W_{rev} によく対応する。 MO という概念を用いている Bertotti の統計モデルとの対応を見てみると、 MO 数 (n'_{MO}) は n_{eff}/β (n_{eff} : 実効磁壁数、 β : 磁壁ダンピング定数) と良く一致する。

今後適用すべき高度化した解析手法として以下が挙げられる。

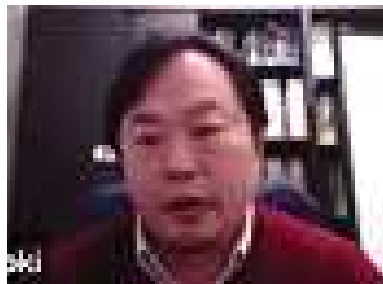
- A) 10MHz に至る高周波領域における磁区構造のシミュレーション
- B) 時間分解 MOKE 磁区観察
- C) 粒子単体の透磁率測定

岡本先生の講義では、鉄損の周波数依存性解析に関し各提案を歴史的に REVIEW し、パワエレに関する最新の情報及び今後の課題を極めて詳細に説明頂いた。後半の圧粉磁心の鉄損に関しては岡本ら: Magnetism Jpn. Vol. 19, No. 5 207 (2024) にトピックスとして紹介されている。本講義と併せて勉強して欲しい。

第3講

日時: 2024年11月22日(金) 14:00-17:00 @Zoom

講義: 各論講義「軟磁性材料の応用について」



講師: 太田 元基 (島根大学次世代たたらセンタ/教授 (株) プロテリアル/主任研究員)

概要:

- 各種軟磁性材料の紹介及び特徴
- 各種パワーエレクトロニクスデバイスに求められる軟磁気特性
- 軟磁性材料選択の例
(現在、多くのパワーエレクトロニクス機器のトランジスタやインダクタンスのコア(鉄心)として使われている各種軟磁性材料の特徴を整理し、用途に適した材料選択の例を交え、紹介する。)

受講者数: 46名

記事: 初透磁率 μ_i は $\mu_i \propto B_s^2 / (K + \alpha \lambda_s \sigma)$ (K : 磁気異方性定数、 λ_s : 磁歪定数、 α : 比例定数、 σ : 応力) で表される。材料の特性 (K , λ_s) と応用時の応力 (σ) によって初透磁率が決定される。 K と λ がゼロの材質が理想的な磁気特性を示す。

材料の形状が軟磁性に影響を与える。薄板(厚み: $>200\mu\text{m}$ 、幅: 数10cm)、リボン(薄帯)、粉末(圧粉磁心、粒径 $<50\mu\text{m}$) と変化すると、磁化は磁壁移動から磁化回転へ変化し、反磁場と電気抵抗が増加する。薄板・薄帯ではコアの透磁率が高く、磁束が漏れにくい、電気抵抗が低く、渦電流が大きい。粉末ではコアの透磁率は低い、コアの電気抵抗が高い。

周波数領域によって使用される軟磁性材料は変化する。電磁鋼板と Fe 基アモルファスは 100~1kHz、Fe 基アモルファスは 1k~10kHz、Fe 基ナノ結晶は 10k~100kHz、メタルパウダーとフェライトが 100k~10MHz の各周波数領域で通常使用されている。パ

ワエレでは SiC や GaN 半導体が汎用化しつつあり、これら半導体の使用周波数領域では、高透磁率と低損失がトレードオフの関係にある。又、良好な軟磁気特性と高パワー密度もトレードオフしている。高パワー密度応用に適合する高軟磁気特性材料がないために、目的に合わせた材料選択が必要になる。この点を理解して、材料の得意・不得意と取扱の留意点を知り、限られた軟磁性材料をうまく使うべきである。

軟磁性材料に用いられる材料は Fe 量が多く、等方的構造(アモルファスのランダム構造、規則度が少し低下した構造、異方性がつきにくい構造等)が適している。

Fe は鉄心材料の基本元素である。磁化が大きく、軟磁気特性が良好で、安価なためである。Fe の磁気特性は高純度化、合金化、酸化物化、アモルファス化及びナノ結晶化によって制御できる。更に、Fe の電子数(合金では Co、Ni の置換による)や価数(酸化物における Mn、Zn、Ni 等の置換)の制御も可能である。

bcc-Fe、hcp-Co、fcc-Ni の結晶磁気異方性 (K_1) 及び磁歪 (λ_{100} , λ_{111}) は正負とその大きさを含めて整理されている。金属の磁性と結晶構造については近角総信著「強磁性体の物理(上)」第4章「物質の構造と磁性」p.172 に記載されており、バンド構造や Fe、Co 及び Ni の 1 原子当たりの磁気モーメントがそれぞれ 2.2、1.7 及び 0.6 μ_B になることを理解して欲しい。

前述したように初透磁率が K と λ に依存し、それぞれがゼロになることが軟磁性材料の理想状態である。更に、 K と λ の相互関係は深く、磁気弾性効果や磁気体積効果として現れる。磁歪による寸法変化 $\Delta l/l$ は磁化の進行と共に増加し、磁壁のない状態で飽和する。金属系軟磁性材料の磁化過程は歪み(strain)と磁気異方性の影響を大きく受ける。歪みの影響を回避して軟磁気特性を向上するためには①ゼロ磁歪組成、② K や λ の影響が表れにくい使い方、③加工時の応力の低減と緩和の3手法がある。

軟磁性材料では磁気異方性の制御が重要で、化学量論組成をうまく使うことが有効である。化学量論組成では①構造の対称性と周期性が高く、②物性のピークを示し、③超格子の効果が得られる等の利点がある。Fe-Ni 合金であるパーマロイには Ni 量によって多くの材質が存在する。Fe-78mass%Ni では 600°C 以上からの急冷で K_1 がゼロになり高透磁率を示すが、徐冷すると FeNi₃ の規則相生成のため K_1 は大きい負の値を示し、軟磁気特性は劣化する。本規則相の生成を Mo、Cr、Cu 等の添加によって抑え、高透磁率と高電気抵抗化が実現され、スーパーマロイが開発された。

センダストは Fe-Si-Al 3 元系混晶合金で、その設計コンセプトでは Fe₃Al と Fe₃Si の有する K と λ を考える。Fe₃Al は概ねゼロの K_1 と大きい正の λ を持ち、Fe₃Si はゼロに近い K_1 と比較的大きい負の λ を持つ。Fe₃Al と Fe₃Si を混晶として、 λ ゼロを狙う。Fe-Si-Al の結晶構造は B1 と bcc からなる DO₃ であるが、2 種の Fe サイトが数的なアンバランスを持って存在している。この状況が規則相にランダムネスを与えている。規則相は必ずしも究極の軟磁気特性を示さないが、変化を与える基点になるといえる。高透磁率を示すセンダスト組成は Fe_{73.8}Si_{16.5}Al_{9.7} (原子%) であるが、その組成範囲を Si: 10~26at.%, Al: 9.6~26at.% へ広げる研究が行われている。スパッタによる急冷で規則相の割合を低減すること、Al 量の調整や熱処理による規則相の割合の調整等が研究例である。パーマロイとセンダストは結晶磁気異方性ゼロと磁歪ゼロを実現できる数少な

い合金系である。

その他の金属系の軟磁性材料には純鉄、カーボニル鉄、Fe-Si（電磁鋼板）及びFe-Co（パーメンジュール）がある。

ソフトフェライトは立方晶の等方的構造を持ち、酸素の囲まれ方の異なる2つのFeサイトがある。最大の特徴は電気抵抗が高いことである。Mn-Znフェライトでは主相の電気抵抗が低いため、粒界相に高抵抗率の相を析出させ、電気抵抗を高めている。Mn-ZnフェライトとNi-Znの電気抵抗 ρ はそれぞれ 10^{-2} と $10^4\Omega\text{m}$ である。Mn-ZnフェライトではMnO、ZnO、 Fe_2O_3 の3元状態図上で、 $K_1=0$ と $\lambda_s=0$ が実現される組成が選択される。

液体超急冷材料であるFe基アモルファス合金の B_s はB量80at%で、 $B_s\sim 1.6\text{T}$ が得られる。アモルファス相内のFeは最近接のFeが疎の状態、bcc構造の様な局所環境にある。アモルファスの磁気モーメントは局所環境に大きく依存し、磁気と体積に強い相関がある。結晶材では $B_s \propto \text{Fe濃度}$ である。

液体急冷法で作製される液体急冷合金の一般組成は $\text{Fe}_{100-x-y}\text{Si}_x\text{B}_y$ と表され、Feは磁気の担い手で、通常92wt.%以上の組成で、SiとBはアモルファス形成能を発揮する。Fe基アモルファス合金の特徴は軟磁気特性にとって+になるものと-になるものがある。プラスになるものを纏めると、①ランダムネス→結晶磁気異方性がゼロ、②薄さ→渦電流損の抑制、③硬さ→剛性の確保、④やや高め磁歪→誘導磁気異方性の起源を与える、がある。

アモルファス薄帯には $(\text{Fe-Ni-Co})_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$ 系でFe、Ni、Coの3元組成を選択することで、多くの材質が用途に沿う形で開発されている。Feリッチ側に磁歪が最大であるが、 B_s が最大になる組成、Coリッチ側で磁歪がゼロになるが、 B_s の低い組成がある。

アモルファス薄帯を用いたリボン巻コアではリアクトルの透磁率を下げるためにギャップ形成が必要になる。ダストコアではギャップなしで透磁率が下げられるが、大型コアの製造が困難になる。アトマイズによってアモルファス粉末の製造も可能である。磁歪が大きく、硬いという欠点があるので、微粉を混ぜて占積率を上げ、成形圧を制限して製品化されている。

Fe基ナノ結晶リボンは液体急冷によるアモルファスリボンを熱処理によって結晶化させて作製する。熱処理によって結晶粒径10nm程度のナノ結晶がアモルファス中に析出した集合組織を有する。本集合組織によって正の磁歪を有するアモルファス相と負の磁歪を有する結晶相によって磁歪が相殺され、ランダム磁気異方性によって結晶磁気異方性が相殺されるため、 λ と K が実質ゼロとなる。ナノ結晶合金の軟磁気特性はHerzerlによって解析され、①磁壁幅よりも小さい結晶粒径が極端に低い結晶磁気異方性を与え、②磁化回転が容易になることが磁気特性発現の基本であることを示した。熱処理時の磁場印加はその印加方向と印加のタイミングで多彩な透磁率制御を可能にする。

各種パワエレデバイスに求められる軟磁気特性を整理している。パワエレは電力用半導体素子を用いた電力変換と制御に関する技術であり、電力変換と制御を中心とした応用システム全般の技術をも指す。軟磁性材料を用いる受動素子には変圧器（トランス）、インダクタ（リアクトル、コイル、チョークコイル、チョッパ）がある。特徴は抵抗を用いた電圧・電流調整よりも損失が少ないことにある。車載充電器のパワエレ受動素子はトランス、コモンモードチョークコイル及びインダクタが挙げられる。トランスは電気絶縁性を有

し、回路に流れる交流電流を利用して電力変換を行う。インダクタ（リアクトル）はコンデンサと併せて用い、スイッチング等で離散的に供給電圧を制御することによって電流が有限時間で変化し、エネルギーの貯蔵と放出を可能とする。トランスの2次側の起電力は $v=-\partial\phi/\partial t$ で表され、 ϕ は軟磁性材を通る磁束である。インダクタンス L を持つインダクタに蓄えられるエネルギーは流れた電流 I を用いて $E=LI^2/2$ (J)と表される。リアクトル、スイッチ及びコンデンサで構成される昇圧チョッパ回路では、リアクトルは電流が変化するとき電圧を発生させる。リアクトルはエネルギーを蓄え、スイッチ動作で蓄えたエネルギーを放出することによって昇圧を行う。出力電圧はスイッチオン時間が長い程増加する。リアクトルには電流が増大するとインダクタンス (L) が低下する直流重畳特性及び温度変化に伴うコアの μ と B_s の変動があるので注意が必要である。

損失の単位は電気回路的には[W]であり、磁気的には[J]である。[W]と[J]の間には単位系として[W]=[J/s]の関係がある。単位時間あたりのエネルギー損失 (W) と1サイクルあたりの損失 (J) を区別して理解しよう。

用途毎に必要なとされる $B-H$ 曲線は変化する。トランス用軟磁性材料には低ロス、高 B_s 、低周波における高 μ が求められる。鉄心は磁束を伝える道の役割を持ち、磁場の追従性を確保するために B vs H 曲線の傾きが急な高 μ 材料が適している。アナログ入力配電用変圧器ではFe基アモルファス合金薄帯やハイグレードの方向性電磁鋼板が用いられる。アモルファス鉄心材料への要求特性は小型化に対して高 B_s 、高占積率が、高効率化に対して低損失が、低騒音に対して低励磁電力がそれぞれ要求される。配電用Fe基アモルファス合金では磁歪による騒音が課題になる。騒音の原因は回転磁化とされ、ヒステリシス曲線上の飽和に近い部分で、磁壁移動が回転磁化に変化する場合に騒音が増大する。従って、磁化過程で 180° 磁壁の運動を支配的にすることによって騒音の低減が可能と言われる。異方性化による 180° 磁壁の安定化と磁壁移動の妨げになる粒界、不純物、欠陥の排除が騒音対策として用いられる。電磁鋼板では方向性電磁鋼板 (GO) を熱処理による結晶粒粗大化が、Fe基アモルファスリボンでは長手方向への T_c 以下での磁場中熱処理が用いられる。

鉄損はSteinmetzの式でその周波数依存性が議論される。50・60Hzの商用周波数では過剰渦電流損 (P_{ac}) を限りなくゼロにする努力が継続されている P_{ac} が $2L/h$ ($2L$: 磁区幅、 h : 板厚) に比例するため、磁区細分化が有効になる。磁壁幅が $\rho^{0.5}$ に比例するので、 P_{ac} は $\rho^{1.5}$ に比例する。1kHz以上では渦電流損が主となり、数10kHz以上では磁壁の枚数も増加せず、鉄損が爆発的に増加する。同じ材料でも処理法を変えることで、磁場に平行な磁壁移動による磁化反転を抑えれば、過剰渦電流を抑制できる。

デジタル波電源のトランスである自励式交直変換器は電圧源として作用するため、出力電圧の正負のアンバランスが生じ、直流成分が発生する。これを直流偏磁と言い、磁心が飽和領域に達して、過電流が発生する。これを避けるために、コアの透磁率を下げ、磁場の振幅幅を小さくすることが求められる。デジタル電源用トランスの磁心では、低損失・低発熱が最優先課題となるため、低ヒステリシス、 $B-H$ カーブが少し寝た形、低磁歪が重要で、磁壁移動を利用した高 μ 材料よりも回転磁化過程が主になるコアが好ましい。

リアクトル (Reactor) はリアクションするものを意味し、スイッチ

ングによる離散的電圧変化に対して磁束・電流が連続的なリアクションを起こす。具体的動作は磁束が侵入するとその動きを妨げ、外部磁場が無くなれば磁場を維持し続ける。電気回路のインダクタンス素子として用いられ、チョッパやチョーク動作を行う。インダクタを構成するコイルは直流電流を通し、交流電流の変動を妨げるように作用し、直流を通さず交流を通すコンデンサと反対の機能を有する。コイルは電流の変動を妨げるように磁束を発生し、コイル電流の流れを妨げるため、エネルギーを蓄えるチョークコイルとも言われる。チョークコイルに使用される磁性体は磁束の道よりも磁束を集めるスポンジの役割が重要であり、高 B_s 材が適する。コア発熱を低減するためにはロスへの配慮を行う。リアクトルでは磁気飽和し難く、 μ が高 H まで一定な軟磁性材料が用いられる。コイルの働きはインダクタンス L で評価され、 $L \propto \mu N^2 A_c / l_g$ (μ : 透磁率、 N : コイル巻数、 A_c : 断面積、 l_g : 磁路長) と表されるため、高 B_s 材料をギャップ形成や形状変化で μ を調整し、広い H の範囲で μ 一定を実現する。一定の低い μ を有する寝た $B-H$ ループが使いやすい。高 B_s 材は大電流に対応できるが、高 H 領域では L の低下によって出力電流波形の乱れが生じる。 L は磁気飽和によって低下するため、磁気飽和を制御する必要があり、その制御手法には①高 B_s 材を使う、②材料を変えて μ を変える、③材料の形態(巻磁心、圧粉磁心等)を変えて μ を変える、④ A_c や l_g 又は N を変える、がある。インダクタは発熱量の大きいデバイスであるため、低ロス材や温度特性のよい材料を使うことが求められる。 $B-H$ 曲線を寝かせる(低 μ 化)の手法は①磁路方向に対して垂直方向に誘導磁気異方性や応力誘起異方性を付与(μ : 4桁程度変化)、②コアをカットして、ギャップを形成(低 μ のエアギャップを挿入、 μ : 3~4桁)、③粉末や粉碎粉を用いてギャップの分散(μ : 1~3桁)がある。応用における周波数変化に対して使用されるコアの μ は変化する。低 f では高 μ 材が、高 f では空芯も用いられる。

薄板を用いたカットコアでは磁束のフリンジング現象(エアギャップにおいて、鉄心の断面積よりも磁束が膨らむ)による渦電流損が発生するため、ギャップ分散型である圧粉磁心のニーズが増加している。圧粉磁心用のパウダー材料は粒子を単結晶とし、不純物がなく、粒子表面の絶縁膜が重要である。メタル系圧粉磁心の採用はフェライト焼結コアよりも小型化に有利で、周波数を勘案し、各種応用に適した材料が選択される。

$B-H$ ループの制御には磁場で熱処理も用いられる。 K が正の材料ではコアの磁路方向と平行に磁場を印加すると角型のよい特性が得られ、磁路方向に垂直に磁場を印加するといわゆる寝た $B-H$ カーブが得られる。磁路方向に応力を加える応力中熱処理では、磁歪定数が正の場合角型のよい特性が得られ、磁歪定数が負の場合寝た $B-H$ カーブが得られる。磁歪が大きい材料ではコア形状によって $B-H$ カーブが変化する。コアの内側では圧縮応力、外側では引張応力が働くためである。角形巻鉄心ではコーナの最小曲率部で $B-H$ カーブが飽和し難くなることにも注意し、曲率対策としては歪み取り熱処理、低磁歪材料の適用、圧粉磁心の適用及びブロックの組合せコアの採用等の手法がある。

パワーエレに大電流制御機器として用いられる可飽和リアクトルではコアの飽和によるインピーダンス低下のために短絡状態になり、高速ターンオンが得られる。パワーノイズを抑制するノイズフィルタにコモンモードチョークが用いられる。ディファレンシャルモードではコア中の

磁場が打ち消しあい、コモンモードでは磁界を強め合う。従って、コモンモードチョークはコモンモードにおいて機能を発揮する。コアにFINEMETが用いられる例がある。

材料選択のポイントを纏める。

- A) 最優先順位は使用目的である。(小型化、高効率化、機能はトランス、インバータ、フィルタ) 目的に沿った仕様(入出力、サイズ、電流、コアロス、 μ 、周波数)を決定する。
- B) 使用環境を考慮し、温度上昇を抑える対策を施す。コア材質のキュリー温度、温度特性、ロス特性を吟味する。
- C) 使用時に大応力が加わる可能性があれば、低磁歪材を選択する。
- D) 譲歩できそうな項目を確認する。(大きさ、振動、騒音、温特、ロス、温度上昇、コスト等)

材料取扱のポイントを纏める。

- A) 磁歪の大きめの材料も加工工程の順番を工夫すれば応用可能である。例えば、完成に近い状況での歪み取り焼鈍などがある。逆に、磁気異方性のコントロールに歪みをつかうこともある。
- B) 熱処理によって $B-H$ ループの形を変えることが可能かを考慮する。
- C) 磁路へのギャップ挿入で μ を下げた場合、ギャップの挿入手法によってはロスが大幅に増加する場合がある。対策としては分散ギャップ、圧粉磁心の粉末粒調整や複合材質の適用がある。
- D) 既存の製造工程で新材料を製造する場合には新材料の性能を犠牲にすることが不可避な場合があるが、材料メーカーとデバイスメーカーの協力で解決していくべきである。

太田先生の講義は材料の基礎、受動素子の機能、応用に必要な材料選択等広範な内容であった。多種の軟磁性材料を広い応用分野に用いていくための基本的な考え方もご教授頂いた。講義の中でも指摘があったが、完全な軟磁性材料は存在せず、時には妥協を含めた各応用への軟磁性材料の適用を考えることの重要性も指摘頂いた。

2025年前期講座予定

第37期BM塾ではZoom開催で、軟磁性材料関連の「パワーエレクトロニクス機器」に関して、3名の講師に講義をお願いしている。塾生諸君の参加をお願いしたい。

第1講

2025年5月30日(金) Zoom

講義: 動的(交流)磁化測定の原理

講師: 小野寺 礼尚(茨城工業高等専門学校/准教授)

第2講

2025年6月20日(金) Zoom

講義: インピーダンス(LCR)測定の基礎および応用

講師: 原野 正幸(日置電機株/プロダクトマネージャー)

第3講

2025年7月11日(金) Zoom

講義: パワーエレクトロニクスにおける磁気部品の基本と応用

講師: 今岡 淳(名古屋大学/准教授)

以上