

日本ボンド磁性材料協会 寺子屋BM塾 第36期講座
軟磁性材料の測定・基礎・応用
(第一講義) 軟磁性材料の測定について
 ～実演も交えた測定の考え方と技術～

Live配信 (リアルタイム配信)
 2024.9.20 (金) 14:00～17:00

岩崎通信機株式会社

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

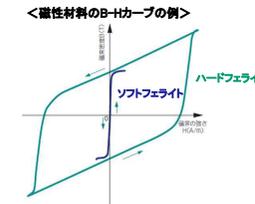
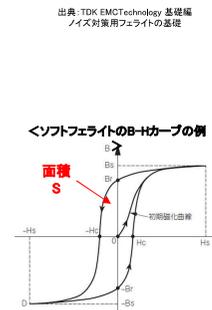
1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
 1) 磁性体とは

- **磁性体**: 一般には磁性を帯びることが可能な物質であり、専門的には反磁性体・常磁性体・**強磁性体**の3つに分けられる。このため、すべての物質が磁性体であるといえるが、通常は強磁性体のみを磁性体と呼ぶ。 出典: ウィキペディア
 - ◎ **強磁性体**: 外部磁場を加えると磁界と同じ方向の磁気を強く帯びるとともに、外部磁場をゼロにしても強い磁気が残る。(鉄、コバルト、ニッケルなど)
 - **硬(質)磁性体**: 外部磁場の影響が無くなっても磁石としての性質を残す
 - **軟(質)磁性体**: 外部磁場の影響が無くなると磁石としての性質がなくなる
 - ◎ **反磁性体**: 外部磁場をかけたとき、物質が磁場の逆向きに磁化される。外部磁場がゼロの時は磁気モーメントが存在しない。(水、金、銀、銅など)
 - ◎ **常磁性体**: 外部磁場が無いときには磁化を持たず、磁場を印加するとその方向に弱く磁化する。外部磁場がなくても磁気モーメントは存在するが、方向がバラバラなため磁気をもたない。(アルミニウム、クロム、ナトリウム、チタンなど)
- ★ **フェリ磁性とフェロ磁性**
- ◎ **フェロ磁性**: 磁気モーメントがすべて揃っており、外部磁場がなくても自発磁化を示す物質。(鉄、コバルト、ニッケルなど)
 - ◎ **フェリ磁性**: 大きさの異なる磁気モーメントが互いに反対方向を向いており、全体として磁化を持つ物質。フェリ磁性体は内部に強磁性体と反強磁性体の部分がある。(酸化物の磁性体であるフェライトなど)

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
 2) B-Hカーブ(フェライトの例)

● 磁性材料のB-Hカーブ(横軸: 磁界の強さH、縦軸: 磁束密度B、で表す)

出典: TDK EMD Technology 基礎編
 ノイズ対策用フェライトの基礎

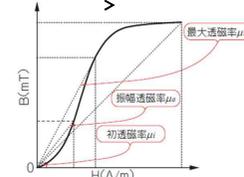


磁性材料の評価は、磁場を正負の磁場に掃引させることにより得られるヒステリシスカーブによる解析が主だが、測定結果は、測定対象物の磁気モーメントの平均値となるので、対象物中の磁気相互作用や、磁束力の分布に対する情報は得ることができない。

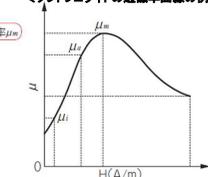
近年では、ナノスケールの磁性材料やナノフェリボンド磁石などの研究も盛んになっており、磁気特性を評価するためには、平均化された特性だけでなく、材料中の構成物質間の相互作用などについての評価も重要になってきている。

出典: ウィキペディア

<ソフトフェライトの初磁化曲線の例>



<ソフトフェライトの透磁率曲線の例>



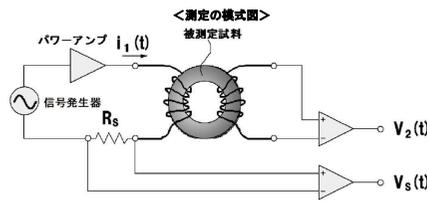
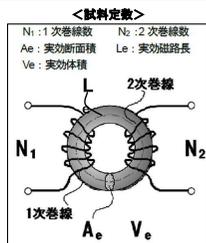
1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

3-1) 測定原理: 2コイル法

●測定原理(2コイル法)

2コイル法を用いると、鉄損(コアロス)のみを測ることができる。

2コイル法では、被測定試料に2つの巻線を施す。
 1次巻線: 試料を励磁するための交流電流を印加。
 2次巻線: 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間電圧を検出。



◎磁束密度 Bと実効断面積Aeの関係
 ◎磁束Hと1次巻線数N1、励磁電流I1、実効磁路長Leの関係は非常に重要。
 ここで下式を覚えておこう!

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \int_0^t V_2(\tau) d\tau$$

$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{L_e} = \frac{N_1 \cdot V_s(t)}{L_e \cdot R_s}$$

IWATSU

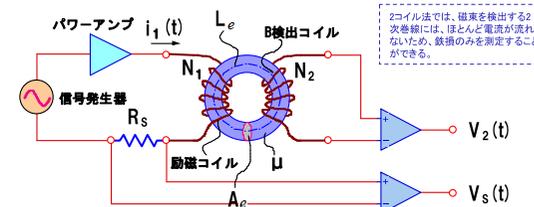
軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講稿

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

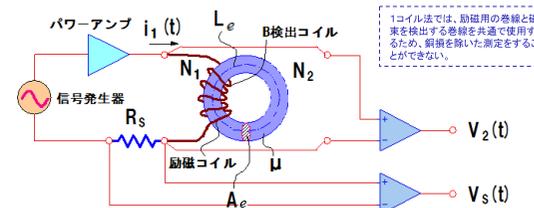
3-2) 測定原理: 2コイル法と1コイル法の差異

2コイル法
 鉄損のみ測定
 ↓
 材料評価



2コイル法では、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、鉄損のみを測定することができる。

1コイル法
 鉄損+銅損
 ↓
 部品評価



1コイル法では、励磁用の巻線は磁束を検出する巻線と共通で使用するため、銅損を除外した測定をすることができない。

IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講稿

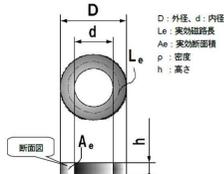
1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

4-1) 試料定数: トロイダルコア

●トロイダルコアの試料定数の算出

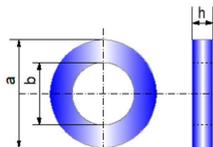
単純に内径・外径の中央部の長さを平均磁路長とする方法(算出1)と、IEC規格に基づき磁心定数C1、C2から求める方法(算出2)を紹介する。

算出1



実効磁路長: $L_e \cong \frac{\pi(d+D)}{2}$
 実効断面積: $A_e \cong \frac{(D-d)h}{2}$
 実効体積: $V_e \cong L_e \cdot A_e$
 質量: $W_e \cong \rho \cdot V_e$

算出2



$C_1 = \frac{2\pi}{h} \ln \frac{a}{b}$ $C_2 = \frac{4\pi}{h^2} \ln \frac{1-\frac{a}{b}}{\frac{a}{b}}$
 $A_e \cong h \cdot \frac{a-b}{2}$ $L_e \cong \frac{C_1^2}{C_2}$ $V_e \cong L_e \cdot A_e$

参考: IEC60205:2016
 Calculation of the effective parameters of magnetic piece parts

IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講稿

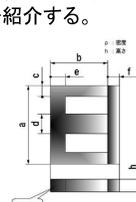
1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

4-2) 試料定数: EIコア、EEコア

●EIコア、EEコアの試料定数の算出

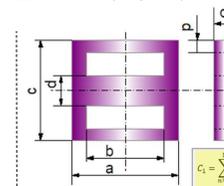
EIコアに対して単純に内側と外側の中央部の長さを平均磁路長とする方法(算出1)と、EEコアに対してIEC規格に基づき磁心定数C1、C2から求める方法(算出2)を紹介する。

算出1



実効磁路長: $L_e \cong a + 2b - c - \frac{d}{2} - e + f$
 実効断面積: $A_e \cong d \cdot h$
 実効体積: $V_e \cong L_e \cdot A_e$
 質量: $W_e \cong \rho \cdot V_e$

算出2



$C_1 = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{A_i}$ $C_2 = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{2A_i^2}$
 $A_e = \frac{C_1}{C_2}$ $L_e = \frac{C_1^2}{C_2}$ $V_e = L_e \cdot A_e$
 $h = \frac{a-b}{2}$ $s = \frac{d}{2}$
 $L_1 = \frac{b}{2}$ $L_3 = l_1$ $L_2 = \frac{c-(2p+d)}{2}$
 $L_4 = \frac{\pi(p+h)}{8}$ $L_5 = \frac{\pi(s+h)}{8}$
 $A_1 = p \cdot q$ $A_2 = h \cdot q$ $A_3 = \frac{d \cdot q}{2}$
 $A_4 = \frac{(A_1 + A_2)}{2}$ $A_5 = \frac{(A_2 + A_3)}{2}$

参考: IEC60205:2016
 Calculation of the effective parameters of magnetic piece parts

IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講稿

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
6-3) 形状と測定方法: 単体では閉磁路を構成できないもの②

●加工が容易な磁性シートの測定では、トロイダル形状に加工し巻線を施して測定したり、小型単板磁気測定装置で測定可能な小片にカットして測定する。
磁性粉末の測定は、通常は2.4項1)で紹介したVSMなどで測定するが、B-Hアナライザで測定する場合には、粉末をトロイダル形状のケースに入れ、巻線を施して測定する。



1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
7) 鉄損(コアロス)

●鉄損(コアロス)

軟磁性材料には、磁化には活用されない鉄損(コアロス)と呼ばれる電力損失があり、 f を動作周波数、 k_h と k_e を係数としたときに単位体積当たりのコアロスは下式で表される。

$$\text{コアロス } (P_{CV}) = \text{ヒステリシス損失 } (k_h \times f) + \text{渦電流損失 } (k_e \times f^2) + \text{残留損失}$$

◎ヒステリシス損失: 軟磁性材料の磁化曲線(BH曲線)のヒステリシスに由来して発生する損失であり、動作周波数に比例して増大する。

◎渦電流損失: 磁心(コア)内の磁束が変化した際に電磁誘導作用によって磁心内部に流れる渦電流によるジュール熱損失であり、材料の導電率とコア形状に大きく依存する。

◎残留損失: コアロス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。一例として、コア内の熱平衡が変化するときなどの緩和プロセスにより発生する。

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
8) 渦電流損失

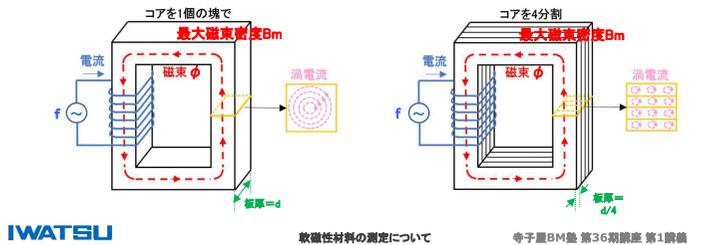
●渦電流損失

単位体積あたりの渦電流損失は交番磁束 ϕ (最大磁束密度 B_m)が通る方向の軟磁性材の厚みを d とし、動作周波数を f 、 K_e を軟磁性材料の定数とすると下式で表わされる。

$$\text{渦電流損失} = K_e \cdot (B_m \cdot f \cdot d)^2 \quad [W/m^3]$$

出典:公益社団法人日本電気技術者協会 電気技術解説口座 インダクタンス用語(®) うず電流とその性質

単位体積あたりの渦電流損失は、厚みの二乗に比例するため、 B_m 、 f 、 K_e が変わらないとするとコアを4分割した場合に発生する単位体積あたりの渦電流損失は1/16になる。



1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎
9) 交流B-Hアナライザで得られるパラメータの種類

シンボル	代表単位	説明	シンボル	代表単位	説明
P_c	[W]	コアロス	I_m	[A]	最大励磁電流
P_{cv}	[W/m ³]	体積比コアロス	V_{2m}	[V]	最大誘起電圧
P_{cm}	[W/kg]	質量比コアロス	L	[H]	インダクタンス
μ_a	-	振幅比透磁率	R	[Ω]	抵抗
H_m	[A/m]	最大磁界	$ Z $	[Ω]	インピーダンス
B_m	[T]	最大磁束密度	μ'	-	複素透磁率(実部)
H_c	[A/m]	保磁力	μ''	-	複素透磁率(虚部)
B_r	[T]	残留磁束密度	μ_z	-	インピーダンス透磁率
B_r/B_m	-	角型比	$\tan \delta$	-	損失係数
$2\Phi_m$	[Wb]	総磁束変化	Q	-	品質係数
θ	[deg]	位相角	THD	-	全高調波歪み
VA	[VA]	皮相電力			

※インダクタンスなどは、LCRメータやインピーダンスアナライザでも測れるが、それらと交流B-Hアナライザとの測定差異は、実動作に近い大きな励磁電流で測定を行えることである。コイルは、電流の振幅依存性(大きくなると磁気飽和)を持つため、その効果は大きい。

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

10-1) 磁気パラメータの算出①

●磁気パラメータの算出

◎ μ_a 、角形比 B_r/B_m 、総磁束変化 $2\phi_m$ 、コアロス P_c 、皮相電力 VA など

$$H_m = \frac{|H_m \uparrow + H_m \downarrow|}{2}$$

$$B_m = \frac{|B_m \uparrow + B_m \downarrow|}{2}$$

$$H_c = \frac{|H_c \uparrow + H_c \downarrow|}{2}$$

$$B_c = \frac{|B_c \uparrow + B_c \downarrow|}{2}$$

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$$

(μ_0 : 真空透磁率 $4\pi \times 10^{-7} [H/m]$)

$$B_r/B_m = \frac{B_r}{B_m}$$

$$2\phi_m = A_c (B_m \uparrow - B_m \downarrow)$$

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_1(t) \cdot V_2(t) dt$$

$$P_{cv} = \frac{P_c}{V_c}$$

$$P_{cm} = \frac{P_c}{W_c}$$

$$VA = \frac{N_1}{N_2} \cdot i_{1RMS}(t) \cdot V_{2RMS}(t)$$

(RMS: 実効値)

IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第56期講座 第1講義

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

10-2) 磁気パラメータの算出②

●磁気パラメータの算出

◎位相角 θ 、複素透磁率 μ 、インピーダンス透磁率 μ_z 、品質係数 Q 、損失係数 $\tan \delta$ 、インダクタンス L 、抵抗 R 、インピーダンス $|Z|$ 、全高調波歪 THD など。位相角 θ は、電圧波形に対する電流波形の位相遅れを示す。理想的なコイルに電圧・電流を印加すると、電流波形は 90° 位相が遅れる。

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \frac{B(\omega_0)}{\mu_0 H(\omega_0)}$$

(μ : 複素比透磁率, j : 虚数単位, $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 : 測定周波数)

$$\mu_z = \sqrt{(\mu')^2 + (\mu'')^2}$$

$$Q = \frac{\mu'}{\mu''}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{Q}$$

$$L = \frac{\mu' \mu_0 A_c N_1^2}{L_e}$$

$$R = \frac{\omega_0 \mu'' \mu_0 A_c N_1^2}{L_e}$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega_0 L)^2}$$

$$THD = 20 \log_{10} \frac{\sqrt{V_2^2(3\omega_0) + V_2^2(5\omega_0) + V_2^2(7\omega_0)}}{V_2(\omega_0)}$$

IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

11-1) 軟磁性材料の磁気特性を測る測定器①

●磁気特性を測る測定器には、様々な装置があるが、ここではB-Hカーブの測定が可能なものに限定して説明を行う。例えば、インダクタンスの測定であれば、LCRメータやインピーダンスアナライザでも測定可能であるが、B-Hカーブの測定はできないため、本章の説明からは省く。

◎振動試料型磁気計 (VSM)

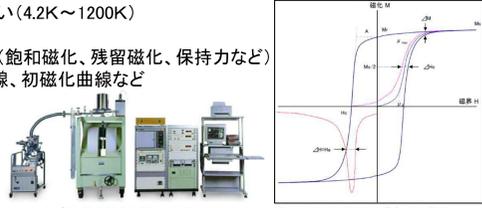
均一磁界中に置いた試料を一定周波数、一定振幅で振動させ、試料の周囲に置いた検出コイルに誘起する起電力を測定する。

特徴:

- 均一磁界中で磁化を測定
- 広範囲な印加磁界中で磁化測定可能 (1mOe ~ 100kOe)
- 磁化測定範囲が広い (反強磁性体から強磁性体、薄膜からバルク体)
- 温度測定範囲が広い (4.2K ~ 1200K)

測定項目:

- ヒステリシスループ (飽和磁化、残留磁化、保持力など)
- 微分曲線、減磁曲線、初磁化曲線など



1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎

11-2) 軟磁性材料の磁気特性を測る測定器②

◎直流B-Hアナライザ

直流の磁気特性を測定する。測定原理は、1項3-1)で説明した2コイル法を使用しB-Hカーブを取得する。

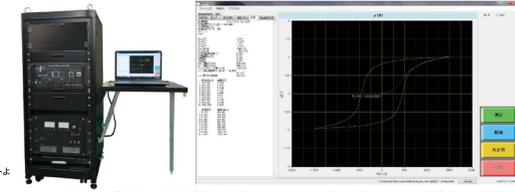
完全な直流ではB-Hカーブは描けないため、非常に低い周波から、10kHz程度までの測定を行うことができる。

特徴:

- 軟磁性材料はトロイダルコアにて2コイル法で測定
- 硬磁性材料は電磁石と組合わせて測定

測定項目:

- ヒステリシスループ (飽和磁化、残留磁化、保磁力など)
- 初磁化曲線、バイアス磁界、偏磁磁化特性など



1. 軟磁性材料の磁気特性の基礎 11-3) 軟磁性材の磁気特性を測る測定器③

◎交流B-Hアナライザ

交流の磁気特性を測定する。測定原理は、1項3-1)で説明した2コイル法を使用しB-Hカーブを取得する。

下限は10Hzから、上限は10MHzの高周波までの測定を行うことができる。

特徴:

- ・高周波まで高精度な測定ができる。
- ・オプションが豊富(恒温槽スキャナー、DCバイアス、単板磁気測定など)

測定項目:

- ・B-Hカーブ、励磁電流/誘起電圧/磁界/磁束密度の時間軸波形
- ・コアロス、振幅比透磁率、インダクタンス、複素透磁率など多数



21

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 (実機デモ含む)

2項は理解を深めるために、説明後に実機による測定デモを行う



2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 1) 測定を行う交流B-Hアナライザ

●実測デモに使用する交流B-Hアナライザとパワーアンプを下記に紹介する。

■CROSS-POWER法(IEC62044-3準拠)にて高周波まで正確なコアロス測定

B-H アナライザ(本体)

SY-8218 10Hz ~ 10MHz

SY-8219 10Hz ~ 1MHz

- 測定周波数 10Hz~10k-Hz(SY-8218)
10Hz~1MHz(SY-8219)
 - 印加波形 正弦波、方形波(10Hz~1MHz)
 - 最大入力電流 ±6A
 - 最大入力電圧 ±200V
 - 励磁方法 自動励磁
- (最大磁界、最大磁束密度、最大励磁電流、最大誘起電圧指定)
残留磁化を残さない様に減衰交換磁界を掛けて励磁



高周波・ハイパワーのパイボア電源

B-Hアナライザ専用パイボア電源

	最高周波数	最大出力電流	最大出力電圧
SY-5001	3MHz	±6Apeak	±150Vpeak
SY-5002	3MHz	±6Apeak	±75Vpeak



23

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 2) 測定の手順-1、試料定数の算出

●おおまかな測定手順は下記の通り

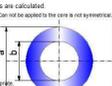
- 磁気特性の測定を行いたいトロイダル試料や巻線用の線材を用意
- どんな条件で磁気測定を行いたいのか(周波数範囲は？励磁条件は？)
- まずは、シミュレーション・シート(岩通より提供)で試算してみる(D~)
- 試料定数(Le、Ae、Ve、We)が提供されているかどうか？
不明な場合には、外径・内径・高さをノギスで測る(実際には、表面にコーティングがあったり、エッジ部が丸まっていたりして正確にはわからないが、メーカーから提供されていない場合にはやむなしとする)。単位重さあたりのコアロスPcmを知りたい場合には、重さも測る。Pcmが必要な場合にはWe=1と仮定して置く(後で必要になった場合にはPcの値から算出可能)。上記が用意出来たらシミュレーションのコアファクタで試料定数を算出する。

Calculation of core factors

If you enter value in the grey cells, core factors are calculated.

■ Toroidal core * If core is not applied to the core is not symmetrical.

Items	Value	Description
a [mm]	23.6	
b [mm]	14.2	
h [mm]	7.92	



Items	Value	Description
C1 [mH]	1.0296E+03	core factor
C2 [mH]	4.0673E+07	core factor
Le [mm]	57.227	effective length of magnetic path
Ae [mm ²]	37.506	effective cross-sectional area
Ve [mm ³]	2148.266	effective core volume

$$C_1 = \frac{2\pi}{h \ln \frac{a}{b}} \quad C_2 = \frac{4\pi \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a}\right)}{h^2 \ln \frac{a}{b}}$$

$$A_e = \frac{a-b}{2} \quad L_e = \frac{C_1^2}{C_2} \quad V_e = L_e A_e$$



24

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定
3) 測定の手順-2、インダクタンスの算出

●おおまかな測定手順の続き

- E) まず、1次巻線の巻数を仮で決め、試料のおおよその比透磁率を用いて、シミュレーション・シートのインダクタンスでインダクタンス値を算出する。

Calculation of inductance

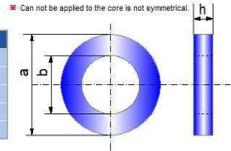
If you enter value in the gray cells, inductance are calculated.

Toroidal coil

Coil factors

Items	Value	Description
a [mm]	23.9	
b [mm]	14.2	
h [mm]	7.92	
N [turn]	10	number of turns in primary winding
μ_r	10	relative permeability at the Frequency

Red characters mean the calculation can not be appropriate.



Inductance

Items	Value	Description
L [μ H]	8.2489E-01	inductance
AL value [μ H/N ²]	0.008	

$$AL \text{ value} = \frac{\mu_0 \mu_r h}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

$$L = N^2 \cdot AL \text{ value}$$

もし、比透磁率わからない場合には、材料から10、100、1,000、10,000のオーダーを予測し、試算してみる。

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定
4) 測定の手順-3、測定試算1

●おおまかな測定手順の続き

- F) まず、N1=N2とし、シミュレーション・シートのSY-95xに今まで得られた値(赤枠部)を代入する。

Sample Parameters Assume ESR(estimated statistic resistance) of primary winding << Rs.

Items	Value	Description
L _e [mm]	57.2	effective length of magnetic path
A _e [mm ²]	37.6	effective net core area
N ₁ [turn]	10.0	number of turns in primary winding
N ₂ [turn]	10.0	number of turns in secondary winding
d [mm]	0.500	copper wire diameter of primary winding
L [μ H]	0.82	inductance of primary winding at the Frequency
C _w [pF]	10.0	capacitance between the primary winding and secondary winding

Configurations

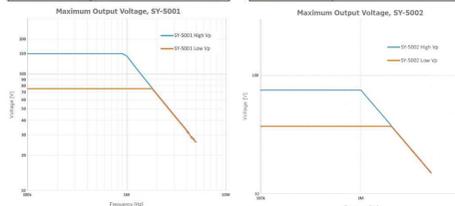
Items	Value	Description
B-H analyzer	SY-8218	
Power amp.	SY-5001	
Coil	2	coil method (single coil or double coils)

パワーアンプの最大出力は機種により異なるので機種名は正しく入れる。

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定
5) 測定の手順-4、パワーアンプの最大出力電圧・電流

- 使用するパワーアンプには、最大出力電圧・電流の規定があり、出力周波数により変化する。シミュレーション・シートでは、上記規定に合わせて判定を行う。

Model	SY-5001	Model	SY-5002
Frequency	DC ~ 3kHz	Frequency	DC ~ 3kHz
Gain	1, 5, 10, 30, 60 \pm 2% (\pm 100ppm/°C)	Gain	30 \pm 1% (\pm 100ppm/°C)
Output Voltage	HIGH mode \pm 150Vpeak (f<750kHz) LOW mode \pm 75Vpeak (f<1.4MHz)	Output Voltage	HIGH mode \pm 75Vpeak (f<500kHz) LOW mode \pm 37.5Vpeak (f<1.8MHz)
Output Current	HIGH mode \pm 5Apeak (f<10Hz) LOW mode \pm 6Apeak (f<10Hz)	Output Current	HIGH mode \pm 5Apeak (f<10Hz) LOW mode \pm 6Apeak (f<10Hz)
Output Impedance	30m Ω \pm 0.33 μ H	Output Impedance	50m Ω \pm 0.30 μ H
Size (mm)/Weight	Approx. 449Wx178Hx435.5D/118kg	Size (mm)/Weight	Approx. 449Wx133Hx435.5D/14kg



2. トロイダル形状試料の磁気特性測定
6) 測定の手順-5、測定試算2

●おおまかな測定手順の続き

- G) 周波数(100kHz)と励磁条件(Bmで10mT)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。

Excitation Conditions Red characters mean the simulation can not be appropriate.

Items	Value	Description
Function	Sm	Pulse can not be selected for using IE-114
Frequency [kHz]	100	0.01[Hz] \leq and \leq 1000[Hz] (SY-8219) or 3000 for pulse excitation (non-user-changeable)
Duty [%]		
Target parameter	Bm	
T _a [°C]	25	ambient temperature

Simulate

simulate

Simulation Result Red characters mean the simulation can not be appropriate.

Items	Value	Comments
0.1 f ₀₂ [kHz]	3292.2	Resonance frequency of secondary winding L _s must satisfy Frequency \leq 0.1 * L _s . When L _s < Frequency, current waveform is similar to the triangular.
f ₀₁ [kHz]		
I ₁ [A]	4.585	Current must be \leq 6[A] or can not exceed output current of the power amp.
V ₁₂ [V]	2.36	Voltage across the secondary winding must be V ₂ \leq 200[V] (2coil method)
V ₁ [V]		Voltage across the primary winding must be V ₁ \leq 200[V] (1coil method)
V _{exc} [V]	5.16	Excitation voltage V _{exc} can not exceed output voltage of the power amp.
Amp Gain	\times 5	It should be set this value to the gain of the power amp.
T [°C]	28.7	Temperature of the sample is expected at T \leq 50[°C]

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 7) 測定の手順-6、測定試算3

- おおまかな測定手順の続き
 - Gのつづき) 前ページの条件で周波数のみ10倍の1MHzと20倍の2MHzに変更してみると、2MHzでは測定できないことがわかる。

■ Simulation Result Red characters mean the measurement can not be done appropriate.

Items	Value	Comments
0.1 f_{c2} [kHz]	3292.2	Resonance frequency of secondary winding f_{c2} must satisfy Frequency $\leq 0.1 \cdot f_{c1}$
f_{in} [kHz]	4.585	When $f_{in} < f_{res}$, Frequency, current waveform is similar to the triangular.
I_1 [A]	4.585	Current must be $\leq I_1$ [A] or can not exceed output current of the power amp.
V_{L2} [V]	23.62	Voltage across the secondary winding must be $V_{L2} \leq 200$ [V] (2coil method)
V_{L1} [V]	24.07	Voltage across the primary winding must be $V_{L1} \leq 200$ [V] (1coil method)
V_{out} [V]	24.07	Excitation voltage V_{out} can not exceed output voltage of the power amp.
Amp Gain	$\times 30$	It should be set this value to the gain of the power amp.
T [°C]	28.7	Temperature of the sample is expected at $T \leq 50$ [°C]

1MHzの結果

パワーアンプ出力電圧に問題はない。

■ Simulation Result Red characters mean the measurement can not be done appropriate.

Items	Value	Comments
0.1 f_{c2} [kHz]	3292.2	Resonance frequency of secondary winding f_{c2} must satisfy Frequency $\leq 0.1 \cdot f_{c1}$
f_{in} [kHz]	4.585	When $f_{in} < f_{res}$, Frequency, current waveform is similar to the triangular.
I_1 [A]	4.585	Current must be $\leq I_1$ [A] or can not exceed output current of the power amp.
V_{L2} [V]	47.25	Voltage across the secondary winding must be $V_{L2} \leq 200$ [V] (2coil method)
V_{L1} [V]	47.47	Voltage across the primary winding must be $V_{L1} \leq 200$ [V] (1coil method)
V_{out} [V]	47.47	Excitation voltage V_{out} can not exceed output voltage of the power amp.
Amp Gain	$\times 30$	It should be set this value to the gain of the power amp.
T [°C]	28.7	Temperature of the sample is expected at $T \leq 50$ [°C]

2MHzの結果

パワーアンプ出力電圧が最大出力を超えている

2次巻線に誘起される電圧は、励磁電流が正弦波の場合、下式で表される。

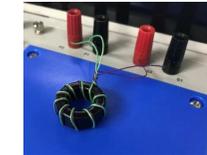
$$V_{2m} = 2\pi f N_2 B_m A_e$$
 周波数に比例するので注意すること。
 この例では、 V_{L2} が周波数に比例して2倍になる。

IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

29

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 8) 測定の手順-7、巻線、測定部への取り付け

- おおまかな測定手順の続き
 - H) 試料に巻線をしてみる。ポイントは下記の通り。
 - ◎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、試料と2次巻線の間に発生する空隙が小さくなるように試料に密着させて等間隔になるように1次巻線より先に巻く。
 - ・1次巻線は流す励磁電流に耐えられる線径の線材で、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、高周波の測定ではできるだけ短くする。
 - ◎比透磁率の大きな試料の場合 ($N_1 = N_2$)
 - ・1次巻線と2次巻線の2本で並行線を作り、同時に試料に巻付ける。
 - ※下記写真は、 $\phi 0.5$ と $\phi 0.26$ の線材で並行に巻き付けている。
 - I) 測定部に取り付ける。できるだけ金属から遠ざけるよう中央部に配置する。



IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

30

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 9) 測定の手順-8、測定時のポイント

- おおまかな測定手順の続き
 - J) 試料定数を入力する。初めての試料では、励磁条件は磁束密度 B_m 指定でなく励磁電流 I_m 指定(100mA程度)で行うのが良い。また、なるべく低い周波数で行う。理由は、試料定数や比透磁率などが大きく誤っていても、励磁電流指定であれば、パワーアンプに大きな負荷をかける心配がないためである。測定を実行すると、試料の比透磁率がわかるので、改めて、測定結果の振幅比透磁率 μ_a の値を持ちてE)~F)をシミュレーションし直す。この時、手元にLCRメータやインピーダンス・アナライザがあれば、インダクタンスや、 N_1 - N_2 間の線間容量も実測しシミュレーションし直するのが望ましい。シミュレーションし直しても、希望条件で問題なく測定できるようであれば、周波数を指定条件にし、念のため励磁条件 B_m を小さい値から徐々に上げながら希望の設定値まで測定を行う。以下のような場合には、シミュレーション通りの結果にはならないので注意する。
 - ・磁気特性が飽和している場合
 - ・測定時の発熱で磁気特性が変化した場合
 次のページでは、シミュレーションで希望通りの測定ができなかった場合の対処方法について説明する。

IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

31

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定 10) 測定の手順-9、希望通りの測定をするために

- おおまかな測定手順の続き
 - K) シミュレーション・シートで希望通りの測定ができなかった場合は、以下を参考に条件を変更してみる。

- ◎磁界 H_m を大きくしたいとき
 - 電流がパワーアンプの最大出力付近になっている場合には、 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。

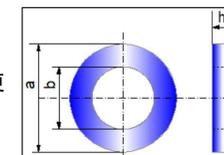
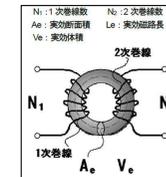
$$H(t) = \frac{N_1 \cdot i_1(t)}{L_e} = \frac{N_1 \cdot V_2(t)}{L_e \cdot R_s}$$

- ◎磁束密度 B_m を大きくしたいとき
 - N_2 の巻数を少なくとも誘起電圧 V_{2m} も比例して小さくなるため、磁界 H_m を大きくするか、試料サイズを変えて断面積 A_e を小さくする。

$$B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \int_0^t V_2(\tau) d\tau$$

- ◎共振周波数を上げたい
 - 1次巻線の巻数を減らすか、試料サイズを変更し、 $h \rightarrow$ 小、 a と b の比 \rightarrow 小にする。

$$L = \left(\frac{\mu^0 \cdot \mu_r \cdot h}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{a}{b} \right) \right) N^2$$



IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

32

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定

11) 測定の手順-10、飽和波形の測定

●おおまかな測定手順の続き

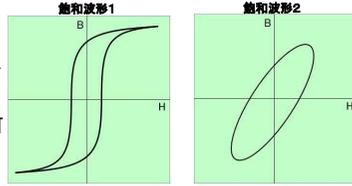
L) 飽和波形の測定

◎飽和波形1の測定

一般的な磁性材で飽和状態になった場合には、飽和波形1のようなB-Hカーブを示す。飽和磁束密度Bsを測りたいときなどに、磁束密度Bm指定にて測定を行うと、Bmが指定値に入らないエラーが発生し、正常に測定を行うことができない。このエラーは、Bの頂点付近で波形が寝ているため、Bm値が指定した許容範囲内に入るための磁界Hの値を定めるのが難しいために起こる。対策としては、Bmでなく、磁界Hmまたは、励磁電流im指定にして測定し、測定したいBm値になるHmまたはimの値を測定を繰り返すことで見つける方法がある。

◎飽和波形2の測定

高周波の測定を行うときに、飽和波形2のようなB-Hカーブを示す場合がある。このような波形では、Bm指定の測定も可能であるが、大きな発熱が発生している場合には、発熱による特性変化で、正常に測定できない場合もある。



IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

33

2. トロイダル形状試料の磁気特性測定

12) 実測デモに使用する試料

●カルボニル鉄粉(カーボニル鉄粉)

真球状の直径1-8 μ mの粒度分布が均質な純鉄粉で、粉末冶金、圧粉磁心、ノイズ抑制シートなどに使用される。

●ソフトフェライト

酸化鉄(Fe₂O₃)を主成分としたセラミックスの総称。酸化鉄にコバルトやニッケル、マンガンなどを混合し焼結して製造する。棒状や板状、円環状(トロイダル状)など様々な形状で使用される。酸化物のため金属磁性体に比べて電気抵抗が非常に高い特長を持ち、高周波まで優れた磁気特性を示す。身の回りにあるあらゆる電子機器、テレビや洗濯機、冷蔵庫、掃除機、パソコン、自動車などに使用される。

●センダスト(由来: 仙台で発明されたダストコア)

鉄にケイ素(9.5%)とアルミニウム(5.5%)を添加して製造。高透磁率かつ高飽和密度Bsであるが、極めて固くて塑性加工性に乏しく、衝撃に対して危うい。この性質を利用して、圧粉磁心(ダストコア)として用いられる。主に磁心材料に用いられるが、優れた耐摩耗性と薄膜技術により、磁気ヘッドや磁気カードの読み取り装置などにも使用される。

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

34

3. シート形状試料の磁気特性測定

(実機デモ含む)

3項は理解を深めるために、説明後に実機による測定デモを行う

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義 35

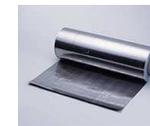
3. シート形状試料の磁気特性測定

1) 単板と単板を使用した製品

●軟磁性材を板やシート、部品形状の薄板に加工したもの。代表的な軟磁性材料として、電磁鋼板やアモルファス金属、ナノ結晶軟磁性材料、フェライトなどがある。



出典: 電機資材網様webより



出典: 日立金属網様webより



出典: 朝レーザックス様webより



出典: 日本理工商事網様webより

●積層してモーターのステータやロータ、電源トランスやリアクトルの鉄心などに使われる。



出典: トヨタ紡織網様webより



出典: 三菱自動車工業網様webより



出典: 朝信電機製作所様webより



出典: スロー電機網様webより



出典: 住友電工網様webより

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

36

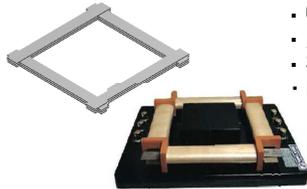
3. シート形状試料の磁気特性測定 2) 単板測定方式の種類と特長

●単板測定方式には、下記の3種の方式がある。

◎ エプスタイン法 (JIS C 2550, IEC60404-2)

◎ SST { 励磁電流法 (JIS C 2556, IEC60404-3)
Hコイル法 (JIS C 2556)

●エプスタイン法
エプスタインフレームを使用して測定。



- ・Min12枚も単板が必要(面倒、特性が揃わない)
- ・大きな単板が必要(30W × Min280L)
- ・磁束密度Bが不均一(断面積が不均一)
- ・エアギャップが出来やすい(四隅)

出典: トロン技術情報webより

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

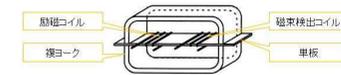
37

3. シート形状試料の磁気特性測定 3) SST (励磁電流法)とSST (Hコイル法)

●SST (励磁電流法)



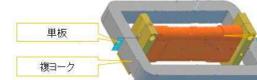
出典: 大分県産業科学技術センターwebより



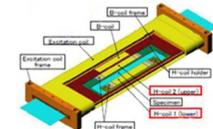
出典: J.Sievert, J.Magn.Mater. 巻 215-218(2000)847-851

- ・Hコイル法よりコイル少なく、構造が簡素(市販品多数)
- ・単板は1枚だけで良い
- ・測定値にヨークのコアロス等の磁気特性が含まれてしまう
- ・大きな単板が必要(JIS: 30W × Min280L)

●SST (Hコイル法)



出典: 大分県産業科学技術センターwebより



出典: 大分県産業科学技術センターwebより

- ・単板は1枚だけで良い
- ・原理的には測定値にヨークのコアロス等の磁気特性が含まれない
- ・コイルが多く(4種5個)、構造が複雑
- ・大きな単板が必要(30W × Min280L)

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

38

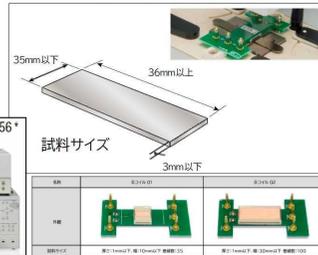
3. シート形状試料の磁気特性測定 4) 小片試料を簡単に測定

●実測デモに使用する小型単板磁気測定装置を下記に紹介する。

小片単板試料での交流磁界特性の測定

小型単板磁気測定装置 SY-956

- 測定周波数 10Hz~20kHz
- 最大印加磁界(の強さ) 10,000A/m
- 試料サイズ 長さ36mm以上、幅35mm以下、厚さ3mm以下
- 縦型単ヨーク式励磁電流法単板磁気特性試験法を採用
- 新方式測定ヨークのコアロス等の磁気特性をキャンセルするヨーク補償機能を搭載
- 測定試料を押さえる力を一定にして測定の再現性を確保



IWATSU

軟磁性材料の測定について

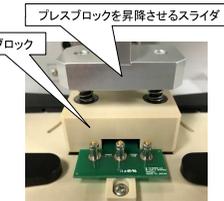
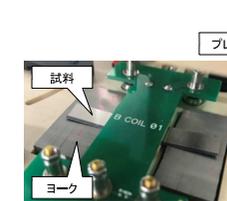
電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

39

3. シート形状試料の磁気特性測定 5) 異なる試料で測定比較、方向性の比較

●異なる試料で測定比較する場合には下記に注意する。

- ・試料の大きさは(幅・長さ・厚み)は同じに
- ・ヨークと試料の接触面の位置は同じに
- ・試料の裏と表で差異がないか確認し、差異がある場合には測定面にも同じに
- ・試料を上からホルドするスライダの加圧値を同じに



●方向性のある試料では、30mm × 30mmのサイズの試料を用意し、測定時のヨークに対する設置方向を0°と90°に変更して測定することで、同一試料での方向性の磁気特性比較を行うことができる。

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

40

3. シート形状試料の磁気特性測定 6) 実測デモに使用する試料

●ケイ素鋼板

鉄にケイ素を添加して製造した鉄板(電磁鋼板)。ケイ素添加量が増すごとに鉄損が低下する。但し、ケイ素添加量が増えると鋼が割れやすくなる。特定の方向に磁化しないようにした無方向性電磁鋼板と特定の方向に磁化しやすくなるようにした方向性電磁鋼板がある。

◎無方向性ケイ素鋼板: モータの鉄心や発電機などに使用される。

◎方向性ケイ素鋼板: 変圧器の鉄心などに使用される。

●ナノ結晶軟磁性材料

アモルファス(非結晶)合金中にナノサイズの結晶を有する軟磁性材料。熱処理により、急冷アモルファス組織からナノレベルの金属組織の結晶化を行う。

◎ファインメット(日立金属、1980年代後半に開発)

基本組成Fe-Cu-Nb-Si-Bからなるナノ結晶軟磁性合金の磁性薄帯。フェライトに比べて高透磁率かつ高飽和磁束密度、低損失、高角形比な特長を持つ。

◎ナノメット(東北マグネットインスティテュート、2014年に東北大にて開発)

基本組成Fe-Si-B-P-Cuから成るナノ結晶軟磁性合金の磁性薄帯。電磁鋼板に匹敵する飽和磁束密度Bsと高透磁率(低い無負荷損)の特長を持つ。

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 (実機デモ含む)

4項は理解を深めるために、説明後に実機による測定デモを行う

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 1) 電気自動車用昇圧リアクトルの例

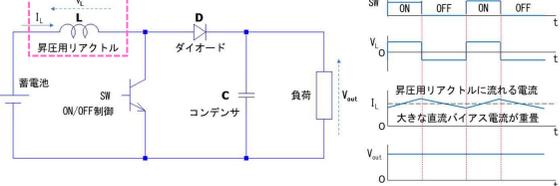
●電気自動車用昇圧リアクトル

<電気自動車の昇圧回路と回路の電圧・電流波形の一例>

昇圧リアクトルのイメージ



出典: 株式会社タムラ製作所
webサイト



●リアクトルは昇圧回路の中で直流電流は抵抗なくスムーズに通すが、交流電流に対しては逆にブレーキをかけることで急激な電流変化を防ぐとともに、電気エネルギーを磁気エネルギーに変化させリアクトル内部の磁性材料に蓄える役割を果たす。

昇圧リアクトルには非常に大きな直流電流が重畳される。そのため、昇圧リアクトルに使用される軟磁性材料には、大きな直流電流が重畳されている状態でも磁気特性が飽和しないために、高い飽和磁束密度が要求される。

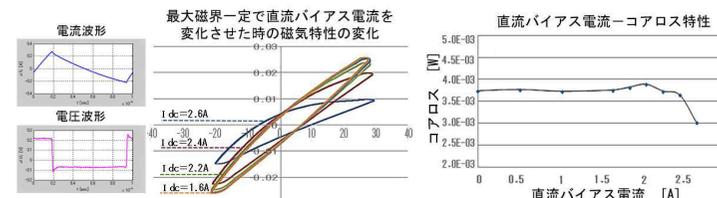
4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 2) チップインダクタの測定例

●チップインダクタに直流バイアス電流を印加し、かつ昇圧回路と同じようにパルス励磁してコアロスを測定した例を下記に示す。

測定条件は、周波数100kHzで、デューティ25%のパルス(励磁電流は三角波、誘起電圧は方形波)で励磁し、直流バイアス電流を0Aから2.6Aまで可変している。

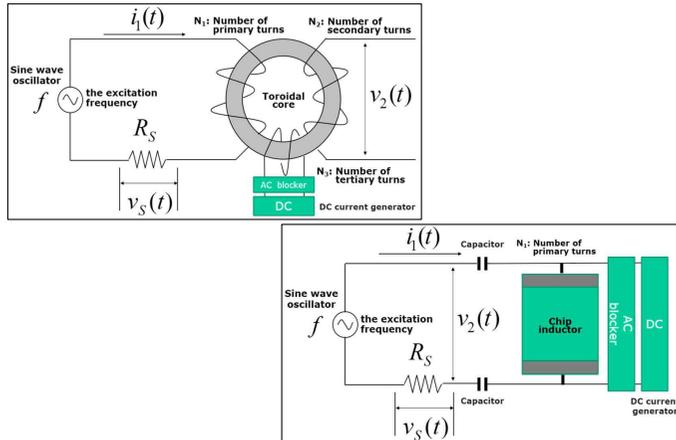
測定結果より、下記の特徴が得られた。

- ・ 直流バイアス電流が2Aを超えるまではコアロスはほぼ一定
- ・ 直流バイアス電流2.5Aの直前でコアロスが急激に減少
- ・ コアロス減少時のB-Hカーブは、透磁率が下がり、非対称に大きく歪む



4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 3) 直流バイアス電流の印加方法

●トロイダルコアとチップインダクタを例に直流バイアス電流の印加方法を紹介します。



IWATSU

軟磁性材料の測定について 寺子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 4) 1コイル法でも2コイル法でも測定可能な装置

●実測デモに使用するDCバイアステスタを下記に紹介する。

直流バイアス印加時の交流磁気特性の測定

DC バイアス・テスタ SY-960/961/962

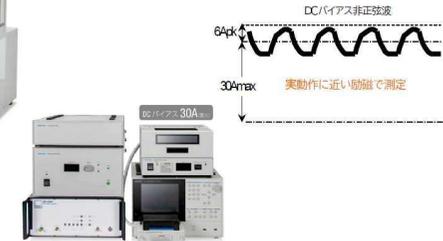
- 最大DCバイアス 30A
- 最大リプル ±6A
- 測定周波数(正弦波) 10kHz~3MHz
インダクタンスの値によっては測定可能な周波数が10kHzよりも高くなる場合があります。
- 測定周波数(方形波) 10kHz~1MHz(Duty10%~90%)

DCバイアスソース SY-961



ACブロック SY-962

DCバイアステスタ SY-960



軟磁性材料の測定について

寺子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

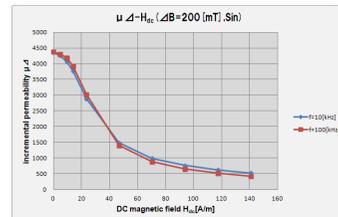
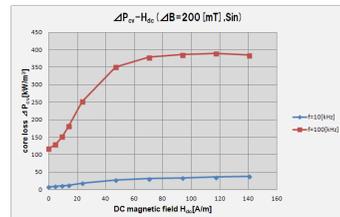
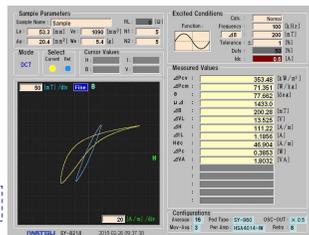
IWATSU

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 5-1) 測定例: Ferrite core

■ Ferrite core
L=53.1[μH]



このフェライトコアは、直流重畳するアプリケーションには適さないことがわかる。



IWATSU

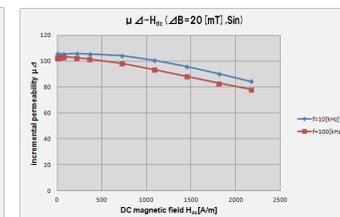
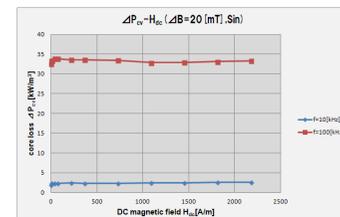
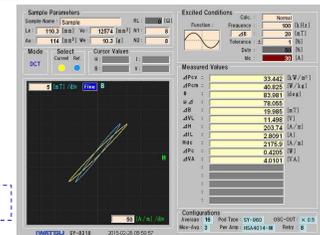
軟磁性材料の測定について 寺子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 5-2) 測定例: Iron powder core

■ Iron powder core
L=8.4[μH]



この鉄粉コアは、直流重畳するアプリケーションに適していることがわかる。



IWATSU

軟磁性材料の測定について 寺子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 6) 大きな直流電流を流す場合には巻線に注意

● 直流電流30Aを安全に流せる線径は下記の通り。

主なサイズと仕様		※数値は標準的な寸法を参考にしてください。						
断面積 sq	巻線径 本/mm	外径 mm	間隙幅 mm	外径 mm	巻線に相当する AWG サイズ #	10m位の 安全電流 A	1芯の 許容電流 A	
0.2	7/0.18	1.2	0.5	1.1	24	1	3	
0.3	12/0.18	1.9	0.65	1.45	22	2	5	
0.5	20/0.18	2.6	0.8	2.4	20	4	9	
0.75	30/0.18	2.8	1.0	2.6	18	6	12	
1.25	50/0.18	3.1	1.2	2.8	16	12	15	
2.0	37/0.26	3.4	1.6	3.2	14	15	20	
3.5	45/0.32	4.1	2.0	3.6	12	20	30	
5.5	35/0.45	5.1	2.6	4.6	10	30	35	
8.0	50/0.45	6.1	3.2	5.6	8	40	45	

出典：(株)小糸電機商会カタログより

内径12mmの試料
N1=40(φ0.0を3パラ)、N2=10
(φ0.26)
ケーブルは全てETFE線



内径12mmの試料で1次巻線40ターンにて直流バイアス電流30Aまでの測定をした場合、φ2の線材は物理的に困難。ETFE φ0.5を3パラで巻いた状態が写真の様子。(面積で比較すると、φ2:3.14、φ0.5:0.59 ⇒ x3=1.77・・・φ2の約56%)

※この巻線状態では、巻き線自体の発熱が非常に大きくなりますので、注意が必要。



ポイントクーラで冷却



軟磁性材料の測定について



試料取付台の非接触温度センサ

電子顕微鏡 第36期講座 第1講義

IWATSU

5. 測定に適した巻線方法

IWATSU

軟磁性材料の測定について

電子顕微鏡 第36期講座 第1講義

4. 直流重畳による変化する磁気特性測定 7) 測定を始める前に必ず計算し確認しておくこと

● 取扱説明書には、①～⑦項目の詳細を説明。以下に①～③の概要のみ転記。これらの項目は、シミュレーションシートで事前に確認が可能。

- 測定に選んだ試料のインピーダンス。本製品で測定するにあたって、まず動いておいて欲しいことは、測定周波数fにも依存しますが、試料のインピーダンスが大きいと、パワーアンプから供給されるリプル電流の一部がACブロッカー-SY-962のチョークコイルを通過して、DCバイアスソースSY-961に流れてしまい、測定誤差の原因となることです。
- RLC直列回路の共振周波数f_r。本製品の測定回路は、パワーアンプから見たらRLC直列回路となるので、測定周波数fは、この回路の共振周波数f_rの10倍以上で測定を行って下さい。
- 2巻線法時のLC直列回路の共振周波数f_r。本製品を2巻線法で使用する場合は、試料と試料の高周電圧Vi測定回路は、パワーアンプから見たらLC直列回路となるので、測定周波数fは、この回路の共振周波数f_rの1/10以下で測定を行って下さい。

Simulation Result		Red characters mean the measurement can not be done appropriate.	Comments
V _{in} [V]			SY-961 compliance voltage must be V _{in} ≤ 100V
10 f _r [kHz]			Resonance frequency of primary winding L _p must satisfy 10×f _r ≤ Frequency
0.1 f _r [kHz]			Resonance frequency of secondary winding L _s must satisfy Frequency ≤ 0.1×f _r
f _r [kHz]			When L _p - Frequency, ripple current waveform is similar to the triangular
η [%]			Ratio of the error ripple current is expected to be η ≤ 3%
I _r [A]			Ripple current must be I _r (A) or can not exceed output current of the power amp
V _{L2} [V]			Voltage across the secondary winding must be V _{L2} ≤ 200V (Coil method)
V _{L1} [V]			Voltage across the primary winding must be V _{L1} ≤ 200V (Coil method)
V _{in} [V]			Excitation voltage V _{in} can not exceed output voltage of the power amp.
Amp Gain			It should be set this value to the gain of the power amp.
V _{in} [V]			High side voltage of sample must be V _{in} ≤ 200V (Coil method)
*T [°C]			Temperature of the sample is expected at T _S 50[°C]

IWATSU

軟磁性材料の測定について

Sample Parameters

Items	Value
L _p [mH]	1.0
A _p [mm ²]	1.0
N _p [turn]	1.0
N _s [turn]	1.0
R _p [Ω]	1.000
Q [mm]	1.000
L [μH]	1.00
C _{in} [pF]	0.0

Configurations

Items	Items
B-H analyzer	SY-4216
Power amp.	HGA4101-4W
Coil	1

Excitation Conditions

Items	Items / Value
Function	Sn
Frequency [kHz]	100
Duty [%]	50
Target parameter	DL
I _r [A]	0.1
T _s [°C]	25

Simulate simulate

電子顕微鏡 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法 1) 背景(市場要求、測定規格)

● 近年、B-Hアナライザの測定にて、低透磁率・低損失材のトロイダルコアを測定する機会が増えている。

● 巻線方法により、測定結果が異なるというお客様からの技術的問合せを受ける機会も増えてきた。

● JIS C2560-2:2006にて、測定方法として、下記などが規定。

- ・ デジタイジング法
- ・ クロスパワー法
- ・ カロリーメトリック法

巻線方法に関して、下記などが規定。

- ・ 巻数は測定条件、使用する測定器及び必要な測定精度との兼ね合いで規定
- ・ 巻線の抵抗成分及び静電容量成分は、関連する測定誤差と比べて、無視できる程度に小さく
- ・ 巻線間静電容量はできるだけ小さく
- ・ 巻線は、できるだけ100%の結合状態となるように、磁心の近くに巻く。
- ・ 巻線は磁心の周りに均等に巻く

引用：マグネティックス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他

IWATSU

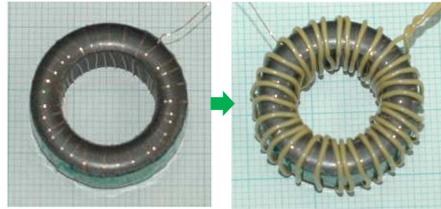
軟磁性材料の測定について

電子顕微鏡 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
2) 測定に使用した試料

●測定に使用した試料スペックと巻線の種類

サイズ
 外径 24mm
 内径 14mm
 高さ 9mm



比透磁率(公称)

- 試料 1: $\mu_r = 125$
- 試料 2: $\mu_r = 19$

巻線

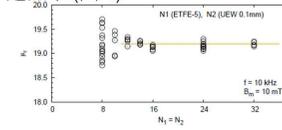
- N_1 —— ETFE 線 (0.5mmφ 単芯, 被覆直径0.8mm)
- N_2 —— UEW (0.1mmφ)

引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
 IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

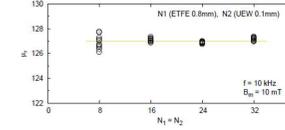
5. 測定に適した巻線方法
3-1) 測定結果①

●1次巻線と2次巻線の巻数が同じ場合
 $N_1 = N_2$ のとき

透磁率(図1)

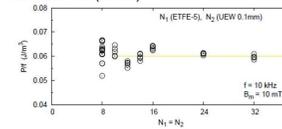


(a) 19材

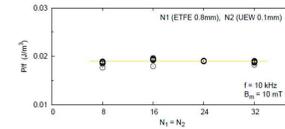


(b) 125材

磁気損失(図2)



(a) 19材

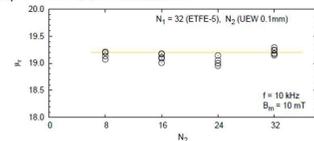


(b) 125材

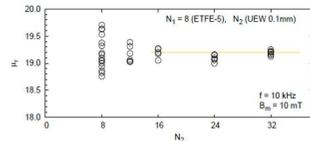
引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
 IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
3-2) 測定結果②

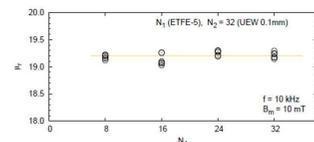
●1次巻線と2次巻線の片側固定で、片方のみ巻数を変えた場合の比透磁率
 $\mu_r = 19$ 材の透磁率



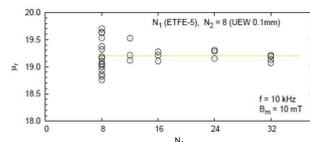
(a) $N_1 = 32$ (固定), N_2 (変化)



(b) $N_1 = 8$ (固定), N_2 (変化)



(c) N_1 (変化), $N_2 = 32$ (固定)

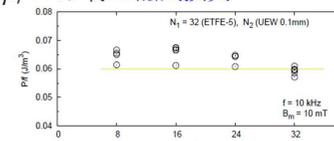


(d) N_1 (変化), $N_2 = 8$ (固定)

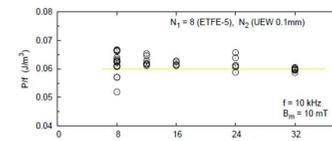
引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
 IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
3-3) 測定結果③

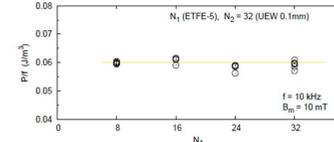
●1次巻線と2次巻線の片側固定で、片方のみ巻数を変えた場合のコアロス
 $\mu_r = 19$ 材の磁気損失



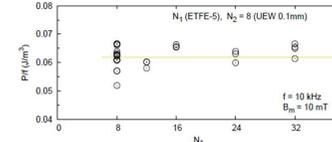
(a) $N_1 = 32$ (固定), N_2 (変化)



(b) $N_1 = 8$ (固定), N_2 (変化)



(c) N_1 (変化), $N_2 = 32$ (固定)



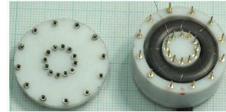
(d) N_1 (変化), $N_2 = 8$ (固定)

引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
 IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BIM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
4) 1次巻線を変更

●2次巻線固定で1次巻線の線種と巻き方の組合せを6種類用意

type	A	B	C
N_1	32	8	8
線種	ETFE-5		ビニル被覆
芯線直径	0.5mmφ		1mmφ
外径	0.8mmφ		3mmφ

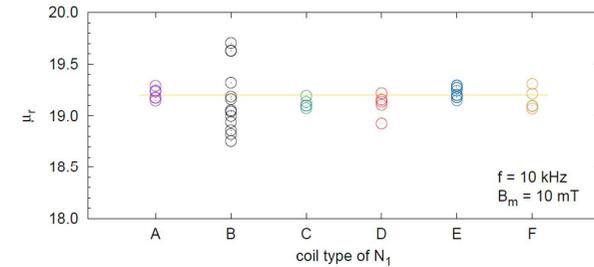


type	D	E	F
線種	ETFE-5線	—	5本並列
N_1	8	12	8
N_2	8	8	8

引用: マグネティックス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
5-1) 1次巻線を変更した測定結果①

●2次巻線固定で1次巻線の線種と巻き方の組合せ6種類で測定した結果透磁率

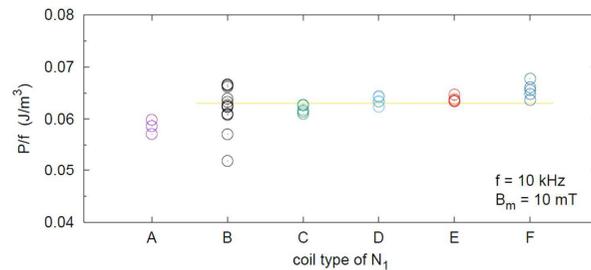


type	A	B	C	D	E	F

引用: マグネティックス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
5-2) 1次巻線を変更した測定結果②

●2次巻線固定で1次巻線の線種と巻き方の組合せ6種類で測定した結果磁気損失

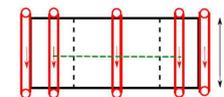
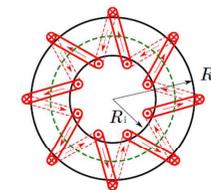


type	A	B	C	D	E	F

引用: マグネティックス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
6) 磁界分布

●1次巻線を8ターン巻いたときの磁界分布の検証方法 (考察) 磁界分布



- 自由空間 ($\mu_r = 1$) での計算
- Biot-Savart の法則

$$d\mathbf{H} = \frac{I d\ell \times \mathbf{e}_r}{4\pi r^2}, \quad \mathbf{e}_r = \frac{\mathbf{r}}{r}$$

- $N_1 = 8$ の場合
32本の直線電流で構成
- 電流素片 ($d\ell$)
1本の電流を1000等分
- 測定位置(平均磁路)での $d\mathbf{H}$ の加算 $\rightarrow \mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$
- $|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$ を評価

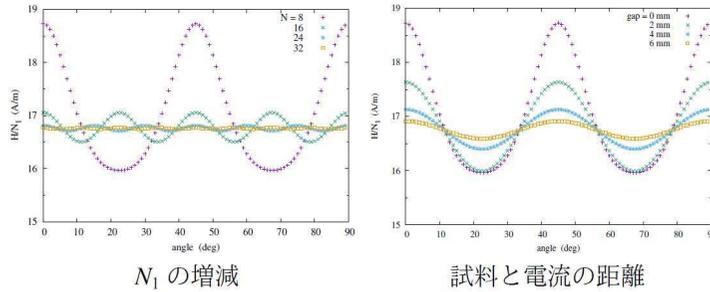
引用: マグネティックス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 電子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
7) 磁界分布

- 1次巻線を8ターン巻いたときの磁界分布の検証方法

(考察) 磁界分布

試料の1/4周上での1巻きあたりの磁界の大きさ ($|H|/N_1$)



引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
8) ここまでの結果のまとめ

- 1次巻線の巻数が少ない場合
N1=N2の密着巻きでは、測定結果のバラツキが増加

(理由)
少ないN1の密着巻きによる不均一な励磁状態が要因
・ N2が多いと平均化される
・ N2が少ないと局所的な特性を測定しバラツキに

(ポイント)
太い被覆線、ポピン、巻線枠、分布巻が有効

- 一方で、2次巻線は密着巻きが原則

- 課題
 - ・ N2の線径
 - ・ 被覆の有無

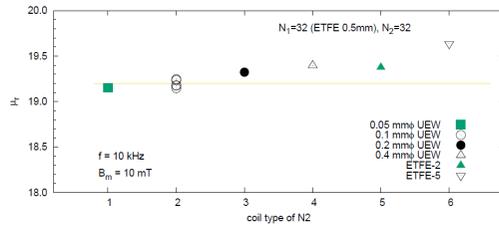
引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
9) 2次巻線を変更した測定結果

- 1次巻線と2次巻線の巻数固定で、2次巻線の線径と線種を変更し測定
 $N_1 = N_2 = 32$ (固定)

N ₂ type	1	2	3	4	5	6
線種	UEW				ETFE線	
芯線径 (mm)	0.05	0.1	0.2	0.4	0.25	0.5
外径 (mm)					0.5	0.8

透磁率 $\mu_r = 19$ 材



引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
10-1) 2次巻線と測定試料の空隙①

- 2次巻線と試料の間の空隙の影響

(考察) 空隙とみかけの透磁率 (μ'_r) の関係

$$B' = \frac{\phi_m + \phi_a}{S_m} = B_m + \frac{\mu_0 H S_a}{S_m} \quad (1)$$

$$\mu'_r = \frac{B'}{\mu_0 H} = \mu_r + \frac{S_a}{S_m} \quad (2)$$

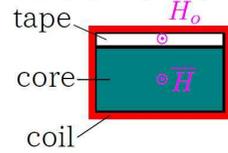
ここで、

ϕ_m : 材料内の磁束, ϕ_a : 2次コイル内で材料外の磁束
 B' : みかけの磁束密度, B_m : 磁束密度
 S_m : 試料の断面積, S_a : 2次コイルの囲む面積のうち S_m 以外
 H : 磁界, μ_0 : 真空の透磁率

引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
10-2) 2次巻線と測定試料の空隙②

- 2次巻線と試料の間にビニールテープで空隙を設けた場合
(考察) ビニールテープによる空隙 ($N_1 = N_2 = 32$)



- 平均直径: $\bar{d} \approx \frac{d_o + d_i}{2}$
- 平均磁界: $\bar{H} = \frac{NI}{\pi \bar{d}}$
- 外周での磁界: $H_o = \frac{NI}{\pi d_o}$

みかけの透磁率

$$\mu'_r = \mu_r + \frac{S_a}{S_m} \rightarrow \mu_r + \frac{S_a}{S_m} \cdot \frac{\bar{d}}{d_o}$$

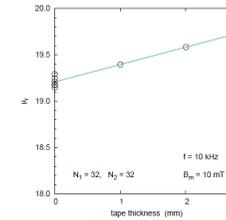
引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
10-3) 2次巻線と測定試料の空隙③

- 2次巻線と試料の間にビニールテープで空隙を設けた場合の測定
(考察) ビニールテープによる空隙 ($N_1 = N_2 = 32$)

$$\mu'_r = \mu_r + \frac{S_a}{S_m} \cdot \frac{\bar{d}}{d_o}$$

$$\mu'_r = 19.21 + 0.187t \quad (4)$$



t	μ_r	$\frac{S_a}{S_m}$	$\frac{\bar{d}}{d_o}$	$\frac{S_a \bar{d}}{S_m d_o}$	$0.187t$
0.0	19.21	0.00	0.79	0.00	0.00
1.0	19.39	0.25	0.76	0.19	0.19
2.0	19.58	0.50	0.73	0.36	0.37

引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

5. 測定に適した巻線方法
11) まとめ

- 低透磁率-低損失トロイダルコアの巻線に起因する誤差要因について検討し以下の結果が得られた。

- ・ 1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。
- ・ 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。
- ・ 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。

- 課題
さらに高周波での検討を進め、測定方法の確立を目指す。

引用: マグネティクス研究会資料 2022.1.28-29 MAG-22-022 高周波励磁下における低透磁率トロイダルコアの磁気測定に関する検討 山本健一、他
IWATSU 軟磁性材料の測定について 寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義

ご清聴ありがとうございました。

<お問い合わせ先>
岩崎通信機株式会社 T&Mカンパニー
T&M推進部 フィールドサポート課
成田 芳正
E-Mail: narita@iwatsu.co.jp
Tel 03-5370-5473

IWATSU

軟磁性材料の測定について

寺子屋BM塾 第36期講座 第1講義