

# 日本ボンド磁性材料協会 寺子屋BM塾

2025年 前期 第1回 動的(交流)磁化測定の原理

## 本日の講義内容

0. 講師自己紹介
1. 動的磁化測定の意義
  - 1.1 動的測定と静的測定
    - 1.1.1 軟磁性材料
    - 1.1.2 磁性ナノ粒子
  - 1.2 動的(交流)測定で評価する磁気特性
    - 1.2.1 磁化率  $\chi$  と透磁率  $\mu$
    - 1.2.2  $M-H$ ループと  $B-H$ ループ

小休止

## 本日の講義内容

3

2. 交流磁気特性の基本事項
  - 2.1 ヒステリシスループと損失
    - 2.1.1 ヒステリシス損失
    - 2.1.2 うず電流損失
  - 2.2 線形応答と非線形応答
    - 2.2.1 線形応答領域における複素透磁率
    - 2.2.2 非線形領域における応答性の評価の必要性

まとめ

## 講師自己紹介



4

氏名 小野寺 礼尚  
 所属 茨城工業高等専門学校 国際創造工学科 機械・制御系  
 所属学会 応用物理学会, 日本金属学会, 日本磁気学会, 日本磁気科学会

博士論文  
 「軟磁性Fe基アモルファス合金の結晶化過程における強磁場効果の研究」  
 於 東北大学金属材料研究所  
 附属強磁場超伝導材料研究センター

- ・アモルファス合金の結晶化制御(ナノ結晶合金)
- ・強磁場中熱処理による磁性材料の変態制御
- ・高温・強磁場中磁化測定装置(高温強磁場VSM)の開発

現所属

2015年～

- ・ 軟磁性ナノ結晶合金の特性向上, プロセス開発

2018年～

- ・ 交流磁化測定装置の開発
- ・ 磁性ナノ粒子の高周波特性評価 筑波大との共同研究

2025年

日本金属学会誌「まてりあ」63巻 8号, 10号, 12号にて  
 実学講座「金属材料実験の手引き」  
 特性の計測評価：磁気特性の計測と解析

本講座は,

まてりあ 63巻 10号 p. 710-718

「磁気測定の実用：動的磁化測定(原理)」 を元に進行

を担当

1.1 動的測定と静的測定

静的(DC)磁化測定 時間変化しない静磁場に対する磁化の評価

実際には, 1秒間の磁場の変化量が数100 Oe程度の時間変化で測定  
 磁化は磁場の変動に対して瞬時に応答 → 磁場の時間変化を考慮しない

主に,

- ・ 磁気秩序(強磁性, 常磁性. . . )
- ・ 飽和磁化, 保磁力
- ・ 異方性, 静磁エネルギーの評価
- ・ 磁気変態, (磁気変態を伴う)相変態

の評価・解析の手段として活用

あつかう磁場の強度

電磁石 0.5~3 T, 超伝導磁石 5~25 T, ハイブリッド磁石 45 T

1. 動的磁化測定の意義

1.1 動的測定と静的測定

1.1.1 軟磁性材料

1.1.2 磁性ナノ粒子

1.2 動的(交流)測定で評価する磁気特性

1.2.1 磁化率  $\chi$  と透磁率  $\mu$

1.2.2  $M-H$ ループと  $B-H$ ループ

1.1 動的測定と静的測定

磁化は磁場の変動に対して瞬時に応答

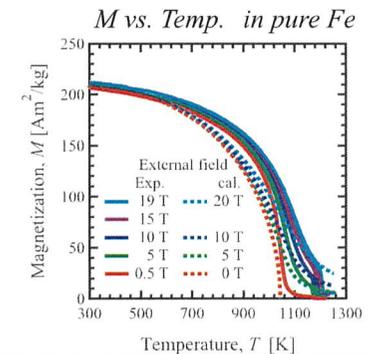
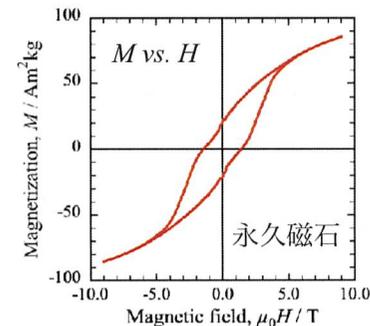
安定値に瞬時に到達(ただし温度, 磁場, 圧力などに依存)

例: 絶対零度で磁化(磁気モーメント)は飽和(飽和磁化  $M_s$ )

有限温度下では, 熱揺らぎによる熱平均値  $\langle M \rangle$  を安定値として検出

キュリー温度以上では, 熱擾乱で安定値は (無磁場では)  $\langle M = 0 \rangle$

静的(DC)磁化測定の一例



## 1.1 動的測定と静的測定

### 動的(AC)磁化測定

時間変化する磁場(動的磁場)に対する磁気特性の評価

パルス磁場, 交流磁場 etc...

本講義では, 動的磁場として周期性を持つ磁場を扱う

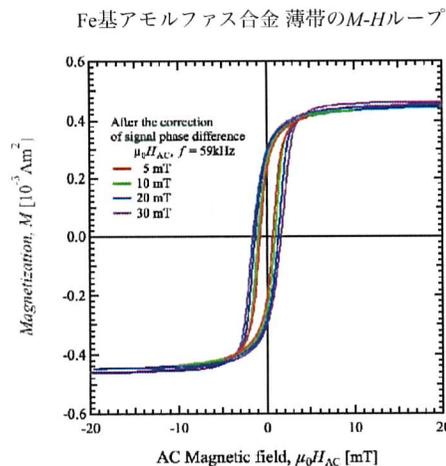
交流磁場に対する,

- ・ヒステリシスループ
- ・透磁率
- ・エネルギー損失

の評価・解析の手段として主に活用

扱う磁場の強度

交流磁場 10, 100, 500 mTほど, パルス磁場 800 T



## 1.1 動的測定と静的測定

磁場が時間変化  $H = H_0 \sin \omega t$

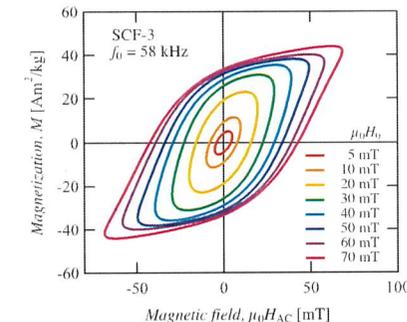
振幅強度  $H_0$  や周波数  $f (= \omega/2\pi)$  によっては磁化の応答に遅れが発生

非平衡状態の特性

### 動的(AC)磁化測定の一例

磁性ナノ粒子(Co ferrite)懸濁液の

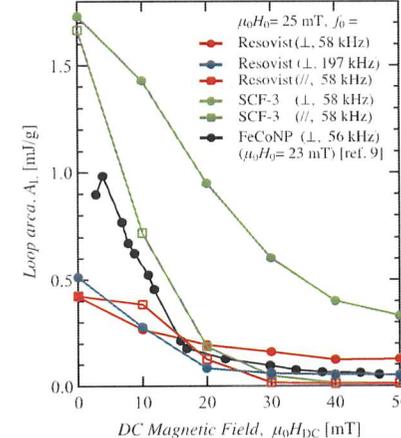
AC M-Hループ



R. Onodera et al.: IEEE Trans. Mag. 57, 6100605 (2021)

磁性ナノ粒子(Co ferrite)懸濁液

AC M-Hループ面積のDCバイアス強度依存



## 1.1 動的測定と静的測定

### 1.1.1 軟磁性材料

動的磁化測定ターゲット

軟磁性材料 → インダクタのコア材料として応用

変圧トランス

小型スイッチング電源中の軟磁性材料

電源回路

(リアクトル, チョークコイル)

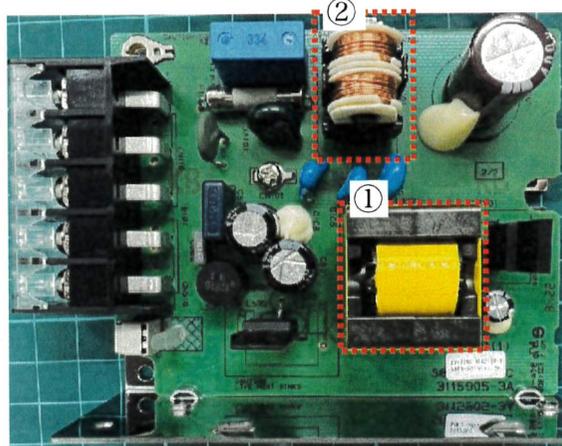
直流化, 平滑化

ノイズフィルター...

①: 変圧トランス

②: チョークコイル

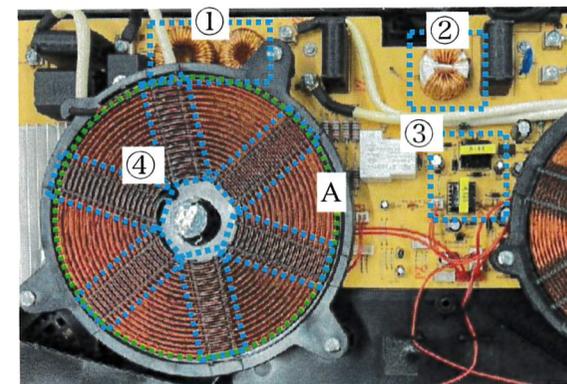
(ノイズフィルター)



## 1.1 動的測定と静的測定

### 1.1.1 軟磁性材料

家庭用卓上IH調理器回路 (通常, 20k ~ 100kHz程度の発振)



①: パワーインダクタ

②: チョークコイル

③: 変圧トランス

④: 漏れ磁束遮蔽用?

発振コイルAの裏側に配置

変圧器の場合

小型化 → 高周波化

$$B_s \geq B_{core} = \frac{V}{\sqrt{2\pi fAN}}$$

$B_s$ : コア材料の飽和磁束密度

$B_{core}$ : 動作中のコアの磁束密度

$V$ : 電圧の実効値,  $f$ : 動作周波数

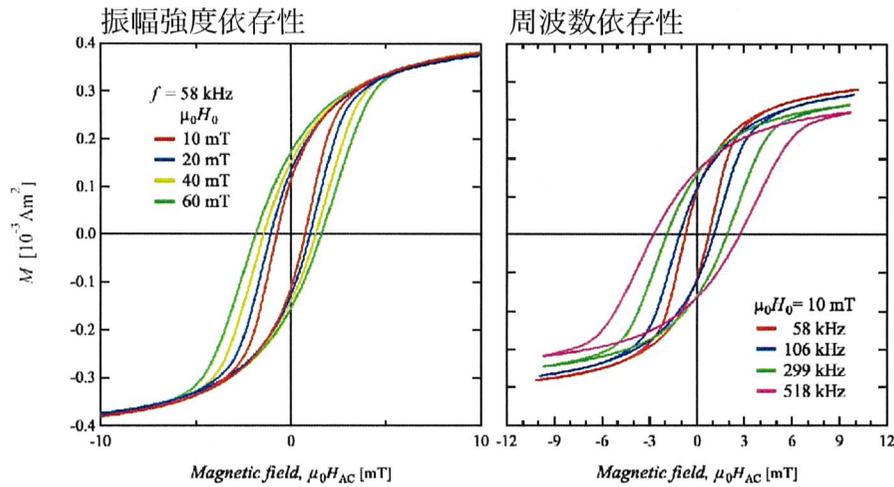
$A$ : コアの断面積,  $N$ : 巻き数

車載用パワーインダクタなど

→ 大電流化: 動作磁束密度 高 $B_s$ が要求

動的(AC)磁化測定の一例

Fe基アモルファス合金 薄帯のM-Hループ



磁性ナノ粒子 → 医療用

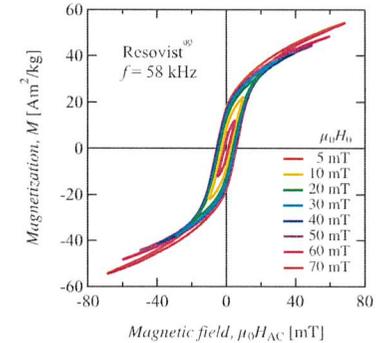
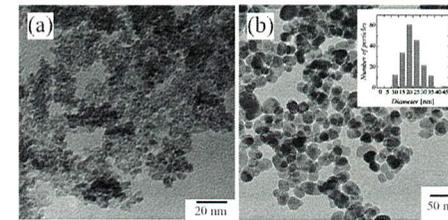
MRIの造影剤, 磁気ハイパーサーミア(がん温熱治療)の発熱体

磁性粒子イメージングの造影剤, ドラッグデリバリー

磁気ハイパーサーミアの発熱体では

交流磁場印加におけるエネルギー損失を利用

磁性ナノ粒子懸濁液の磁気特性評価



R. Onodera et al.: IEEE Trans. Mag. 57, 6100605 (2021)

1.2 動的(交流)測定で評価する磁気特性

1.2.1 磁化率χと透磁率μ

磁場の非常に弱い線形領域において

磁化Mは磁場Hに比例するとして扱える

$$M = \chi H$$

磁化率χは磁場と磁化の比例関係を表す係数

透磁率μ

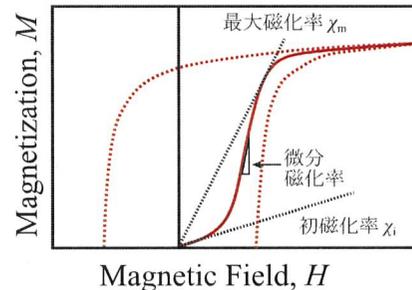
$$\mu = B/H \text{ で定義}$$

外部磁場Hの印加によって材料に生じた磁束密度Bは

$$B = \mu_0(H+M) = \mu_0(H+\chi H) = \mu_0(1+\chi)H \quad \mu_0: \text{真空の透磁率}$$

$$\mu = \mu_0(1+\chi) \text{ で与えられる}$$

$$\text{比透磁率 } \mu_r = \mu / \mu_0 \text{ で与えられる}$$



1.2 動的(交流)測定で評価する磁気特性

1.2.2 M-HループとB-Hループ

磁化Mの大きさ

→ 磁気モーメントの秩序

材料の状態(相変態)を反映

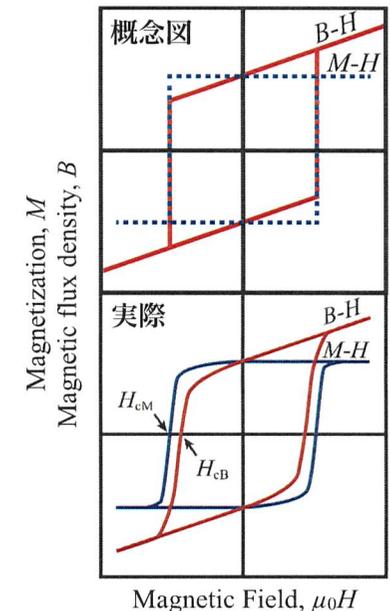
材料開発, 物性研究の評価

磁束密度Bの大きさ,  $B = \mu_0(H+M)$

→ 外部磁場(コイル)+材料磁化(コア)

インダクタとしての性能を反映

回路に用いる受動素子としての評価



回路に用いる受動素子としての評価

ループ面積：エネルギー損失の評価

ループ面積×周波数 はエネルギー損失  $[J/s = W]$ に相当

透磁率：応答性の高さ( $B$ - $H$ ループの傾きに相当)

トランス：高透磁率が要求、巻数節約、小型化、効率向上

リアクトルなど：容易に飽和しないことが要求

→ 高 $B_s$ が要求、透磁率それほど大きい必要性なし

とりわけ、高周波利用では周波数特性重要

高周波数帯で

・透磁率 減衰 → 位相遅れ発生

・位相遅れ → エネルギー損失の増加

小休止  
(5 min)

## 2. 交流磁気特性の基本事項

### 2.1 ヒステリシスループと損失

#### 2.1.1 ヒステリシス損失

#### 2.1.2 うず電流損失

#### 2.1.3 熱緩和

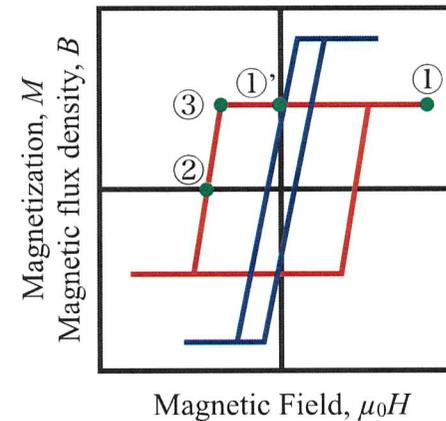
### 2.2 線形応答と非線形応答

#### 2.2.1 線形応答領域における複素透磁率

#### 2.2.2 非線形領域における応答性の評価の必要性

## 2.1 ヒステリシスループと損失

### DCヒステリシスループの場合



- ①：飽和磁化  $M$
  - ①'：残留磁化  $M_r$
  - ②：保磁力  $H_c$
  - ③：最大エネルギー積  $BH_{max}$
- の他、  
異方性磁場、異方性定数  
などを評価

軟磁性(ソフト)磁性

異方性 小さい(磁化反転 容易)

保磁力 小さい, 透磁率 大きい

硬磁性(ハード)磁性

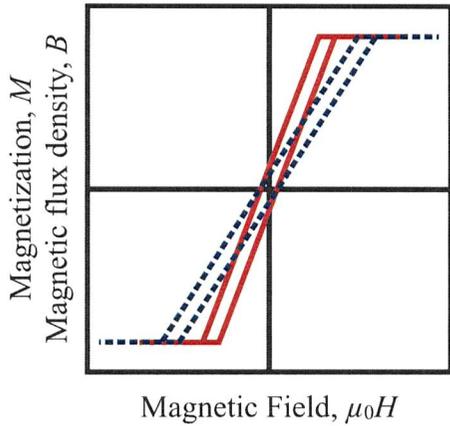
異方性 大きい

保磁力 大きい



2.1.1 ヒステリシス損失

ACヒステリシスループの場合



ループの傾き  $\propto$  透磁率  $\mu$   
 ループ面積  $\propto$  エネルギー損失  

$$P_{\text{hys}} = \oint M dH \times f [\text{Hz}]$$

$$[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{sec}) = \text{W}/\text{m}^3]$$

磁気ハイパーサーミア用  
 磁性ナノ粒子では  
 エネルギー損失  $\propto$  発熱量  
 発熱効率の良い材料が要求  
 軟磁性では損失抑制が要求

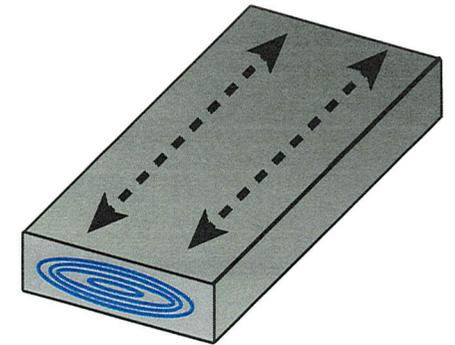
2.1.2 うず電流損失

鉄損(エネルギー損失) = ヒステリシス損失  $P_{\text{hys}}$   
 $P_{\text{tot}} [\text{W}/\text{kg}]$  + 古典うず電流損失  $P_{\text{ce}}$   
 + 異常うず電流損失  $P_{\text{ae}}$

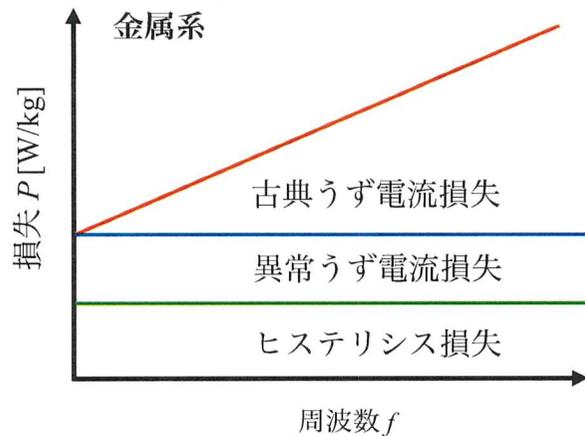
古典うず電流損失 電磁誘導起源

$$P_{\text{ce}} = \frac{\sigma(\pi f B_m t)^2}{6\rho}$$

磁束変化  $\phi(t)$  密度  $\rho$   
 周波数  $f$  導電率  $\sigma$   
 最大磁束密度  $B_m$  板厚  $t$



2.1.2 うず電流損失



鉄損の周波数特性  
 $P_{\text{tot}}(f)$  から  
 ヒステリシス損失(測定)  
 古典うず電流損失(計算)  
 を差引  
 $\rightarrow$  異常うず電流損失  
 (磁壁移動に関連)

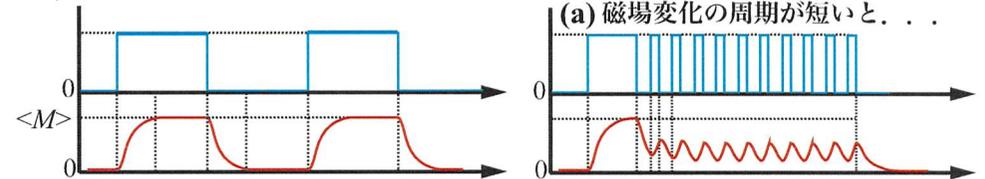
2.2.1 線形応答領域における複素磁化率および透磁率

印加磁場の高周波化

$\rightarrow$  磁場に対する磁化の追従が遅れが発生(磁壁移動, 磁化回転...)

$\rightarrow$  交流磁化に位相差  $\omega\tau$ が生じる(緩和)

$M, H$



磁化は遅れを伴って熱平衡値  $\langle M \rangle$  へ緩和

(a) 磁場変化の周期が短いと...

(b) さらに短いと...

(a) : 磁場の変化に追従できず非平衡な磁化

(b) : 磁場の減衰に追従できず平衡値をとり続ける

## 2.2 線形応答と非線形応答

### 緩和を伴う場合の磁化率

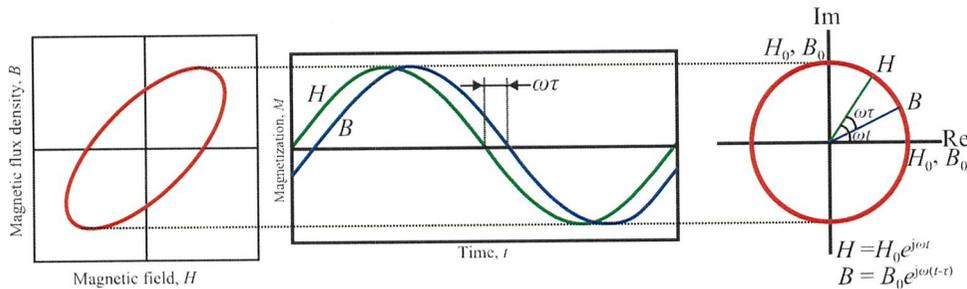
M-Hループの原点近傍では、Mは線形応答として近似可能

磁場の複素表現  $H = H_0 e^{j\omega t}$

磁化の熱平衡値  $\langle M \rangle$  は、磁場の実数部を用いて  $\langle M \rangle(t) = \text{Re}[\chi_0 H_0 e^{j\omega t}] = \chi_0 H_0 \cos \omega t$

測定される磁化  $M(t)$  は、 $\langle M \rangle(t)$  に対して緩和時間  $\tau$  の遅れを伴っているため、

$$\frac{\partial M(t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (\langle M \rangle(t) - M(t)) \quad \text{ただし,} \quad M(t) = \text{Re}[\chi H_0 e^{j\omega t}] = H_0 (\chi' \cos \omega t + \chi'' \sin \omega t)$$



## 2.2 線形応答と非線形応答

複素表現で磁化率を表すと、

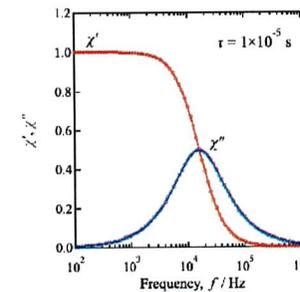
$$\chi = \chi' - j\chi'' = \frac{\chi_0}{1 + j\omega\tau} \quad \chi' = \frac{\chi_0}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \chi'' = \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \chi_0 \quad \text{となる.}$$

1秒あたりのエネルギー損失は、

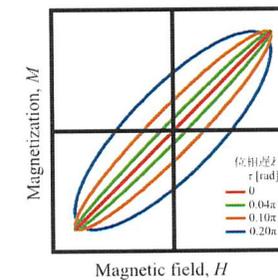
ループ1周を描く際の内部エネルギーの変化量 × 周波数で与えられるため、

$$\Delta U = \oint M dH = 2\mu_0 H_0^2 \chi'' \int_0^{2\pi/\omega} \sin^2 \omega t dt \quad \text{損失 } P = f \Delta U = \mu_0 \chi'' f H_0^2 \propto \chi''$$

$\chi', \chi''$  vs.  $f$



位相差の異なるM-Hループ



## 2.2 線形応答と非線形応答

### 透磁率の場合、

磁場、磁束密度の複素表現  $H = H_0 e^{j\omega t}$ ,  $B = B_0 e^{j\omega(t-\tau)}$

透磁率  $\mu = B/H$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{B}{H} = \frac{B_0 e^{j\omega(t-\tau)}}{H_0 e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} \frac{e^{-j\omega\tau} e^{j\omega t}}{e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} e^{-j\omega\tau} \\ &= \frac{B_0}{H_0} \cos \omega\tau - j \frac{B_0}{H_0} \sin \omega\tau \quad (\text{複素表現}) \end{aligned}$$

$\mu = \mu' - j\mu''$  はそれぞれ

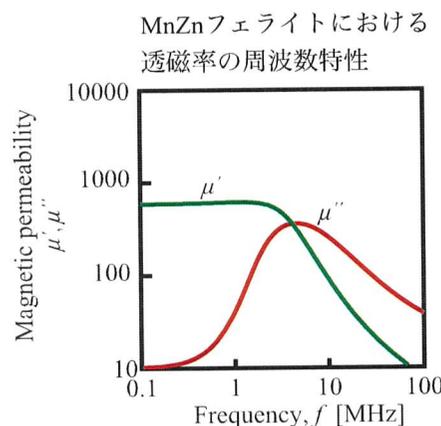
複素磁化率を用いて

$$\mu' = \mu_0 (1 + \chi'), \quad \mu'' = \mu_0 \chi'' \quad \text{と表せる.}$$

実部と虚部の比

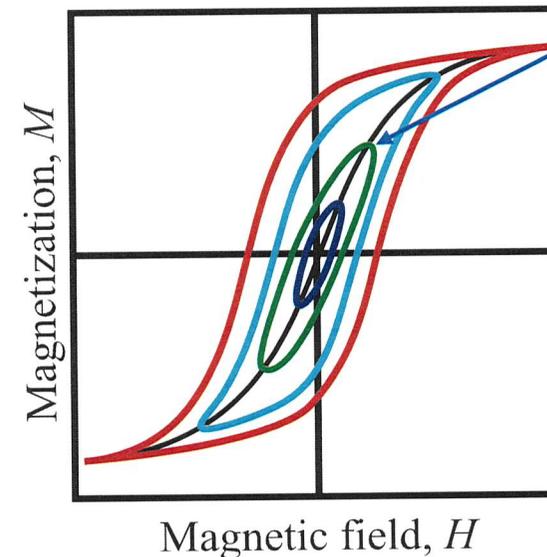
$$\frac{\mu''}{\mu'} = \tan \omega\tau = \tan \delta$$

は損失係数と呼ばれる



## 2.2 線形応答と非線形応答

### 2.2.2 非線形領域における応答性の評価の必要性



おおむね線形応答

複素磁化率(透磁率)を定義可  
取り扱い容易

Stoner-Wohlfarth model

非線形応答

測定される磁化  $M(t)$   
正弦波から、大きく逸脱

$$M = \chi_0 H + \chi_2 H^3 + \chi_4 H^5 + \dots$$

非線形磁化率 + 緩和を扱う  
モデル無い(現状)

ループ測定 → 損失評価の重要性

非線形応答 → 大振幅

→ インダクタの通電電流 大

車載用パワーインダクタなど

→ 大電流化：動作磁束密度 高 $B_S$ が要求

ベース電流 + 高調波ノイズ

→ 容易に飽和しないフィルタ必要

磁性体的には、DC磁場 + AC磁場

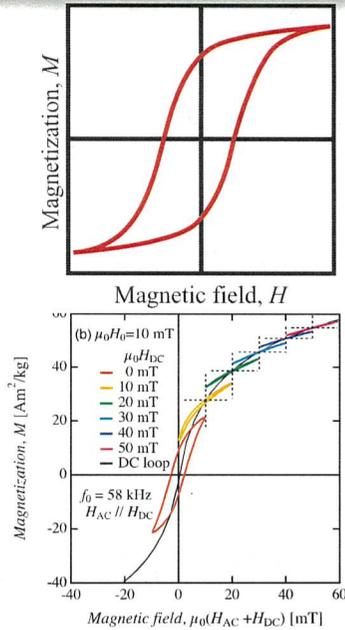
DCバイアス磁場下での

AC特性の評価必要

DCバイアス磁場下での

$M(B)$ -Hループの原点をどう定義する？

損失(ループ面積)の評価には問題ないが...



R. Onodera et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 61, 065003 (2022)

動的磁化測定の意味として、

静的磁化測定と注目する特性の違いについて説明した。

動的磁化測定ターゲットとなる材料および特性について説明した。

動的(交流)測定で評価する磁気特性として、

磁化率  $\chi$  と透磁率  $\mu$  および  $M$ - $H$ ループと  $B$ - $H$ ループにおける

磁化  $M$  および磁束密度  $B$  の扱いを区別する理由について説明した。

交流磁気特性の基本事項として、

ヒステリシスループと損失(ヒステリシス損失, うず電流損失)について説明した。

線形応答と非線形応答の違いとして、

複素透磁率および、非線形領域に拡大されたコア材料の応用について説明した。

本講義の内容は、

まてりあ 63巻 10号 p. 710-718 「磁気測定の実用：動的磁化測定(原理)」

まてりあ 63巻 12号 p. 842-851 「磁気測定の実用：動的磁化測定(測定)」

に掲載されている内容を抜粋いたしました。