

2. 特性の計測評価

2-3 磁気特性の計測と解析

2-3-1 磁気測定的基础：静的磁化測定

小野寺 礼 尚\* 喜 多 英 治\*\*



2-3-1-1 はじめに

磁気測定と聞くと、永久磁石や軟磁性材料など磁性体を扱う人たちの研究手法というイメージを持たれているのかもしれませんが、しかし、例えばよく知られた鉄の $\alpha$ - $\gamma$ 変態など材料の相変態や、組織を構成する相の割合など多様な情報を変態に伴う磁気的性質の変化から見積もることができます。

この講座は、普段、組織を金属顕微鏡や電子顕微鏡により直接観察することが多く、磁気測定を研究手法として取り入れている方、例えば構造材料の研究を始めた学部生や修士課程の学生のみなさんに向けて、その原理、手法、測定例を紹介し、新たな解析方法として挑戦してもらうために執筆しました。

磁気測定については全2回の連載となりますが、初回は静的な測定、今回は動的な測定について、なるべく噛み砕きながら説明していきたいと考えています。また、動的測定については、現在、磁性体をテーマに研究している学生のみなさんも、自分で装置を組み上げ、測定・解析ができるような説明を心がけます。

2-3-1-1-1 磁場、磁気モーメントと磁化

初めに、磁場に対する物質の応答を考えます。物質が磁場( $H$ )の中に置かれると磁気分極(あるいは磁化)が誘起されます。磁気分極は古典的には、一对のNSの磁極(磁気双極子)やループ状の電流で表わされます。その磁化は磁場とともに磁束密度( $B$ )に寄与し、磁場の強さ $H$ [A/m]および単位体積あたりの磁化 $M$ [A/m]と磁束密度 $B$ [TあるいはWb/m<sup>2</sup>]との間には、次の関係式が成り立ちます<sup>1)</sup>。( [ ]内はCGS単位系による表式)

$$B = \mu_0(H + M), [B = H + 4\pi M] \quad (1)$$

ここで $\mu_0$ は真空の透磁率と呼ばれる定数です<sup>2)</sup>。

微視的に見ると、原子単位での角運動量が磁気分極(磁気モーメント)の源となっていて、量子力学によって説明されています<sup>3)(1)-(3)</sup>。磁場に対する応答は物質によって異なり、外部磁場のない状態でも磁気分極が存在して秩序状態にある場合と磁場に比例した応答をする場合があります。図1に、前者の強磁性、反強磁性、フェリ磁性と後者の例である常磁性における磁気モーメントの状態を示しています。個々の原子が担う磁気モーメントの大きさを $m$ として表し、材料全体で磁気モーメントの総和(ベクトル和)をとった値を単位体積当たりに換算した量を(体積磁化) $M$ として表しています<sup>4)</sup>。強磁性(a)の場合は、磁気モーメントが全て同一方向に整列(あるいは秩序化)します。そのため、強磁性は自発磁化 $M_0$ を持ちます。反強磁性(b)では、最隣接の磁気モーメント同士が反平行に秩序しているため、総和はゼロとなり自発磁化を持ちません。一方、フェリ磁性(c)は、2種類の原子すなわち磁気モーメントによって構成されています。反強磁性と同様の秩序状態を示しますが、互いの磁気モーメントの大きさが異なるため、総和をとると自発磁化を持ちます。

<sup>1)</sup> 磁束の単位であるWb(ウェーバ)はSI組立単位であり磁束密度と面積の積を意味し、次元は $m^2 \text{ kgs}^{-2} \text{ A}^{-1}$ で表されます。1 m<sup>2</sup>の面積に1 Wbの磁束が存在するとき、磁束密度は1 Wb/m<sup>2</sup>すなわち1 Tと表されます。

<sup>2)</sup> 真空の透磁率。以前は、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ あるいは $\text{N/A}^2$ と定義されていました。2018年のSI単位系の改定に伴いアンペアの定義が新しくなった影響で、定義値ではなく測定によって決定する物理量( $1.25663706212(19) \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$ )となりました。本稿では、便宜的に以前の定義である $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ を使用します。

<sup>3)</sup> 詳しくは次の文献を参考してください。初学者向けには文献(1)、物理が得意な方や大学院生には文献(2)を挙げます。英書ですが、文献(3)にも丁寧な説明があります。

\* 茨城工業高等専門学校 国際創造工学科；准教授(〒312-8508 ひたちなか市中根866)

\*\* 筑波大学名誉教授

Experimental Guides for Metallic Materials: 2. Measurement and Evaluation of Material Properties

2-3 Structural Measurement and Analysis Using X-rays : 2-3-1 Introduction of Basic Magnetometry: Basic of Static Measurement; Reisho Onodera\* and Eiji Kita\*\* (National Institute of Technology, Ibaraki College, Hitachinaka. \*\*Emeritus Professor, University of Tsukuba, Tsukuba)

Keywords: magnetization measurement, magnetic moment, magnetic field, vibrating sample magnetometer (VSM), Currie temperature

2024年5月21日受理[doi:10.2320/materia.63.556]

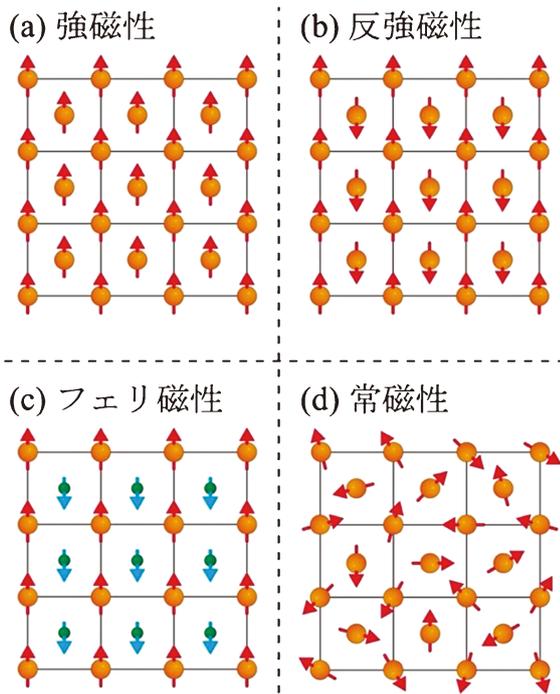


図1 物質の磁性と磁気モーメントの秩序の例。橙色、緑色の丸で表した個々の原子が、それぞれ矢印で表した磁気モーメントを担っているとしたとき、(a) 強磁性：磁気モーメントが一方向に秩序、(b) 反強磁性：最隣接の磁気モーメントが反平行に秩序、(c) フェリ磁性：大きさの異なる磁気モーメントが反強磁性秩序、(d) 常磁性：磁気モーメントの方向が無秩序。

なお磁気モーメントが平行に並ぶか反平行に並ぶかは磁気モーメント間の交換相互作用の符号に依存します<sup>(2)</sup>。(d)は磁気モーメントが秩序しておらず、常磁性と呼ばれています。また磁気モーメントの秩序がない磁性として、反磁性も挙げられます。反磁性では磁場印加されることで磁場と逆向きの磁気モーメントが生じます。

ここで、強磁性体を例に磁化測定によって測定できる磁化  $M$  と磁気モーメントの状態について説明します。絶対零度では強磁性体の磁気モーメントは熱擾乱の影響を受けないため、図2(a)に示すように真の磁気モーメントの大きさ  $m$  を示します、この総和が飽和磁化  $M_s$  となります。一方で有限の温度においては、図2(b)に示すように熱擾乱により観察できる磁気モーメントの大きさは熱平均値  $\langle m \rangle$  となるため、その総和  $M_s$  は絶対零度における値よりも小さくなります。磁気モーメントの真の大きさ  $m$  として、一般には液体ヘリウム冷却で測定できる 4.2 K の値が用いられます。

強磁性体をキュリー温度以上に加熱すると熱エネルギーにより秩序は崩壊し、図2(c)に示すように各々がランダムな方向をとるようになり常磁性へと磁気変態します。変態後、モーメントの総和はゼロとなります。この状態に磁場を印加すると図2(d)で表すように個々の磁気モーメントは磁場方向に弱く整列するため印加磁場に比例した磁化が誘起されます。またこの時の比例係数  $\chi$  を磁化率(帯磁率)と呼びます。

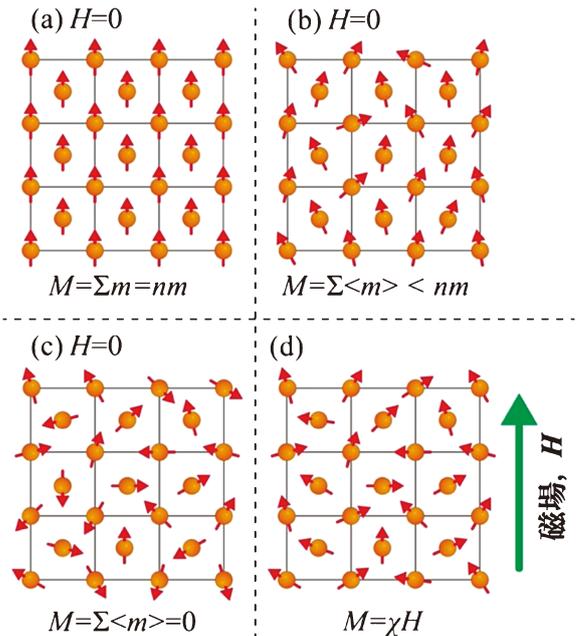


図2 強磁性体において測定される磁化  $M$ 、および磁気モーメント  $m$  の秩序の様子、 $n$  は体積あたりの原子数。(a) 絶対零度における自発磁化、(b) 有限温度における自発磁化、(c) キュリー温度以上の状態、(d) (c) に磁場印加した際の磁化  $M$ 。  $M$  は磁化率  $\chi$  および磁場の強さ  $H$  に比例する。

磁場印加による磁化は、キュリー温度以下でも誘起されるため、磁化  $M$  は  $H$  の関数として、

$$M(H) = M_0 + \chi H \quad (2)$$

と表すことができます。式(2)で表される磁化は弱い外部磁場での近似であり、いずれ飽和して  $M_s$  に到達します。

磁束密度  $B$  [T あるいは  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ] と磁場あるいは単位体積の磁化  $M$  [A/m] をかけた値は、 $\text{J}/\text{m}^3$  となり単位体積のエネルギーの次元をもつため、体積磁化と磁場は共役の物理量といえます。

材料の磁化は体積あたり、あるいは質量あたりの値を用いて議論することが一般的ですが、物性物理や磁性材料の分野では、原子1つあたりのモーメントの大きさ ( $m$ ) を議論することが多くあります。この場合、ほぼ1電子の磁気モーメントの大きさを表すボーア磁子  $\mu_B = e\hbar/2m_e$  ( $9.2741 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$ ) を単位として表現されます。ただし、 $e$  は電気素量、 $\hbar$  はディラック定数(プランク定数  $h$  を  $2\pi$  で割った値)で、 $m_e$  は電子の静止質量です。ボーア磁子を用いると、Fe 原子一つの磁気モーメントは、 $m = 2.22 \mu_B$  と表されます<sup>(5)</sup>。したがって、磁束密度  $B$  [T] を掛けると、やはりエネルギーの次元を持つこととなります。

図3にはさまざまな磁性体の磁化曲線の概念図を示します。ここまで単位体積あたりに換算された磁化  $M$  を用い説明してきましたが、実際は試料の体積より質量の方が容易に計測できます。その場合、図3のように質量磁化  $\sigma$  [Am<sup>2</sup>/kg] で表すこととなります。以降の図も、実験データは質量磁化を用いて表しています。強磁性やフェリ磁性の磁化は磁

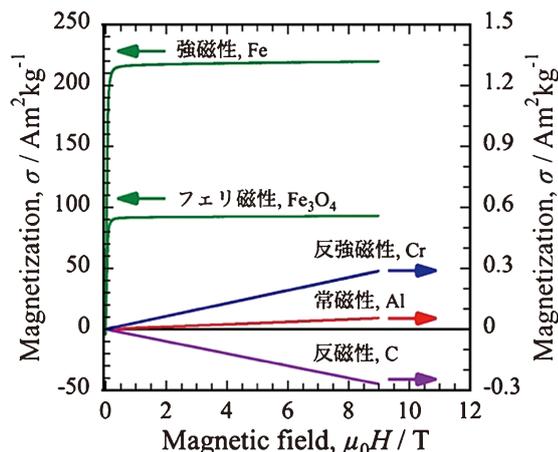


図3 磁性体の磁化曲線(概念図). 強磁性体やフェリ磁性体の質量磁化 $\sigma$ は, 常磁性体, 反強磁性体および反磁性体が示す磁化の $10^2 \sim 10^3$ 倍大きい。(実際の磁性体の飽和磁化, 磁化率<sup>(6)</sup>を元に作成.)

場印加によって飽和しますが, 常磁性と反強磁性の磁化は磁場に対して比例します. これらの磁化率は小さく, 一般的な強度の磁場印加では強磁性の磁化の100分の1程度の大きさになります. また, 炭素やビスマスのような反磁性体は負の比例関係があります. このため計測対象の磁化の大きさによって感度の異なる計測手段を選択する必要があります.

強磁性体は磁場印加によって一定値に飽和しますが, 結晶構造や試料形状に由来する磁気異方性によって, 磁化の飽和の過程が異なります. 後述するヒステリシスループを測定することで, この異方性の情報を得られます. この磁化と磁場の関係を調べるのが磁化測定と呼ばれる計測です.

磁化測定で得られる物性値として, 物質の磁化と上述の磁気異方性があります. さらに温度変化を測定することで, 強磁性を失う温度, すなわちキュリー温度を測定することができます. キュリー温度は, 強磁性をもたらす交換相互作用の強さに影響を受けるため, 間接的に磁気モーメントの結びつきの強さを測定することになります.

磁気測定分野で扱う単位には, emu を用いた CGS 表記がまだ使われる場面があるため簡単に説明します<sup>14</sup>. CGS 単位系における質量磁化  $\sigma = 1 \text{ emu/g}$  は SI 単位系における質量磁化  $\sigma = 1 \text{ Am}^2/\text{kg}$  に等しいため, 換算が容易です. また SI 単位系における磁気モーメントの次元 [ $\text{Am}^2$ ] は, ループ面積 (S) を流れる電流 (I) の積を表しています. 参考までに表 1 に, 単位系ごとの磁化および磁場の単位をまとめ, 表 2 には, 実際の測定を想定していくつか単体物質の磁性と飽和磁化(強磁性体)と  $\mu_0 H = 1 \text{ T}$  の磁場中での質量磁化(常磁

表 1 SI および CGS 単位系における磁化・磁場の単位<sup>(4)</sup>.

単位系	SI 単位系	CGS 単位系
磁気モーメント (試料磁化) $m$	$\text{Am}^2$	emu
体積磁化 $M$	$\text{A/m}$	$\text{emu/cm}^3$
質量磁化 $\sigma$	$\text{Am}^2/\text{kg}$	$\text{emu/g}$
磁場の強さ $H$	$\text{A/m}$	Oe(エルステッド)
磁束密度 $B$	$\text{T}(\text{Wb/m}^2)$	G(ガウス)
備考	1 T は約 796 kA/m に相当 ( $B = \mu_0 H$ ) 1 T は 10 kG に相当 試料体積を $v$ とすると試料磁化 $= Mv$	

表 2 単体物質の室温付近の飽和磁化(強磁性体)と 1 T の磁場下での磁化(常磁性, 反強磁性および反磁性)<sup>(6)</sup>.

元素	磁性	質量飽和磁化 [ $\text{Am}^2/\text{kg}$ ]	変態温度 $\theta_f$ [K]
Fe		218.0	1043
Co	強磁性	161.85	1388
Ni		55.01	631
質量磁化 ( $\mu_0 H = 1 \text{ T}$ の磁場下)			
Al	常磁性	$0.61 \times 10^{-2}$	
Pt	常磁性	$0.983 \times 10^{-2}$	
Cr	反強磁性	$3.17 \times 10^{-2}$	
Cu	反磁性	$-0.086 \times 10^{-2}$	
C	反磁性	$-3.0 \times 10^{-2}$	

性, 反強磁性および反磁性)をまとめました. 後者の質量磁化は  $\mu_0$  をかけることにより質量磁化率に変換できます.

### 2-3-1-1-2 磁化測定で得られる情報

強磁性を示す単一元素や合金構成元素 (Fe, Co, Ni, Cr, Mn, etc.) は, 炭素鋼や, 強靱鋼, ステンレス鋼などの構造材料に含まれていることはご存知だと思います. したがって, 構造材料の微細組織を構成する各相も当然磁気的性質を有しています. これが, 構造材料など磁気分野以外のフィールドで研究しているみなさんでも, 磁化測定する意味が見出せると著者が考えている理由です.

材料の中には温度環境によって相変態するものが多くあります. 鋼の主構成要素である鉄 (Fe) は, 1043 K にキュリー温度をもち, 1185 K で bcc 構造の  $\alpha$ -Fe (フェライト) から fcc 構造の  $\gamma$ -Fe (オーステナイト) へと相変態します. 図 4 は純鉄の磁化の温度依存性を示しています. 1043 K 以上では  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe 共に常磁性ですが磁化率が異なるため, 変態温度で磁化に異常な変化が現れます. 図 4 は印加磁場の異なる熱磁化曲線を示しており, 挿入図に変態温度近傍の拡大図を示しますが, 一次変態の特徴である  $\alpha$ - $\gamma$  変態に伴い磁化が急激に減少することや, 加熱・冷却時にヒステリシスを伴って変態していることがわかります.

<sup>14</sup> ここで注意すべきことは, emu は次元をもつ単位ではなく, 使用する単位系を示していることです. 本稿では, できる限り SI 単位系で統一し, 磁化の値には質量磁化 ( $\sigma$ ) では  $\text{Am}^2/\text{kg}$ , 磁場の強さには T (テスラ) を用いることにします. T (テスラ) は厳密には磁束密度 ( $B$ ) の単位ですが, 慣例として磁場の強度を表す際によく用いられます.

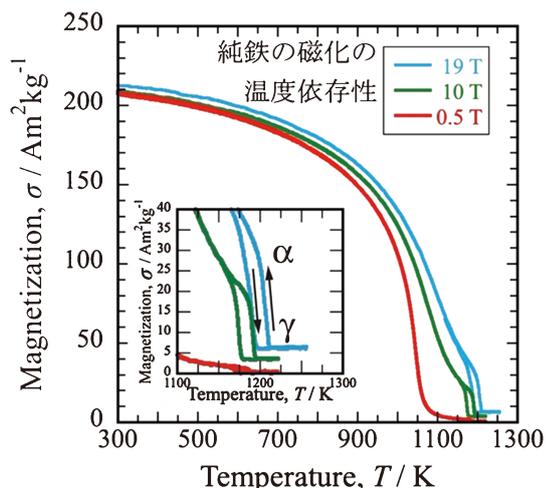


図4 純鉄の熱磁化曲線. 挿入図はキュリー温度近傍の拡大図.

また、マルテンサイト変態のような無拡散変態や、規則合金の規則-不規則転移のような拡散変態も磁化率の差を反映した磁化の変化から観測することが可能です。

このような変態は当然、DTA(differential thermal analysis)やDSC(differential scanning calorimetry)などの熱分析で観測することができます。特に、DSCでは変態の潜熱を測定し、熱力学的な平衡状態に関する貴重な情報を得ることができます。TG(thermogravimetry)-DTAのように他の測定と組み合わせて複数の物性値を測定することもできます。ただし、主として試料へ出入りする熱を観測するため、磁気変態を比熱の変化を通して観測することになります。比熱に対する磁性の寄与は決して大きくなく、独立した現象として明瞭に観察できないこともあります。

一方で磁化測定は他の物理量からの影響が少ない環境で行われるため、比較的独立した計測と考えられます。このため、磁性を担う電子状態などが直接反映される利点があります。例えば、磁化だけが観測に影響するため、キュリー温度では単に自発磁化が消失します。これが磁化測定の特徴と言えます。

また、熱分析やX線構造解析では材料の平均的な(あるいは巨視的な)情報を得られます。局所的な(部分的な)情報は主相のシグナルに埋もれてしまう場合がありますが、磁化測定で検出できる場合があります。

合金系によっては組成や温度、あるいは熱処理履歴によってさまざまな非平衡相が生じる場合がありますが、それらの相を磁化測定で検出・同定することができます。

このように、磁化率や磁化の大きさ(絶対値)といった物性値の基本的な評価に加えて、組織構成に関する情報を得られます。熱分析と磁化測定のどちらかが優れているという話ではなく、測定手法としてどちらも習得すれば、所望する情報に応じて適切な手法を選択できると理解していただければと思います。

まとめると磁化測定によって物質の、

- 磁気モーメント(磁化)
- キュリー温度(磁気変態温度)
- 相変態温度(構造, 規則-不規則, etc)
- 相の構成比

を得ることができます。これらの情報は、磁性材料を研究対象とする方以外にも重要な情報であるといえます。次節では、一般的な磁化測定装置の装置構成について紹介します。

## 2-3-1-2 磁化測定装置の概要

### 2-3-1-2-1 構成要素

この節では、一般的な磁化測定装置の構成について紹介します。磁化測定装置は、大きく分けて、磁場発生部、磁化検出部から構成されます。それぞれについて簡単に説明したのち、市販されている装置の測定可能範囲についてまとめます。

### 2-3-1-2-2 磁場発生部

磁化測定では、材料に磁場を印加することで材料に誘起される磁化を計測します。強磁性体の場合、後述する反磁場の影響もあり、飽和させるためには0.5~1 Tは必要となります。異方性の大きい永久磁石材料などを飽和させるためには、さらに強い磁場が必要となる場合があります。

磁場発生装置として最も一般的であるのが電磁石で、図5(a), (b)のように銅線を鉄心に巻いたコイルから構成されます。磁場は磁極間に発生し、最大発生磁場は一般的な磁石で1~1.5 Tほど、強磁場発生用に設計されたもので3.5 T程度です。

電磁石よりも強い磁場が必要な場合は、超伝導磁石を用います。図5(c), (d)のように超伝導ケーブルをソレノイド状に巻いた空芯コイルです。

市販の磁化測定装置に用いられている超伝導磁石は発生磁場5~9 Tのものが多く、最大で14 T発生する測定装置もあります。

磁場強度の測定には、ホール効果を利用した磁気センサで

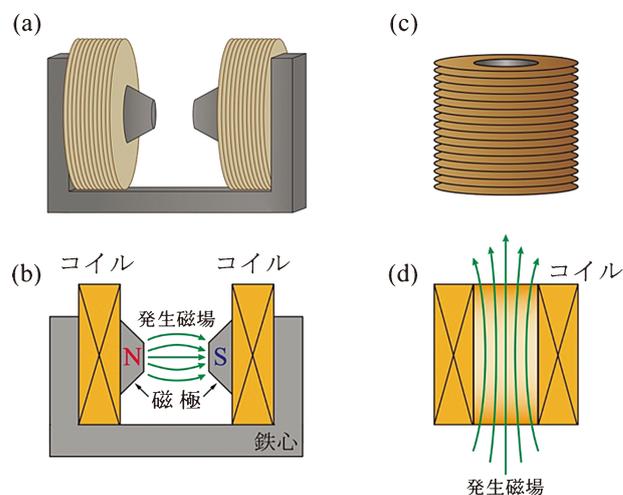


図5 (a) 一般的な電磁石の概念図と(b)断面図, (c) ソレノイド型空芯磁石の概念図と(d)断面図.

あるホール素子を用いる方法と、コイルに通電している電流値を測定し、磁場に換算する方法があります。ホール素子では、薄膜状の半導体素子の面内に電流を流し、電流に垂直方向に磁場が印加されると、両者に垂直な方向に磁場強度に比例して電圧が生じるホール効果を利用して磁場を測定します。鉄心のある電磁石では、電流と磁場の関係に鉄心由来のヒステリシスが存在することがあるため、実際の磁場を測定するホール素子が利用されます。超伝導磁石では電流値を用いることが一般的です。超伝導磁石への通電している電流値を計測する際には、電源の設定値ではなく、シャント抵抗を用いて正確な電流値の測定を行うことが望ましいです。シャント抵抗は電流の測定に特化した抵抗器で、電流経路に直列に接続し、抵抗両端の電圧降下を測定して、オームの法則から電流値を計算します。

さらに強磁場が必要な場合、パルス磁場を用いることがあります。パルス磁場は $\mu\text{s}\sim\text{ms}$ の時間で数10 T～数100 Tの磁場を発生させることができますが、室温以下の測定がほとんどです<sup>15</sup>。

### 2-3-1-2-3 磁化検出方法

磁場によって生じた材料の磁化を検出する方法として、ピックアップコイルと呼ばれる検出コイルを用いる方法が一般的です。図6で説明するように検出コイルを鎖交する磁束 $\Phi$ に時間変化が生じると、その変化率 $d\Phi/dt$ に比例する電圧 $V$ が誘起される、いわゆるファラデーの電磁誘導の法則を用いて磁化を検出します。検出コイルを鎖交する磁束 $\Phi$ の発生源は、測定対象物の全磁化 $Mv$ (試料体積 $v$ )です。

$$-\frac{d\Phi}{dt} = V \quad (3)$$

磁束を時間的に変化させる方法としては、一定速度で試料をコイル中を通過させる引き抜き法や、コイルの中心で一定振幅・周波数で試料を振動させる試料振動型磁力計(VSM: vibrating sample magnetometer)<sup>(4)</sup>があります。

次に、試料の磁化が検出コイルに作る磁束を考えます。まず図6(a)に示すように単独のコイルの中心に磁化を配置して、コイル中心を $z$ 軸方向の原点にとります。 $z$ 軸上で試料位置を変化させたとき、磁束 $\Phi$ は図6(b)のように変化します。もし磁場や磁化が時間変化せず一定で試料位置も固定されているならば、式(3)に従ってコイルに起電力 $V$ は発生しません。ここで試料を $z$ 軸に沿った位置で小さく振動させるとコイルに生じる誘導起電力は図6(c)のようになります。ただこの場合、コイル中心に試料を置くと電圧はゼロになります。

磁化測定中は磁場中に試料が置かれているため検出コイルには磁化の作る磁束に比べてはるかに大きな、磁場発生装置からの磁束が鎖交します。このため、電源電流の揺らぎや振動が検出コイルの誘導起電力に雑音として影響を与えます。

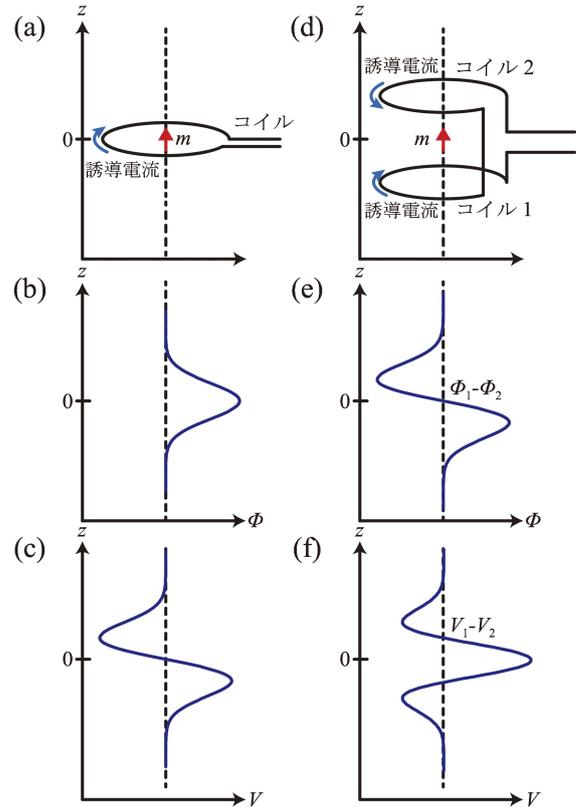


図6 ピックアップコイルが検出する磁束 $\Phi$ と誘導起電力 $V$ 。(a)単独コイルの中心に磁化 $m$ を配置した場合に(b)コイルを鎖交する磁束、(c)試料を小さく振動させたときにコイルに生じる誘導起電力。(d)直列接続した2つのコイルの中心に磁化を配置した場合の(e)それぞれのコイルを鎖交する磁束の和、(f)起電力の和。

これを避けるために図6(d)のように2つ1組のコイルを配置し、外部からの一様磁場を打ち消します。2つのコイルの中心に $z$ 軸の原点をとり、試料を軸方向に移動させると、各コイルを鎖交する磁束の和は図6(e)のように表され、中心では位置に対し直線的に変化します。このとき、試料を小さく振動させた場合の起電力は図6(f)のように表せます。これがVSMで一般的に用いられる磁化検出方法ですが、検出コイルを構成するコイルの数は装置によって異なります。

試料(磁化の大きさ $Mv$ )を図6(d)に示した2つのコイルの中心に置き、 $z$ 方向に角振動数 $\omega (=2\pi f, f: \text{周波数})$ で振動させたとき、振幅が $z = A_0 \sin \omega t$ ( $A_0$ は比例係数)で表されるとすると、コイルを鎖交する磁束 $\Phi$ の時間変化は $A$ を比例定数として次式で表せます。

$$\Phi = AMv \sin \omega t \quad (4)$$

検出コイルに発生する電圧( $V$ )は

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} = AMv\omega \cos \omega t \quad (5)$$

で表せ、振動周波数と磁化に比例します。このコイルに生じた誘導起電力の検出にロックインアンプを用います。ロックインアンプでは、入力された信号から正弦波の参照信号に同期した信号を分離することができます。参照信号に加振器の

<sup>15</sup> 国内では東京大学物性研究所と大阪大学にてパルス磁場が共同利用に供されています。

駆動信号を用いれば、雑音を除去して試料の振動と同じ周波数成分だけを検出することができます。

また、SQUID 磁力計<sup>8)</sup>と呼ばれる超伝導量子干渉素子 (SQUID: superconducting quantum interference device) を用いて磁化を検出する方法があります<sup>16)</sup>。検出コイルを用いることは、試料振動法と同じですが、そのコイルは超伝導線材を用いて巻き、超伝導トランスで磁束を伝達し計測します。これは、上述の方法では磁束の時間微分の電圧が発生するのに対して、磁束の変化を打ち消す直流の完全反磁性電流(遮蔽電流)が流れることを利用します。その磁束を SQUID で検出し、出力電圧を磁化に変換する方法です。試料を振動させなくても磁化に比例した電流が流れることが特徴です<sup>7)</sup>。

SQUID では試料の作る磁束を、量子化された磁束 ( $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$ ) を基準に検出することができます。市販の SQUID 磁力計 (SQUID magnetometer) では、試料が一定速度でピックアップコイルを通過する DC モードに加えてさらに高感度が実現できる手法としてピックアップコイル内で試料を振動させる VSM モードを選択できます。

計測装置の感度に対する要求は、測定対象に大きく依存します。VSM は SQUID 磁力計に比べ大きな磁化をもつ強磁性体などの測定に適しており 20~100 mg ほどの試料質量があれば十分な精度で測定できます。一方、感度に優れている SQUID 磁力計は常磁性や反強磁性、反磁性やごく微量の強磁性体など磁化が小さい物質の測定に適しています。

また、測定温度に対する要求も装置選択の重要な要因です。測定温度範囲が 4.2 K~1200 K と広い装置であっても、同じセッティングでこの範囲をカバーできるわけではありません。ほとんどの装置で低温測定と高温測定でセッティングを変える必要があります、室温を跨いだ広範囲の測定を一括で行うことは困難です。

### 2-3-1-3 磁化測定の準備

この節では実際に磁化を測定する際に必要な手順、注意点を述べていきます。特に、装置の構成および、試料のセッティング、測定前の較正、測定条件の選択などについて、図 7 に示したような電磁石を用いた典型的な VSM 装置をもとに説明します。

#### 2-3-1-3-1 装置構成

一般的に市販されている VSM は、図 7 に示すように、磁場印加のための電磁石とその冷却装置、電磁石の励磁電源、試料に関係した部分は試料を振動させるための加振器、サンプルロッド、サンプルホルダーで構成されます。磁化信号処理と制御のための制御・測定系は発振器、ロックインアンプ、制御用 PC などで構成されています。

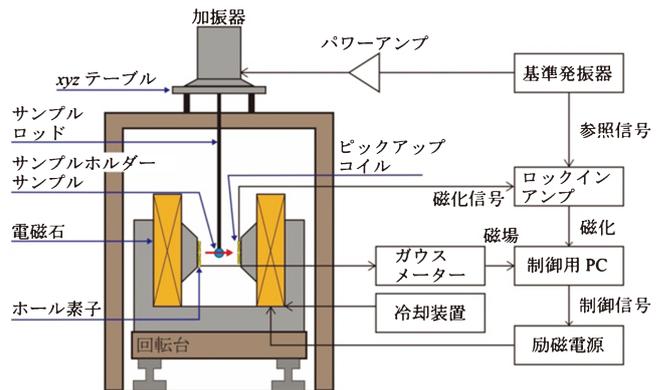


図 7 VSM ブロックダイアグラム。

電磁石の上方に据え付けられた加振器には試料ロッドが取り付けられます。ロッド先端には試料が固定され、磁場の中心で振動させます。試料は形状や温度環境に応じて適切な容器(試料ホルダー)に納め、測定に用います。

制御・測定系には、加振器振動の基準となる信号(40~80 Hz 程度)発振器の他、検出コイルの信号を検出するロックインアンプや、磁場の強度を計測するガウスメーターなどが組み込まれています。ほぼ全ての操作は、制御・計測ソフトがインストールされた制御用 PC で行うことができます。この辺りは、メーカーによって異なりますので、装置管理者によく相談の上使用してください。

#### 2-3-1-3-2 試料ロッド・ホルダーの選択、試料固定

試料ロッドの先端は試料を固定する試料ホルダーとなっています。試料ホルダーは試料形状(試料容器)に対応したものが装置メーカーによって用意されています。そのため、測定者は試料形状に適した試料ホルダーを選択し、試料をセットするだけで測定できます。ただし、測定したい温度範囲によってロッド・ホルダーの素材に注意する必要があります。

室温測定用の試料ホルダーには、ポリマー樹脂製かガラス製の反磁性磁化率が小さい素材が使用されています。低温用には低温脆化が小さいポリマー樹脂製か、熱収縮の小さいガラス製、高温用には石英ガラス製のホルダーと、測定温度範囲に適したホルダーが用意されています。

試料ホルダーのタイプについて紹介します。メーカーごとに細かい違いがありますが、通常は薄膜用、バルク用、粉末用が用意されています。図 8 には著者の手元にあるいくつかの試料ホルダーを示しています。図 8(a)に示す薄膜用ホルダーでは平滑面に試料を乗せた後、図 8(b)のようにカバーを被せ、ネジでカバーごと押さえつけて固定します。図 8(c)に示したバルク用ホルダーは、比較的大きな試料空間を持っており、試料をネジで押さえつけて固定します。粉末試料は図 8(d)に示したように専用カプセルに詰め、バルク用ホルダーに固定する方法[図 8(c)]が一般的だと思いますが、アルミホイルなどで均一な厚みになる様に包み、薄膜用

<sup>16)</sup> SQUID 磁力計の検出回路や動作原理については、次回の付録として紹介します。

のホルダーに固定する方法もあります。

また、比較的小さなバルク試料であれば粉末用カプセルに入れて測定する方法も考えられます。ただし、カプセル内で試料が動かないよう、石英ウールで隙間をぎっしりと埋める必要があります。

上述のように、試料固定にホルダー以外の素材を用いる場合、その素材の磁化率を把握する必要があります。石英ウールは反磁性、アルミホイルは常磁性ですので、磁場の強度に比例して磁化が生じます。大量に使用する場合や強い磁場を印加する場合には注意が必要です。あらかじめ、同量の石英ウールやアルミホイルの磁化を測定しておき、試料磁化の測定後に較正する必要があります。

試料をホルダーにセット後、振動ロッドに取り付けて測定位置にセットしますが、本測定を始める前に試料位置を調整する必要があります。磁気モーメントの大きさが不変でも試料位置によって検出コイルの出力が変化し、磁化信号に差が生じるためです。図9に検出コイルに生じる起電力の $x, y, z$ 軸方向の分布を示しました。 $x$ 軸方向は磁化信号が最小値、 $y$ 軸と $z$ 軸方向は最大値となるよう調整します。角度 $\theta$ は、磁場に対して測定したい試料面が平行・垂直になるよう、ロッドあるいは電磁石を回転させて調整をします。

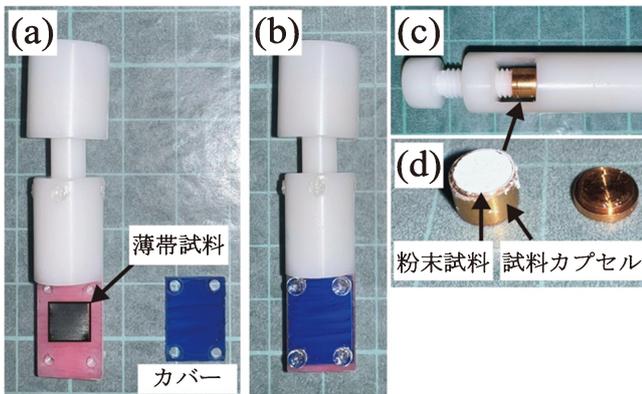


図8 VSM サンプルホルダーの一例。(a), (b) 薄膜用ホルダー、(c) バルク用ホルダーに(d) 粉末試料用カプセルを固定。

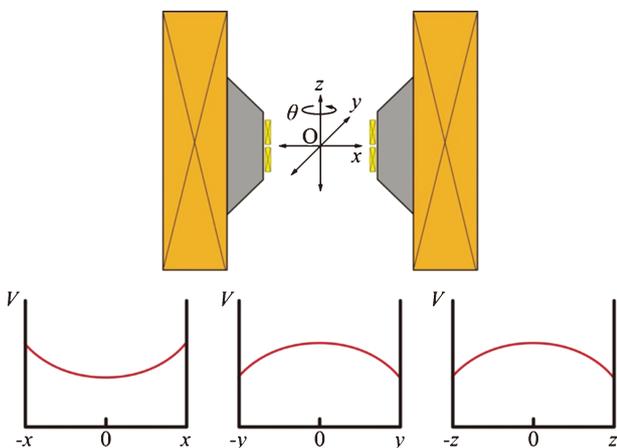


図9 電磁石磁極間の試料位置と検出コイルの出力  $V$  の変化。

この位置調整を行うことで、試料は磁場の分布の鞍点に位置することになります。最近のVSM装置では、試料セットのガイダンスがあり、指示に沿って操作すれば位置調整できるものがあるようですが、試料位置と磁化信号の関係を理解しておくでセッティングがスムーズに行えると思います。このような試料の位置調整は、磁化較正用の標準試料および、測定試料の測定ごとに必要です。

### 2-3-1-3-3 磁化の較正(標準Niの測定)

VSMでは磁化をピックアップコイルで検出します。得られる出力は磁化の大きさに比例する誘導起電力で式(5)に示すような関係があります。その比例係数を決定する較正作業が必要です。較正は、磁化の値が既知である標準試料を測定することで行われます。一般的に、VSMの場合は強磁性Niの飽和磁化を、高感度のSQUID磁力計の場合は常磁性Pdの磁化率を用います。

標準試料は、通常その装置に付随して用意されています。使用する際には、なるべく測定しようとする試料と同様の形状のものを使います。VSMでは磁化が既知の薄板状、ロッド状、球状の標準Niが用意されているはずですが。

標準試料の測定結果がその試料の磁化に一致するよう、較正係数を決定します。その係数を用いて以後の測定結果を較正します。測定ソフトウェア上で較正できることが多いと思いますが、この関係さえ把握していれば、測定後、データを解析する際に自分で較正することもできます。

### 2-3-1-3-4 測定パラメータの設定

VSMで磁化測定をする際には、

- (a) パーミアンス係数
- (b) 時定数(タイムコンスタント)
- (c) 印加磁場の掃引速度
- (d) 印加磁場の強度
- (e) 磁化の測定レンジ
- (f) 試料体積、質量

などを入力・設定する欄があると思います。

このうち、(a)のパーミアンス係数と呼ばれる値は、後述する反磁場を補正するために必要なパラメータです。反磁場は試料形状によって異なりますが、飽和磁化やその温度依存性を求める場合には影響が少なく、入力されている値を変更する必要はありません。

(b)の時定数は、測定条件によって変更する必要があります。磁化はピックアップコイルに生じる誘導起電圧としてロックインアンプで振動周波数と同じ周波数成分を取り出しますが、この時、横波信号を積分しSN比を上げること(積算)が行われます。その際の積算時間が時定数です。一般に100ms~10sの範囲で設定されます。1sと設定した場合、直前1s間に収集したデータを平均化したものが出力されることとなります。したがって、時定数は試料振動の一周期よりも十分長く、後述する $M-H$ ループや、磁化の温度依存性を評価する場合、磁場や温度の時間変化よりも十分短い時間に設

定をしなければいけません。

例えば、(c)磁場掃引速度 10 mT/s(100 Oe/s)で、時定数を 1 s と設定した場合、10 mT 刻みの平均化された磁化の値しか測定できません。永久磁石の保磁力のように、急峻な磁化の変化を測定したい場合には、注意が必要です。一方、掃引速度はそのまま時定数を 100 ms に設定すれば、1 mT 刻みの測定ができ、それだけ磁場の変化に対して敏感な測定ができます。ただし、積算時間が短くなるため雑音除去できなくなり測定精度が低下します。時定数と磁場の掃引速度を適切に設定するためには予備実験が必要です。

磁化の温度依存性を測定したい場合、加熱速度は 5 K/min 程度が一般的と思われます<sup>17</sup>。5 K/min では 1 s 間に 0.083 K の変化しかありませんので、時定数は 3 s ほどで十分です。温度計に熱電対を使うとして、温度測定の精度からみてもこの程度の温度間隔で十分かと思えます。

(d)印加磁場強度は印加する磁場の最大値です。ただし、最大磁場の発生には制限時間が設けられている場合があります。M-H ループの測定ならばあまり関係ありませんが、温度依存性のように長時間その磁場を維持したい測定では注意する必要があります。

(e)測定レンジは、測定対象物の磁化の大きさに合わせる必要があります。小さい磁化を大きなレンジで測定してしまうと、磁化の小さな変化が雑音に埋もれてしまうことになります。また、測定中にレンジの設定を変更するとデータに不連続点が生じることがあるため、注意してください。

### 2-3-1-4 測定データと解析手法

#### 2-3-1-4-1 磁化曲線に影響を及ぼす因子

##### (A) 反磁場

試料の形状によって反磁場が生じ、磁化過程に影響を受けます。磁化した材料の表面には、図10のように磁極が生じます。すると、その磁極によって磁性体内部に外部磁場  $H_{ex}$  と逆向きの磁場が生じます。これを反磁場  $H_d$  と呼びます。

反磁場の大きさは、材料の形状によって異なります。試料長手方向に磁場印加すると小さく、その垂直方向への印加で大きくなります。また、材料内部が一様に磁化していない場合、分布が生じます。

試料が回転楕円体である場合、その回転軸方向に磁化させると内部の反磁場は同様となり、

$$H_d = -NM \quad (6)$$

で与えられます<sup>(4)</sup>。この式中の  $N$  を反磁場係数と呼びます。反磁場係数には、回転の主軸を  $x, y, z$  とすると  $N_x + N_y + N_z = 1$  なる関係が成り立ちます。球状の場合、 $N_x = N_y = N_z = 1/3$  となり、長い円柱の場合は  $z$  方向を長手方向として、 $N_x = N_y = 1/2, N_z = 0$  と近似できます。

したがって、測定試料に実質的に働く磁場  $H_{eff}$  は、

$$H_{eff} = H_{ex} + H_d = H_{ex} - NM \quad (7)$$

<sup>17</sup> 加熱・冷却の速度が早すぎたり、試料が大きすぎたりすると、試料温度が制御温度に追従せず、正しい磁化の温度変化を測定できない場合があります。

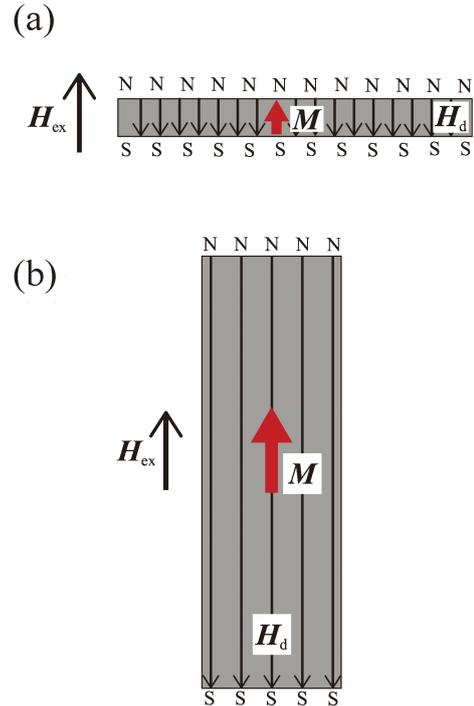


図10 細長い形状をした強磁性体が磁化した際に(a)短軸方向、(b)長軸方向に生じる反磁場  $H_d$ 。(a)に比べ磁極が離れているため、反磁場は小さい。

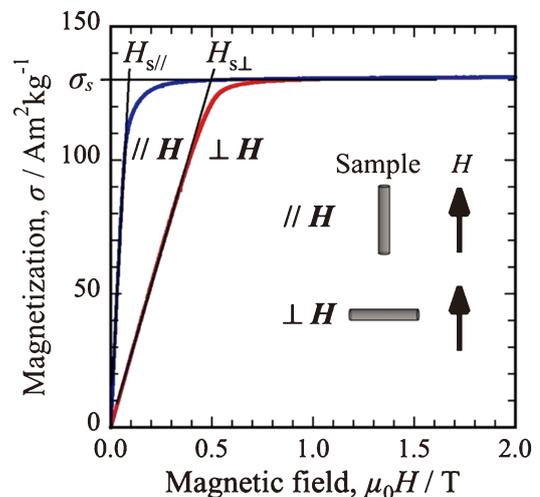


図11 針金の磁化過程( $\sigma//H, \sigma \perp H$ )。

で与えられます<sup>(4)</sup>。例えば、飽和した鉄の球状試料の場合、飽和磁束密度  $\mu_0 M = 2.17$  T、反磁場係数 1/3 を用いて、

$$\mu_0 H_d [\text{T}] = -N\mu_0 M = -\frac{1}{3} \times 2.17 [\text{T}] = -0.723 [\text{T}]$$

と計算できます。したがって、飽和させるためには、0.7 T 以上が必要になると推定されます。

図11は、著者が測定した  $\phi 0.9 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  の市販されているステンレス製の針金の磁化曲線になります。針金の長手方向に垂直に磁場を印加した測定を  $\perp H$ 、長手方向に磁場印加した測定を  $// H$  の添字で表しています。反磁場係数は  $N_{\perp H} > N_{// H}$  となるため、飽和に要する磁場(飽和磁場)は  $// H$  の

方が小さくなります。飽和磁場  $H_s$  は、図11に示すように飽和の前後を直線近似し、それぞれの延長の交点と定義しています。

この測定では質量飽和磁化  $\sigma = 131 \text{ Am}^2/\text{kg}$  が得られました。円柱の長手方向に垂直に磁場をかけた ( $\perp H$ ) として、 $N = 1/2$  を用いて  $H_d$  を概算してみます。

鉄の密度  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  を質量飽和磁化  $\sigma$  に掛けると、この試料の体積磁化は、 $M = 1022 \text{ kA/m}$  と得られます。したがって、

$$H_d = -NM = -\frac{1}{2} \times 1022 [\text{kA/m}] = -511 [\text{kA/m}]$$

が得られるため、 $\mu_0 H_d = -0.64 \text{ T}$  となります。この値は実験結果と概ね一致していることが図11から分かります。

### (B) 結晶磁気異方性

材料の磁化過程は印加磁場方向がどの結晶方位に平行に印加されるかによっても異なる場合があります。この特性を評価するために単結晶試料を用いて測定が行われます。多結晶試料の場合にはそれらの平均的な磁化過程が得られますが、集合組織や、結晶配向した場合には、多結晶試料でも異方的な磁化曲線が現れます。図12は純鉄の単結晶について、各結晶軸に磁場を印加した際の磁化過程になります<sup>(9)</sup>。図12は1926年に報告された論文からの引用であるため、現在の国際単位系 (SI 単位系) ではなく CGS 単位系で表されています。図中の磁束密度  $10^3 \text{ G}$  (ガウス) は  $0.1 \text{ T}$  に相当し、磁場の強さ  $100 \text{ Oe}$  (エルステッド) は約  $7.96 \text{ kA/m}$  に相当します。

この磁化過程を見て明らかのように、 $[100]$  方位に磁場を印加した場合、最も小さい磁場で飽和し、 $[111]$  方位に印加した場合は飽和に要する磁場が最も大きくなります。このように、磁性体の結晶構造には、磁化しやすい結晶軸 (磁化容易軸) と磁化しにくい結晶軸 (磁化困難軸) が存在します。純鉄の結晶 (bcc) の場合、 $[100]$  が磁化容易軸、 $[111]$  が磁化困難軸となります。 $[110]$  方位は中間軸となります。このように、特定の結晶軸に沿って磁化しやすい特性を結晶磁気異方性と呼びます。

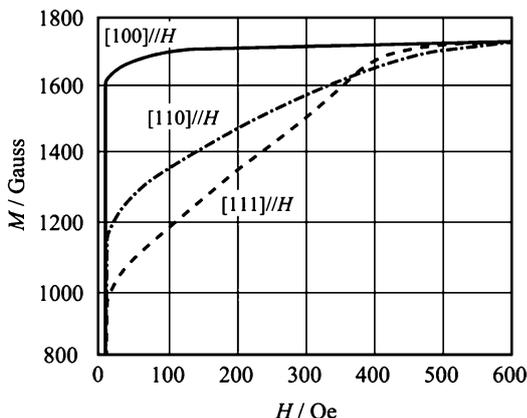


図12 純鉄の磁化過程と結晶磁気異方性<sup>(9)</sup>。

### (C) ミラー効果 (鏡像効果)

試料磁化の大きなものを測定していると、磁場の増加に伴って磁化が減少してしまう時があります。これは、試料の磁化によって電磁石の鉄心に磁極が誘起されてしまうためです。これをミラー効果といいます。

ミラー効果の影響を小さくするためには、磁極間距離を広げ試料と磁極を離す、試料磁化を小さくする、試料を飽和しやすい形状にするなどが挙げられます。

### 2-3-1-4-2 ヒステリシスループ

ヒステリシスループは、図13に示したように連続した磁場の変化に対して追従する磁化の履歴曲線のことであり、磁性材料の特性評価のため幅広い分野で測定されます。このループを測定することで、飽和磁化の他、残留磁化や保磁力の測定、さらに、エネルギーロスを見積もることができます。

ヒステリシスループは、図13の②→③→④→⑤の過程で描かれます。①は、初磁化曲線と呼ばれ、試料を飽和させるために磁場を印加する過程であるため、ループの過程には入りません。また、⑤の過程で1周のループを描いた後は磁場を減じ、測定は終了となります。一般的な装置では、ループ測定モードを選択し、最大磁場だけ入力すればループ測定を実施してくれます。

②の過程で磁場がゼロとなっても磁化が残る場合、これを残留磁化  $M_r$  と呼び、永久磁石の性能を示すパラメータの一つとなっています。さらに、磁場を反転させる③の過程で磁化がゼロになります。このように、残留磁化をゼロとするのに必要な逆向きの磁場の強さを保磁力  $H_c$  と呼びます。保磁力も磁性材料の特性を表す重要なパラメータの一つです。また、このループに囲まれた面積はヒステリシスループを1周描く際のエネルギー損失に相当します。

保磁力は少なくともループが閉じるまで (飽和するまで) 磁場印加したのちに測定する必要があります。十分に磁場を掛

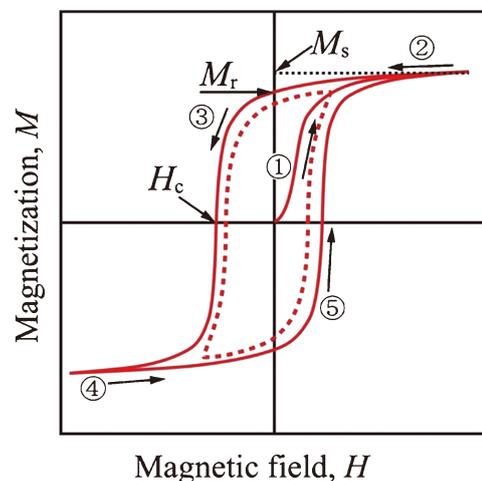


図13 強磁性体のヒステリシスループ。

けた後のヒステリシスループは図13に実線で描かれた②→③→④→⑤の過程を辿りますが、もし、初磁化曲線①や⑤の過程の途中、磁化が飽和に達しない磁場で反転させると磁化曲線は点線で示したようなループを描きます。これをマイナーループと呼びます。このとき、見かけの保磁力は飽和したループから得られる値より小さく観測されてしまいます。マイナーループから得られた保磁力は特性評価として適切な値とはいえません。保磁力を正しく評価するためには磁化が磁場に対して一価関数になるまで(飽和するまで)十分に大きな磁場を印加した後にヒステリシスループの測定をする必要があります。先述した反磁場は磁化過程には影響しますが、 $M=0$ で $H_d=0$ となるため、原理的に保磁力には影響を及ぼしません。しかし、反磁場が大きいと飽和磁場が大きくなり、飽和が困難になります。したがって、なるべく反磁場係数の小さい形状で測定することが推奨されます。

### 2-3-1-4-3 温度依存性

最後に磁化の温度依存性について述べます。磁気変態や構造変態などの状態変化を磁化の変化から読み取ることができ、本稿では、それら相変態の一例として、磁気変態、アモルファス合金の結晶化、および純鉄の $\alpha$ - $\gamma$ 変態を紹介します。

#### (A) 磁気変態

材料の強磁性-常磁性変態に関して、その特徴を表すキュリー温度などが実験的に求まります。強磁性が自発磁化を失う温度として強磁性キュリー温度 $\Theta_f$ 、常磁性温度領域の磁化率の温度依存性(キュリー・ワイスの法則)から漸近キュリー温度(常磁性キュリー温度) $\Theta_p$ が求まりますが、分子場理論に基づいて解釈することにより交換相互作用や揺らぎの単位などの物理量に関係づけることができます<sup>(5)</sup>。分子場理論によるとキュリー温度近傍では、磁化の2乗 $M^2$ が磁場の大きさ $H$ と磁化 $M$ 、キュリー温度 $\Theta_f$ 、温度 $T$ を用いて、

$$M^2 = \frac{a}{A} \left(1 - \frac{T}{\Theta_f}\right) + \frac{\mu_0 H}{A M} \quad (8)$$

と表せます<sup>(4)</sup>。

また、キュリー・ワイスの法則は以下の式で表されます。

$$\chi = \frac{C}{T - \Theta_p} \quad (9)$$

ただし、キュリー定数 $C$ は量子スピンの大きさに関連する値であり、 $\Theta_p$ には交換積分の符号と大きさが含まれますが、本稿では詳細を割愛します。興味のある方は、文献(2)や(4)を参考にしてください。

ここでは、強磁性キュリー温度 $\Theta_f$ の求め方として簡易的な方法とアロットプロット、漸近キュリー温度 $\Theta_p$ の求め方としてキュリー・ワイスの法則に沿って逆磁化率を用いる方法の計3種類を紹介します。

#### (A1) キュリー温度の簡便な決定法( $M^2$ vs. $T$ プロット)

この方法では磁場一定の条件で温度依存性を測定します。式(8)で右辺の第2項を無視すると磁化の2乗は温度 $T$ に

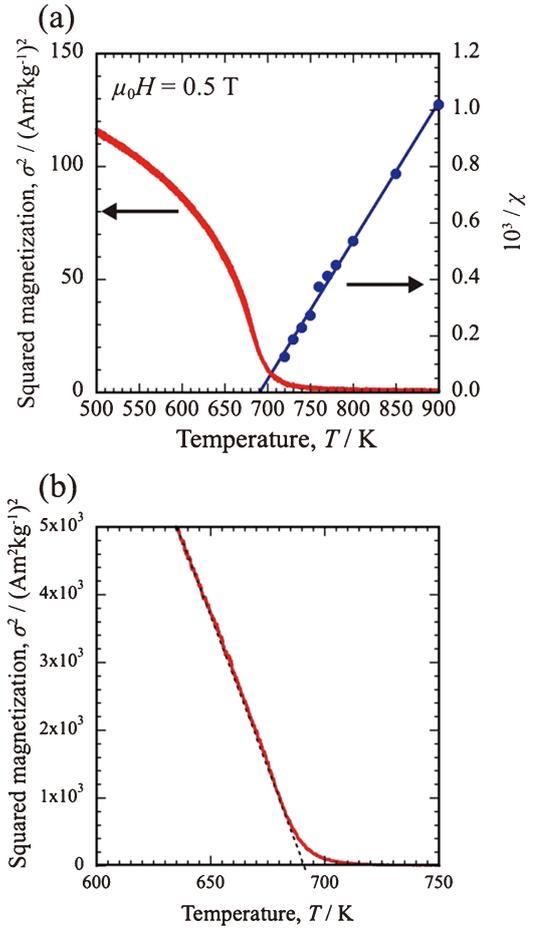


図14 (a) FeRhの質量磁化 $\sigma$ と逆磁化率( $\chi^{-1}$ )の温度依存性<sup>(10)</sup>, (b)  $\sigma^2$ の温度依存性。

比例しているため、磁化の温度依存性を測定し、 $M^2$  vs.  $T$ をプロットします。このプロットで $M^2$ の近似直線が横軸を切った点がキュリー温度となります。図14は、著者がFeRhという強磁性を示す合金を測定した結果になります<sup>(10)</sup>。図14(a)は磁場0.5 Tで測定した質量磁化 $\sigma$ の温度依存性と、磁化率の逆数 $\chi^{-1}$ の温度依存性、図14(b)はキュリー温度近傍で質量磁化の2乗 $\sigma^2$ を温度に対してプロットしたものになります。

#### (A2) アロットプロットによるキュリー温度の決定

この方法では、キュリー温度近傍で試料温度を一定に保持し、磁化の磁場依存性を測定します。保持温度を徐々に上げ、キュリー温度を十分超えるまでこの測定を繰り返します。著者がFeRhで測定した結果を図15(a)に示します。この実験データを式(8)に沿って、 $\sigma^2$  vs.  $H/\sigma$ でプロットすると、図15(b)のようになります。このプロットをアロットプロットといいます。図中の各系列の近似直線を外挿したとき、原点を通過した直線に対応する温度が強磁性キュリー温度 $\Theta_f$ となります。 $\Theta_f$ より低温ではy軸切片が正、キュリー温度より高温では切片が負になります。

しかし、特定していない温度で測定することはできません。そこで、この近似直線の切片(式(8)の右辺第1項)が

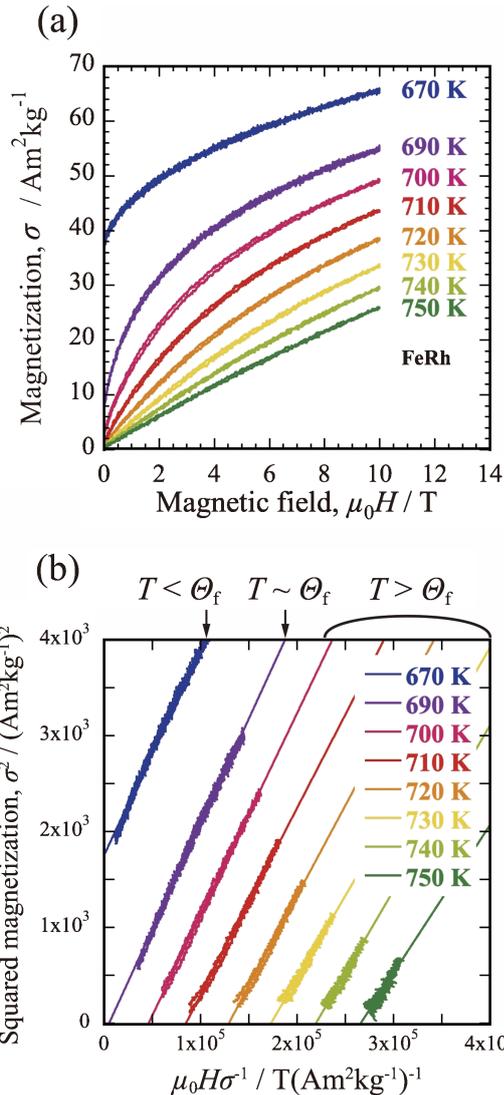


図15 FeRhのアロットプロットによる強磁性キュリー温度の決定. (a) 各温度における質量磁化  $\sigma$  の磁場依存性<sup>(10)</sup> と (b) アロットプロット.

温度に比例することを利用します. アロットプロットで得られた切片を測定温度でプロットします. このプロットの近似直線の温度軸切片として  $\Theta_f$  が得られます.

先に紹介した (A1)  $M^2$  vs.  $T$  プロットとこのアロットプロットはいずれも式 (8) に基づいて  $\Theta_f$  を推測する方法です.

(A1) では磁化の磁場依存性を無視するため,  $\Theta_f$  近傍のデータが使えないなどの欠点が生じます. 一方, (A2) アロットプロットでは右辺の第 2 項を含んで磁化の磁場依存性を取り込んでいるため (A1) より正確な推定方法と言えます.

(A3) キュリー・ワイスの法則を用いた漸近キュリー温度の決定法

最後に, 漸近キュリー温度の決定法について紹介します. 式 (9) は強磁性体や反強磁性体が変態温度以上で常磁性状態での磁化率  $\chi$  の温度  $T$  に対する依存性を表しており, 式 (9) で  $C$  はキュリー定数と呼ばれ物質固有の値となります. この関係から求まる温度は, 漸近キュリー温度あるいは

表3 各種方法で求めた FeRh 合金のキュリー温度と漸近キュリー温度<sup>(10)</sup>.

手法	温度
$\sigma^2$ vs. $T$	$\Theta_f = 692.5$ K
アロットプロット	$\Theta_f = 689.6$ K
キュリー・ワイスの法則	$\Theta_p = 690.8$ K

常磁性キュリー温度と呼ばれます.

キュリー・ワイスの法則から漸近キュリー温度を求める場合, 試料の磁気変態温度よりも十分高温で測定します. 図 15 (a) に示すようにキュリー温度より十分高温では磁化曲線は比例関係を示し, 磁化率  $\chi$  が求まります. いくつかの温度で  $\chi$  を得たら, その逆数を温度に対してプロットすると,

$$\chi^{-1} = \frac{T - \Theta_p}{C} \quad (10)$$

に従い, 温度  $T$  に比例します. これが図 14 (a) の右軸に対応するプロットになります. これを直線近似すると温度軸の切片からキュリー温度  $\Theta_p$  が得られます.

一般に, アロットプロットで求めた強磁性キュリー温度に比べて, キュリー・ワイスの法則から求めた漸近キュリー温度はやや大きな値となります. これは, キュリー温度の直上では, 磁気モーメントの長距離秩序が失われても短距離秩序が残っているためです. したがって, 短距離秩序も失われる十分高温のデータから求めた値はやや高く得られます. 以上, 3 種類の方法で求めた FeRh のキュリー温度を表 3 にまとめました. 表 3 を見てわかるように, 全ての方法でキュリー温度はおよそ 690 K であることがわかります. また, (A1) および (A2) の方法で求めた強磁性キュリー温度  $\Theta_f$  には多少の差がありますが, 真の値に近いのは (A2) のアロットプロットで求めた値であると考えられます. また, (A3) 常磁性キュリー温度  $\Theta_p$  は (A2) の方法で求めた強磁性キュリー温度  $\Theta_f$  よりも高く得られる傾向は一致していますが, 一般的な例から見ると  $\Theta_f$  に近すぎます. このように, 見積りの方法によって, 多少異なる値が得られますので, 学会発表や論文などに用いる際には, どのような方法で見積もった値であるか併記することが重要です.

## (B) 相変態の観察

最後に, 磁化測定による相変態の観察について紹介します. 本稿の序盤でも紹介しましたが, 材料に生じる相変態を磁化測定で観測できることがあります. 一例として, 鉄の  $\alpha$ - $\gamma$  変態, Fe 基アモルファス合金の結晶化, 規則合金の規則-不規則変態, 磁気形状記憶合金のマルテンサイト変態などです. これらの変態以外でも磁性, 磁化率の変化を伴う変態は磁化で明瞭に観察することができます.

純鉄の  $\alpha$ - $\gamma$  変態については, 冒頭に示した図 4 と共に説明をしました. その他の例として, Fe 基アモルファス合金の結晶化を磁化測定で観察した例を紹介します.

図 16 は Fe-Si-B アモルファス合金の磁化の温度依存性で

