

## 報告：「寺子屋 BM 塾」 2020 年後期講座 第 28 期 BM 初心者講座

理事兼寺子屋 BM 塾 塾長  
元・日立金属(株)  
徳永 雅亮

2020 年度前期（第 27 期）の寺子屋 BM 塾は新型コロナのために中止せざるを得ない状況に追い込まれた。新型コロナ対策として、第 28 期は Webex での開催に変更した。各論講義は開始時刻を 15:00 からとし、講義時間を 2 時間に短縮した。

2020 年度後期の BM 塾では、①「永久磁石の基礎」、②「永久磁石測定法 1」及び③「永久磁石測定方法 2」の 3 各論講義を取り上げた。これらは永久磁石に係る人々にとって基本が勉強できるテーマである。

### 第 1 講

2020 年 10 月 16 日（金）@ Webex

講義：各論講義「永久磁石の基礎」



yamamoto hitoshi

講師：山本 日登志（ネオジコンサル）

#### 概要：

- 1) 電気回路と磁気回路の類似性と差異、
- 2) パーミアンス法による磁気回路の設計、
- 3) 反磁場とその理解の重要性及びパーミアンス係数

受講生総数：72 名

記事：今回の山本先生による永久磁石関連の 3 回連続講義は「永久磁石と永久磁石測定方法の基礎」をわかりやすく説明することに主眼を置いて頂いた。なお、本講義の内容は山本先生の著作である「永久磁石の基礎と永久磁石測定方法」（ネオジコンサル社刊、2019）の内容をベースとしているので、参考にして頂きたい。

電磁現象は以下に示す Maxwell 方程式で記述される。表現方法は以下の微分又は積分形式が用いられる。

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad \text{又は} \quad \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, ds = 0 \quad (\mathbf{B} \text{ の式})$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = 0 \quad \text{又は} \quad \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (\mathbf{H} \text{ の式})$$

B の式は磁荷が存在せず、磁気モーメントの存在（磁荷の対）を反

映している。H の式は磁気回路では電流が存在せず、右辺がゼロとなる。

永久磁石の基本式は cgs 単位系で

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{J}^* \quad (\mathbf{J}^* = 4\pi\mathbf{M}) \quad \text{と表され、パーミアンス係数 } (P_e) \text{ は } P_e = \mathbf{B}/\mathbf{H} \text{ となる。}$$

ここで、B は磁束密度、H は磁界、M は磁化である。J\* は 4πM を表すが、MKS 単位系の磁気分極とは異なるので注意して頂きたい。本講演では磁気回路を扱うために表現と説明の簡便さが得られる cgs 単位系を用いる。磁石の評価は J-H カーブが、磁石応用では B-H カーブが便利である。磁石応用では磁石の発生する B を使うからであり、両カーブの相互変換は B=H+J の関係を使って行う。

磁石が空気中に存在すると、磁石から H（磁力線）が空気中に放出され、磁石に戻る。磁石及び空気の透磁率 (μ<sub>m</sub>) はほぼ 1 である。したがって、磁力線の通り易さは磁石の中でも、空気中でも同等であり、磁力線は空気中に容易に漏れる。一方、銅線の電気伝導度 (σ) は σ=5.6×10<sup>7</sup> (1/Ωm)、空気の電気伝導度はほぼゼロであるため、銅線中の電流は空気中には漏れない。このような「漏れる」という磁気性格から磁気特性の有効数字は 3 桁、測定精度 ± 1% になる。既に一部述べたが、電気には電荷が存在するが、磁気には磁荷が存在せず、磁荷の対（N 極と S 極のペアと言っても良い。）である磁気モーメントを用いて論理が構築されている。

磁気回路における磁束及び起磁力に注目し、磁束を電流に、起磁力を電圧に対応させて、磁気回路を等価的な電気回路に置換えて解析する方法が最も古典的で、最初に勉強する手法になっている。前掲の div B=0 は磁束密度の発散がゼロ、湧き出し量がゼロで、閉ループを形成し、連続であることを示している。鉄ヨークと磁石からなるギャップのある直列的な磁気回路では B について

$$B_m A_m = B_g A_g + \sum_e B_e A_e = \sigma B_g A_g$$

という近似式が導かれる。ここで、B<sub>m</sub>：ギャップの磁束密度、A<sub>m</sub>：磁石の断面積、B<sub>g</sub>：ギャップの磁束密度、A<sub>g</sub>：ギャップの断面積、B<sub>e</sub>：漏洩磁束密度、A<sub>e</sub>：漏洩磁路の断面積（Σは漏洩部の総和を表す。）、σ：漏れ係数である。漏れ係数 σ は磁石から出た総磁束 B<sub>m</sub> に対して、ギャップ空間外にどの程度磁束が漏れているかを示す係数である。σ は経験的に求められ、通常 σ=1.1 ~ 1.2 程度である。前掲の rot H=0 は磁気回路においては電流が存在しないことを意味している。H については以下の近似式が導かれる。

$$H_m L_m = B_g L_g + \int_e H_e L_e = f B_g L_g$$

ここで、H<sub>m</sub>：磁石内部の磁場、L<sub>m</sub>：磁石の長さ、B<sub>g</sub>：ギャップの磁束密度、L<sub>g</sub>：ギャップの長さ、H<sub>e</sub>：ギャップ以外の磁場の強さ、L<sub>e</sub>：ギャップ以外の磁場のかかっている部分の長さ、f：起磁力損失係数である。起磁力損失係数 f は磁石が発生する起磁力 (H<sub>m</sub>L<sub>m</sub>) から出た磁場 H<sub>m</sub> がギャップに到達する間に低下する磁場の量のようなものである。磁気回路の鉄ヨークや接着層による損失が生じ、この損失量を起磁力損失 f で定義する。経験的に f=1.1 ~ 1.3 が仮定される。以上で、B と H に関する Maxwell 方程式を磁気回路に適用して表現することができた。

磁気回路を考える際に必ず現れるパーミアンス (P) を見てみよう。パーミアンスは磁気抵抗の逆数であり、磁気回路解析において並列計算が適用でき、計算を簡単にすることができる。磁気回路の各部の P が定





## BM インフォメーション

クの下に来ると減磁が生じることにある。減磁は逆磁界に印加によっても生じる。これはJ-Hカーブを用いて算定できる。磁石単体の減磁量の実測はクロス・フィットコイルを用いて行われる。恒温槽内に磁石を設置し、クロス・フィットコイルを自動掃引して、各温度における磁束量を引き抜き法で測定する。減磁量と加熱温度の関係として得られる減磁量は上述の算定値や電磁解析シミュレーションで得られる値よりも大きい。その理由は電磁解析では磁石のバラツキや $H_k$ の評価が含まれていないためである。

次に着磁の問題を考えよう。Nd-Fe-B焼結磁石の初磁化曲線はよく知られているように急峻に立ち上がる。この部分は磁壁移動で説明されている。熱脱磁後の結晶粒内部に磁壁が存在し、磁場印加によって磁壁が移動して磁化が進行する。熱脱磁後はN極とS極を示す磁区が混在し、トータルとして外部に磁束密度を発生させない。磁壁移動とともにN極又はS極を示す磁区のみとなり、着磁が完了する。逆に、着磁後に140℃x2hの加熱を行うと、磁壁が存在する多磁区化した結晶粒が局所的に観察され、これが熱減磁の正体である。加熱による多磁区化は粒径の大きい結晶粒で観察される。従って、粗大粒の多いNd-Fe-B焼結磁石では保磁力、 $H_k$ ともに低下する。粗大結晶粒は基本的に磁気特性を低下させるため、その発生を阻止する製造プロセスが重要となる。磁区の見え方はc面とab面では異なり、c面ではメイズパターン、ab面では柱状のパターンが観察される。

着磁性は磁石の材質とその保磁力メカニズム、保磁力の絶対値、異方性が等方性か、によって様々に変化する。従って、飽和着磁するために必要な磁界強度を慎重に決定する必要がある。異方性磁石であっても、配向度の低い磁石は着磁性が悪い。必要があれば、実験的に決定することが求められる。不完全着磁の場合は得られる磁束密度が低下し、また、熱安定性にも悪影響を与える。

初磁化曲線に典型的にあらわれるように、保磁力のメカニズムによって着磁性は異なってくる。一般に、ニュークリエーション型に整理されるのはSmCo<sub>5</sub>系、Nd-Fe-B系焼結磁石であり、ピンニング型に整理されるのはSm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub>系焼結磁石である。

本各論講義では第1回目の講義の復習を含めて、基礎的に減磁カーブ、温度特性及び着磁特性を学んだ。これらテーマは相互に関連性があり、講義では、適宜スライドを再提示して頂き、理解しやすい様に工夫された。

### 第3講

2020年12月11日(金) @ Webex

講義：各論講義「永久磁石測定方法2」

講師：山本 日登志(ネオジコンサル)

概要：

- 1) 永久磁石国際規格(IEC国際規格)、
- 2) 直流BHトレーサ、パルスBHトレーサ、
- 3) VSM

受講者数：71名

記事：まず、第1回及び第2回の復習からスタートした。

- ①測定系は日常管理トレーサビリティで管理すること、
- ②開磁路磁気特性評価は漏れを前提として構築されていること、
- ③電気回路と磁気回路を比較し、その差を理解すること、

④パルスB-Hトレーサと直流B-Hトレーサの測定値の比較が改めて説明された。

Nd-Fe-B系粒界拡散磁石は表面にTbやDyの酸化物や合金を塗布、拡散した「次世代Nd-Fe-B系磁石」である。1例を示すと、粒界拡散前後の $B_r$ の低下は0.021 T(1.414 T→1.393 T)と小さいが、 $H_{cJ}$ の向上は0.79 MA/m(1.057 MA/m→1.847 MA/m)と非常に大きい。Dyを粒界拡散した磁石を切り刻んで、表面から内部に微小磁石をサンプリングして磁気測定すると、磁石表面からの深さに対して保磁力は低下してゆく。同時にDy含有量も低下してゆく。従って、粒界拡散磁石はDy、Tbの傾斜組成を有する「傾斜機能磁石」と言うことができる。しかも、DyやTbの粒界拡散が届いていない磁石内部の保磁力に相当する磁場を印加しても内部減磁は起こらない。拡散層の深さ方向の磁気特性の確認には粒界拡散磁石を加工によって微小試料を切出し、パルスB-Hトレーサで測定されるが、微小試料の測定には開磁路測定に起因する磁束の漏れを考慮した微小磁石専用のJコイルを設計する必要がある。

磁石測定法の国際規格はIEC/TC68が担当している。TC68は磁性材料及び磁気測定の国際規格を議論し、制定する技術委員会(TC: Technical Committee)である。なお、TC68には5つのWG(Working Group)があり、WG5が永久磁石関係を担当している。

グローバル化社会では永久磁石も国境を越えて取引される。磁石の磁気測定値が磁石生産国と磁石応用国で異なると、磁石ビジネスが回りにくい。このような場合は特性の異なる磁石を複数個相互に測定を行い、検量線による測定値の読み直しが行われる。磁石ユーザが磁気特性指定値を一定にして、複数の磁石メーカに磁石提供を依頼した場合、納入される磁気特性に差のある事は広く知られている。磁石ユーザと磁石メーカの検量線(特性の相関直線)を用いて、品質管理が行われることが多い。

永久磁石の磁気測定には

- ① 直流B-Hトレーサ
- ② VSM
- ③ パルスB-Hトレーサ

が用いられている。

試料のサイズ、印加磁界強度及び測定温度等によって使い分けられている。直流B-Hトレーサは最も基本的な測定系で、閉磁路を用い、渦電流補正と反磁界補正が不要である。ISO-9000トレーサビリティ体系が整備され、測定系としての管理も行い易い。測定用試料の寸法公差は、市販Nd-Fe-B磁石の最小保証寸法である $\pm 0.03\text{mm}$ を用い、直流B-HトレーサとパルスB-Hトレーサでは問題は生じない。しかし、パルスB-Hトレーサの標準外寸法とVSMでは $\pm 0.01\text{mm}$ の公差を用いる必要がある。なお、パルスB-Hトレーサの標準寸法は $7 \times 7(\text{mm}^3)$ である。

標準寸法を有する磁石のパルスB-Hトレーサの測定値を直流B-Hトレーサとの比較でみると、 $H_{cJ}$ の測定値は直流B-Hトレーサの測定値よりも高くなる傾向がある。これは渦電流の影響と考えられ、磁石の寸法、材質及びパルスの周波数によって変化する。パルスB-Hトレーサによる磁気測定は開磁路測定なので、反磁界補正が必要になるが、試料形状が回転楕円体でないために、 $P_c$ が試料内部で分布を持つという点も注意が必要である。両測定法による減磁カーブの完全な一致はない。

パルス  $B-H$  トレーサには 200℃までの温度調節機能も付加されており、磁石の温度特性評価にも使用できる。パルス  $B-H$  トレーサは生産現場管理に広く使用されており、その際、直流  $B-H$  トレーサとの検量線による特性値の読み替えが行われている。

最近の Nd-Fe-B 焼結磁石の磁気特性が向上し、応用される磁石の厚みは薄くなってきている。このような薄い磁石の磁気特性の評価が必要な場合は、薄い磁石を積層して測定することになる。厚み 1、1.75、2.34、3.5、7 mm の磁石をそれぞれ、7、4、3、2、1 枚積層し、7 mm 立方体試料を作製し、磁気測定を行った。磁石厚みの低下とともに総ての磁気特性は低下する。特に  $H_k$  90 の低下が大きい。厚みの薄い磁石ほど加工劣化の影響が大きいからである。同様に 7 mm 立方体と 1.3 mm 立方体を比較しても加工劣化は微小磁石ほど大きく表れる。

一般にパルス  $B-H$  トレーサでは用いるパルス周波数や試料の電気抵抗によって渦電流効果に変化する。電気抵抗の異なる  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  磁石の測定では Nd-Fe-B 系磁石とは異なる渦電流補正が必要となる。

次に VSM (Vibrating Sample Magnetometer) を説明する。名称の通り、試料を一定の振動数及び一定の振幅で振動させ、電磁誘導によって磁化検出コイルに誘導電流が流れる。この誘導電流を積分して試料の磁化を測定する。その特徴は①感度が非常に高い、②常磁性、反磁性の測定が可能、③液体窒素温度から 900℃までの連続測定が可能、④磁場中加熱、冷却を行うことができるという 4 点がある。試料は磁気双極子近似可能なサイズとし、測定された磁化 ( $\sigma$ ) から以下の式によって磁気分極が得られる。

$$M = \sigma \rho / m, \quad J = 4\pi M$$

ここで、 $\sigma$  (emu): VSM で測定した磁化、 $m$  (g): 試料重量、 $\rho$  (g/cm<sup>3</sup>): 試料密度、 $M$  (emu/cm<sup>3</sup>): 磁化、 $J$  (gauss): 磁気分極である。単位は cgs である。粉末の磁気特性の測定ができるのが特徴で、試料粉末をパラフィンで「磁場配向」すれば、異方性磁場 ( $H_A$ ) の測定ができる。

以下は VSM による測定例である。加工劣化の少ない Nd-Fe-B 系焼結磁石を用いて、 $2 \times 2 \times t$  ( $t=1.0, 0.5, 0.3, 0.1\text{mm}$ ) 寸法の測定がされている。 $2 \times 2 \times 0.1(\text{mm}^3)$  の MEMS 応用の微小磁石では 213 kJ/m<sup>3</sup> の  $(BH)_{\text{max}}$  が得られている。SUS-304 の加工誘起マルテンサイト変態歪を透磁率によって評価されている。厚さ 17.3  $\mu\text{m}$  の PLD 法による Nd-Fe-B 系厚膜磁石の磁気特性も評価できる。キュリー点測定は VSM の最も得意な測定分野である。

VSM 測定における磁化の校正の基本は試料形状と同一形状の Ni を用いることにある。代表的な Ni の飽和磁化値は① 1989 年理科年表による 6074.1 G、② JIS C 2501(2019) 記載の 6102 G がある。最近の NIST の Ni 標準サンプルでは Ni の磁化を印加磁界と温度の関数で示し、5 kOe の印加磁界における磁化を校正に用いることを推奨している。VSM による磁気測定値は Ni 標準試料による校正方法によって変化することに注意する必要がある。

山本先生が勤務されていた KRI に依頼できることは磁石の精密加工、トレーサピリティー用磁石の提供、粒界拡散磁石の切出しサンプルによる評価等を含め非常に間口が広い。磁石関連で問題があれば、KRI にご相談されることをリコメンドしたい。

## 2021 年前期講座予定

第 29 期 BM 塾では、「磁気応用」を取り上げる。

### 第 1 講

2021 年 5 月 28 日 (金) @ Webex

講義: 各論「回転機」

講師: 中村 健二 (東北大学 教授)

### 第 2 講

2021 年 6 月 17 日 (木) @ Webex

講義: 各論「静止器」

講師: 中村 健二 (東北大学 教授)

### 第 3 講

2020 年 7 月 16 日 (金) @ Webex

講義: 各論「解析技術」

講師: 中村 健二 (東北大学 教授)

以上