

報告：2021 後期寺子屋 BM 塾 第 30 期 BM 講座

寺子屋 BM 塾長
元・日立金属(株)
徳永 雅亮

2021 年度後期の BM 塾では、①「磁性材料の基礎」、②「軟磁性材料」及び③「硬磁性材料」の 3 各論講義を「やさしい磁性材料」として取り上げた。講師には元三菱製鋼の福田方勝様に全 3 回の連続講義をお願いした。できるだけ「やさしい磁性材料」を目指して頂き、磁性材料の初心者である大学の学部学生、企業の営業職及び磁性材料を初めて研究する方々にも理解可能な内容に絞って頂いた。福田様は三菱製鋼(株)在職時には各種磁性材料の開発に携わってこられ、特殊鋼倶楽部から定期刊行されている「特殊鋼」に磁性材料の基礎に関する多くの寄稿をされておられたことを付記しておく。

第 1 講

2021 年 9 月 10 日(金)@ Zoom

講義：各論講義「磁性材料の基礎」



講師：福田 方勝(元 三菱製鋼(株))

概要：磁性材料を理解するための基礎知識についてやさしく解説する。磁気を表す用語の意味、磁気の単位、磁化曲線の見方、磁気特性の見方、磁性材料の分類、磁性材料と電流との関係など。

受講生総数：73 名

記事：磁性材料と言えば永久磁石が最も身近で、誰もが知る種の経験を持っている。さらに、磁性材料は身の回りに存在する多くの AV 製品、家電製品、OA 機器や自動車に使用されている。磁性材料は永久磁石に吸引され、吸着される材料であり、磁場に対して何等かの反応を示す。磁性材料は「構造材料に比べて分かりにくい。」と言われる理由は、

- ① 磁気の教育が不十分、
- ② 単位系が多く、それらが併用されている、
- ③ 用いられる用語に馴染みが薄い、
- ④ 磁気の根源的な性質を説明しにくい(磁性は本質的に量子現象である。)等が考えられる。

小学 3 年生から中学 2 年生の学習指導要領においても、磁石に関する内容は電気と比較して、磁石間の吸引・反発、鉄心の磁化、電流と

磁界の関係が散見される程度であり、非常に散発的な内容で系統的な教育になっていない。

磁性材料は磁心に用いられる軟質磁性材料と永久磁石である硬質磁性材料に大別される。釘を加熱し、焼入れすれば、永久磁石化し、釘の硬度も高い。これが硬質磁性材料と呼ばれる所以である。一方、釘を加熱し、焼鈍すれば、釘の硬度は低く、軟磁性材料になる。現在では機械的硬度を用いて、磁性材料の硬質と軟質を分類することはない。

周期律表には多くの元素が存在し、金属元素は bcc (体心立方晶)、fcc (面心立方晶)、hcp (六方稠密晶) なる 3 種の結晶構造を示す。原子は原子核と電子からなり、原子核の周りに K 殻、L 殻…Q 殻が存在し、各殻に s、p、d…h の電子軌道が存在する。各元素は決められた電子軌道を占有する電子を持つ。電子は原子核の周りに存在し、軌道運動による磁気モーメントとスピンによる磁気モーメントを持つ。軌道運動による磁気モーメントは多くの場合、打ち消しあい、スピンによる磁気モーメントを原子は示すことになる。一例として Fe の電子軌道を考えてみよう。Fe は K 殻に 1s 電子 2 個、L 殻に 2s 電子 2 個及び 2p 電子 6 個、M 殻に 3s 電子 2 個、3p 電子 6 個及び 3d 電子 6 個、N 殻に 4s 電子 2 個を有する。M 殻の 3d 電子以外は閉殻になっているため、Fe の磁気モーメントに寄与するのは M 殻の 3d 電子 6 個である。6 個の 3d 電子は磁気量子数 (m_l) が -2、-1、0、1、2 の 5 つスピン配置に入る。 $m_l = 2$ の軌道にはアップスピンとダウンスピンがペアで入っているため、磁気モーメントには $m_l = -2 \sim 1$ に配置されている 4 個の電子が寄与する。上述は孤立した Fe 原子や Fe イオンの磁気モーメントに対する考え方である。

原子が結晶を構成した場合の磁気モーメントは原子間に働く量子力学的な力である交換相互作用を導入する必要がある。交換相互作用によって磁気モーメントが同一方向に揃った方が安定になる金属 (Fe、Co、Ni) と、逆向きに揃った方が安定になる金属 (Cr、Mn) がある。なお、交換相互作用よりも熱エネルギーが大きければ、磁気モーメントの向きはバラバラとなる。

磁性を分類すると、

- ① 強磁性 (各原子の磁気モーメントが同一方向に揃い、全体として自発磁化を持つ)、
- ② フェリ磁性 (隣合う原子の磁気モーメントは互いに逆方向を向くが、その大きさが異なるため、全体として磁気モーメントを持つ)、
- ③ 反強磁性 (隣合う原子の磁気モーメントは互いに逆方向を向き、全体として磁気モーメントを持たない)、
- ④ 常磁性 (各原子の磁気モーメントはバラバラな方向を向き、全体として磁気モーメントを持たない) 及び
- ⑤ 反磁性 (磁性原子を含まない場合に現れる非常に弱い磁性) の 5 つになる。

①、②及び③は強磁性に分類される。強磁性体の磁気モーメントの温度変化を見ると、キュリー温度 (T_c) において磁気モーメントがバラバラになり、 T_c 以上の温度では常磁性を示す。

強磁性体が磁場によって磁化する過程を見てみよう。以下は軟磁性材料の場合である。磁場 $H = 0$ の状態では磁気モーメントの揃った磁区に分割され、全体としての磁化はゼロである。磁場を印加し、増加させると、各磁区の磁気モーメントは外部磁場の方向に向き、全体として磁化を持つ。この過程で磁区の境目である磁壁が移動し、磁区が変化する。再度、外部磁場をゼロにすると各磁区の磁気モーメントはバラバラとなり、全体と

しての磁化もゼロとなる。

単位系について復習しておこう。過去及び現在において主として使用されている磁気の単位系は① SI、② cgs 及び ③ MKSA の 3 種であるが、① SI が主流になりつつある。SI 単位系の基本単位は長さ (m)、質量 (kg)、時間 (s)、電流 (A)、温度 (K)、物質質量 (mol) 及び光度 (cd) である。MKSA 単位系は長さから電流までの基本単位は同じである。cgs 単位系では長さ (cm)、質量 (g)、時間 (s) 及び電流 (emu/ 電流の電磁単位) である。SI 単位系を基礎として、SI 組立単位が存在する。例えば、周波数 (s^{-1})、力 ($kg \cdot m/s^2$)、エネルギー ($kg \cdot m^2/s^2$)、電気量 ($A \cdot s$) 等がある。10 のべき乗を表す接頭語も決められている。k (10^3)、M (10^6)、m (10^{-3})、n (10^{-9}) 等がある。単位系は機会のある毎に換算表を利用して、確認して表示されている量を自分のものとする必要がある。

磁性材料で用いる物理量は磁場の強さ (H)、磁束密度 (B) 磁性体の磁化の強さ (M 又は I 、 J : 磁気分極) がある。磁場の単位系は cgs 系ではクーロンの法則から $H (Oe) = m/r^2$ [m は磁荷 (emu)、 r は磁荷間の距離]、MKSA 系ではアンペールの法則から $H (A/m) = I/(2\pi r)$ (I : 電流、 r : 円電流の半径) とそれぞれ決定される。磁束密度は磁束が磁石の N 極から出て、S 極へ入るイメージで、概略磁力線と同等である。鉄粉を使って可視化も可能である。磁束を単位面積で除したものが磁束密度になる。cgs 系では $G (= Mx/cm^2)$ 、MKSA では $T (= Wb/m^2)$ が磁束密度の単位である。空間における磁場の強さと磁束密度の関係は単位系で異なり、cgs 系では $B = H$ 、MKSA 系では $B = \mu_0 H$ となる。 μ_0 は真空の透磁率 $4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m) である。磁性体の磁化は M (I が使用される場合もある) 又は磁気分極 J と表現される。磁化も磁気分極も単位体積当たりの磁気モーメントである。

磁性体中の磁束密度は磁場と磁化 (磁気分極) の和になる。

これを

- ① cgs 単位系で $B = H + 4\pi M$ 、
- ② MKSA 系で $B = \mu_0 H + J$ 、
- ③ SI 系で $B = \mu_0 (H + M)$

と表現する。これを電気と磁気の対応から見ると、②は $E-H$ 対応 MKSA であり、③は $E-B$ 対応 MKSA である。cgs 系と MKSA 系の単位換算方法を手元において、常に換算できることが望ましい。

磁化曲線は $M-H$ 曲線または $B-H$ 曲線として表現される。両者の変換は $B = \mu_0 (H + M)$ の関係を用いて行う。 $J-H$ 曲線と $B-H$ 曲線の間では $B = \mu_0 H + J$ の関係がある。磁化曲線測定から得られる磁気特性には飽和磁化 ($\mu_0 M_s = J_s$)、残留磁化 ($\mu_0 M_r = J_r$)、保磁力 (固有保磁力 : H_{cJ} と保磁力 : H_{cB}) がある。なお、固有保磁力の大きい材料を磁氣的に硬い硬質磁性材料 (永久磁石) という。逆に保磁力の小さい材料を磁氣的に軟らかい軟質磁性材料という。軟質磁性材料と硬質磁性材料の境界は明確ではないが、概略 800 A/m (10 Oe) 以下を軟質磁性材料と言うことが多い。

空間に置かれた磁化 M を有する磁性体内部には反磁界 (H_d) が発生する。磁石外部では N 極から S 極に磁束線が発生し、磁石内部には磁化と反対方向に自己減磁界である反磁界 (H_d) が発生する。反磁界は磁石形状に依存する反磁界係数 N (N_x 、 N_y 、 N_z) で決定される。なお、 $N_x + N_y + N_z = 1$ の関係がある。 H_d は cgs 単位系では $H_d = 4\pi NM$ 、MKSA 単位系では $H_d = NM/\mu_0$ となる。なお、磁石内

部の有効磁界 (H_{eff}) は外部磁界 (H_{ext}) から反磁界分を差し引いた $H_{eff} = H_{ext} - H_d$ である。

軟磁性材料を理解するための基礎知識を見てみよう。 $B = \mu_0 H + J$ の関係から J が飽和しても、 B は飽和しないので、飽和磁束密度 (B_s) は定義できない。習慣上、例えば磁場 8000 A/m の磁束密度を B_s と表現することが多い。ヒステリシス損 (P_h) は磁気履歴曲線で囲まれた面積で、軟磁性材料の交流での使用において重要である。

透磁率 (μ) は初磁化曲線上の点と原点を結ぶ直線の傾き (B/H) で、最大透磁率 (μ_m)、初透磁率 (μ_i)、微分透磁率等がある。 μ の単位は cgs 単位系では無次元、MKSA 単位系では H/m である。比透磁率 (μ_r) は透磁率を μ_0 で割ったもので、cgs 系及び MKSA 系共に無次元量になる。交流の透磁率は複素透磁率で、実数部 (μ') と虚数部 (μ'') があり、 μ' は大きい方が、 μ'' は小さい方が軟磁性材料としては良い。軟磁性材料の交流磁界における透磁率は $\mu = \mu' + j\mu''$ と表す。 j は $j^2 = -1$ で虚数単位である。虚数部と実数部の比は $\mu''/\mu' = \tan \delta$ と表し、 δ は H に対する B の遅れを表す。交流電流に直流電流を重ねた場合 (直流重畳、DC バイアス) では透磁率が低下する。コアロス (P_c) はヒステリシス損失 (P_h) と渦電流損失 (P_d) の和である ($P_c = P_h + P_d$)。コアロスの単位は cgs 系で erg/cm^3 、MKSA 系で J/m^3 である。鉄損 (W) は kg 当たりの仕事率で表し、MKSA 系で W/kg の単位を持つ (W は $V \times A$ を意味する単位ワットである)。

硬質磁性材料を理解するための基礎知識を見てみよう。 $M-H$ 曲線第一象限で飽和磁化 (M_s) と残留磁化 (M_r) から配向度 $\alpha = M_r/M_s$ [無次元] が定義される。 $B-H$ 曲線や $M-H$ 曲線の第二象限を減磁曲線と呼び、 $B_r = \mu_0 M_r$ 、 H_{cB} 、 H_{cJ} 及び $(BH)_{max}$ を決定する。 $(BH)_{max}$ は減磁曲線上の各点で定義される $B \times H$ を計算し、その最大値を指す。 $(BH)_{max}$ の単位は cgs 系で $MGOe$ 、MKSA 系で kJ/m^3 である。減磁曲線上の動作点における B_d と H_d から、パーミアンス係数 (P_c) が $P_c = B_d/H_d$ で求められる。単位は cgs 系、MKSA 系共に無次元である。硬質磁性材料の磁気特性は温度変化を持つ。 B_r 及び H_{cJ} の温度変化の程度を温度係数によって表現する。 $\alpha(B_r)$ 及び $\alpha(H_{cJ})$ で表し、単位は %/K である。温度範囲は常温と 100°C が使用されることが多いが、高温側は任意に選択し、明示して使用することが可能である。

磁性材料の応用を理解するための基礎を見てみよう。直線電流が作る磁場は右ネジの法則により、直線電流の流れる方向に対して右周りに磁界が発生する。コイルについては右手親指の法則により右手親指以外の指が電流方向の場合、親指の方向に磁界が発生する。親指の方向が N 極で、その反対方向が S 極になる。磁場中で移動する銅線に流れる電流はフレミングの右手の法則に従う。親指が銅線の移動方向、人差し指は磁力線の方向、中指が電流の方向である。磁場中の電流が受ける力はフレミングの左手の法則に従う。

電磁誘導はレンツの法則に従う。コイルを通過する磁力線が増加 (減少) するとき、その磁力線と反対方向 (同じ方向) に磁力線が発生するように電流が流れる。ファラデーの電磁誘導の法則は「誘導電圧又は誘導電流は磁力線の変化する割合に比例する」と表現される。式で表すと、 $V = -Nd\phi/dt$ となり、マイナスが付くのは磁力線の変化を妨げる方向に電圧が発生するからである。

福田先生の講義内容は磁性材料の基礎を詳細に纏めたものであった。受講生は講義資料を座右に置き、疑問がある場合はすぐに見直して

欲しい。9. まとめの部分は整理されており、利用し易い。繰り返し学習して、磁性材料の基礎を身につけ、更に進歩する努力を期待したい。

第 2 講

2021 年 6 月 17 日(金)@ Zoom

講義：各論講義「軟磁性材料」

講師：福田 方勝(元 三菱製鋼株)

概要：軟磁性材料を理解するための基礎知識についてやさしく解説する。軟磁性材料の歴史、種類と特徴、必要な磁気特性、製造方法、軟磁性材料の応用、今後の展望など。

受講者数：62 名

記事：軟磁性材料は硬質磁性材料と比較して応用に当たって考慮すべき磁気特性が多い。具体的には透磁率とコアロスであり、その周波数依存性が重要である。

軟磁性材料は種類が多く、その特性を生かす応用分野も広範に分布する。主な材料は珪素鋼板（1900 年）、パーマロイ（1916 年）、パーメンダー（1929 年）、センダスト（1932 年）、Mn-Zn フェライト（1941 年）、アモルファス（1974 年）及びナノ結晶材（1988 年）が挙げられる。これら軟磁性材料はそれぞれの応用に必要な組成と形態（薄板、薄片、バルク、圧粉）を用いて多くの応用に供される。

軟磁性材料の磁気特性は飽和磁束密度 (B_s)、透磁率 (μ)、比透磁率 (μ_r)、反磁界 (H_d)、反磁界係数 (N)、電流が作る磁場（直線電流→右ねじの法則、コイル→右手親指の法則）、電磁誘導（ファラデーの法則）があり、これらを総合的に考える。交流で使用される軟磁性材料では複素透磁率（実数部： μ' 、虚数部： μ'' 、周波数特性、直流重畳特性）、コアロス (P_c 、ヒステリシス損： P_h 、渦電流損： P_e)、表皮効果（表皮深さ / スキンデプス： s ）を考える。軟磁性材料の材料組成を検討するための物性は飽和磁化 (M_s)、結晶磁気異方性 (K)、磁気歪み (λ)、比抵抗 (ρ) がある。

直流重畳（DC バイアス）とは交流に直流磁場（電流）を重ねたときの状態で、透磁率あるいはインダクタンスが変化する。（インダクタンスは透磁率の 1 次関数である。）軟磁性体コアの直流重畳特性を良くするためには磁束密度が飽和する磁界を大きくする、すなわち、飽和磁界の大きい材料とする。軟磁性材料の特性としては飽和磁束密度を大きくし、初磁化曲線の直線部分を伸ばすことが必要で、その結果透磁率は低下する。透磁率が低くても、磁束密度の飽和までが直線的なヒステリシス曲線が有利である。ヒステリシス曲線を傾けるために、磁気回路的にギャップを挿入して反磁界を与える。これがカットコアである。また、圧粉磁心を用いて磁粉に働く反磁場を利用する場合もある。これらの手法によって、バイアス磁界の広い範囲で透磁率の変化の少ないコイルが作製される。

交流で使用される軟磁性材料のコアロス (P_c) を詳しく見てみよう。コアロスは交流磁界中で消費する単位体積当たりのエネルギーで、 J/m^3 の単位で表す。電磁鋼板の場合は W の記号を用いて単位質量あたりの仕事率 $W/kg [= J/(s \cdot kg)]$ で表す。コアロス (P_c) はヒステリシス損 (P_h)、渦電流損 (P_e) 及び残留損失 (P_r) からなる ($P_c = P_h + P_e + P_r$)。残留損失は金属材料の場合は交流周波数によらず、一定値で一般に小さい。フェライトの場合は交流周波数依存性があり、高周波領域で大きくなる。

鉄損の表し方の一例である W_{1750} は $B_m = 1.7T$ 、 $f = 50Hz$ の時の鉄損を表す。表示法が混乱しているので、注意する必要がある。ヒステ

リシス損 P_h は磁歴曲線に囲まれた面積に相当するエネルギーの消費である。履歴曲線は交流の周波数に依存し、一般に直流の履歴曲線の内側に入る。 P_h を小さくするためには①透磁率を上げ、②履歴曲線の幅を小さくすることが重要である。渦電流損 P_e は交流磁場の電磁誘導により材料中に流れる電流（渦電流）によるエネルギー消費である。誘導円電流は B を打ち消すように B と垂直に流れる。 P_e は $P_e = \pi^2 d^2 B^2 f^n / (C\rho)$ で表される。ここで、 d ：材料の代表長さ（厚さ、粒径）、 B ：動作する磁束密度、 f ：動作周波数 ($n \approx 2$)、 C ：材料の形状による係数、 ρ ：比抵抗である。

P_e を小さくするためには、

- ① 比抵抗を大きくする、
- ② 材料の代表的長さ d を小さくする（電磁鋼板では厚さを薄くし、圧粉磁心では粒径を小さくする）、
- ③ 渦電流の通路を遮断する（電磁鋼板の絶縁膜、圧粉磁心の粉末絶縁）がある。

表皮効果は交流磁場が誘導電流により磁性材料の内部で減少する現象である。表皮深さ (s ：Skin Depth) は交流磁場の大きさが約 1/3 に減衰する深さを指し、 $s = [2\rho/(2\pi f\mu)]^{1/2}$ で表される。ここで、 f ：周波数、 ρ ：比抵抗、 μ ：透磁率である。

結晶磁気異方性は結晶の方向によって磁化のされ方が異なる現象で、磁化の方向に依存して材料の磁化エネルギーが異なることに起因する。磁化され易い方向は物質によって異なり、Fe では [100] 方向、Ni では [111] 方向、Co では c 軸方向になる。結晶磁気異方性係数 K は異方性エネルギーを $\sin^2\theta$ の関数として表した際の係数である。なお、 θ は一軸異方性の場合の磁化と c 軸のなす角度である。軟磁性材料の場合は K の絶対値は小さい方が良い。

次は磁気歪みである。磁性体を磁化したとき磁性体の外形が変化する現象で、 $\Delta l/l$ で表す。ここで、 l は磁場印加方向の長さ、 Δl は長さの変化である。符号は伸びる場合はプラス、縮む場合はマイナスである。金属の熱膨張係数と同程度で、軟磁性材料の特性に影響を及ぼす。磁歪によって弾性エネルギーが増加するが、その大きさを表す際の係数を磁歪係数 (λ) と呼ぶ。立方晶結晶では結晶方位によって値が異なるため、 λ_{100} 、 λ_{111} 等と表し、多結晶では λ_s と表す。一般に磁気弾性エネルギー $\lambda^2 Y$ (Y ：ヤング率) のオーダーは異方性定数 K と比較して小さいが、 $K \approx 0$ の場合は影響が現れるので、勘案されなければならない。

軟磁性材料の組成検討は材料の特性改善や新材料開発の際、必要不可欠である。Fe に種々の合金元素を添加・置換した場合、結晶磁気異方性、磁歪定数や電気抵抗が変化する。これら変化の様子を理解しておく、軟磁性材料の特性の起源を理解して、材料開発の際に役立てることができる。例えば、Si について言えば、結晶磁気異方性と磁歪定数を下げ、電気抵抗を上げる。これら物性の変化が電磁鋼板 (Fe-Si) の磁気特性を発揮させている。代表的な軟磁性材料の組成において各元素がどのような役割を果たしているのかは、各論で勉強して欲しい。

純鉄は最も基本的な軟磁性材料である。不純物である C、S、P、Mn、O 及び N の低減による高純度化と結晶粒の粗大化が特性を向上させた。プロセス的には微量 Si の添加による C の溶解度低減、真空空解による脱ガス及び水素焼鈍等が特性向上に寄与している。電磁石のヨーク、磁気シールド等に用いられる。

電磁鋼板は軟磁性材料の中でも、歴史が長く、量的に最も多く使用されている工業材料である。Fe-3wt%Siは無方向性及び方向性電磁鋼板の両方で使用されている。方向性電磁鋼板は結晶粒を磁化容易方向である[100]方向を圧延方向に、[110]方向を圧延方向と直角に制御した材質である。電磁鋼板の更なる技術的進展はレーザ処理材、磁区幅制御材、Fe-6.5wt%Si材等に見られる。磁区制御材は磁区幅を狭くすることによって磁壁の移動距離を小さくしたもので、本移動距離の低減によって渦電流損失を低減している。

Fe-6.5wt%Siは圧延されたFe-3wt%SiにSiCl₃を用いて浸珪法(CVD)で作製される組成と機能に傾斜を有する電磁鋼板である。高周波領域のコアロスが小さいのが特徴である。

方向性電磁鋼板の主な用途はトランス、無方向性はモータコアである。方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板の生産量比率はほぼ1:5と言われ、2020年それぞれ18万トン、91万トンが国内で生産されている。

その他の軟磁性材料を見てみよう。センダストはFe-Si-Al 3元系で、高透磁率がFe-9.6wt%Si-5.4wt%Al組成で得られた。センダストは同材が粉末において高機能を発現するので、仙台のダスト(dust)と命名された。高性能の得られるのは飽和磁気歪 $\lambda_s=0$ と異方性定数 $K=0$ の双方が実現できる組成で、透磁率は非常に急峻な増加を示す。パーマロイはNi-Fe系の高透磁率合金であり、Mo、Cu、Cr、Mn等の添加物によって非常に多くの材質が開発されている。高透磁率を得るために、磁歪と結晶磁気異方性を小さくする熱処理が重要である。JISにおいてパーマロイはPB、PC、PD及びPEの4材質に分類され、それぞれの特性を利用した多様な応用に供されている。パーメンダーはFe-Co2元系合金で、所謂スレーター・ポーリング曲線で示される高飽和磁化を狙ったFe-50wt%Co組成で、加工性改善のために通常2wt%のVが添加される。アモルファスはアモルファス形成能のあるSi及びBを構成元素として有するFe基及びCo基の材質で、超急冷技術によって15~25 μ m厚の薄帯状に製造される。ナノ結晶材はCu及びNbを合金元素として有し、Cuリッチ合金が初期微結晶(クラスター)になり、結晶化の核となる。結晶化によってbcc Fe-Siを生成し、Nb、Bに富むアモルファス相とfcc Cuが共存する。軟磁性ソフトフェライトはスピネル型のMO \cdot Fe₂O₃(M=Mn、Zn及びNi)であり、Mn-Zn系とNi-Zn系の2種がある。Ni-Zn系の方がより高周波領域に用いられる。金属系軟磁性材料よりも電気抵抗が高いため、高周波でコイル、トランス、電源その他に応用される。

圧粉磁心は軟磁性フェライトよりも高 B_s の要求される高周波用途に用いられる。磁粉はセンダスト、純鉄、Fe-Si等多種が用いられており、磁心として高磁束密度、大きなインダクタンス、小さなコアロスが必要とされるインダクタ、リアクトル、モータコア等の多くの用途に使用されている。高い磁束密度の圧粉磁心を得るためには

- ① 飽和磁化 M_s の高い粉末を用いる、
- ② 粉末の充填率を上げる、
- ③ 透磁率を上げる、
- ④ 粉末の粒径をスキンドeps(s)よりも小さくするの4点が重要である。一方、大きなインダクタンスを得るためにはコアの透磁率が高いことが必要で、粉末の透磁率を大きくし、粉末の充填率を上げる必要がある。インダクタの構造からは

- ① 巻き数 n を大きく、

- ② 断面積を大きく、
- ③ 磁路長を短くすることが重要である。

軟磁性材料は非常に多くの用途に使用され、必要とされる磁気特性も多岐にわたる。工業的に用いられている材質も多く、きめ細かな各種応用への材料選択が行われる。福田先生に軟磁性材料の基礎を平易にヌケなく講義して頂いた。塾生は本講義をベースに軟磁性材料の磁気特性と応用の対応をより深く理解する努力をして欲しい。

第3講

2021年11月19日(金)@ Zoom

講義：各論講義「硬磁性材料」

講師：福田 方勝(元 三菱製鋼株)

概要：硬磁性材料(永久磁石)を理解するための基礎知識についてやさしく解説する。永久磁石の歴史、種類と特徴、必要な磁気特性、製造方法、永久磁石の応用、今後の展望など。

受講者数：77名

記事：磁石の起源は中国慈州の磁鉄鉱にあって、慈州が磁州に変化したことに伴い、慈石が磁石になったという説がある。また、ギリシャ、エーゲ海のマグネシア地方のひきつける石であるmagnesがmagnetの起源とする説もある。1600年出版のW. Gilbert著の「磁石論」は磁石の性質の一部を記述した最古の書物であり、永久磁石が古くから学問の対象となっていたことが理解できる。

永久磁石にはすべての方向で磁気特性が等しい等方性と特定の方向で磁気特性が優れる異方性がある。異方性化は材料の結晶を材料の磁化容易方向に揃える配向によって実現できる。配向の手法は材料によって異なり、磁場中熱処理(鑄造磁石)、熱処理後の圧延加工(圧延磁石)、熱間塑性加工(熱間加工磁石)、磁場中成形(焼結磁石、ボンド磁石)等がある。

永久磁石の各論に移ろう。

- ① 焼入れ硬化磁石
炭素を含むオーステナイト高温相(fcc)を焼入れて、マルテンサイト(bct)化することによって保磁力を発生させる。マルテンサイト化によって生じる内部応力と磁気歪との弾性エネルギー分布による保磁力を得るためには焼入れ性を良くし、Feの磁歪定数を増加させる添加物が必要である。最も有名な材質はKS鋼と呼ばれ、C 0.9wt%、Co 35wt%を含む。
- ② 析出硬化型
析出硬化を利用した永久磁石はMK鋼、新KS鋼、Vicalloy、AlNiCo、FeCrCoと多くの種類がある。AlNiCoの鋼種は等方性で2、3、4、異方性で5、6、8がある。熱処理方法は溶体化処理、磁場中時効処理及び時効処理からなる。溶体化は1200~1300 $^{\circ}$ Cで α 単相化を行う。磁場中冷却法は900~800 $^{\circ}$ Cの間を0.1~2 $^{\circ}$ C/sの速度で冷却する方法で、AlNiCo-5系磁石に用いられる。恒温磁場中熱処理は800 $^{\circ}$ C付近で10分程度保持する方法で、AlNiCo-8系磁石に用いられる。時効処理は625~650 $^{\circ}$ Cで保持した後、550 $^{\circ}$ Cで保持する2段タイプである。AlNiCoの高性能化は結晶の方位を[100]方向に揃えることによって実現されている。方位を揃える手段としては柱状晶化、帯溶解及

び単結晶化がある。工業的には casting の際に冷やし金を用いる柱状結晶化が用いられている。

FeCrCo 磁石は東北大グループによってスピノーダル分解に基づいて発明された圧延磁石として注目された。1977 年の Co 価格高騰時に casting 磁石化と低 Co 化が進行し、10wt%Co 組成で $(BH)_{max} = 6.75$ MGOe を実現した。本特性により、フェライト化が進むスピーカ用磁石において金属磁石としての地位を維持した。

希土類を除く金属間化合物磁石として PtCo 磁石、PtFe 磁石があり、Pt の人体への親和性によって、特殊な用途に用いられている。MnAl も熱間押出加工によって異方性化が可能であるが、現状の用途は少ない。

③ 結晶磁気異方性を利用した磁石

希土類磁石は歴史的な順で見ると、① SmCo₅、② Sm₂Co₁₇、③ NdFeB、④ Sm₂Fe₁₇N₃ が開発・工業化されている。

SmCo₅ は第 1 世代の希土類磁石で、K. J. Strnat が開発したが、現状では淘汰されている。SmCo₅ は高い結晶磁気異方性を示し、当時の Poor なプロセスによっても高磁気特性を得ることができた。更なる高エネルギー積を狙って **Sm₂Co₁₇** が研究されたが、結晶磁気異方性が低く、工業化可能な磁気特性が得られなかった。E. A. Nesbitt の SmCo₅ に対する Cu 置換効果の研究から、析出硬化型 Sm(Co, Fe, Cu, Zr)₂ 系焼結磁石が開発された。本材質は現在でも高 Fe 化組成による高性能化研究が継続されている。

NdFeB 磁石は佐川真人が焼結磁石を、J. J. Croat が超急冷によるボンド磁石用磁粉を 1983 年に開発し、現状の主要永久磁石となった。本材が工業材料として成長するための重要なプロセスとして、① ストリップキャスト、② HD (水素解砕: Hydrogen Decrepitation)、③ 低酸素プロセス、④ 粒界拡散が開発されている。磁気特性の高性能化は 1983 年 $(BH)_{max} = 288$ kJ/m³ から 2005 年 $(BH)_{max} = 474$ kJ/m³ まで進展した。超急冷を用いて作製されるボンド磁石用磁粉は MQ パウダーと呼ばれ、NdFeB 熱間加工磁石の原料としても使用される。本製造法による磁粉は現在も特許許諾せず、一社 (Neo Performance Materials) による生産・販売が継続している。NdFeB 熱間加工磁石は MQ パウダーを圧密し、熱間で後方押出やダイアップセットによって異方性化する。後方押出では放射状異方性リング磁石が得られる。異方性ボンド磁石磁粉は HDDR 法と呼ばれる分解・再結晶を利用した方法で製造される。

HDDR は Hydrogenation (水素化)、Decomposition (相分解)、Desorption (脱水素化)、Recombination (相の再結合) を意味する。要は加熱と水素圧を制御して NdFeB の HDDR 反応による結晶粒微細化を行う製法である。相分解は $Nd_2Fe_{14}B + H_2 \rightarrow NdH_2 + Fe + Fe_2B$ であり、再結合はその逆反応である。d-HDDR 法では HD 反応は 25 ~ 820℃、30 ~ 100 kPa、DR 反応は 25 ~ 820℃、0.01Pa ~ 3kPa の条件を用い、温度と水素圧を制御する。得られた磁粉の結晶粒はサブ μm、磁粉粒径は 100 μm 以下である。NdFeB 磁石の温度特性は $\alpha(B_r) = -0.1\%/K$ 、 $\alpha(H_{cJ}) = -0.5\%/K$ で示されるように、希土類磁石の中では大きい値を示す。従って、高温で使用する場合

は B_r と H_{cJ} の低下に留意する必要がある。特に H_{cJ} は 100℃ の温度上昇で常温の 1/2 に低下する。

NdFeB 磁石の用途は用途に必要な H_{cJ} によって変化する。 H_{cJ} の水準は Dy 置換によって変化する。Dy 置換が大きい場合は自動的に $(BH)_{max}$ は低下する。全希土類量を 31wt% とした場合、Dy 置換ゼロでは MRI 等に、Dy 置換量 5wt% では OA モータ等に、Dy 置換量 10wt% では EV 駆動用モータ等に使用される。

Nd 鉱床はバヤンポー、マウンテンパス、オリンピックダム等世界中に分布しているが、Dy は中国の龍南鉱床のみに依存している。所謂、Dy 供給が中国の政策によって変動するリスクがある。よって、NdFeB 磁石の省 Dy や Dy フリー化が重要な研究テーマとなる。省 Dy 化の手法としては 2 合金法と粒界拡散法 (GBD: Grain Boundary Diffusion) があるが、現状では GBD が NdFeB 磁石の高性能化と省 Dy が実現できる手法として多用されている。Dy のフッ化物や酸化物スラリーに製品形状に近い磁石を浸漬し、磁石表面に Dy のフッ化物や酸化物を付着させる。焼結温度からかなり低い 800 ~ 900℃ で Dy を拡散させる。フッ化物や酸化物は磁石に含まれる Nd によって還元され、Dy メタルに変化する。一方、Dy フリー化は専ら結晶粒微細化によって実現される。焼結磁石用磁粉は He を粉砕媒体として用いるジェットミルによって、概略 1 μm まで微粉化される。熱間加工磁石は超急冷→圧密→熱間加工のプロセスを経ても結晶粒はサブ μm が維持されている。

SmFeN ボンド磁石用磁粉は Sm₂Fe₁₇N₃ 窒化物系金属間化合物を用いる。溶解法及び還元拡散法によって得られた Sm₂Fe₁₇ 粉末を窒化・粉砕して作製される。粉末粒径は 3 μm 程度で、射出成形によって異方性ボンド磁石化される。なお、超急冷による TbCu₇ 型等方性 SmFeN ボンド磁石も生産されている。

フェライト 磁石は 1932 年の加藤・武井による OP 磁石がルーツで、1952 年に J. J. Went によって Ba フェライトが、1963 年 A. Cochardt によって Sr フェライトが開発された。1998 年以降、La-Co 置換された Sr フェライト及び Ca フェライトによって高性能化が図られた。フェライト磁石は粉末冶金法で製造される。原料は Fe₂O₃ と MCO₃ (M=Ba, Sr 及び Ca) であり、混合後、仮焼される。仮焼後、粗粉砕・微粉砕され、乾式等方性、乾式異方性及び湿式異方性の各磁石によってプロセスは変化する。湿式異方性は湿式粉砕されたスラリーを用いて磁場中成形を行い、空气中焼結する。

フェライトは

- ① コストパフォーマンスに優れる、
- ② 化学的に安定、
- ③ 密度が小さい、
- ④ 電気抵抗が大きい、
- ⑤ 保磁力が低温で小さくなる [$\alpha(H_{cJ})$ がプラス] 等の特徴を有する。

ボンド磁石 は磁粉をバインダーと混練するコンパウンド化後、成形して作製される。磁粉はアルニコ、フェライト及び希土類化合物 [Sm₂Co₁₇、NdFeB (MQ)、NdFeB (HDDR)、SmFeN] がある。バインダーは熱可塑性樹脂 (ポリアミド)、熱硬化性樹脂 (エポ

BM インフォメーション

キシ) 及びゴムがあり、成形法には射出成形、圧縮成形、押出成形及び圧延成形がある。これら、磁粉、バインダー及び成形法の多種の組合せが存在する。本組合せによって幅広い磁気特性を有するボンド磁石が産業界に提供されている。

JEITAによる永久磁石生産量統計は2006年から鑄造磁石が、2017年からフェライト磁石が、2018年から希土類磁石が廃止されている。したがって、日本の永久磁石生産量に関する公式の統計は現状ではなくなってしまっている。

福田先生のご講演によって硬磁性材料の基礎が把握できたと思われ、ここからは塾生の努力による更なる勉強が必要である。勉強のトリガーになるポイントはほぼ総て説明頂いている。知りたいことに合致する多くの教科書も紹介頂いた。その中から自分の分野と実力に合う教科書を選び、座右の書とするとともに、勉強を継続して欲しい。

なお、JABMのHP「磁性材料面白コーナー」に福田様が執筆された「永久磁石百年史」が掲載されている。参考にして欲しい。

(<https://www.jabm03.com/magnet/ACenturyHistoryofPermanentMagnet.pdf>)

2022年前期講座予定

第31期BM塾では小林久理真先生による硬磁性材料の保磁力の問題を取り上げる。小林先生には2011年/後期(第10期)において「保磁力とは何か、その発現と増強のセオリーとは」を講演して頂いている。

今回の第31期では保磁力の問題を磁化反転モデル、磁気余効及び磁化反転領域の拡張を視点として、3回連続の各論講義をお願いする。

第1講

2022年5月27日(金)@Zoom

講義：各論「磁化反転モデルの正確な理解」

講師：小林久理真（立命館大 客員研究員）

第2講

2022年6月17日(金)@Zoom

講義：各論「磁気余効現象が保磁力に果たしている重要な側面」

講師：小林久理真（立命館大 客員研究員）

第3講

2022年7月15日(金)@Zoom

講義：各論「磁化反転領域の拡張と保磁力近傍の磁区分布」

講師：小林久理真（立命館大 客員研究員）

なお、各論講義の題目は暫定である。

以上