

## 報告：2022 後期寺子屋 BM 塾 第 32 期 BM 講座

寺子屋 BM 塾長  
元・日立金属(株)  
徳永 雅亮

2022 年度後期の BM 塾では、株式会社豊田中央研究所の田島伸様に軟磁性材料及び圧粉磁心に関して、3 回の連続講義をお願いした。①「軟磁性材料概論 1」、②「軟磁性材料概論 2 と圧粉磁心概論 1」及び③「圧粉磁心概論 2」の 3 連続講義である。

軟磁性材料概論と近年代表的軟磁性材料になりつつある圧粉磁心について、基礎からその応用分野を講義して頂く。田島様からは「今回は軟質磁性材料に関して初学者に近い方を対象とした講義にしたい。」との抱負を頂いた。

### 第 1 講

2022 年 9 月 9 日 (金) @ Zoom

講義：各論講義「軟磁性材料概論 1」



講師：田島 伸（豊田中央研究所 主席研究員）

**概要：**軟磁性材料の概要を説明する。現状、軟磁性材料に関する教科書は Bozorth のような古典しか見当たらない。そこで、本講座では、基礎的な部分から応用の部分まで、可能な範囲で、できるだけ詳細に軟磁性材料について説明する。特に、軟磁性材料は磁石と違って、用途によって使われ方や必要な特性が大きく違っているので、そのような点について考察する。

受講生総数：63 名

**記事：**軟磁性材料（圧粉磁心）と永久磁石（ボンド磁石）の違いを考えてみよう。軟磁性材料は①使われ方が用途によって大きく変わる（作動周波数が 1Hz から 10MHz まで変わる）、②要求される特性は用途によって大きく違う、③見かけの特性が材料によって大きく違う（例えば保磁力は 100 倍以上違う：アモルファスと圧粉磁心の例）等の特徴を有する。「教科書がない」ことや、企業の方が大学・国研よりも研究・開発がはるかに進んでおり、企業秘密でデータがオープンにならないという周

辺状況もある。

電磁気学の復習をしておこう。磁気の単位は高梨先生の「磁気工学入門」を座右にして、繰り返し勉強して欲しい。

電磁気学の基本は Maxwell の 4 つの方程式であるが、磁気に関係するのは以下の 3 つの方程式である。

① 電磁誘導の法則

$$\text{rot } E(r, t) + \partial B(r, t) / \partial t = 0$$

② アンペールの法則

$$\text{rot } B(r, t) - \mu_0 \epsilon_0 \partial E(r, t) / \partial t = \mu_0 I(r, t)$$

③ ガウスの法則

$$\text{div } B(r, t) = 0$$

( $B$ : 磁束、 $E$ : 電場、 $I$ : 電流、 $\mu_0$ : 真空の透磁率、 $\epsilon_0$ : 真空の誘電率) 電磁波は変動する磁場と電場が 90 度の角度差で相互に相手を発生させて生じ、その波の速度は光速である。波の速度を計算してみて、光速に一致することを確かめて欲しい。

フレミングの左手の法則は電磁力と力の関係を表しており、モータの回転力の発生原理である。Maxwell 応力は磁力線の歪と捉えることができ、空間の歪が重力であることとアナログに理解できる。

物質の磁性を考えてゆく。原子とイオンの磁性は電子運動による軌道角運動量  $L$  とスピン角運動量  $S$  によって決定されるが、軟磁性材料の場合は  $S$  による磁性だけを考えればよい。その理由を理解するためには角運動量の消滅の論理を考える必要がある。自由原子・イオンの基底状態における軌道角運動量の  $z$  成分はポテンシャル  $V$  中の電子エネルギーの期待値から導出される。量子力学的考察により、全空間積分による軌道角運動量のエネルギーがゼロになるためである。原子の磁気モーメントはボーア磁子 [ $\mu_B = eh/(4\pi m)$ ]、 $h$ : プランク定数、 $m$ : 電子の質量、 $e$ : 素電荷の値] の整数倍になる。単位は [J/T] = [Wb·m] である。

金属では電子は固体内に広がり、動き回っているので、原子一個当たりの  $L$  や  $S$  を定義するのが困難になる。よって、金属の磁性は電子がフェルミ粒子であることやバンド構造の電子論によって理解される。バンド構造は量子力学から導かれる電子状態であり、外殻電子が禁制帯を挟んで価電子帯と伝導帯にスプリットする。固体の電子状態は状態密度 DOS (Density of state) とエネルギーの関係によって示され、電子が占有された最大のエネルギーをフェルミエネルギーという。DOS は第一原理計算、XPS (X 線光電子分光法)、HAXPES (硬 X 線光電子分光法) で求めることが可能である。磁場印加によってアップスピンとダウンスピンの DOS の差が恒常的に生じる物質が強磁性体である。磁場印加によって、電子のクーロンエネルギーの得が運動エネルギーの損以上であるという「ストーナー条件」によって強磁性が安定化する。単純な構造の金属 (Fe、Ni、Co 等) の DOS は VASP 等のフリーソフトで計算可能である。強磁性非晶質合金の飽和磁化は結晶質の構成金属で決定された飽和磁化を用いて決定できる。強磁性非晶質合金にリジッドバンドモデルとメタロイド原子から遷移金属原子に s、p 電子が移動するモデルが適用できるからである。

磁性によって材料を分類すると、常磁性、反磁性、反強磁性、フェロ磁性、フェリ磁性になる。フェリ磁性は酸素イオンを介した超交換相互作用による強磁性である。MnO は反強磁性であるが、フェリ磁性は隣合う原子の磁化が異なり、全体として磁化が残る場合の磁性である。

軟磁性材料と永久磁石の相違点は保磁力の大きさであって、磁化曲

線の本質は変わらない。軟磁性材料の動作状況はメジャーモードだけでなく、マイナーモードや静磁場重畳特性を把握する必要がある。強磁性体の磁化曲線に与える要因を考える。軟磁性材料の特性を理解するためには、結晶磁気異方性、形状磁気異方性及び磁歪磁気異方性、更には磁区構造を把握する必要がある。基本的に軟磁性材料ではこれら異方性は小さいことが望ましいが、用途によっては必ずしも小さい必要がない場合もある。軟磁性材料の全エネルギーを静磁エネルギーと磁壁エネルギーの和で考えると、磁壁が導入されることで全エネルギーが大幅に減少する。従って、軟磁性材料では磁壁が存在し、磁壁が移動し易く、磁化が回転し易い必要がある。バルクハウゼン効果を低減するためには磁壁移動を妨げる欠陥や不純物、内部応力が少ないことが必須である。結晶磁気異方性と磁歪がなるべく小さいことも重要である。単磁区粒子の磁化挙動は軟磁性材料では議論しないが、小林先生の講義で再三現れた式  $H_c = 2K/J_s (=H_k)$  は  $J_s$  を大きくすれば、 $H_c$  が小さくなるという重要な視点を与える。

軟磁性材料の優劣を決める鉄損 ( $P_i$ ) を考える。鉄損はヒステリシス損 ( $P_h$ )、渦電流損 ( $P_c$ ) 及び異常渦電流損 ( $P_f$ ) の和として解析される。また、磁気回路において磁束が空气中に漏れること及び磁束量が時間変化することによる損失発生を考慮する。 $P_h$  は磁気履歴曲線 ( $B-H$  曲線) の面積に相当し、磁気履歴曲線が欠陥、空孔、不純物、粒界等の存在で保磁力、残留磁束密度が増大する結果、ヒステリシス損も増大する。 $P_c$  は  $B$  と  $H$  の位相遅れが大きいと、増加する。 $P_f$  は周波数  $f$  の関数  $P_f = \alpha f + \beta f^2 + P_a$  と表現できる。鉄損解析には  $P_i$  を  $f$  で割った  $P_i/f = \alpha + \beta f + P_a/f$  が用いられる。 $P_i/f$  を  $f$  の関数で表現し、 $\alpha$  は  $P_h$  を、 $\beta$  は  $P_c$  ( $\beta f^2$ ) の係数、異常渦電流損は  $P_f$  から  $P_h$  と  $P_c$  を差引くことによって評価できる。注意すべきは  $P_a$  の  $f$  依存性が不明なので、 $\alpha$  は静磁場測定によって決定する必要がある。磁歪のある材料では印加応力によって鉄損が変化する。ケイ素鋼板では鉄損は面直応力によって増加し、面内の引張応力で減少する。応力の磁性材料に与える影響は、モータの製造現場では Building factor として整理されている。

実用化されている軟磁性材料を概観してみよう。

- ① 純鉄：鉄中の不純物 (C, N, O) の除去や結晶粒成長を  $H_2$  中熱処理によって行う。電気抵抗が小さいため、交流用途には適さない。結晶粒径粗大化による保磁力低減化は軟磁性材料の特性改善の一般的手法である。
- ② 圧延鋼板：車ボディー用の鋼板材料を磁性材料に転用したもの。各モーターメーカーが自己責任で安価なモータに利用している。
- ③ 電磁軟鉄：純鉄よりも不純物が多いが、磁性目線で不純物を制御し、高透磁率、低保磁力を獲得している。不純物としての Mn と S を MnS として鉄中に析出させる手法が利用されている。
- ④ 電磁鋼板：Fe-Si、Fe-Al 等の 2 元合金では  $\gamma$  ループを回避して、すなわち、 $\alpha \leftrightarrow \gamma$  変態を通らずに熱処理が可能になり、結晶粒粗大化が図れる。不規則相である高温相による低結晶磁気異方性化が図れる。Fe-Si 合金では Si 添加によって、電気抵抗が向上し、 $K$  と  $\lambda$  が低下、引張強度が向上し、軟磁性材料の諸性質が獲得される。渦電流損を低減するためには薄板化が必要であり、絶縁被膜技術は超 Know-how としてメーカー内に秘匿されている。
- ⑤ Fe-Si-Al 合金 (センダスト)：Fe-10Si-5Al 組成の  $K_1 \approx 0$ 、 $\lambda_s \approx 0$  を有する日本発の高透磁率、低保磁力材料。

- ⑥ Fe-Co (パーメンジュール)：Fe<sub>50</sub>Co<sub>48</sub>V<sub>2</sub> 組成の不規則構造高飽和磁化材料。
- ⑦ Ni-Fe (パーマロイ)：Ni70% で  $K_1 \approx 0$ 、 $\lambda_s \approx 0$  を示す高透磁率合金。fcc 構造の不規則相を有する。
- ⑧ 電磁ステンレス：Fe-13Cr 系は電磁弁に使用される。
- ⑨ アモルファス：結晶磁気異方性がないが、磁歪は発生する。アモルファス形成に必要な多量の非磁性元素を用いるため飽和磁化が小さい。

軟磁性材料の磁気特性を測定する機器には VSM、直流自記磁束計、 $B-H$  アナライザーがあり、目的に応じて使用される。粒径や粒度分布等の粉体性状評価には種々の手法があるので、手法の長所と欠点を理解した上で慎重に運用する必要がある。粒子形状の定量的評価は非常に難しく、機械学習を用いる検討がされている。

田島先生に軟磁性材料の基礎を実学に基づいて、網羅的に講義して頂いた。研究開発に携わっている人たちには、問題点に遭遇した場合、田島先生の講義の内容を見直し、手がかりを見つけて、問題解決を進めて欲しい。

## 第 2 講

2022 年 10 月 14 日 (金) @ Zoom

講義：各論講義「軟磁性材料概論 2 と圧粉磁心概論 1」

講師：田島 伸 (豊田中研 主席研究員)

概要：前半は軟磁性材料を利用した磁気応用部品について考察する。特に、材料研究者目線で必要な知識や技術を主として説明する。後半は、圧粉磁心の概要を説明する。おそらく、受講者の多くの方は、圧粉磁心をご存じとどと思われるが、「初心忘るべからず」のように、一度基礎から振り返りたい。

受講者数：63 名

記事：まず、電磁気工学の基礎から始める。コイルにはソレノイドコイル、トロイダルコイル及びギャップのあるコイルがあり、そのコイルの中には軟磁性材料が挿入されている。これらコイルの機能は挿入される軟磁性材料の透磁率、寸法及びコイルの巻数を用いて表現できるよう体系化されている。磁気回路は等価電気回路で表現されることが多いが、その差異にも配慮が必要である。電気回路の電気伝導度が一定値であるのに対して、磁気回路の  $\mu$  が非線形であるためである。磁気回路では、空気に対する磁性体の透磁率比が小さいことや磁束の漏れを考慮する必要がある。更に、磁束は時間変化によって損失を発生する。コイルに蓄積できるエネルギーは磁気エネルギー  $W_A = 1/2 \cdot LI^2$  である。 $L$  はインダクタンスで、 $V = L di/dt$  である ( $I$ ：電流、 $V$ ：電圧)。 $B-H$  曲線で考えると  $\mu$  が一定で、 $B$  が  $H$  に比例するとき、 $W_A$  は最大にできる。

ギャップのあるコイルに軟磁性ロータを挿入した場合のトルクは  $\varphi^2 \times (R_m)$  の角度変化率： $dR_m(\theta)/d\theta$  又は  $I^2 \times (L)$  の角度変化率： $dL(\theta)/d\theta$  で表現できる。ここで、 $\varphi$ ：磁束、 $R_m$ ：磁気回路の磁気抵抗、 $L$ ：コイルのインダクタンスである。コイルに交流電流を印加すると、 $V$  と  $I$  の位相が  $90^\circ$  ずれる。コイルに直流電流を印加した場合、得られる電流値は  $I = I_L [1 - \exp(-t/R_L L)]$  となり、過渡現象を示す。ここで、 $I_L$ ：コイルの電流、 $R_L$ ：コイルの電気抵抗である。「コイルはスイッチオフしてもすぐに  $I = 0$  にならない。」という過渡現象である。

反磁界は硬質磁性材料においても  $P_c$  を介して磁気回路における利用

# BM インフォメーション

可能な磁束を評価する際に用いられる。開磁路測定であるVSMの反磁界補正にも多用される。磁化された磁性体の有効磁界 ( $H_{eff}$ ) は反磁界 ( $H_d$ ) を用いて、 $H_{eff} = H_{ex} + H_d = H_{ex} - NJ/\mu_0$  と表される。ここで、 $N$ : 反磁界係数、 $J$ : 磁性体の磁気分極である。磁気ギャップは電気回路には存在しない磁気回路において考えるべき重要事項である。磁気ギャップは  $\mu \approx 1$  の領域であり、反磁界が発生する。軟磁性材料の場合、高磁場で飽和すると見掛けの  $\mu$  は 1 となり、磁気ギャップになる。従って、磁場の大きさによって磁性材料になったり、ギャップになったりすることに注意が必要である。

ギャップに蓄積される磁気エネルギーはギャップの磁束の 2 乗及びギャップの面積  $S$  に比例する。磁心部の磁性材料の  $\mu$  が大きいほど、ギャップに蓄積されるエネルギーの磁心部に蓄積されるエネルギーに対する比率を大きくできる。磁気抵抗にギャップが及ぼす効果を考えてみよう。高  $\mu$  材と低  $\mu$  材をモータに用いる場合を仮定する。磁石を使用する場合と使用しない場合での磁気抵抗  $R_m$  を比較する。磁石を使用しない場合では、低  $\mu$  材は高  $\mu$  材に対し、約 18% の  $R_m$  増加を示し、磁石を使用する場合は 1.8% の  $R_m$  増加を示す。結論は磁石を使用したモータでは磁気回路全体の  $R_m$  に対して、軟磁性材料の  $\mu$  の影響は小さくなるということである。従って、磁石モータにおいては電磁鋼板に替えて圧粉磁心を用いた場合には、そのメリットを出せる可能性が存在することになる。一般に軟磁性材料は低磁界領域で高  $\mu$  を示し、 $B$  の増加と共に  $\mu$  は低下し、強磁性体の磁心を有するコイルの  $L$  は  $H$  に対して非線形性を有する。磁心の  $\mu$  を  $H$  の増減に対して一定にしたいときは磁心にギャップを入れる。これはギャップ形成によって発生する反磁界の効果による。ギャップ形成によってフリンジング磁束という漏れ磁束が発生し、浮遊損が発生する。磁気回路のコーナー部内側にも磁束漏れが発生している。

圧粉磁心の適用が可能なモータの基礎を確認しておこう。ロータ電流の極性を変えるブラシを持つ直流モータではその等価回路において、モータ部は交流源として考える。ロータを 3 スロットにするのは、2 スロットの際現れるトルクゼロの死点を回避するためである。モータの損失は鉄損 (ヒステリシス損、渦電流損) と銅損 ( $\mu$  の高い磁性体を使う) 及び機械損を中心に考える。

BLDC モータはステータに多相コイルを取り付けて、交流電流を流して回転磁界を作り、回転磁界に同期してロータを回転させる。多相コイルへの通電はロータ回転に同期したインバータによる電流の切換えによって行う。BLDC モータのロータに用いる磁石は SPM (表面磁石) と IPM (埋込磁石) の 2 方式があり、IPM ではフラックスバリアを利用したリラクタンストルクが活用できる。フラックスバリアはロータに設けられた空隙による。ステータへのコイルの巻き方は分布巻きと集中巻きがある。分布巻きはスロット間を渡って重ねて巻き、コイルの起磁力が大きく、高調波発生が小さいので、トルクリップルが小さい。巻線が長くなるため銅損が増加し、コイルエンドが大きくなるため、モータ体格も大きくなる欠点もある。集中巻きは 1 本のティースにコイルを巻くため、コイルが短くなり、銅損が小さい。コイルエンドも小さくモータも小型化可能であるが、高調波発生が大きく、トルクリップルが大きくなる。

誘導モータは「多相交流による回転磁界」の効果を利用したモータで、その基本はアラゴの円板に見られる。回転磁界で誘導された電流と磁界の相互作用で回転が得られる。ロータは導体と短絡環からなるかご形で、電気抵抗の小さい Cu や Al が用いられる。誘導モータにはすべり  $s$  が存

在するのが特徴である。モータ効率は BLDC モータの方が誘導モータより高いのはかご形導体に発生するロスとすべりに原因がある。

SR モータはステータとロータの突極位置に合わせた通電によって回転を得る。現状では制御が難しく、振動や騒音が大きいためにメリットに対してデメリットを抑えられないので、実用化例は少ない。

軟質及び硬質磁性材料の研究者は各種モータの課題を理解して、解決すべきテーマを設定する必要がある。

電磁弁の吸引力はステータ面積  $S_1$  と可動コアの空隙間の  $B$  の 2 乗の積に比例する。開閉はばねの応力との大小で作動する。吸引力はステータ巻線への通電により発生し、コイルの過渡特性を把握し、コイル巻数を小さくする等の時定数を短くする設計が必要である。

電流を磁気に変換してエネルギーを蓄積する素子であるリアクトルを考える。リアクトルは直流電圧変換になくてはならない磁気部品で、DC-DC コンバータの主要部品である。

出力電圧  $V_{out}$  は入力電圧  $V_{in}$  とリアクトルへのオン・オフ時間の比率  $\alpha = T_{on}/(T_{on} + T_{off})$  で制御でき、 $V_{out} = V_{in} \cdot \alpha$  である。リアクトルの磁心の体積は周波数  $f$  に反比例するので、高周波化によって小型化できる。ギャップを有するリアクトルでは全磁路長に対するギャップ長の割合で磁心の  $\mu$  を制御できる。

圧粉磁心材料に焦点を移す。圧粉磁心は複合組織を持つ複合材料であるが、複合によるシナジー効果はない。圧粉磁心は磁性粒子を絶縁被膜でコートし、高密度成形したもので、絶縁被膜で磁性粒子間の導通を阻止して、電気抵抗を高めている。使用周波数によって異なる磁性材料が用いられる。圧粉磁心は形状自由度が高く、3 次元磁気回路が可能となる。磁歪による騒音、バルクに対する磁束密度及び透磁率の低下、機械的強度が低い等の欠点も有する。磁粉材質を選択することによって、1kHz から 10MHz の広い周波数領域で使用できる。

粉末の製造方法は多岐にわたる。アトマイズ粉、プラズマ回転電極法、SWAP、化学的合成法、機械的粉碎法があり、粒子形状の改良にはボールミルが用いられる。圧粉磁心に用いられる材質は純鉄、電解鉄、Fe 合金、アモルファス、ナノ結晶材料、金属ガラス等これも多岐にわたる。これら材質は前述の粉末製造法との組合せで作製される。

圧粉磁心の特性の支配要因の一つは絶縁被膜である。絶縁被膜の材質は樹脂、リン酸塩系 (アルカリ土類 / 希土類 - ホウリン酸塩)、 $SiO_2$  系、 $Al_2O_3$  系、低融点ガラス、ナノシート等がある。被膜の種類とその被膜形成方法は磁心材料との組合せで変化する。Fe-Al 合金の酸化を利用した絶縁被膜は興味深い。Al の濃度によって形成される酸化被膜が異なっている。Fe-1Al では  $Fe_2O_3$ 、 $Fe_3O_4$ 、 $FeO$ 、 $FeO \cdot (Fe, Al)_2O_3$  が層状に形成されるが、Fe-6Al では  $Al_2O_3$  のみが形成される。

田島先生の今回の講義は非常に幅の広い、磁気応用部品と圧粉磁心材料に関するもので、軟磁性材料の応用、圧粉磁心材料及び絶縁被膜のバリエーションの大きさに驚かされた。実際の圧粉磁心製品では材質、粉体製造方法、絶縁被膜製法の組合せの中で、高機能で低コストが可能な組合せが選択される。

## 第 3 講

2022 年 11 月 18 日 (金) @ Zoom

講義: 各論講義「圧粉磁心概論 2」

講師: 田島 伸 (豊田中央研究所 主席研究員)

**概要：**第2講を受けて、圧粉磁心の特性向上や実用化に必要な技術について考察する。時間の都合で、どこまで議論できるかわからないが、最後は受講者の皆様と可能な範囲で、圧粉磁心について議論したいと考えている。

**受講者数：**59名

**記事：**圧粉磁心の製造プロセスに入っていく。概略は、粉末作製→粒度調整→絶縁被膜形成→バインダ混合→成形→熱処理→加工→後処理→防錆である。粒度調整は粉体が球形同一粒径の場合の体積分率が74%に留まるため、二山の粒度分布を採用して、充填密度の向上を図る。二山の範囲はプロセスでの取扱いを考えると40～200μm程度になる。平均粒径小が有利な渦電流損と平均粒径大が有利なヒステリシス損を考え、平均粒径は選択される。成形は高充填密度が得られる金型圧縮成形が選択される。成形の際の潤滑には内部潤滑法と金型潤滑法がある。内部潤滑は潤滑剤が磁心内部に留まるため、磁心の充填密度が下がる。金型への粉末充填は生産性向上を狙ってエンジニアリング的な工夫が施されている。その目標は早く、均一に、高充填を行うことである。金型潤滑はステアリン酸リチウム等を金型内壁にノズルで吹き付けて行うが、抜き圧も同時に低減される。抜き圧が低減されるメカニズムの一つとして、高温・高圧成形の際、ステアリン酸リチウムが鉄粉表面とメカノケミカル反応し、ステアリン酸鉄が形成される例がある。

成形後の熱処理は磁粉の転位や残留応力の除去を目的とするが、同時に電気抵抗が低下する。電気抵抗の低下の原因は絶縁層の球状化、磁粉と絶縁層の反応及び絶縁層の変質が考えられているものの、不明な点も多い。

圧粉磁心の飽和磁化は磁性粉末の体積分率に比例する。圧粉磁心の透磁率の体積分率に対する変化は理論的な解析がされている。バルクの透磁率が10000の磁粉を用いた場合、5000の磁心透磁率を得るためには、概略95%以上の体積分率が必要である。粒子形状の透磁率に与える影響は反磁界を介して生じているが、反磁界係数の分布や粒子形状の分布をパラメータとした理論式は提案されていない。保磁力を介在物、それ以外に起因する保磁力、平均結晶粒径及び転位密度の関数として、純鉄系圧粉磁心で定式化した例がある。ヒステリシス損は成形体密度の向上によって低下する。渦電流損は粒子内及び絶縁被膜の欠陥による粒子間渦電流からなるが、表皮効果を加味した解析が必要で、第1回講義で説明された  $P_i = \alpha f + \beta f^2 + P_a$  の  $\alpha$  と  $\beta$  を周波数の関数として取り扱う必要がある。鉄損を低減するための熱処理と粒径制御は必須である。モータ応用に用いられる周波数領域ではケイ素鋼板の鉄損の方が圧粉磁心よりも低い。ケイ素鋼板で見られる異常渦電流損は圧粉磁心には見られない。

各種圧粉磁心の特徴的な特性を見ておこう。まず、Fe系である。Fe系圧粉磁心に用いられるリン酸鉄絶縁被膜(B-P-O)は焼結・拡散による球状化が生じ、絶縁被膜が脆弱である。Y-B-P-O及びSr-B-P-O被膜を純鉄系磁粉に適用し、DWL-WC(Die Wall Lubrication - Warm Compaction)との組合せで、高成形圧力・高密度圧粉が可能となった。Sr-B-P-OをFe粒子に成膜後、カチオン性のPDADMACを吸着させ、シリカナノシートを吸着させる特殊な絶縁被膜もある。絶縁被膜の形成には水やガスを媒体として用いる。

次は、Fe合金系及びアモルファス合金系である。種々の合金系があり、高合金系及びアモルファス系はヒステリシス損が非常に小さい特徴を持

つ。Fe-3Si系はSi添加によってヒステリシス損及び渦電流が低下するが、1000K以上での耐熱性を有する絶縁被膜が必須である。絶縁被膜形成には外部酸化とシリコンを用いる。Fe-3Siは電磁鋼板組成で、圧粉磁心の組成としても、磁気特性、電気抵抗、成形体密度のバランスから一つの解となり、プリウスのDC-DCコンバータ用リアクトルに採用されている。アモルファス合金系圧粉磁心は高硬度のため、体積分率が上げ難く、比透磁率がかなり低いが、リアクトルとしてはこの特性が好ましい。合金系ではSi等の添加物の酸化挙動を利用した外部酸化による絶縁被膜の形成を利用する例が多い。

圧粉磁心の応用例を概観しよう。インダクタとリアクトルは基本的に同じ電子部品であり、小電流を扱う小型部品をインダクタ、大電流を扱う大型部品リアクトルと呼ぶ。国内生産では、用いられる磁心はフェライトが74%、圧粉磁心が17%である。残りはケイ素鋼板型と空芯コイル型である。使用される周波数領域は、 $\geq 100\text{kHz}$ ではフェライト、 $\leq 100\text{kHz}$ では圧粉磁心、 $\geq 30\text{MHz}$ では空芯が多い。最近ではアモルファス合金系磁心が数MHz用にも利用されている。スマートフォン向けが最も多く、次いでPC、車載に用いられる。今後はEV向けの増加と数MHzで使用可能なアモルファス合金系圧粉磁心も増加すると予想される。

直流送電システム(北海道と本州間の系統連結)にはアノード電流の電流上昇率を低減する保護回路としてアノードリアクトルが用いられている。著名な応用はHV車に用いられるDC-DCコンバータ用リアクトルであろう。3代目プリウスでは電圧昇圧(200V→650V)によって、電池コストの低減及びインバータ電流の抑制によるインバータの低コスト化を実現している。用いられている圧粉磁心はUI型のコアである。ケイ素鋼板適用対比で工程数6→2、歩留り60%→100%を実現し、低コスト化に成功している。合金系をFe-6.5SiからFe-3Siに変え、外部酸化とシリコンによる絶縁被膜を適用している。ガソリンエンジン点火用コイルは磁石を用いた磁気回路を用いる。磁石はギャップかつ起磁力として動作し、逆磁界側に磁界範囲を広げて、利用可能な磁気エネルギーを2倍に増加させる。内燃機関の回転数3000rpmを考えると、40msecに1回の点火や燃料噴射が行われるが、点火プラグの放電時間は1msecであり、渦電流損に比例する動作速度が優先され、ヒステリシス損は重要視されない。渦電流損は磁性材料の厚さ $d$ の2乗に比例する。従って、圧粉磁心の大きさによって、要求される電気抵抗率 $\rho$ に対する要求が異なってくる。大きい圧粉磁心では電気抵抗率のより高い材質が求められる。自動車ABSモータでは従来の電磁鋼板を圧粉磁心に変更することで、デッドスペースのない小型化が実現している。圧粉磁心は低強度という短所もリサイクル面では長所として捉えることができ、鉄鋼材料では、強度減少の原因となる巻線であるCuとの分離が容易に行える。

現状のプリウスに用いられているラジアルギャップモータから圧粉磁心を適用したアキシヤルギャップモータとし、体格半減に挑戦した例を見てみよう。ロータは永久磁石を貼りつけた鉄心である。ステータはティースとヨークからなり、異なる圧粉磁心を使いわけ。試作したモータのシミュレーションと実測値を比較すると、トルクとヒステリシス損はほぼ一致するが、渦電流損の実測値がシミュレーション値より大きい。加えてPWMによる高調波に伴う損失が発生する。同様のコンセプトでヘガネス社のSomaloyを使用したモータがKoenigsegg社のHEVに搭載されている。

# BM インフォメーション

ディーゼルエンジン用コモンレール用噴射弁では 200MPa 程度の圧力で数 msec 内に 9 回の多段噴射を行っている ( $\mu$  sec レベルの噴射)。本機能に対応するためには高  $B_s$ 、高電気抵抗及び高耐熱温度が必要であり、ケイ素鋼板を純鉄系圧粉磁心に変更した好例である。

田島先生の講義はご自身の経験に裏打ちされた具体的で、詳細な内容であった。圧粉磁心の応用例の公表は比較的少なく、技術者共通の技術基盤を向上するためにも、圧粉磁心応用例の学会発表や論文執筆が望まれる。田島先生執筆による「磁性複合材料-圧粉磁心とボンド磁石」が 2023 年 2 月に発刊される。本講義の内容が網羅的に本書に含まれている。購入の上、参考にして、勉強したい。

最後に田島先生から、材料研究には「Positive thinking」と「思い込み」が原動力になることが多く、若い頭脳で未来を切り開いて頂きたいとの励ましの言葉を頂いた。

## 2023 年前期講座予定

第 33 期 BM 塾ではハイブリッド開催で以下の 3 講義を計画している。塾生諸君の参加をお願いしたい。

### 第 1 講

2023 年 5 月 12 日 (金)「ふらっとにっぽり」と ZOOM のハイブリッド

講義：各論「電磁鋼板の基礎技術」

講師：開道 力 (磁気技術コンサルタント 元・新日本製鐵株)

### 第 2 講

2023 年 6 月 16 日 (金)「ふらっとにっぽり」と ZOOM のハイブリッド

講義：各論「モータや発電機を支える電磁鋼板技術」

講師：開道 力 (磁気技術コンサルタント 元・新日本製鐵株)

### 第 3 講

2023 年 7 月 14 日 (金)「ふらっとにっぽり」と ZOOM のハイブリッド

講義：各論「トランスやリアクトルを支える電磁鋼板技術および電磁鋼板の磁気特性などの測定法」

講師：開道 力 (磁気技術コンサルタント 元・新日本製鐵株)

## ◎ 新刊書籍のご案内 2023 年 2 月刊 コロナ社 ◎



### 磁性複合材料 -圧粉磁心とボンド磁石-

小林 久理真 静岡理工科大名誉教授 工博 監修

(株)豊田中央研究所 編

田島 伸 (株)豊田中央研究所 博士 (工学) 著

ISBN 978-4-339-00986-6/A5 判/424 頁

定価：7,260 円 (本体 6,600 円+税)

本書では、自動車や強電用途の圧粉磁心とボンド磁石について、自動車に関係する技術を主として、研究開発に有用な技術や知識、またこれらの材料の基礎から具体的な応用までを網羅的に解説している。

### 【主要目次】

1. 序論【はじめに/電磁気学および磁性材料に関する科学技術の歴史/自動車の歴史/最後に】
  2. 磁性概論と強磁性材料【磁気の単位/電磁気学の基礎/強磁性体の起源/磁気特性による物質の分類/強磁性材料の特性/磁気損失(鉄損)/強磁性材料の温度依存性】
  3. 実用化されている強磁性材料の特性と評価方法【はじめに/軟質磁性材料/硬質磁性(永久磁石)材料/磁性材料および磁性粉末の評価方法】
  4. 磁気応用部品・機器の動作原理【電磁気工学の基礎/反磁界とギャップの影響/モータ/磁弁/リアクトル】
  5. 磁性複合材料：圧粉磁心とボンド磁石【圧粉磁心とボンド磁石/複合材料の考え方/磁性複合材料：圧粉磁心とボンド磁石/圧粉磁心の長所と短所(特徴)/ボンド磁石の長所と短所(特徴)】
  6. 圧粉磁心およびボンド磁石の作製方法と特性【はじめに/圧粉磁心用磁性粉末/圧粉磁心用絶縁被膜の種類と特徴/圧粉磁心とボンド磁石用バインダ(結合剤)/圧粉磁心とボンド磁石の作製プロセス/圧粉磁心の基本特性/報告されている圧粉磁心の特性/市販されている圧粉磁心の特性/ボンド磁石の基本特性/市販されているボンド磁石の特性】
  7. 圧粉磁心とボンド磁石の応用【磁気応用部品・機器から圧粉磁心とボンド磁石に求められる特性/圧粉磁心を使用したリアクトル/圧粉磁心を使用したモータ/圧粉磁心を使用した電磁弁：ディーゼルエンジン用コモンレールシステム/ボンド磁石を使用したモータ】
- 付録【重要な定数と物性値、および磁気関係の換算式/金属の電子伝導度/規則-不規則転移/アモルファスとガラス/焼結/液相焼結/コイルの巻数とモータ駆動電流、電圧の設定/金属表面の酸化挙動】



株式会社 コロナ社

〒112-0011 東京都文京区千石 4-46-10 振替00140-8-14844  
TEL (03)3941-3131(代), -3132, -3133(営業部直通)  
https://www.coronasha.co.jp FAX (03)3941-3137  
E-mail eigyo@coronasha.co.jp