報告：2023 後期寺子屋 BM 塾
第 33 期　BM 講座

理事 兼 寺子屋 BM 塾長
元・日立金属㈱
徳永　雅亮

2023 年度前期の BM 塾では、磁気技術コンサルタント（元・新日本製鐵株式会社）の開道　力様に電磁鋼板に関して、3 回の連続講義をお願いした。①「電磁鋼板の基礎技術」、②「モータや発電機を支える電磁鋼板技術」及び③「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」の 3 連続講義である。

第 1 講
2023 年 5 月 12 日（金）@ふらっとにっぽり及び Web (Zoom)
講義：各論講義「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))
概要：

- 珪素鋼板の発明における背景と効果、
- 軟磁性材料における電磁鋼板の位置付けと電磁鋼板の種類
- 電磁鋼板の用途と電磁鋼板への要求と問題点
- 電磁鋼板の材質条件、磁化挙動と磁化曲線、鉄損
- 電磁鋼板への要求に対する対応
- 高磁束密度化、低ヒステリシス損化と低渦電流損化
- 電磁鋼板の機械特性（強度、疲労）
- 限界特性とこれからの展開

受講生総数：54 名
記事：19 世紀に発電機、電動機及び変圧器が発明され、これら機器の性能向上のために鉄心素材の性能向上要求が顕在化した。鉄心素材として 1900 年に Hadfield が珪素鋼板を発明した。珪素鋼板の Si 添加効果には①高透磁率、②低ヒシテリシス損、③低渦電流損、④経時劣化無し、⑤ Si 脱酸効果の 5 つの側面がある。

電磁鋼板はエネルギー変換の媒体として発電機、電動機、変圧器及びリアクトルに使用される。電気制御部品にはフィルター、コイル、過飽和リアクトルが用いられている。センサや磁気装置にも電磁鋼板は使用され、電磁鋼板は鉄心の形で用いられる。鉄心以外の形の使用例としては磁気シールドがある。電磁鋼板の役割は磁気エネルギーを介して、電気エネルギーと機械エネルギー間のエネルギー変換を行うことにある。

エネルギー変換機器の高出力励磁条件はその出力が磁束密度 B、角周波数 ω、電流密度 i 及びサイズ L に比例するため、これらを高くする必要があるが、磁束密度 B と角周波数 ω の重要度が高い。損失の少ない高効率励磁条件は銅損と鉄損の和である損失 W を最小にすることが必要である。最小条件は「最小の定理」によって導かれ、銅損と鉄損が等しい場合になる。注意すべきは銅損と鉄損の積が一定という条件を充足する必要がある。エネルギー変換機器の要求機能と電磁鋼板への要求性能の関連で示すと (0) 高加工性を別にすれば、①界磁磁束発生⇔ (1) 高磁束密度、②高速応答⇔ (2) 高透磁率及び（3）低鉄損、③推力の保持伝播⇔ (4) 高機械強度、④熱の抜熱⇔ (5) 高抜熱性、⑤磁束漏洩抑制⇔ (2) 高透磁率と整理できる。一方、鉄心における問題点とそれを解決するための要求性能を纏めると、①磁気飽和、非線形：高飽和磁化、恒透磁率、②損失（鉄損）：低鉄損（高電気抵抗）、③騒音、振動：低磁歪、機械強度、機械剛性、④温度上昇、温度依存性：特性の不変性、温度依存性データ、⑤加工劣化、組立劣化：劣化抑制技術（応力依存性、加工性）、⑥コギングトルク：リラクタンストルクの高精度算定となる。ただし、これら問題点の一つを緩和すれば、他の問題点が増幅される場合もあり、全体のバランスを考慮した問題解決を実行する必要がある。

エネルギー変換用軟磁性材料は B_s の異なる多くの材料があり、最大の B_s を有する Co-Fe-V からパーマロイ、ソフトフェライトまで各種用途に応用されている。Fe 系材料は純鉄及び Fe-Si が工業的に最も多用されている。電磁鋼板には無方向性 (NO: Non-oriented) と方向性（GO: Grain-oriented）の 2 種があり、Si 量 0.1 ～ 3wt%、板厚 0.05 ～ 0.65mm、表面処理有機系、無機系、結晶粒径 0.01 ～ 20mm の多くの材質があり、レーザや機械処理によって磁区制御された材質も存在する。JIS の特性表示方法を見ておこう。$B_{○○}$は磁界○○ x100A/m における磁束密度 (T)、$W_{△△/○○}$は磁束△△ kG、周波数○○ Hz における鉄損（W/kg）を示す。電磁鋼板の種類は NO で、**A### と表すが、** は板厚 (mm) x100、A は NO 材質であること、### は $W_{15/50}$ の保証値 x100（W/kg）を示す。GO 材には G（普通材、B_s ≧ 1.78T）、P（高配向材、B_s ≧ 1.88T、0.23mm 厚さでは 1.85T）、R（高配向材の磁区細分化材、厚さ 0.23mm 及び 0.27mm）の 3 材質がある。NO 材、GO 材共に鉄損低下を主目的とした材質開発が行われてきている。GO 材では磁区制御を用いて鉄損低下を狙う。

電磁鋼板の磁気特性向上手段をピックアップすると、① B_s 向上、②磁化容易方向活用（GO）、③磁壁ピン止め抑制、④磁歪抑制及び⑤歪圧縮力低減があげられる。GO 材は圧延（RD: Rolling Direction）方向に [100] が配向しており、2 方向性電磁鋼板では圧延方向に [100] が配向し、幅方向 (TD: Transverse Direction) に [010] が配向している。

磁化曲線は片対数や両対数で表現し、NO 材と GO 材の差を理解することができる。飽和磁化と透磁率を x、y 軸にとり軟磁性材料の特性をプロットすると、K、λ=0 の領域と K、$\lambda \neq 0$ の領域に分かれ、K、λ=0 の領域に飽和磁化の比較的低い高透磁率材料が分布する。

電磁鋼板の渦電流による表皮効果モデルでは、渦電流の影響がない磁束密度ピーク点透磁率は表皮効果開始周波数を超えると低下し、NO 材ではモデルに沿った変化を示す。高磁界領域（～ 5kA/m）の磁界に対する磁化の変化は、NO 材では結晶磁気異方性に起因する結晶方位に異存した磁化の変化は示さず、平均的な磁化変化になる。GO 材では RD 方向は＜ 100 ＞、＜ 011 ＞方位、TD 方向は＜ 111 ＞方位に近い磁化変化を示す。GO 材の配向が完全ではないため、方位と一致した変化はない。鉄損の磁束密度依存性は両対数プロットにおいて直線近似が可能である。エネルギー変換機器の損失は回路損、機械損、銅損及び鉄損に分類できる。電磁鋼板の鉄損はヒステリシス損と渦電流損に分解される。ヒステリシス損は周波数の 1 乗 f に、渦電流損は周波数の 2 乗 f^2 に比例する。ただし、表皮効果開始周波数を超えると、すなわち、表皮効果が顕著になると、周波数依存性は変化し、ヒステリシス損、渦電流損共に $f^{1.5}$ に比例する。ヒステリシス損は周波数、保磁力及び磁束密度ピーク値の積 $fH_{cJ}B_M$ に比例する。渦電流損は電磁鋼板の材質や鉄心形状に依存する。実際の渦電流損は古典的な渦電流損に κ（異常渦電流係数）を乗じたものになる。正弦波では $W_e=\kappa(\pi f B_M d_{Fe})/(6\rho_{Fe})$ と表される。ここで、κ:異常渦電流係数、f:周波数、B_M:磁束のピーク値、d_{Fe}：板厚、ρ_{Fe}：抵抗率である。電磁鋼板の高周波対応は Si 量の増加と板厚低減によって行われているが、ヒステリシス損が重要である。磁壁移動による異常渦電流損は κ ＞ 1 で発生する。対策の一つはレーザ照射による磁区細分化がある。磁区細分化によってヒステリシス損も渦電流損も低下する。

電磁鋼板の磁気特性の劣化やトランスの騒音・振動は磁歪に起因する。磁歪低減のシンプルな対応は Si 量の増加で、6wt%Si で磁歪をゼロにできる。

電磁鋼板の機械特性改善は EV 用モータの高回転化には必須のテーマであるが、高機械強度化による磁気特性の劣化があり、両者のバランスを考慮した材料設計が必要になる。疲労強度も EV 用途では重要である。

電磁鋼板の材料要因は①成分（Si 量、物性と機械強度が決まる）、②集合組織 / 結晶粒方位分布（NO、GO の材質）、③結晶粒径（損失、ヒステリシス形状）、④板厚（渦電流損）、⑤被膜（鋼板表面の影響）が挙げられる。

電磁鋼板は溶解凝固行程、薄手化行程及び再結晶・被膜処理工程の改善により今後も進化を続ける。

電磁鋼板の基礎技術について開道先生の経験を踏まえた多岐にわたる講義を受けた。応用面からの要求に答える電磁鋼板技術は現在も更に進化していることが理解できた。

第 2 講

2023 年 6 月 16 日（金）@ふらっとにっぽり及び Web (Zoom)

講義：各論講義「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))

概要：

- モータや発電機の種類と電磁鋼板の使用法
- モータ鉄心などにおける電磁鋼板の励磁状態や応力歪状態とその影響
- 加工による電磁鋼板の特性変化
- 電磁鋼板におけるパワエレの影響
- モータ制御法に対する電磁鋼板の対応
- モータや発電機の損失における電磁鋼板鉄損の比率とモータにおける IEC 規格やトップランナー方式に対する電磁鋼板の対応

受講者数：59 名

記事：モータ・発電機を支える電磁鋼板技術を勉強する。電磁鋼板はステータの界磁磁束（φ_F）を電機子（ロータ）巻線に導き、鎖交させることにある。ステータ及びロータに用いられる電磁鋼板は磁束の通り道として機能する。最もシンプルなブラシ付 DC モータの例を見てみよう。永久磁石界磁型では、電磁鋼板は界磁継鉄としてステータで、電機子鉄心としてロータで用いられる。巻線電流界磁型では、ステータ及びロータで電磁鋼板が巻線と共に用いられる。ブラシレス DC モータや同期モータ、誘導モータ及びリラクタンスモータにおいても、同様に電磁鋼板は磁束の通り道として機能する。DC モータ、誘導モータ及びリラクタンスモータでは励磁周波数がロータ回転数に比例し、ステータ巻線電流界磁では界磁磁束密度 B_F が機器サイズ L に依存することを頭に入れておこう。総てのモータ応用ではデバイスへの組込みのため鋼板を加工することが必要であり、打ち抜き、曲げ加工、積層等が適用される。ステータやロータに用いるために、分割鉄心、螺旋巻鉄心、アキシャル巻鉄心等多種の構造が提案され、それらを実現する加工方法が開発されている。

発電機応用においても電磁鋼板の使用法は基本的にモータ応用と変わらない。基本的に NO 材が使用される。大型発電機において継鉄周方向と RD（ロール方向）を合わせる GO 材が用いられるのは特殊例である。

モータや発電機等のエネルギー変換機器の損失率 W/P（P：機器容量、W：損失）は $1/L$ 又は $1/P^{1/4}$ に比例する。従って、小型・低容量では低効率、大型・大容量では高効率と結論できる。具体的には W/P=0.1、10kVA の水車発電機より、W/P=0.01、10MVA のタービン発電機の損失 (%) が小さくなる。

モータ・発電機における電磁鋼板の対応の 5 点を整理する。

a　高トルク化：高 B 電磁鋼板及び高 μ 電磁鋼板の活用

b　高回転数化:高周波用電磁鋼板の低損失化、遠心力対応（機械強度の向上）

c　高出力化：高熱伝導化による温度上昇抑制、遠心力対応

d　低損失化：低鉄損化、システム総合損失の低減

e　その他：小型・軽量化のために高 B 材を適用、省空間化のために GO 材を利用、位置決めのための変位出力

モータ・発電機応用の際の電磁鋼板の問題点の実例を見てみよう。

①　まず励磁状態の把握が必要である。励磁状態は電源の駆動モード、鉄心の構造・形状及び歪み・応力による鉄心の特性変化に影響される。実装鉄心の性能算定はこれら励磁状態・磁束分布を考慮することによって、素材特性ベースの性能算定よりも実機に近い概算が可能になる。特に、歪・応力の影響を把握するの

が困難で、実機性能と算定値の差異が生じることに注意すべきである。

② 磁束分布の変化は 1) 鉄心形状、磁石着磁分布、非線形磁化曲線、2) 渦電流による磁束分布への影響、3) 歪分布、磁気異方性によって生じる。1) では空間的無効磁束や異相ズレによる時間的無効磁束の発生、磁束分布と磁歪による内部応力の発生に注意する。

③ 鉄心や機器の製造上の問題点は鉄心材料の加工、積層鉄心における層間結束及び積層鉄心のケースへの固定の各工程に存在する。電磁鋼板にも打抜歪やカシメ歪による加工劣化による素材特性の劣化があることに留意しよう。残留歪の分布は X 線回折法で、残留歪の磁区形成に与える影響は SEM で観察できる。打抜加工による鉄心の性能劣化の実例は素材 (A)、放電加工 (B) 及び打抜 (C) したモータ鉄心の鉄損トルクを比較して評価した例がある。劣化比率を (C-B)/B で定義すると、モータ鉄心の場合は 0.37 になる。弾性応力や塑性変形によって鉄損や磁化曲線は変化する。これら変化は電磁鋼板の結晶粒径にも依存する。

層間結束にはかしめ、溶接、接着・モールド及びボルト締めが存在するが、板形状の電磁鋼板を応用していくためには、必須の技術である。しかし、層間結束による磁気特性劣化や層間短絡があり、応用毎の評価と改善が必要になる。

積層鉄心の固定には焼き嵌め、圧入、モールド / 一体化、ボルト締めがあるが、磁気特性劣化、鉄損増加が見られ、0.01mm なる締付歪の精度の管理によって、特性及び鉄損低下を平準化している。

④ 機器の駆動・制御では PWM 制御による時間高調波が発生することが最も大きな問題である。モータ駆動を行う制御波形にはモータ駆動に関与しない高調波が含まれ、鉄心の電磁鋼板には高調波による損失が生じ、界磁側の永久磁石にも PWM 鉄損が発生する。空間高調波はスロット形状による高次高調波が主たる検討対象になる。対策はスロット開口部の狭幅化や磁性楔の適用がある。回転磁界による回転磁束にも磁壁移動による鉄損が NO 材及び GO 材に現れる。

⑤ 騒音、振動は電磁力と磁歪、更には共振によって発生する。一般に騒音は溶接コアよりも接着コアの方が小さい。

⑥ 熱の問題は層間熱伝達を考えることが多い。溶接コアよりも接着コアの層間熱伝達が小さい。

電磁鋼板に関する国内外の技術動向を見てみよう。国外では高効率モータ規制による需要拡大が、国内ではトップランナー基準の導入・拡大と省エネ車両 (xEV) の導入拡大が電磁鋼板技術の進展を担っている。電磁鋼板を使用する機器では高効率化規制に対して、銅損低減 / 低電流化した機器の開発、鉄損（渦電流損及びヒステリシス損）の低減された電磁鋼板の適用が推進されている。

電磁鋼板の新しい活用方法としては以下が検討されている。鉄心として応用するために必要な加工プロセスに対して劣化しない材質の開発や製造プロセスの高度化がある。GO 材を螺旋コア化し、モータ応用に GO 材を導入する。バルク継鉄を電磁鋼板から製造し、電磁鋼板の特性を生かす。

開道先生のモータ・発電機応用における電磁鋼板の適用例は多岐に渡るデータを駆使した広範な内容であった。電磁鋼板の適用に当たって如何に多くの検討がなされ、現在があるかが理解できた。

第 3 講

2023 年 7 月 14 日（金）@ふらっとにっぽり及び Web (Zoom)

講義：各論講義「トランスやリアクトルを支える電磁鋼板技術及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)）

概要：

- トランスやリアクトルの種類と電磁鋼板の使用法
- トランス鉄心における磁束、鉄損の分布
- トランスにおける騒音・振動
- 鉄損の増加（ビルディングファクター）と騒音振動への電磁鋼板の対応
- 電力系統におけるトランスやリアクトルと電磁鋼板の位置付け
- パワエレにおける電磁鋼板の役割
- 電磁鋼板の磁気特性などの測定法と規格測定値の解釈

受講者数：53 名

記事：トランス応用の電磁鋼板技術を勉強する。GO 材を用いたトランス及びリアクトルが主たる用途である。単相鉄心を用いたトランスには巻鉄心タイプと積鉄心タイプがある。巻鉄心は板状電磁鋼板を巻いてコアを作製し、積鉄心では打抜かれた板状電磁鋼板を積上げて、コアの部品を作製後、コアに組立てる。EI コアやカットコアも使用されている。三相鉄心には N タイプの 3 相 3 脚と C タイプの 3 相 5 脚がある。積層接合部は磁束の通り易さを目的として C、S 及び B タイプの 3 相鉄心が考案されている。基本的に GO 材がトランスには用いられるが、NO 材が EI コアや誘導異方性容易方向である RD(圧延方向) を利用して用いられることがある。巻鉄心の製造にはスリットされた電磁鋼板を巻成形した後焼鈍し、積鉄心では打抜きの後、焼鈍される。何れも成形・打抜後の焼鈍は必須である。

トランス、リアクトル応用においても電磁鋼板の役割は磁束 φ を介したエネルギー変換である。（電気エネルギー⇔磁気エネルギー）

従って、高出力励磁には磁束密度 B 及び励磁周波数 ω の高いことが第 1 に求められる。損失の最小条件は鉄損 = 銅損であり、モータ応用の場合と変わらない。機器効率はトランス容量 P が大型・大容量の場合に高い。大型・大容量のトランスでは低鉄損電磁鋼板を用いて設計すれば、高効率化できる。

一般商用機器用トランス、リアクトルに用いられる軟磁性材料は主として GO 材及び NO 材電磁鋼板と Fe 系アモルファスである。高配向 GO 材に対してレーザ照射を行った磁区制御材（細分化）がトランス、リアクトルに用いられている。トランス応用における普通材 (G)、高配向材 (P) 及び磁区制御材 (R) の $W_{17/50}$ を比較すると、単相及び三相積鉄心において全鉄損が G 材、P 材、R 材の順に低下しており、P 材の特徴が理解できる。G 材と P 材のトランス鉄損 B_F（ビルディングファクター、B_F= トランス鉄損 / 素材鉄損）を比較すると、G 材の配向度が低いために P 材よりもトランス鉄損 B_F が低い。これは G 材のコア磁路の磁束ショートカット効果が強いためである。

単相 GO 積鉄心の鉄損に与えるコーナー部積層法の影響を見てみよう。A 積鉄心はコーナー部が斜めに切断されており、上下左右の 4 部分を斜め切断面で対向させてコアを作製する。B 積鉄心ではコーナー部は積層間渡りで構成されており、配向方向が⇆⇅と交互積層されている。B 積鉄心では渡りが多いために、鉄損が増大し、B_F も大きくなる。積層鉄心の接合部に発生する鉄損は素材の特性（G、P、R）、ラップの影響及び積層部の数（単相積鉄心と 3 相積鉄心の比較）の影響を評価して、設計することが重要である。コーナー部の磁束分布の変化としての回転磁束や時間的無効磁束の評価も必要である。トランスの温度上昇による影響は、①電磁鋼板の飽和磁化が低下し、励磁電力が上昇する、②磁歪定数が上昇し、ヒステリシス損が上昇する、③抵抗率が上昇し、渦電流が低下するの 3 点が挙げられる。トランスの騒音・振動は電磁鋼板の磁歪に起因する。材質毎の磁歪評価を行い、磁歪の小さい電磁鋼板を適用することが求められる。

電力系統には電磁鋼板を使用したトランス、リアクトル及びフィルターが用いられる。BTB (Back To Back) を含めた直流送電、周波数変換には昇・降圧トランス、無効電力補償用リアクトル及び高周波フィルターが用いられる。電磁鋼板に求められる特性は恒透磁率（高透磁率）、低鉄損及び低次高調波である。

パワエレにもインバータ用トランス、昇降圧チョッパ用リアクトル及び他励式インバータ用直流リアクトルに電磁鋼板が用いられ、高周波依存性や重畳特性が重要視される。

変圧器には省エネを主題とする高効率化が求められ、用いられる電磁鋼板には低鉄損化が必須の課題である。そのために、薄手化、高 Si 化及び高配向化が検討される。TOC（Total Occupied Cost）を考慮した高効率電磁機器の普及の必要性もある。TOC は機器価格、定格時鉄損、定格時銅損及び維持費を加えた全使用期間の電磁機器のコストである。TOC を考慮すると用いられる電磁鋼板の低鉄損化は明確な目標になる。

電磁鋼板の特性測定方法について述べる。よく知られているように、素材特性の磁気測定にはエプスタイン試験（Epstein Test）と単板磁気試験器（SST：Single Sheet Tester）を用いる 2 種の方法がある。エプスタイン試験では定められた寸法（幅：30 ㎜、長さ：280 ～ 320 ㎜）の試験片を 4 の倍数で交互積層したフレームに組み立てる。最低でも 16 枚の試料が必要であり、磁路長は 940 ㎜なる指定値を用いる。ノイズは小さく、加工歪の影響を受けるが、モデルトランスとしての評価法と言える。単板試験法は 100 x 500 ㎜ ^{2} の試料を用い、GO 材を用いたヨークで閉磁路を形成して測定する。試料が 1 枚のため板間バラツキはあるが、磁路長の影響はなく、ノイズは大きいが、均一磁界部で測定すると真値が得られるという特徴がある。これら測定法の誤差要因は測定法による本質的な誤差、測定磁気回路による誤差及び試料による誤差のあることを認識しておく必要がある。エプスタイン試験では焼鈍前後の鉄損が議論される。また、単板磁気試験には磁界測定法の異なる 2 種があり、磁路の影響が小さいが、ノイズの影響が大きい H コイル法とヨーク部の励磁による誤差があるが、ノイズの影響の小さな電流法がある。素材磁気特性の真値を求めるために試料切断幅変化による差分法も用いられている。これら電磁鋼板の磁気測定法はその原理、測定磁気回路の限界及び測定に用いるパラメータの運用法等によって得られる磁気特性は変化するため、得られた測定値の内容を吟味する必要もある。電磁鋼板を応用により近い形状である鉄心に加工し、その鉄心性能を評価する必要もある。回転機損失評価である鉄心全体評価は①入力電力より評価する電動機法、②機械入力より評価する発電機法、③損失を直接評価するカロリー法があり、局部評価には表面測定や探索コイル法が用いられる。②の方法では鉄損トルク T による鉄損 W 計算において実形状での評価が 1 枚の試験片で可能である。局部評価の表面測定には赤外線カメラ、サーミスタ法がある。

鉄心や機器の性能算定には、電磁鋼板特性のモデル化が必要で、算定値と実測値の差からは未知因子が発見できる可能性がある。

電磁鋼板のトランス、リアクトル応用における実際と電磁鋼板への要求と問題点が広範に把握できた。同時にエプスタイン法及び単板試験器を用いた測定法についても学習した。特に電磁鋼板の素材特性と応用時の鉄心特性の差が生じる原因についても理解を深めることができた。

2023 年後期講座予定

第 34 期 BM 塾ではハイブリッド開催で、大同特殊鋼理事の入山恭彦先生による「希土類ボンド磁石」関連の 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 9 月 22 日（金）@ ふらっとにっぽり ＆ Zoom

講義：各論「ボンド磁石の歴史と基礎知識」

講師：入山　恭彦（大同特殊鋼㈱　技術開発研究所　理事、JABM 理事）

第 2 講

2023 年 10 月 31 日（火）@ふらっとにっぽり ＆ Zoom

講義：各論「希土類ボンド磁石」

講師：入山　恭彦（大同特殊鋼㈱　技術開発研究所　理事、JABM 理事）

第 3 講

2023 年 11 月 21 日（火）@ふらっとにっぽり ＆ Zoom

講義：各論「ボンド磁石に関する最近の開発状況」

講師：入山　恭彦（大同特殊鋼㈱　技術開発研究所　理事、JABM 理事）