



入門講座

電磁鋼板入門－1

磁性材料と電磁鋼板

Magnetic Materials and Electrical Steel

山口 広

Hiroi Yamaguchi

JFE スチール（株）
スチール研究所 電磁鋼板研究部
主任研究員

1 はじめに

どうして鉄は磁石にくっつくのか？と聞かれたら、どう答えるだろう。磁石同士はN極とS極とが引き合うようにくっつくけれど、磁石と鉄の場合はどうなるのか？

答えは鉄が磁石になるから。磁石のN極を鉄に近づけると、鉄はS極を向けて磁石になり、磁石にくっつくのである。鉄が磁石になっている証拠を示すことは難しいが、磁石に釘やクリップをたくさんぶら下げる実験を思い出せば、磁石と接していない釘やクリップも磁石となっていなければ、その先まで連なってくっついていないことを説明できない。

この磁石になりやすい性質を追求した材料が電磁鋼板で、Fe-Si合金の総称である。1900年、Hadfieldらにより鉄に珪素を添加することで磁気特性が向上することが発見されて以来、珪素鋼板とも呼ばれる電磁鋼板は主に変圧器、回転機の鉄心材料として広く産業界で利用され、必要不可欠な材料となっている。

磁気特性に優れ、エネルギー損失の少ない電磁鋼板は、電力量の増加に伴う社会インフラの整備とともに、その生産量は増加しているが、昨今の地球温暖化対策の観点から、環境・エネルギー・経済のバランスの取れた持続的な社会の構築が

求められる中、電磁鋼板の重要性はますます高まっている。

2 磁性材料

磁気を有する材料は磁性材料と呼ばれ、軟質磁性材料と硬質磁性材料に大別される。前者は外部磁場によって磁石となりやすい材料であり、後者は外部磁場がなくても磁石のままだ材料である。代表的な磁性材料を表1にまとめているが、実用的な磁性元素は26Fe, 27Ni, 28Coの3つで、必ず3元素のうちのいずれかが含まれている。特にFeは高価なCo, Niと比較して入手しやすく、Fe系の合金や酸化物は広く磁性材料として利用されている。

磁気は原子核を回る電子の磁気スピンに起源を持つが、スピン同士も強い相互作用を有するため、磁気特性は原子配置を決める結晶構造にも強く依存する。

磁化しやすい結晶軸は結晶系によって異なり、bccのFeであれば<001>軸が磁化容易軸となる¹⁾。Fe, Co, Niについて結晶構造などを表2にまとめた。いずれも異なる結晶系を有し、磁化容易軸も異なる点が興味深い。これらの合金相には規則相を生じるものもあるため、3元素を組合せた合金だけでも多彩な磁気特性が期待できることがわかる。最大の磁化

表1 代表的な磁性材料

軟質磁性材	金属	Fe, Fe-Si(電磁鋼板)、Fe-Al, Fe-Al-Si(センダスト)、Fe-Ni(パーマロイ)、Fe-Co(パーメンジュール)、アモルファス、ナノクリスタル
	酸化物	Mn-Znフェライト、Ni-Znフェライト、Cu-Znフェライト、Ni-Zn-Cuフェライト
硬質磁性材	金属	KS鋼、MK鋼、AlNiCo(アルニコ)、SmCo(サマコバ)、FeNdB(ネオジム)、SmFeN
	酸化物	Baフェライト、Srフェライト

量、飽和磁束密度Bsは鉄コバルト合金で得られる。

また、これらの磁性元素にSiやAl等を添加することで、材料の比抵抗が増加して磁化時に生じる渦電流を低減させて磁気損失を抑制したり、磁化しやすさの指標である透磁率が增大したり、前述の磁気異方性や磁化による寸法変化（磁歪）を制御できるなど、多岐にわたる工業的な応用が可能である。

例えば、Fe-9.5Si-5.5Alの組成をもつセンダストは非磁性元素のSiとAlを合計で15%も添加して飽和磁束密度は低下するが、透磁率は純鉄の20倍以上になる²⁾。

半導体分野では、SiやGeのIV族元素が代表的であるが、IV族をⅢ - V族元素の組み合わせに置き換えたGaAs, GaN, InPや、Ⅱ - VI族元素に置き換えたZnO, ZnSe、あるいはIV族同士の組合せであるSiC等、価数を考慮した成分設計で、種々の化合物半導体が実用化されている（図1）。半導体の結晶構造は共有結合性の強いダイヤモンド構造かその複合格子の閃亜鉛鉱型構造に限られるので、材料設計において検討すべき因子が比較的少ないと考えられる。

一方、磁性材料分野においても、26Fe, 27Ni, 28Coを含まない化学組成で、スピン配列に近い24Cr, 25Mn, 29Cuの化合物やより広い磁性材料の探索、開発はなされている。しかしながら、多彩な結晶構造を有し、微視的なスピン、バンド構造から巨視的な形状、サイズに至るまで、非常に多くの因子が複雑に影響を及ぼしあう磁性材料の設計は容易ではない。現時点ではFe, Ni, Coを含まない磁性材料が実用レベルに達しているとはいえないが、マテリアルズ・インフォマティクスなどのAI活用により、広範で多次元的な磁性材料の開発が現実になりつつある。

3 電気と磁気

電磁銅板の磁性材料としての特性や磁化挙動を理解するためには、ある程度の電磁気学の知識が必要となるが、それらはマクスウェル方程式に集約される。

表2 Fe, Co, Niの物性および磁気特性の比較

	結晶構造	磁化容易軸	磁化困難軸	磁気モーメント (飽和磁化)	磁気異方性定数 K_1	キュリー温度
Fe	bcc	<001>	<111>	$2.219\mu_B$ (2.2T)	$4.2\times 10^4\text{J/m}^3$	790℃
Co	hcp*	<0001> c軸	<1000> a軸	$1.715\mu_B$ (1.8T)	$-5.1\times 10^3\text{J/m}^3$	1150℃
Ni	fcc	<111>	<001>	$0.604\mu_B$ (0.6T)	$5.3\times 10^5\text{J/m}^3$	360℃

hcp* :420℃以上ではbcc

							IIIA	IVA	VA	VIA
							5 B	6 C	7 N	8 O
							13 Al	14 Si	15 P	16 S
24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

図1 元素周期律表（部分）（Online version in color.）

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{i} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$\mathbf{H}$ は磁場 [A/m]、 $\mathbf{D}$ は電束密度 [C/m²]、 $\mathbf{E}$ は電場 [V/m]、 $\mathbf{B}$ は磁束密度 [Wb/m², T]、 ρ は電荷密度 [C/m³]、 $\mathbf{i}$ は電流密度 [A/m²]である。rotはベクトル演算子の外積「 $\nabla \times$ 」で回転を表し、ベクトル場に対して右回転のベクトルが得られ、右ネジの法則に相当する。divはベクトル演算子の内積「 $\nabla \cdot$ 」で発散、湧き出しを表すスカラー量で、ベクトル場の総和の変化を表す。

式 (1) は右辺の第1項だけを考えると、電流 (密度) $\mathbf{i}$ が流れるとその周りに時計回りの磁場 $\mathbf{H}$ が生じることを表しており、アンペールの法則として知られている。導線をコイル状に巻いて電流を流せば、コイル内に巻き数に比例した磁場が生じる。空芯のコイル内に電磁鋼板などの鉄心を入れると、コイル内に生じた磁場で鉄心が磁化して電磁石が得られる。軟質磁性材料においては素材の透磁率が高く磁化しやすいほど、磁気回路を小さくでき、励磁電流は少なくて済むため、いわゆる銅損を低減することができる。回転機器であれば、高い磁束密度を生かし、小型で高トルクのモータが得られる。第2項は電場の時間的変化によっても磁場が生じることを示している。

図2はリング状鉄心による変圧器の動作を示している。1次巻線に流れる1次電流により鉄心が励磁されてリング試料内

を磁束が流れ、2次巻線に2次電流が流れる。1次と2次の巻数比 N_1/N_2 に比例して電圧比 V_1/V_2 が増減するため、交流の電圧を簡単に変化させることができる。この磁気回路は磁性材の磁気特性を評価する磁気測定器等価で、1次巻線の電流で生じる磁場により磁性材が励磁され、その磁化量を2次巻線の電圧から読み取り、電力計に接続することで鉄損や磁束密度等の磁気特性を求めることができる。詳細は次節で述べる。

式 (2) はファラデーの電磁誘導の法則にあたり、回路内を貫く磁束 (密度) が変化すると誘導起電力が生じることを表している。右辺の負符号は磁束の変化を打ち消す方向に誘導起電力が生じるため、レンツの法則と呼ばれる。電磁鋼板を交流で磁化した場合には、この誘導起電力によって鋼板内に生じた渦電流による損失が加わる。そのため、板厚を薄くしたり、Si等の高比抵抗元素を添加したりすることで鉄損の低減が図られる。

高い対称性を持つ電気と磁気とで決定的に異なる点が式 (3) と式 (4) である。図3に示すように、電荷が正負の単電荷で存在できるのに対し、磁荷はN極またはS極単独では存在できず、磁気双極子として閉じた磁場 (磁化ベクトル場) を

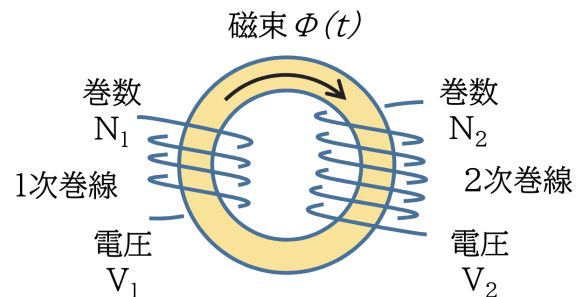


図2 リング鉄心による変圧器の動作 (Online version in color.)

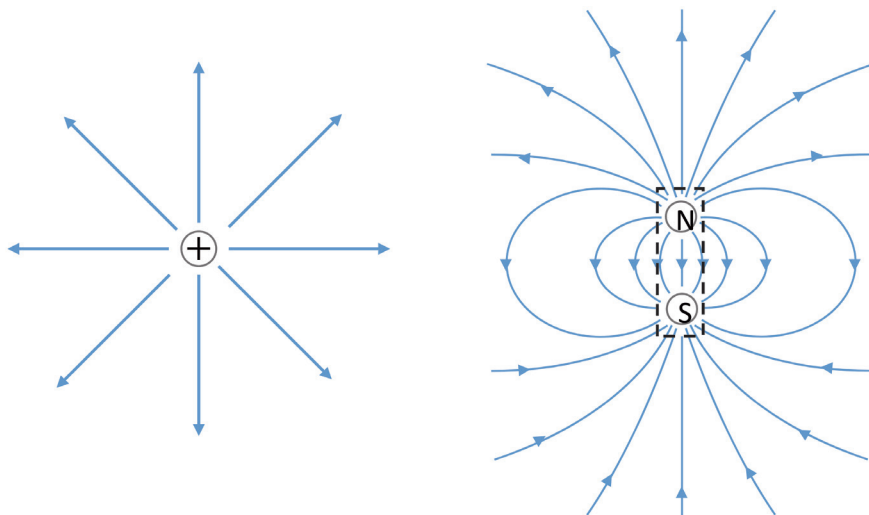


図3 単電荷（左）と磁気双極子（右） (Online version in color.)

形成する。電束は発散する、すなわち湧き出すのに対し、磁束は途中で生成、消滅することはなく、発散、すなわち湧き出しは零となる。

磁気の起源を磁荷とするか電流素片とするかで磁化の定義は異なるが、本稿では磁性分野の慣例に従った記述としている。式 (1) の電流密度 $\mathbf{j}$ に対応する項は式 (2) には現れない。

磁束は本当に生成、消滅しないのか？地磁気を考えてみよう。南極 (N 極) を出た磁束が北極 (S 極) まで途切れることなく繋がっているため、我々は地球上のどこにいても方位磁石で北を知ることができる。2 万 km におよぶ磁束の流れをイメージしてみよう。

図3右の磁気双極子を上がN極、下がS極の磁石に見立てると、磁石内には逆向きの磁界が発生し、磁性体の磁化を弱める減磁力が働く。これが反磁界の効果である。紙面の下から上向きに外部磁場が加わった時の磁性体の磁化状態と考えた場合には、外からの磁界を弱める作用を生じる。磁気に関する現象が厄介なのは、この反磁界効果により磁化の大きさが形状やサイズの影響を強く受けることや、導線内にしか流れない電流と異なり、いわゆる磁力線として材料の外に漏れる磁束が存在することに原因があり、それらが磁性材料の電磁界解析や等価な磁気回路の考慮をより困難なものとしている。電動車用の磁石モータも例外ではなく、高回転化に対応した強度対策とともに、よりトルクを高め、鉄損を低減するため、電磁銅板の磁気特性だけでなく、磁石の大きさや配置などに工夫を凝らしたデザインへと、日々進化し続けている。

4 電磁銅板の磁化挙動

磁性材料が外部磁場 H を受けた時の磁化挙動を示したのが J - H 曲線である。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} \quad (5)$$

$\mathbf{J}$ は材料の磁化 [Wb/m^2 , T]、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ は真空の透磁率 [H/m] である。式 (5) に示したように、磁束密度 $\mathbf{B}$ は外部磁場 $\mathbf{H}$ と材料の磁化 $\mathbf{J}$ の和で表されるが、強磁性体では前者が無視できるほど後者が大きいため、特に軟磁性材においては慣例的に B - H 曲線として記述されることが多い。図4左に磁化 $B=0$ の消磁状態から、外部磁場 H を変化させた時の磁束密度 B の挙動を B - H 曲線で表す。

強磁性体は自発磁化を持ち、磁壁で区切られた磁区と呼ばれる構造を有しているが、外部磁場がない場合、外に磁化が漏れないように磁区が配置され、磁化は零に見える (①)。

原点からスタートした曲線は初磁化曲線と呼ばれ、一般に直線とはならず非線形な磁化挙動を反映した曲線となる。交番磁界下ではその後、正負方向に磁化を繰り返すが、 B - H 曲線は二度と原点を通ることはない。

外部磁界が最大となった (②) 後、磁界の強さを減じても初磁化曲線上を戻らず、 $H=0$ の y 切片は零とならない (③)。これは外部磁場を零に戻しても材料の磁化が完全に零とはならないため、この値を残留磁化 B_r と呼ぶ。さらに負方向への磁界を強くすると、 $B=0$ となる (④) が、この値は保磁力 H_c と呼ばれる。磁化されていない状態に戻すために必要な反対向きの外部磁場の強さで、抗磁力とも呼ばれる。第三、第四上限でも同様の挙動が繰り返される。磁化量を決める磁区構造の変化も合わせて記した。

このように磁界の強さの変化に対して、材料の磁化が遅れをもって追従するため、ヒステリシス曲線が描かれる。ヒステリシス曲線を一周する間に消費されるエネルギーがヒステリシス損であり、この曲線で囲まれた面積に等しい。③点から④点へは、正の磁化を減じるために負の向きの外部磁界を

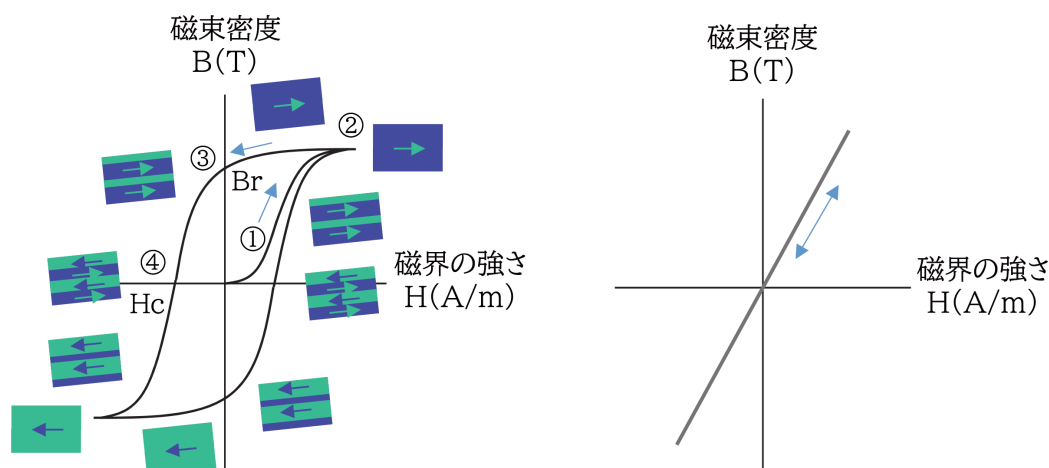


図4 軟磁性材の B - H 曲線 (Online version in color.)

かける必要があり、この余計な仕事が生じる原因と考えると理解しやすい。ヒステリシス曲線は材料固有で、多くの磁化モデルが提唱されているが、ヒステリシスを正しく予測することは難しく、電磁界解析のシミュレーションでは実測に基づくデータベースが必要となる。

交流磁化の場合、磁束密度の変化を妨げるように誘導起電力が生じて渦電流が流れるため、損失はヒステリシス損に、その抵抗損である渦電流損も加えた値となる。

この閉じたヒステリシス曲線で囲まれた面積が鉄損と呼ばれる単位重量当たりの損失に相当し、熱エネルギーとして失われる。鉄損は式 (6) で表される。図4右は理想的な軟磁性材料の磁化挙動を表したものである。外部磁場の変化に比例して、材料の磁化Bが増減し、ヒステリシスを生じることなく原点に戻り、反転した磁界下の第三象限でも同様の直線的な磁化挙動を示す。透磁率は一定で磁化量は線形に変化し、磁気回路の設計が容易となる。磁化による損失、すなわち鉄損は零である。

$$P = \frac{1}{\rho T} \int H \frac{dB}{dt} \cdot dt \dots\dots\dots (6)$$

縦軸Bと横軸Hで囲まれた図形の単位の次元は以下のようになり、単位重量あたりのエネルギー損失となっていることが確認できる。

磁束密度B [T] × 磁界の強さH [A/m] ÷
材料の密度 [kg/m³] × 周波数 [Hz]
= [Wb/m²] × [A/m] × [m³/kg] × [1/s]
= [V・s・m/kg] × [A・m・s] = [W/kg]

表3に電磁鋼板の鉄損要因とその低減策をまとめた。ヒステリシス損には、磁壁の移動を妨げてヒステリシスを生じる要因となる鋼中の不純物や残留歪、表面のモルフォロ

ジー等が影響する。また結晶粒の方位も重要であり、方向性電磁鋼板であれば、圧延方向へ磁化容易軸の<001>軸、無方向性電磁鋼板であれば、回転機の回転面内ヘランダムな方向に<001>軸を有する結晶粒の集積度を高めることが有効である。

電磁鋼板とは反対に、外部磁場がなくても大きな残留磁化を有するのが硬質磁性材料で、いわゆる永久磁石である。ヒステリシス曲線は四角くなり、飽和磁化に対する残留磁化の比は角型比と呼ばれ、1に近いほど良い磁石であり、磁化とは逆向きの非常に大きな外部磁場をかけないと磁化反転しない。磁石においては、いかに減磁しにくいかが要求される。

扱いにくい磁気ヒステリシスであるが、磁気記録はこのヒステリシスを利用しており、適度な外部磁場で磁化し、外部磁場の除去後も磁化が記録として残留する性質が重要となる。外部磁場零で正負2点を持つので二値化 (1と0)、いわゆるデジタル化に都合が良く、必要に応じて消去 (消磁)、上書きすることも可能である。磁気記録用の材料には、軟質磁性材料と硬質磁性材料の中間的な特性が求められる。

鉄損が材料の磁化過程における熱的損失であることから、精密な温度計測を行うことで鉄損を直接求めることが可能である。図5は赤外線サーモグラフィにより、三相変圧器鉄心の発熱量から鉄損を求めた例である。明るい部分は発熱による損失が大きい領域を示す。

熱的損失P [W/kg] は比熱C_p [(J/K) /kg] と温度上昇率 [K/s] の積で式 (7) のように表される。

$$P = c_p \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

B = 1.7T励磁時の鉄心全体の温度変化dT/dtにFe-3% Si合金の比熱C_pを掛けて、足し上げると、式 (6) で得られる磁気測定による値と等しい鉄損が熱的損失として得られる³⁾。

変圧器鉄心は、方向性電磁鋼板の磁化容易方向である圧延方向が磁束流れと平行になるよう組み上げられ、いっそうの鉄損低減が図られている。励磁コイルが巻かれている脚を図中左からU脚、V脚、W脚とすると、中央V脚の付け根はT接合部と呼ばれ、発熱が最も大きい。三相励磁下においてT接合部では磁束流れが回転するため、圧延方向の磁気特性に特化した方向性電磁鋼板の場合、局所的な損失は脚部の3倍以上となっている。大型鉄心においては回転磁化の生じる箇所は限局的なため、方向性電磁鋼板が使用されるが、小型のEIコアや、モータコアのように回転磁化が主体となる場合は無方向性電磁鋼板が使用される。

U脚の右側とW脚の左側の損失が各脚の反対側よりわずかに損失が大きくなっている。この箇所は鉄心を大局的に見た場合の内周側に相当していて、磁束が鉄心内を均一ではな

表3 電磁鋼板の損失因子とその対策

損失	影響因子	対策
ヒステリシス損	結晶方位	集積度向上
	不純物	低減
	表面性状	平滑化
	残留歪	歪取り焼鈍
渦電流損	板厚	薄手化
	比抵抗	Si等の増加
	結晶粒径	微細化
	磁区	細分化
		引張応力付与

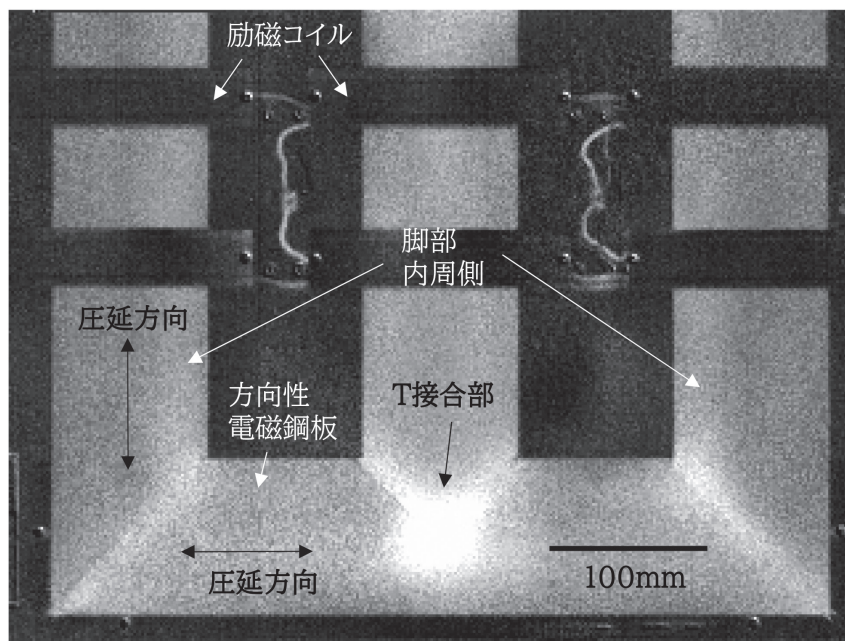


図5 三相変圧器鉄心の $B = 1.7\text{T}$ 励磁時の温度分布

く、磁路長が短くなるよう、より内側を流れるために起こる現象である。磁束の偏りはシミュレーション計算でも予測されるが、熱的損失分布でも確認することができる。

変圧器やモータに組んだ時の鉄損は、素材そのものの鉄損よりも増加する場合が多く、その比率はビルディングファクタ (BF) と呼ばれる。実使用下での局所的な鉄損増加箇所を可視化し、BFを抑える鉄心設計や素材選定を行うことも重要である。

5 電磁鋼板の特性評価

磁性材料の磁気測定は図2に示したように、リング状の試料に励磁巻線を施して直流磁化曲線やヒステリシス曲線を計測するのが一般的な手法であるが、測定ごとに励磁巻線を巻かなければならず、またリング状試料を準備できない場合も多い。長方形試料の磁気特性を簡便かつ精度良く測定する手段としては、以下の二つの代表的な測定法がある。

一つはエプスタイン試験器を用いた測定法で、短冊状の試験片を井型に多数枚積層して組んで閉磁路を形成し、四辺に巻かれた1次コイルおよび2次コイルで、磁界の強さ H と材料の磁束密度 B を計測する方法である。もう一つは単板磁気試験器 (SST: Single Sheet Tester) を用いた測定法で、エプスタイン試験器が多数の試験片を必要とするのに対し、 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ の試料一枚で計測することが可能である。ただし、単板では閉磁路を形成できないため磁束を還流させるためのヨークが必要であり、測定された鉄損にはヨークに

よる損失が含まれる点に注意しなければならない。

電磁鋼板に対応する規格は材質と測定法の2つに大分される。表4にまとめたように国際規格IEC (International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議) の60404シリーズと国内規格のJIS (日本工業規格) のC255xシリーズがあり、相互に整合性が取れるよう制定と改訂が進められている⁴⁾。

材質規格は鋼板の厚さと交流で励磁した際の鉄損の最大値によって分類される。無方向性電磁鋼板の場合、磁束密度 $B = 1.5\text{T}$ 、周波数 50Hz の交流励磁下における鉄損値がグレード分けに用いられる。磁化しやすさの指標として、磁界の強さ $H = 5000\text{A/m}$ での磁束密度も有力な指標となる。それぞれ便宜的に $W15/50$ [W/kg], $B50$ [T] と表記される。方向性電磁鋼板の場合は、磁束密度 $B = 1.7\text{T}$ 、周波数 50Hz の鉄損値 $W17/50$ [W/kg] によりグレード分けされる。結晶粒の磁化容易軸 $\langle 100 \rangle$ 軸の圧延方向への配向度は方向性電磁鋼板の製品品質を決定する重要な因子であり、結晶配向度に最も敏感な磁界の強さ $H = 800\text{A/m}$ での磁束密度 $B8$ [T] が評価指標として重用される。

測定法規格には、磁気測定の試験方法、寸法形状、表面絶縁抵抗、密度抵抗率や占積率などの計測方法がある。電磁鋼板は渦電流損低減を目的に、板厚は一般的に 0.35mm 以下に仕上げられるが、この薄鋼板を必要な鉄心の厚みまで数十から数千枚積層して使用するため、板厚偏差にも高い精度が要求される。また、積層鋼板間で短絡電流が流れると渦電流損が増加するため、鋼板表面の絶縁特性も要求される。いずれ

表4 電磁鋼板のIEC規格とJIS

	IEC規格		JIS	
磁性材料の分類	60404-1	Ed3.0/2016		
電磁鋼帯の絶縁被膜	60404-1-1	Ed1.0/2004	C2557	2014
セミプロ無方向性電磁鋼帯	60404-8-3	Ed3.0/2005		
フルプロ無方向性電磁鋼帯	60404-8-4	Ed3.0/2013	C2552	2014
方向性電磁鋼帯	60404-8-7	Ed5.0/2020	C2553	2019
中周波用薄電磁鋼帯	60404-8-8	Ed2.0/2017	C2558	2015
Fe基アモルファス	60404-8-11	Ed1.0/2018		
エプスタイン試験器による磁気測定法	60404-2	Ed3.1/2008	C2550-1	2011
単板試験器による磁気測定法	60404-3	Ed2.2/2010	C2556	2015
電磁鋼帯の寸法・形状の測定法	60404-9	Ed2.0/2018	C2550-2	2020
中周波磁気特性の測定法	60404-10	Ed2.0/2016	C2550-3	2019
電磁鋼帯の表面絶縁抵抗の測定法	60404-11	Ed2.0/2021	C2550-4	2019
電磁鋼帯の密度・抵抗率・占積率の測定法	60404-13	Ed2.0/2018	C2550-5	2020
Fe基アモルファスの単板磁気測定法	60404-16	Ed1.0/2018		
方向性電磁鋼帯の磁歪測定法	60404-17	Ed1.0/2021		

も電磁鋼板の重要な品質管理指標となっている。

2021年には変圧器騒音の指標となる電磁鋼板の磁歪測定法が規格化された。2018年のFe基アモルファス関連の規格とともに、IEC/TC68（磁性合金および磁性鋼に関する Technical Committee）の日本委員会がこれら国際規格の制定に大きく貢献している。

6 おわりに

カーボンニュートラル問題解決のため、エネルギー分野ではより省エネに貢献する高効率変圧器のための方向性電磁鋼板、自動車分野では電気自動車（EV）やハイブリッド車（HEV）向けの高効率モータのための無方向性電磁鋼板の需要がますます高まっている。

次連載以降で、無方向性電磁鋼板および方向性電磁鋼板についての技術開発変遷や製造プロセス、モータや変圧器にお

ける利用技術や解析手法、品質管理等について紹介していく。

限られた紙面での解説となってしまったが、磁性に興味を持たれた方は成書^{5,6)}を参考に理解を深めていただきたい。

参考文献

1) R.Bozorth: Ferromagnetism, Springer-verlag, (1951).
2) 増本量, 山本達治: 日本金属学会誌, (1937) 1, 127.
3) 山口広, 今西大輔, 石田昌義, 井上博貴: マグネティックス研究会 MAG-11-129, (2011), 1.
4) 岡部誠司, 山口広, 和嶋潔: まぐね, 10 (2015) 5, 234.
5) 近角聡信: 強磁性体の物理 (上) (下), (1978), (1984).
6) 電気学会 マグネティックス研究会編: 改訂 磁気工学の基礎と応用, (2013).

(2022年9月28日受付)