

# JFE スチールグループの磁性材料

## Magnetic Materials in JFE Steel Group

尾田 善彦 ODA Yoshihiko	JFE スチール	スチール研究所	主席研究員・博士 (工学)
山口 広 YAMAGUCHI Hiroi	JFE スチール	スチール研究所	電磁鋼板研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)
高下 拓也 TAKASHITA Takuya	JFE スチール	スチール研究所	ステンレス鋼・鉄粉研究部 主任研究員 (課長)・博士 (工学)
吉田 裕史 YOSHIDA Hirofumi	JFE ケミカル	ケミカル研究所	磁性材開発センター 参事

### 要旨

JFE スチールグループでは、1954 年に無方向性冷間圧延電磁鋼板、1959 年に方向性電磁鋼板の製造を開始し、最近では 1993 年の 6.5% Si 鋼板 (スーパーコア<sup>®</sup>) を初めとして、種々の電磁鋼板を開発してきた。また、軟磁性材料への多様化するニーズに応え、圧粉磁心用鉄粉や MnZn フェライト等、数 10 Hz から数 MHz の広い周波数域をカバーする軟磁性材料をラインナップしている。本稿では、各種電磁鋼板と軟磁性材料の概要と代表的な製品群を紹介する。

### Abstract:

Since the first production of cold rolled non-oriented electrical steel sheets in 1954, grain oriented electrical steel sheets in 1959 and 6.5% Si steel sheets (Super Core<sup>TM</sup>) in 1993, JFE Steel group has developed various kinds of electrical steels, including iron powder and MnZn ferrite, etc. to meet diversifying needs with a lineup of soft magnetic materials that cover a wide frequency range from commercial frequency to MHz order.

## 1. はじめに

JFE スチールでは 1954 年に無方向性冷延電磁鋼板、1959 年に方向性電磁鋼板の製造を開始して以来、種々の電磁鋼板を開発しており、最近では鋼中の Si 量を高めた 6.5% けい素鋼板や板厚方向に Si 分布を付与した Si 傾斜磁性材料も開発している。これら電磁鋼板の用途は変圧器、ハイブリッド電気自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の駆動モータ、高効率エアコン、産業用で使用される高効率誘導モータ、水力・火力発電機に使用される大型回転機、太陽光発電用リアクトル等多岐にわたり、電磁鋼板への要求特性も多様化している。

さらに JFE スチールでは数 kHz~数 10 kHz オーダーの周波数域で駆動される電気機器に対応した圧粉磁心用絶縁被覆鉄粉も開発した。圧粉磁心は複雑形状の加工が可能であり、3 次元的な磁気回路も構成できることからアキシシャルギャップモータ等への適用が期待されている。

一方、パワー半導体の進歩により電子部品のスイッチング周波数も高周波化しており、これに伴い発生するノイズも高周波化している。このため MHz オーダーの高周波ノイズを除去できる高抵抗かつ高透磁率の MnZn フェライトを JFE ケミカルで開発した<sup>1)</sup>。

これら各種磁性材料の開発により、JFE グループでは図 1 に示すとおり数 10 Hz から数 MHz の広い周波数域をカバーする軟磁性材料をラインナップしている。本稿ではこれら磁

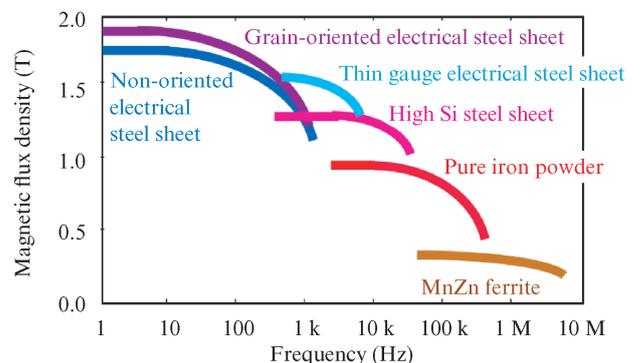


図 1 各種材料の適用範囲

Fig. 1 Applicable range of various soft magnetic materials

性材料の特長と用途について概説する。

## 2. 電磁鋼板

### 2.1 方向性電磁鋼板

方向性電磁鋼板は、圧延方向の磁気特性が非常に優れた 3% Si 鋼である。方向性電磁鋼板は、主に変圧器の鉄心材料として利用され、その鉄損特性は変圧器のエネルギー効率に大きな影響を及ぼすため、省エネルギー、CO<sub>2</sub> 削減を通じ社会に大きく貢献する素材である。

変圧器の省エネルギーに対する社会的ニーズの高まりに応じて、日本ではトップランナー制度<sup>2)</sup>、米国ではエネルギー省の DOE 規制<sup>3)</sup>、欧州では EcoDesign 指令<sup>4)</sup> といった

2023 年 3 月 22 日受付

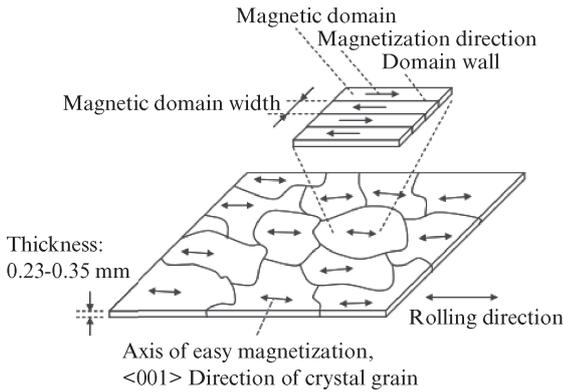


図2 方向性電磁鋼板の結晶学および磁気的特徴

Fig. 2 Schematic diagram of crystallographic and magnetic features of grain oriented electrical steel sheet

厳しい変圧器の効率規制が行われるようになってきた。トップランナー制度は、旧 JIS 品に比べ損失 30% 低減，エネルギー変換効率約 99% という世界最高水準レベルを目標として、2006 年度の油入変圧器に対する省エネ法特定機器規制より開始された。変圧器の省エネ技術の進歩に伴い、2014 年度からは第二次判断基準への切り替えが義務づけられ、現在では第三次判断基準が検討されており、より一層の高効率化が求められると推定される。JFE スチールは変圧器の省エネルギー，CO<sub>2</sub> 排出量削減の社会的要請に応えるべく、一貫して方向性電磁鋼板の低鉄損化技術を追求している。

方向性電磁鋼板の結晶学的特徴を図 2 に示す。板厚 0.23~0.35 mm の鋼板に対して、板厚を貫通するミリメートルオーダーの結晶粒が圧延方向に磁化容易方向（bcc の <001> 方向）へ配向した組織になっている。

方向性電磁鋼板の磁化を担うのは、磁化容易軸に平行および反平行の自発磁化を有する 180° 磁区で、磁区の境界は磁壁で区切られている。方向性電磁鋼板の交流磁化とは、磁壁が移動して磁化方向と平行な磁区幅が増加あるいは減少を繰り返す現象であり、その磁壁移動で生じる損失がいわゆる鉄損である。鉄損は式 (1) のとおり、ヒステリシス損 ( $W_h$ )、古典的渦電流損 ( $W_{ce}$ )、異常渦電流損 ( $W_{ae}$ ) が

ら成る。

$$W = W_h + W_{ce} + W_{ae} \dots\dots\dots (1)$$

ヒステリシス損は鋼板内部の析出物や介在物により磁壁移動が妨げられるのが原因であり、C, N, O, S などの不純物元素は極限まで低減するのが望ましい。また方向性電磁鋼板の圧延方向と結晶粒の磁化容易軸のなす角が小さいほど磁化しやすくヒステリシス損が低下するため、結晶方位の集積度を高めることが有効であり、この集積度に依存した磁束密度の優劣により、方向性電磁鋼板は HGO (High induction Grain Oriented steel) と CGO (Conventional Grain Oriented steel) に分類される。

古典的渦電流損は交流磁化による電磁誘導で生じる渦電流損失で、板厚減少や Si 添加により低減できる。JFE スチールの方向性電磁鋼板の板厚は 0.23~0.35 mm, Si 量は冷間圧延性等を考慮し、約 3% である。

異常渦電流損は磁壁移動に起因する損失で、磁区幅を小さくすることで低減でき、結晶粒の微細化や鋼板表面の絶縁被膜による引張応力の向上が有効である。また、物理的に磁区幅を減少させる手法として、鋼板に局所ひずみを導入する方法と鋼板表面に溝を形成する方法がある。

前者は歪取り焼鈍により磁区細分化効果が消失するため(非耐熱型磁区細分化材)、積鉄心型変圧器に用いられる。JFE スチールでは、効率よく局所ひずみを導入する方法で、低鉄損と騒音特性の両者に優れた製品シリーズ「JGSE<sup>®</sup>」を製造しており好評を博している<sup>5)</sup>。

後者は電解エッチングを用いた耐熱型磁区細分化手法<sup>6)</sup>を適用し、歪取り焼鈍が必要な巻鉄心型変圧器に用いられる。製品シリーズ名は「JGSD<sup>®</sup>」である。

現在の当社の方向性電磁鋼板の製品ラインナップを図 3 に示す。お客様の多様なニーズにお応えするため、「JG」「JGS<sup>®</sup>」「JGH<sup>®</sup>」「JGSD<sup>®</sup>」「JGSE<sup>®</sup>」「JGHE<sup>™</sup>」の 6 種をシリーズ化している。「JG」シリーズは一般的な方向性電磁鋼板で、CGO に該当する。「JGS」シリーズは当社の最高級品

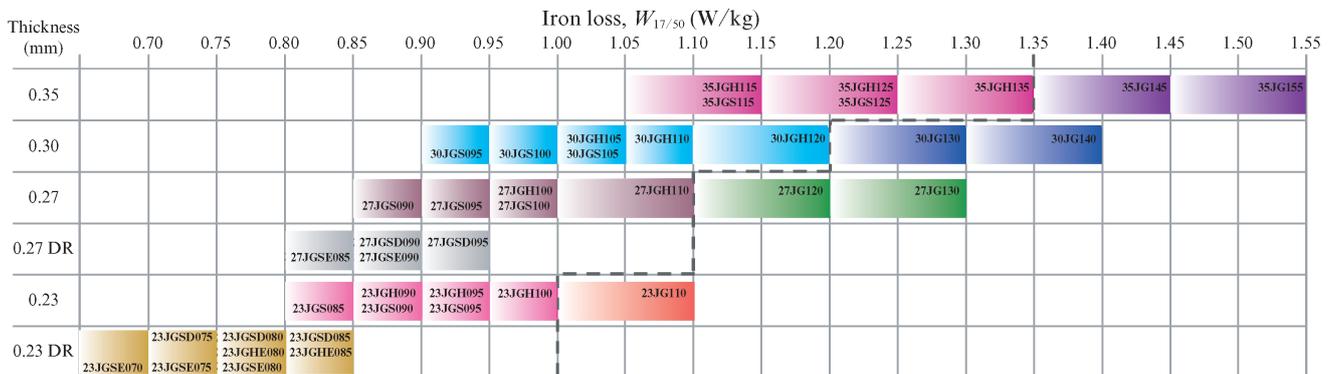


図3 JFE スチールの方向性電磁鋼板の製品ラインナップ

Fig. 3 JFE Steel's product line-up of grain oriented electrical steel sheets

種で HGO に相当し、他社製品を凌駕する極めて高い磁束密度と低鉄損特性を有し、結晶配向性に優れることから変圧器の低騒音化にも有効である。

図 3 中の「23JGSE070」などの商品名は、板厚、鋼種および鉄損 ( $W_{17/50}$ ) 保証値を意味し、「23JGSE070」は、板厚: 0.23 mm, 鋼種: JGSE, 鉄損保証値: 0.70 W/kg 以下であることを示している。

## 2.2 無方向性電磁鋼板

国内の総電力消費量の内、モータは約 6 割を占めており<sup>7)</sup>、仮にモータ効率を 1% 改善すると 50 万 kW クラスの原発 1 基分の省エネに相当することから、高効率モータの開発が急務となっている。

このようなモータの鉄心材料として広く使用される無方向性電磁鋼板は、磁気エネルギーを伝達する機能材料であり、モータ効率を左右するキーマテリアルである。

近年、市場が急拡大しているモータの用途に電気自動車 (EV) がある。EV 駆動モータには小型・高効率、高トルク、信頼性等の様々な特性が要求され、鉄心材料として使用される電磁鋼板には、その要求特性を満たすため以下に示すような特性が必要となる。

発進、加速時には高トルクが必要となるため、電磁鋼板には高磁場域における高磁束密度が要求される。一方、高回転域ではモータ損失に占める鉄損の割合が大きくなるため、高周波鉄損の低さが求められるとともに、発生した熱を逃がすため熱伝導率が高いことも必要となる。さらに、内部磁石埋め込み型 (IPM) モータでは、磁石の飛散を防止するため高強度、高疲労強度が求められる。このように電磁鋼板には様々な特性が要求されるが、これらすべての要求特性を一種類の電磁鋼板で満たすことは困難であるため、モータの要求性能の度合いに応じて各種の電磁鋼板が使分けられている。

図 4 に EV 駆動モータ用に使用される板厚 0.20 mm, 0.25 mm,

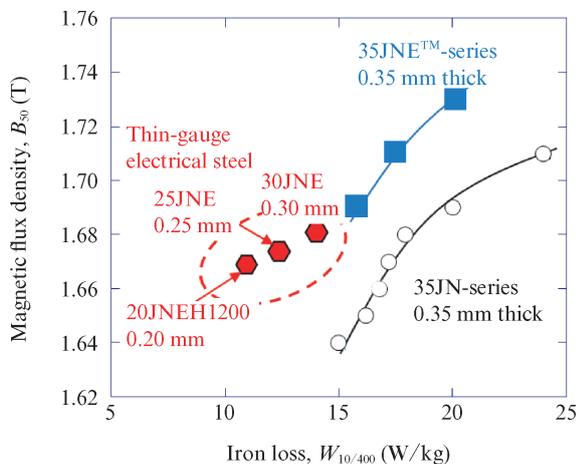


図 4 薄電磁鋼板の磁気特性

Fig. 4 Magnetic properties of thin-gauge electrical steel sheets

0.30 mm の JNE<sup>®</sup> シリーズの薄電磁鋼板の磁気特性例を示す<sup>2)</sup>。板厚 0.35 mm の最高級材 (JNE シリーズ) に比べ、板厚 0.20 mm の薄電磁鋼板では 25~30% 程度鉄損が低下しており、この傾向は高周波になるほど顕著になる。

EV モータ用途には JNE シリーズの薄電磁鋼板以外に磁束密度を高めた JNP<sup>®</sup> シリーズ、強度を高めた JNT<sup>®</sup> シリーズも品揃えしており、要求特性に応じた材料が使用されている<sup>8)</sup>。

## 2.3 高いい素鋼板

6.5% けい素鋼は 1950 年代より知られていた材料であり<sup>9)</sup>、鋼中に Si を 6.5% 添加することにより、磁歪がほぼゼロとなり、透磁率および鉄損が最も優れた値を示すことが明らかとなっていた。しかし、Si 添加量が増加すると材料の伸びが急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難となるため、従来の最高級電磁鋼板では Si 添加量は 3% 程度に制限されていた。これに対し、近年、圧延法に代わり CVD 法 (化学気相蒸着法) による高いい素鋼板の製造技術が開発され、6.5% けい素鋼板 (JNEX<sup>®</sup>) を量産できるようになった<sup>10)</sup>。6.5% けい素鋼板は、従来の無方向性電磁鋼板よりも鉄損が著しく低いため、高速モータ用の鉄心材料として優れた特性が期待できる<sup>11)</sup>。

さらに最近では CVD プロセスを用い、板厚方向に Si 濃度勾配をつけた Si 傾斜磁性材料 (JNHF<sup>®</sup>) も開発されている<sup>12, 13)</sup>。JNHF シリーズは 10 kHz 以上の高周波域で JNEX をしのぐ鉄損特性を有しているだけでなく、板厚中心部の Si 量が JNEX に比べて少ないため、磁束密度が高く、打ち抜き等の加工性に優れるというメリットもある<sup>13)</sup>。

JNEX シリーズ、JNHF シリーズは高周波鉄損が低く EV 駆動モータの高効率化に寄与できるが、一般の無方向性電磁鋼板に比べると磁束密度が低く、モータのトルクが低下するといった課題があった。そこで板厚方向の Si 傾斜技術による渦電流損低減技術を活用しつつ、磁束密度を高めた JNRF<sup>®</sup> シリーズを開発した<sup>14)</sup>。

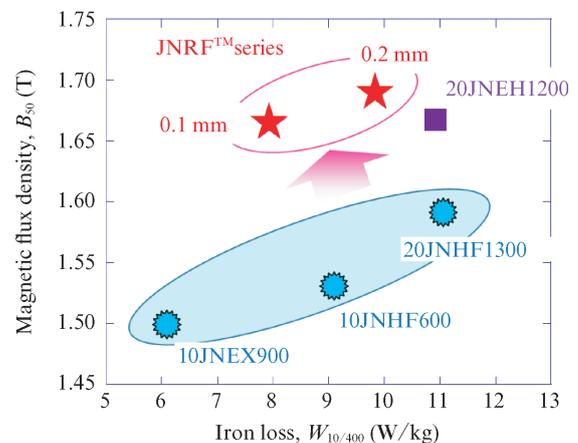


図 5 Si 傾斜磁性材料 (JNHF<sup>®</sup>, JNRF<sup>®</sup>) の磁気特性

Fig. 5 Magnetic properties of Si gradient steel sheets

図5にJNRFシリーズの磁気特性を示す。JNRFシリーズはJNHFシリーズに比べEV駆動モータの駆動周波数に相当する400 Hzの鉄損が低く、大幅に高い磁束密度を示す。このことからJNRFシリーズはEV駆動モータの高トルク化、高効率化への貢献が期待できる。

### 3. 圧粉磁心

圧粉磁心は、絶縁被覆が施された鉄粉、Fe-Si粉およびFe-Si-Al粉等の軟磁性粉末を加圧成形して得られる磁心である(図6)。その微視組織を図7に示す。粒子表面に被覆されていた絶縁被覆が加圧成形後も軟磁性粒子間に残存することで、飽和磁束密度の高い金属相が電気抵抗の高い絶縁層によって細かく分断された組織となっている。このような微視組織に起因し、圧粉磁心はフェライトと比較して高い飽和磁束密度、電磁鋼板と比較して低い渦電流損を両立させている<sup>15)</sup>。さらに、直流重畳特性が良好であることから、リアクトルのような高飽和磁束密度と低渦電流損失の両立が要求される用途への適用が進んでいる<sup>16)</sup>。

圧粉磁心のもう一つの特長として、3次元的に等方的な磁気特性と、粉末冶金技術の派生であることに起因したニアネットシェイプ成形の容易性が挙げられる。この特長により、アキシシャルギャップモータ<sup>17)</sup>やクローティースモータ<sup>18)</sup>といった、複雑形状であり、かつ3次元的に等方的な磁気特性の鉄心が要求されるモータの製造が容易となる。このよう

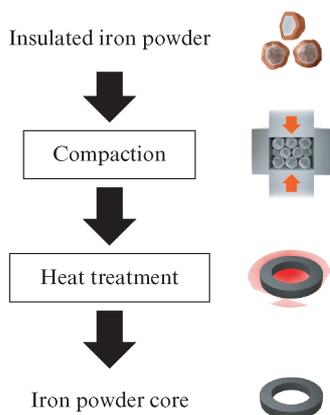


図6 圧粉磁心の製造工程

Fig. 6 Production process of iron powder core

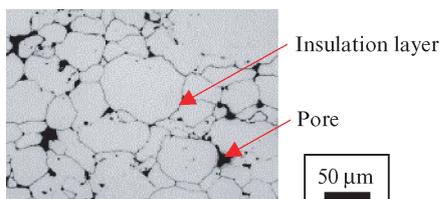


図7 圧粉磁心の微視組織

Fig. 7 Microstructure of iron powder core

な複雑形状鉄心モータのメリットはモータの小型化であり、インホイールモータ<sup>19)</sup>のように、スペース制約上従来のラジアルギャップモータ(電磁鋼板を打ち抜き、積層して鉄心を製造する方式のモータ)の適用が困難な用途への適用が期待されている。また、上記特殊形状モータの「従来に対して小型化が可能」という特長は、別の視点から捉えると「同一体格での高出力化が可能」ということ示している。このような高出力化に着目し、一部のスポーツ車種ではハイブリッド電気自動車にアキシシャルギャップモータを採用している<sup>20)</sup>。以上のように、圧粉磁心を活用することで従来のモータでは困難であった用途の電動化が期待される。

JFE スチールでは圧粉磁心の用途の中でも特にアキシシャルギャップモータ等の特殊形状モータへのニーズに対応するべく、モータ用鉄心向け絶縁被覆純鉄粉 電磁郎®を商品化している。電磁郎の製造工程を図8に示す。ベースとなる純鉄粉は水アトマイズ法により製造される。この際、圧粉磁心の磁気特性を決定する重要な因子である純鉄粉の粒子形状、粒子径を制御する。その後、水蒸気を導入した水素雰囲気下で脱炭、脱酸熱処理を行い、最後に粒子表面への絶縁被覆を施し、絶縁被覆純鉄粉 電磁郎となる。当社の粉末冶金

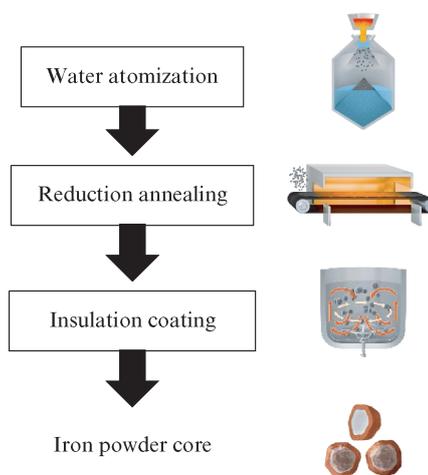


図8 電磁郎®の製造工程

Fig. 8 Production process of Denjiro™

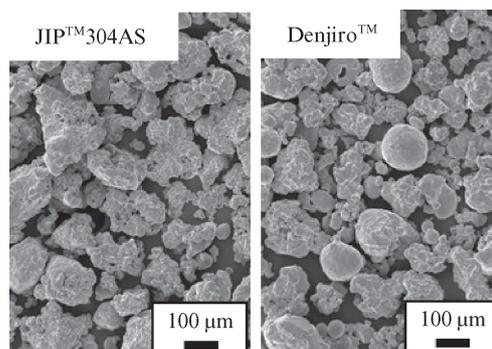


図9 JIP® 304AS および電磁郎®の粒子外観

Fig. 9 Powder particle shapes of JIP™ 304AS and Denjiro™

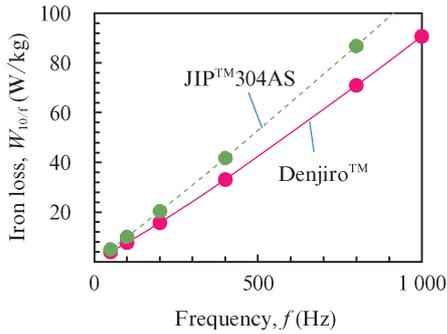


図 10 電磁郎®の鉄損

Fig. 10 Iron loss of Denjiro™

用純鉄粉 JIP® 304AS と電磁郎の粒子外観を図 9 に示す。電磁郎は JIP 304AS に比べると粒子球形度が高いことが特長であり、これにより加圧成形時のひずみを低減し、圧粉磁心の低鉄損化を達成している。絶縁被覆を施した JIP 304AS および電磁郎を 980 MPa の圧力で成形し、600℃窒素雰囲気中で熱処理して作製した圧粉磁心の鉄損を図 10 に示す。電磁郎による圧粉磁心は JIP 304AS による圧粉鉄心と比較してすべての周波数で低鉄損化を達成している。

以上、圧粉磁心の特長と当社製品 電磁郎について述べた。現状、電磁郎は 1 グレードのみの商品化であるが、今後お客様のニーズに応じてラインナップの拡充を図っていく予定である。

## 4. MnZn フェライト

### 4.1 MnZn フェライトの特長

フェライトとは鉄系酸化物磁性材料の総称<sup>21)</sup>である。このうち軟磁性材料の代表例として、MnZn フェライトおよび NiZn フェライトが挙げられる。両者の代表的な磁気特性を表 1 に示す。MnZn フェライトは飽和磁束密度  $B_m$  が高く、損失が小さく、初透磁率  $\mu_i$  も高いことが特長である。一方 NiZn フェライトは比抵抗  $\rho$  が高く電気絶縁性を有し、 $\mu_i$  の減衰周波数である  $f_r$  が高いことから周波数特性も良好である。

JFE スチールのグループ会社である JFE ケミカルおよび JFE フェライトでは、鋼板製造工程における表面酸洗により発生する廃酸を回収リサイクルする際に副産物として得られる高純度酸化鉄を原料に使い、MnZn フェライト焼結コア（以下、焼結コア）を製造、販売している。焼結コアは、日

表 1 MnZn フェライトと NiZn フェライトの諸特性の比較

Table 1 List of comparison of properties between MnZn and NiZn ferrite

	$B_m@23^\circ\text{C}$ (MHz)	$\mu_i@10\text{ kHz}$ 23°C	$\rho$ ( $\Omega\text{cm}$ )	$f_r$ (MHz)
MnZn ferrite	400~550	2 000~15 000	$\sim 10^3$	0.1~2
NiZn ferrite	250~500	$\sim 2 000$	$10^8\sim$	$\sim 10$

本、タイおよび中国の 3 拠点で製造している。

MnZn フェライトの諸特性を、他の金属磁性材料と比較して図 11 に示す。MnZn フェライトはフェリ磁性体<sup>22)</sup>であるため、金属磁性材料と比較してキュリー温度  $T_c$  および飽和磁束密度  $B_m$  は劣る。しかし酸化物であるため  $\rho$  が  $10^5\sim 10^8$  倍高く、渦電流損の抑制が可能である。そのため図 12 に示す

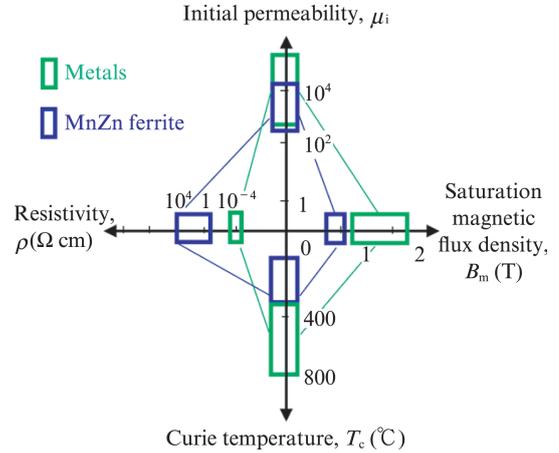


図 11 MnZn フェライトと金属磁性材料の諸特性比較

Fig. 11 Comparison of properties between MnZn ferrite and metal magnetic materials

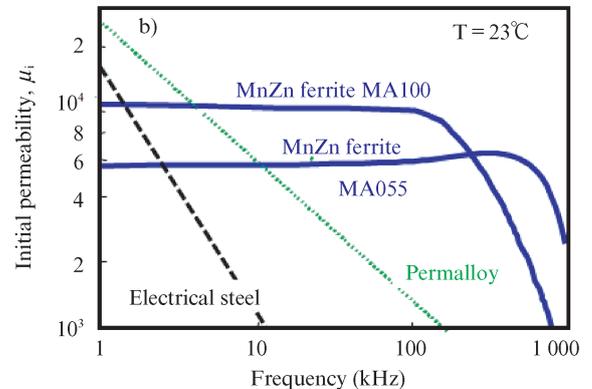
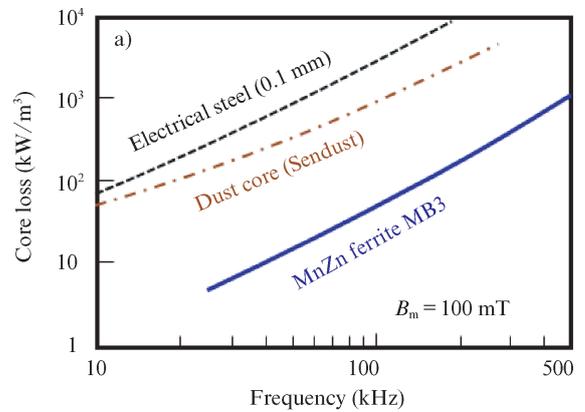


図 12 MnZn フェライトと金属磁性材料の周波数特性比較  
a) コアロス b) 初透磁率

Fig. 12 Comparison of frequency characteristics between MnZn ferrite and metal magnetic materials

a) Core loss, b) Initial permeability

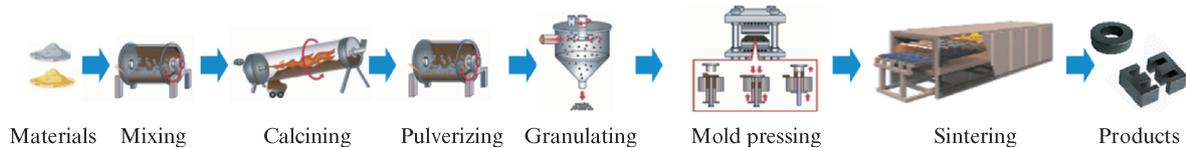


図 13 MnZn フェライトの一般的な製造工程

Fig. 13 General manufacturing process of MnZn ferrite

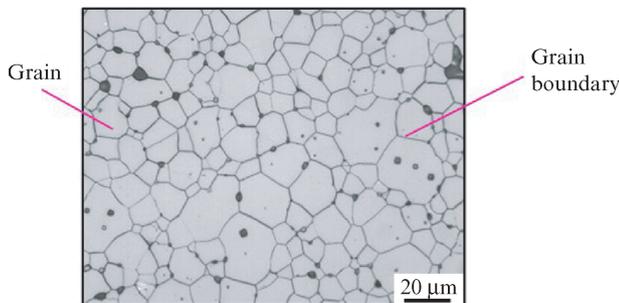


図 14 MnZn フェライト焼結コアの結晶組織像

Fig. 14 Image of microstructure of MnZn ferrite sintered core

とおり、10 k~1 MHz の高周波領域において、金属磁性材料に比べて低損失、高 $\mu_i$ という特長を有する。

## 4.2 MnZn フェライトの製造工程

MnZn フェライトの一般的な製造工程を図 13 に、焼結コアの結晶組織像を図 14 に示す。磁気特性の大半は主原料の成分比によりほぼ定まるが、一部は多結晶組織の微細構造の影響を受ける。主原料である高純度酸化鉄に、酸化マンガおよび酸化亜鉛の粉末を混合した後に、約 900℃で仮焼し成分を均質化する。得られた仮焼粉は、焼成工程における焼結反応性を均質に高めるために、約 1 μm に湿式粉碎処理される。この際、磁気特性を改良する目的で結晶組織を制御するべく、粒界に偏析する等の特長を持つ微量成分を添加することが多い。粉碎処理後の試料はスラリー状態である。このスラリーに、バインダーの役割を担う、ポリビニルアルコール (PVA) 等の水溶性樹脂の水溶液を混合し、スプレードライ法で噴霧造粒する。噴霧されたスラリーは表面張力により球状となり、バインダーの接着力により形状を保持したまま乾燥され、球形の造粒粉となり、高い流動性を有する。造粒粉は金型に充填され、所望の形状となるよう 100 MPa 以上の圧力により圧粉成形されて成形体となる。この成形体を、焼成炉を用いて雰囲気制御下で 1200℃以上の熱を加え固相焼結させることで、良好な磁気特性を備えた MnZn フェライトの焼結コア製品が得られる。

## 4.3 MnZn フェライトの用途

焼結コアの主用途は、大きくトランスの磁心材とノイズフィルタの磁心材の 2 つに分類される。

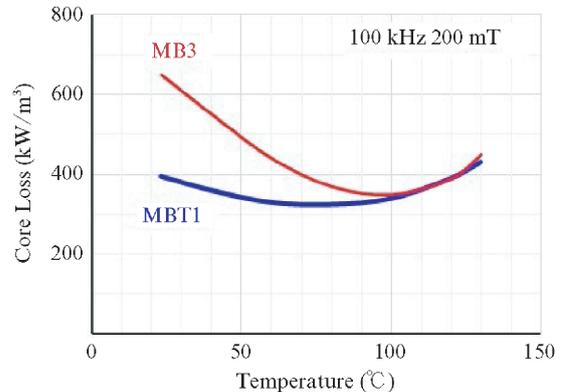


図 15 MnZn フェライトの損失の温度特性

Fig. 15 Temperature dependence of Core Loss of MnZn ferrite

スイッチング電源の電力変換トランスの磁心材は、一般的に駆動周波数が 100 kHz 近辺であり、先述のとおり金属磁性材料と比較して MnZn フェライトの方が低損失で優位である。同じ出力が得られるトランスを想定すると、駆動周波数とトランスの断面積は反比例の関係にある<sup>23)</sup>。そのため、MnZn フェライトを使用することでデバイスを小型軽量化できる。この用途の MnZn フェライトには、低損失、キュリー温度  $T_c$  および飽和磁束密度  $B_m$  が高い、といった特性が求められる。後述の車載用途の場合は、一般的に図 15 に示す MBT1<sup>24)</sup> のように、広い温度領域下で低損失な材料が優位である。

回路信号に重畳する高調波ノイズ成分は駆動周波数の数倍程度であるが、このノイズ成分が機器の誤作動を誘発する恐れがあるため、これを除去する目的でノイズフィルタが用いられる。回路の交流抵抗は磁心のインダクタンス成分に周波数を乗じたものと比例の関係にある。この原理を活用して、ノイズフィルタは磁心のインダクタンス成分により、信号より周波数の高いノイズを選択的に除去している。この用途の MnZn フェライトには、インダクタンスと比例関係にある  $\mu_i$  が高いこと、および広範囲の周波数のノイズを除去するべく  $\mu_i$  の周波数特性が良好であることが求められる。なお、車載用途では高温耐久性の観点からキュリー温度  $T_c$  が高く、磁気飽和を防ぐ観点から高い飽和磁束密度  $B_m$  を兼ね備えているものが優位である。

従来は焼結コアが搭載される主な最終製品は電気機器であった。しかし近年、自動車駆動系のハイブリッド電気自動

車 (HEV) や電気自動車 (EV) への移行が進み、焼結コアが最終的に自動車に搭載される事例が増加している。車載用途では、走行時の振動等への配慮が求められるため、焼結コアは良好な電磁気特性に加え、高強度であることも重視される。今後さらなる電気自動車の普及に伴い、車載用途の焼結コアの需要の増加は確実視されている。JFE ケミカルでは JFE スチールの支援を受け焼結コアの高強度化を検討しており<sup>25)</sup>、良好な磁気特性を兼ね備えた焼結コアの開発および安定した製造条件の確立を進めている。

## 5. おわりに

本稿では JFE グループで製造している磁性材料である、方向性電磁鋼板、無方向性電磁鋼板、高い素鋼板、圧粉磁心用絶縁被覆鉄粉、MnZn フェライトの特長および用途について概説した。今後、カーボンニュートラルの進展にともない電動化が加速するとともに、電気機器に対する小型・高効率化のニーズは一層高まるものと予想される。JFE グループでは多様化するお客様のご要望にお応えする新規磁性材料を開発するとともに、材料特性を最大限発揮させるための利用技術等も提案させていただき所存である。

### 参考文献

- 1) 吉田裕史, 岡崎由紀子. 10 MHz 対応高抵抗高透磁率 MnZn フェライト. JFE 技報. 2021, vol.47, p.19-24.
- 2) 日本電機工業会. 「トップランナー変圧器 2014」—改正省エネ法特定機器変圧器の目標年度に向けて—. 月刊省エネルギー. 2013, vol. 65, no. 5, p. 55-60.
- 3) Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for Distribution Transformers. DOE 10 CFR Part 431 [6450-01-P]
- 4) Official Journal of the European Union. COMMISSION REGULATION (EU) 2019/1783 of 1 October 2019
- 5) 非耐熱磁区細分化による低鉄損方向性電磁鋼板 JGSE® シリーズ. JFE 技報. 2015, vol. 36, p. 37-38.
- 6) 佐藤圭司, 石田昌義, 日名英司. 耐熱型磁区細分化方向性電磁鋼板. 川崎製鉄技報. 1997, vol. 29, no. 3, p. 153-158.
- 7) 新機能素子開発研究協会. 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査. 2009, 53p (p.13).
- 8) 尾田善彦, 大久保智幸, 高田正昭. JFE スチールにおける無方向性電磁鋼板の最近の進歩. JFE 技報. 2015, no.36, p. 6-11.
- 9) Bozorth, R. M. Ferromagnetism. D. Nostrand Co. Inc., N. J., 1951, 968p (p.77).
- 10) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦. 6.5%けい素鋼板 (スーパー E コア) の開発. あたりあ. 1994, vol.33, no. 4, p. 423-425.
- 11) 尾田善彦, 志賀信勇, 河野雅昭, 本田厚人. 自動車用電磁鋼板の最近の動向. 平成 21 年電気学会全国大会. 2009, S5, p. 15-18.
- 12) 藤田耕一郎, 高田芳一. 高い素電磁鋼板の最近の動向. 熱処理. 1999, vol. 39, no. 4, p. 200-206.
- 13) 笠井勝司, 浪川操, 平谷多津彦. JFE スチールにおける高 Si 電磁鋼板の最近の進歩. JFE 技報. 2015, no. 36, p. 12-16.
- 14) 財前善彰, 尾田善彦, 大久保智幸, 笠井勝司, 戸部輝彦. 高速モータの高効率化に寄与する Si 傾斜磁性材料 JNRF® の開発. あたりあ. 2022, vol. 61, no. 1, p. 44-46
- 15) 定廣健一, 後藤聡志, 上ノ蘭聡. JFE スチールグループの軟磁性材料. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 1-6.
- 16) 五十嵐直人, 魚住真人, 小菅敏行, 佐藤淳, 草別和嗣, 山口浩司. 車載用リアクトルの小型化を可能にした純鉄系圧粉コア. SEI テクニカルレビュー. 2015, no. 186, p. 92-97.
- 17) 渡辺麻子, 齋藤達哉, 上野友之, 鶴田聖, 中村悠一. 圧粉磁心による薄型・高トルクなアキシシャルギャップモータの実現. SEI テクニカルレビュー. 2018, no. 192, p. 119-125.
- 18) 榎本祐治, 床井博洋, 小林金也, 天野寿人, 石原千生, 安部恵輔. 高密度圧粉磁心を適用したクローティースモータの開発. 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 2009, vol. 129, no. 10, p. 1004-1010.
- 19) 高橋朋平. EV・HEV 向けフェライト磁石アキシシャルギャップモータの高出力密度化に関する研究. 学位論文. 2022 (北海道大学)
- 20) Tamara Sword. Ferrari selects YASA electric motor for SF90 Stradale, the company's first hybrid production series supercar. 2019. 3. 30., <https://www.yasa.com/news/ferrari-selects-yasa-for-sf90-stradale/>, (参照 2023. 1. 15)
- 21) 岡本祥一, 近桂一郎. マグネットセラミックス. 1 版, 技報堂出版, 1985, 253p.
- 22) 太田恵造. 磁気工学の基礎 I. 初版, 共立出版, 1973, 215p.
- 23) 戸川治郎. スイッチング電源のコイル/トランス設計. CQ 出版, 2012, 272p.
- 24) 藤田明, 後藤聡志. 広い温度範囲で鉄損の低い MnZn フェライト. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 3, p. 111-115.
- 25) 吉田裕史, 平谷多津彦, 田川哲哉. MnZn フェライトの高強度化. JFE 技報. 2021, vol. 47, p. 25-30.