

JFE スチールグループの軟磁性材料

Soft Magnetic Materials of JFE Steel Group

定廣 健一 SADAHIRO Kenichi JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員(副課長)
後藤 聡志 GOTOH Satoshi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(副部長)・工博
上ノ菌 聡 UENOSONO Satoshi JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(副部長)・工博

要旨

鉄をベースとした軟磁性材料は変圧器、モータ、発電機を初めとする鉄心などに広く用いられている。JFE スチールグループは軟磁性材料として、方向性電磁鋼板、無方向性電磁鋼板、スーパーコア (6.5% Si 鋼)、ソフトフェライト、鉄粉を開発している。これらの軟磁性材料群の使用範囲は、商用周波数域から 1 MHz 程度までの幅広い周波数にわたっている。JFE スチールグループでは、個々の材料の特性改善に加え、上記のような多岐にわたる材料の最適な利用方法について変圧器やモータの評価を通して検討を進めている。

Abstract:

JFE Steel group has developed the following soft magnetic materials: grain oriented electrical steels, non-oriented electrical steels, super-core (6.5Si-Fe), soft ferrites, and iron powders. The frequency-range of those materials covers from commercial frequency to about 1 MHz. JFE Steel group makes every effort to improve magnetic properties of those materials and to find their optimum applications through the evaluation of transformers and motors.

1. 緒言

強磁性体には、永久磁石のようにいったん磁化されると半永久的に外部に磁束を供給する硬磁性の材料と、電磁石の鉄心のようにコイルへの通電をやめると外部への磁束の供給も同時に失われる軟磁性の材料とが存在する。本論文で扱うのは、後者の軟磁性材料である。

鉄をベースとする軟磁性材料は、変圧器、発電機、モータなどの鉄心に用いられ、それらの材料の低損失化は直接、エネルギー変換の効率の改善に貢献するものである。このような軟磁性材料の改善は、近年の省エネルギー、環境志向の観点から、社会全体において重要な課題であるといえる。

JFE スチールグループが擁する代表的な軟磁性材料を列挙する。

(1) 電磁鋼板

高純度な鉄に 3% 前後のけい素を添加し、高度の冶金的処理を施すことによって、交流磁場下で発生する鉄損を極限まで低減した材料である。その板厚は、方向性電磁鋼板では、主に 0.23 mm~0.35 mm、無方向性電磁鋼板では 0.20 mm~0.65 mm の範囲である。いずれの鋼板も、交流磁場下で発生する渦電流を抑制するため表面に薄い絶縁被膜が塗布焼付けされている。

電磁鋼板は、変圧器やモータの積層鉄心として用いられており、一般の人の目に触れることは極めて少ない。しかしながら、電磁鋼板の世界の生産量は、年間 500 万トン以上にものぼる。そもそも電力は、電磁鋼板を鉄心に用いた大型の発電機により生み出される。発電された電力は、電磁鋼板を鉄心に用いた変圧器により昇圧あるいは降圧されて、工場や家庭に送り届けられる。最終の電力利用の形態は、光、熱、動力など多岐にわたる。これらのうち特に動力は、各種モータにより生み出されており、その用途は生活の利便性の向上とともに空調機、洗濯機、掃除機、冷蔵庫、情報機器など極めて多岐にわたっている。このように、電力の送配電、利用のすべてのプロセスにおいて、電磁鋼板が使用されているのである。ただし、電磁鋼板は、スーパーコアのように 0.10 mm 程度に薄手化しても、元来導電性のある金属系の材料であるため、その使用周波数は、直流域から広くとも 100 kHz の範囲である。

(2) ソフトフェライト

JFE スチールグループにおいて開発・製造・販売されているソフトフェライトは、MnZn 系および NiZn 系フェライトの原料粉と MnZn フェライトコアである。MnZn フェライトは、電磁鋼板のような金属材料に比べて、素材の比抵抗が、 $10^6 \sim 10^{10}$ 倍も高く、電磁鋼板よりも高い周波数、すなわち、100 kHz から 1 MHz 程

度の周波数で使用できる。ただし、飽和磁束密度は、0.5 T 程度であり、電磁鋼板の 2.0 T に比べて 1/4 程度にとどまる。しかしながら、電磁鋼板に比べて 1000 倍オーダで高い周波数領域をカバーできるため、小型のスイッチング電源のような分野では、高性能化が著しい MOS-FET、IGBT などのスイッチング素子と相俟って広範に使用されている。

(3) 鉄粉

電磁鋼板のような薄板形状とは異なり、鉄粉を利用したコアにおいては、3 次元的に渦電流経路を断ち切ることで、鉄心の渦電流の発生をさらに抑制することを可能にしている。JFE スチールの鉄粉は、100 μm 径程度の純鉄系の還元鉄粉である。したがって、鉄粉を用いたコアの比抵抗増大は、けい素のような比抵抗増大元素ではなく、圧粉成形時に混練する樹脂により、粒子間の絶縁を確保することで実現される。このような鉄粉コアは、10 kHz ~ 100 kHz を中心としたノイズフィルターやスイッチング電源のチョークコアとして幅広く用いられている。

以下にそれぞれの材料の特長を詳しく述べる。

2. JFE スチールの軟磁性材料

2.1 電磁鋼板

2.1.1 方向性電磁鋼板¹⁾

方向性電磁鋼板は、鉄の磁化容易軸方向である<001>方向すなわち鉄の立方晶の辺方向を、製品コイルの圧延方向に配向させた極めて高機能の材料である。この材料の結晶は、通常の薄鋼板のような十数マイクロメートルの多結晶とまったく異なり、Photo 1 に示すようなミリメートルオーダの単結晶の集合体からなる。また、その磁化容易軸の圧延方向からのずれは、8° 以内に抑えられている。通常のコイルは、数千メートルにも及ぶ長さである。そのような長大な鋼帯の結晶が、一様に数度の範囲に配向しているのは、まさに鉄の芸術品とも呼ぶべきものである。



Photo 1 Typical macrostructure of grain oriented electrical steel

Table 1 Typical magnetic properties for JFE G-core

Type	Symbol	Thickness (mm)	$W_{17/50}$ (W/kg)	B_8 (T)
JG	35JG135	0.35	1.33	1.85
JGH	30JGH105	0.30	1.03	1.89
JGH	23JGH090	0.23	0.88	1.89
JGS	30JGS105	0.30	0.99	1.93
JGS	23JGS090	0.23	0.87	1.92
JGSD	23JGSD085	0.23	0.78	1.88

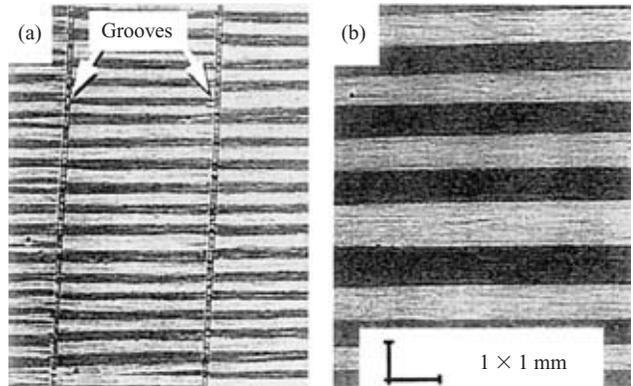


Photo 2 Magnetic domain structures of (a) grooved and (b) plain materials observed by type-II Lorentz SEM method

方向性電磁鋼板の製品特性は、結晶方位の配向性を特徴づける磁束密度 B_8 (磁化力 800 A/m における磁束密度) と鉄損 (たとえば、 $W_{17/50}$: 磁束密度の振幅 1.7 T, 50 Hz における重量あたりの損失) により、議論されることが多い。現行の代表的な製品の B_8 と $W_{17/50}$ を Table 1 に示す。 B_8 は 1.85 ~ 1.93 T, $W_{17/50}$ は、0.78 ~ 1.33 W/kg (数値はすべて代表的な値) の製品が製造されている。磁束密度 B_8 の値は JG, JGH, JGS の順に高く、JGH では、1.89 T, JGS では 1.93 T にもおよぶ高い磁束密度に到達している。このような 1.88 T をこえるような高磁束密度の方向性電磁鋼板の安定製造は、二次再結晶をはじめとする高度な冶金的技術の組み合わせによるものである。一方、鉄損は、結晶の配向性に加えて、板厚の薄手化によっても低減される。広く使用されているのが、0.23 mm 厚の材料、23JGH, 23JGS である。このような低鉄損の材料を、さらに Photo 2 に示す微細線状溝形成による磁区細分化により低損失化した製品が 23JGSD であり、23JGSD085 では、 $W_{17/50}$ が 0.78 W/kg まで低減されている。

高性能の方向性電磁鋼板は、主に変圧器の高効率化に、低鉄損化と励磁電流の低減という二面から貢献している。さらに、高磁束密度材では、変圧器の設計磁束密度を高くすることによる小型化や低磁歪特性による変圧器騒音の抑制にも貢献している。

2.1.2 無方向性電磁鋼板²⁾

無方向性電磁鋼板は、上述の方向性電磁鋼板とは異なり、100 μm 前後の多結晶からなり、鋼板面内の磁気的な異方性

を小さくするように設計されている。このような鋼板の特性も、方向性電磁鋼板と同様に、磁束密度 B_{50} (磁化力 5000 A/m における磁束密度) と鉄損 (たとえば、 $W_{15/50}$: 磁束密度の振幅 1.5 T, 周波数 50 Hz における損失) により特徴づけられている。

JFE スチールで製造しているおもな無方向性電磁鋼板を Fig. 1 に示す³⁾。JN コアは、JIS 規格に準じた、板厚 0.35 mm と 0.50 mm の材料である。鉄損 $W_{15/50}$ は、低 Si の 50JN1000 の 7.2 W/kg から高 Si の 35JN200 の 1.98 W/kg までの製品をラインアップしている。

このような JIS 準拠材は、低鉄損化とともに磁束密度も低下する。JNE コアは、同一鉄損の磁束密度を高めた新製品であり、JN コアに比べて、 B_{50} が 0.03~0.05 T 高くなっている。また、この材料は、同一の鉄損の材料どうして比較すると、硬度を低減できるという利点も兼ね備えている。このような特性改善のための材料設計としては、比抵抗元素である Si, Mn, Al の電気抵抗、硬度への影響を見極めるとともに、粒界偏析元素の添加と中間工程の最適化による磁気特性に有害な (111) 集合組織の低減技術を適用している。このような材料特性の改善により、モータなどの応用機器における効率改善に寄与できるだけでなく、硬度の低下による金型損耗の抑制という鉄心製造上のメリットも享受できる。

JNEH コアは、最近の高周波化のニーズに応じて開発された 0.20 mm 厚の材料である。この材料では、従来の $W_{15/50}$ でなく、 $W_{10/400}$ により特性が規格化されている。たとえば、20JNEH1200 の $W_{10/400}$ は、11 W/kg である。この値は、同一の比抵抗の 35JN230, 50JN250 の 16.2 W/kg, 24 W/kg に比べて、それぞれ 32%, 54% の鉄損低減に相当する。

このような差は、 $W_{15/50}$ による比較では顕著でなく、高周波における板厚低減の有効性を明確に示すものである。

近年、無方向性電磁鋼板のおもな応用分野であるモータ分野のニーズが大きく変化しつつある。モータ種類の、誘導モータから永久磁石モータへの転換、制御面での商用電源制御からインバータ制御への転換、ニーズ面からのハードディスクモータやハイブリッド自動車用モータの高速回転化が挙げられる。いずれの因子も、鉄心の励磁が高周波化されたり、高調波成分が重畳されたりと、鉄心材料の高周波での鉄損特性の改善を要求する動向である。このような高速回転のニーズに応えるべく開発されたのが、20JNEH シリーズである。

2.1.3 スーパーコア (6.5% Si 鋼)

スーパーコアは、6.5% の Si を含有する鋼板である。Si は、これまでも述べてきたように比抵抗増大元素であり、添加量を増大することにより、渦電流の抑制に有効である。しかしながら、上述の電磁鋼板は、圧延と焼鈍により製造されており、一般に、3.5% を超える Si の添加では、材料が脆くなり、圧延することが困難になるといわれている⁴⁾。その一方で、6.5% の Si 添加が透磁率の改善と磁歪の低減に極めて有効であることは古くから知られていた⁴⁾。このような状況を打破すべく開発された技術が、CVD 法を用いた浸注法である⁵⁾。これは、3% Si 鋼で薄鋼板を製造したのち、CVD 法により Si を拡散させる画期的な手法である。JFE スチールは、現在も、世界で唯一の 6.5% Si 鋼の商用生産メーカーである。

スーパーコアのラインアップを Table 2 に示す。板厚としては、50 μm ~100 μm があり、高い比抵抗と相俟って、従来の電磁鋼板よりも、高い 400 Hz~100 kHz の範囲で有効に利用できる。

スーパーコアの特性は、おもに鉄損 ($W_{1/10k}$: 磁束密度 0.1 T, 周波数 10 kHz における損失や $W_{0.5/20k}$) により評価されている。100 μm 厚のスーパーコアの $W_{1/10k}$ は 8.3 W/kg であり、0.20 mm 厚の無方向性電磁鋼板の 21 W/kg や

Table 2 Typical magnetic properties for Super core

Thickness (mm)	Symbol	$W_{10/1k}$ (W/kg)	$W_{1/10k}$ (W/kg)	$W_{0.5/20k}$ (W/kg)	Magnetostriction ($\times 10^{-6}$)
0.10	10JNEX	18.7	8.3	6.9	<0.1
0.20	20JNEH	42.0	21.0	-	8.0
0.23	23JGSD	35.0	26.5	-	1.0

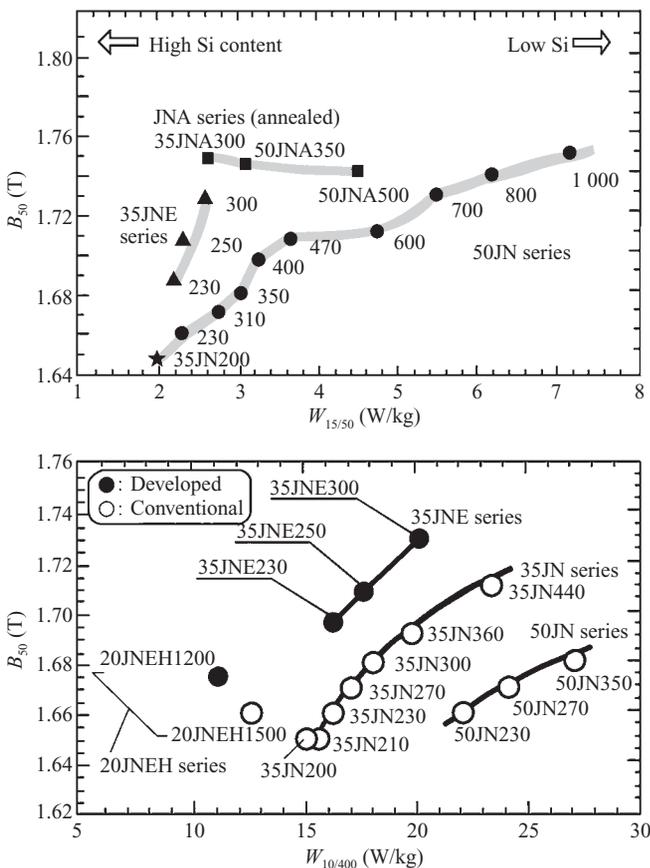


Fig. 1 Maps of non-oriented electrical steel products of JFE Steel

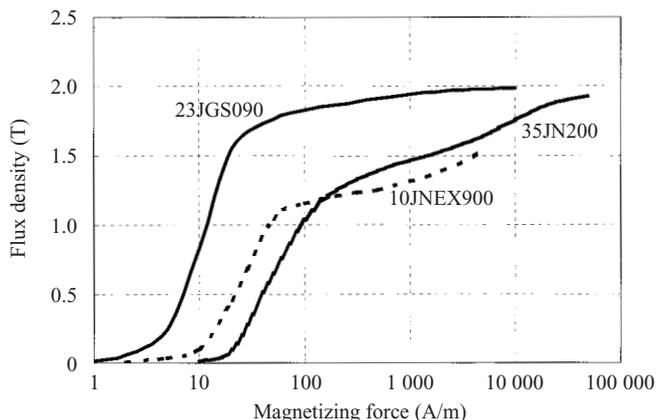
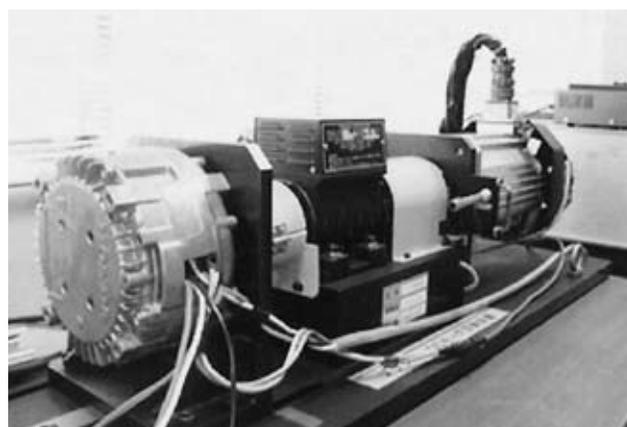


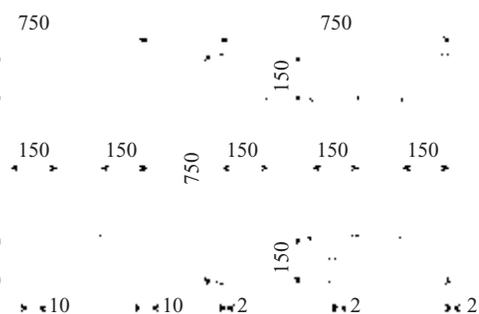
Fig.2 Typical magnetization curve for JFE G-core, N-core and Super core

0.23 mm 厚の方向性電磁鋼板の 26.5 W/kg に比べて、大幅な低鉄損化が可能である。

このようなスーパーコアは、MOS-FET、IGBT といった高速のスイッチング素子を組み込んだ回路において、リアクトルとして用いられることが多い。スーパーコアの飽和磁束密度は、Fig. 2 に示すように、従来の電磁鋼板の 2.0 T に比べると若干低いが、フェライトコアの 0.5 T と比べると 3 倍強の優位性が存在する。これは、鉄心の断面積をコンパクト化することにつながるため、電気機器の小型化には



(a) Model motor evaluation system



(a) Alternate-lap joint

(b) Step-lap joint

unit : mm

(b) 3-phase transformer evaluation system

Photo 3 Model motor and transformer evaluation systems

極めて有効である。

さらに、スーパーコアは、原理的には磁歪がゼロとなる材料である。騒音の原因となる磁歪の値は、方向性電磁鋼板の 1/10、無方向性電磁鋼板の 1/80 以下であり、大幅な低騒音化が可能である。

以上のように、スーパーコアは、電磁鋼板とソフトフェライトの中間の周波数領域を補完する高飽和磁束密度金属系軟磁性材料であるとともに、理想的な低騒音材でもある。

2.1.4 電磁鋼板の利用技術開発

以上のような電磁鋼板の開発に加えて、JFE では、Photo 3 に示すモータ評価システム³⁾や変圧器評価システム^{6,7)}を活用し、材料特性の改善の有効性を評価している。

変圧器の騒音に対する材料の磁束密度 B_s を評価した例を Fig. 3 に示す。方向性電磁鋼板の結晶方位の分散を抑制し、磁束密度を高めることが、変圧器の騒音低減に貢献できる点が明確に検証できている。

一方、ブラシレス DC モータの評価では、Fig. 4 に示すように、基本周波数の 100 Hz よりも高い周波数の鉄損（たとえば、 $W_{10/400}$ ）がモータ特性を支配していることを明らかにしてきた。このような知見をもとに、先に述べたような高周波域の鉄損を低減した材料を開発しているのである。

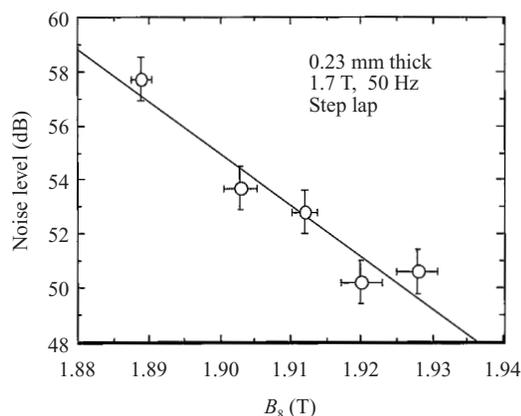


Fig.3 Relationship between material flux density and transformer noise level

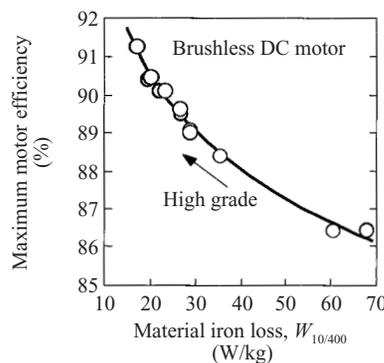


Fig.4 Relationship between material iron loss $W_{10/400}$ and maximum motor efficiency

2.2 ソフトフェライト

JFE グループで、製造・販売しているソフトフェライトコアは、MnZn フェライトであり、おもに数十 kHz 以上のスイッチング電源のコアとして幅広く用いられている。MnZn フェライトコアは、Fe₂O₃、MnO、ZnO の三元系酸化化合物の焼結体である。JFE スチールグループでは、ソフトフェライト用の高純度酸化鉄を製造しており、原料の開発および安定供給の面での強みがある。また、世界に先駆けて雰囲気を高度に制御したローラーハース炉の開発に成功し、これによる高特性、高効率、高生産性の製造技術を確立した。このような高度な焼成技術により、MnZn フェライトの結晶組織の均質化と高比抵抗化を達成し、Photo 4 に示すような超大型のコアの焼成にも成功している。

このような材質制御技術により開発したのが、MB3、MB4 といった世界最高レベルの低損失材料である。JFE スチールグループでは、これらの低損失フェライトを中心に、お客様のニーズ変化に対応した車載用に最適な常温から 120°C 付近まで低い損失を示す MBT2、広い周波数範囲において使用可能な MBF4 などを開発している⁸⁾。

MnZn フェライトの損失は、一般的に、Fig. 5 に示すように 100 kHz、200 mT の損失値を中心に評価されている。先の MB4 では 100°C での損失を 300 kW/m³ 以下、MBT2 では 20~120°C の範囲の損失変動を 280~360 kW/m³ に制

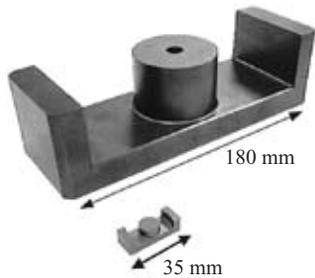


Photo 4 Example of large size soft ferrite core

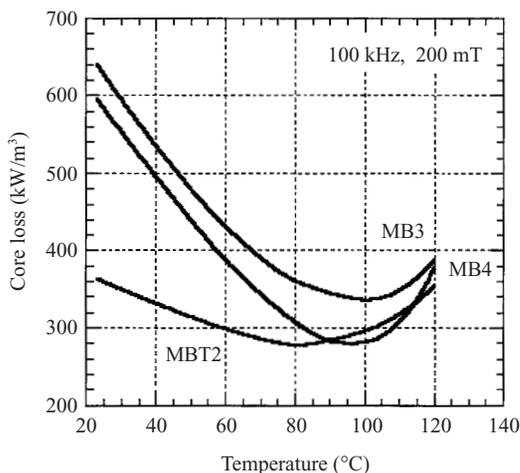


Fig. 5 Temperature dependence of core loss at 100 kHz and 200 mT of low loss materials, MB3, MB4, and MBT2

御している。MBF4 は、100 kHz、200 mT の損失と 300 kHz、100 mT の損失をともに 300 kW/m³ 以下とした高周波対応低損失材料である。

以上のようなソフトフェライトコアは、パソコンなどのスイッチング電源をはじめとして、さまざまな家電の電源回路に用いられている。今後は、ハイブリッド自動車におけるメインバッテリー電圧から補機類向け電圧への降圧 DC-DC コンバータ回路を中心に、上記のようなさまざまなニーズに対応した低損失フェライトコアが、効率の向上に貢献していくものと期待される。

2.3 鉄粉

JFE スチールでは電磁特性を改善した鉄粉として、還元鉄粉 JIP MG270H を製造・販売している。磁気特性を改善すべく、初透磁率に及ぼす不純物濃度、粒径、残留歪の影響を詳細に解析し⁹⁾、Fig. 6 に示すように、同一の成形条件で作製された従来材コアに比べて、高い初透磁率 (≧ 74) 特性を示す材料を開発できた。

さらに、この材料のリング状圧粉コアの鉄損特性を、無方向性電磁鋼板 50JN250 および 20JNEH1200 と比較した結果を Fig. 7 に示す。鉄粉を用いたコアの鉄損は、50JN 材

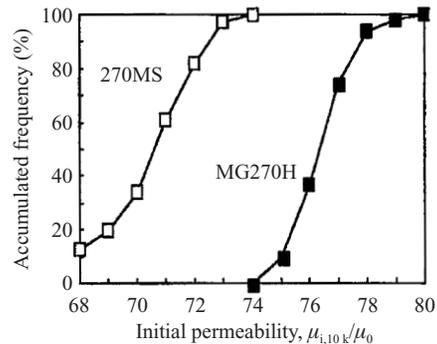


Fig. 6 Accumulated frequency of initial permeability of iron powder cores

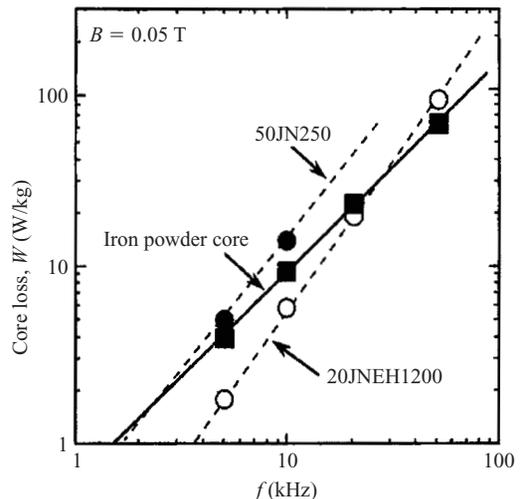


Fig. 7 Comparison of core loss for iron powder core with non-oriented electrical steels

に対しては、2 kHz 以上の領域で、20JNEH 材に対しては、20 kHz 以上の領域で優位性を示す。このように、鉄粉を用いた圧粉コアは、従来の電磁鋼板とフェライトコアの間を補完する特性を示す材料であるといえる。

今後、圧粉成形体の高密度化による初透磁率、飽和磁束密度のさらなる改善と高周波までの鉄損改善の両立が進められれば、圧粉コアの三次元形状成形性の強みを生かして、さらに適用範囲が拡大するものと期待される。

3. 結言

JFE スチールグループが擁する、世界トップレベルの配向性を有する方向性電磁鋼板 JGS、磁束密度と鉄損、硬度のバランスを改善した新たな無方向性電磁鋼板 JNE コア、1 kHz~100 kHz の範囲での低鉄損と磁歪ゼロによる低騒音特性をあわせもつスーパーコア JNEX、3次元形状設計の可能性のある鉄粉 JIP MG270H、業界トップレベルの低鉄損フェライトコアである MB4 コア、さらには、車載用に最適な温度依存性の小さい MBT2 コアといった特徴的な軟磁性材料を紹介した。以上の軟磁性材料の主な使用領域を磁束密度と周波数の観点からまとめた結果を Fig. 8 に示す。今後もそれぞれの材料の守備範囲を広げるべく、材質、利用技術の両面から新材料の開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 森戸延行, 小松原道郎, 清水洋. 川崎製鉄技報. vol. 29, no. 3, 1997, p. 129.
- 2) 本田厚人, 小畑良夫, 岡村進. 川崎製鉄技報. vol. 29, no. 3, 1997, p. 136.
- 3) 本田厚人, 千田邦浩, 定廣健一. 川崎製鉄技報. vol. 34, no. 2, 2002, p. 85.
- 4) Bozorth, R. M. Ferromagnetism. D. Van Nostrand. 1951.

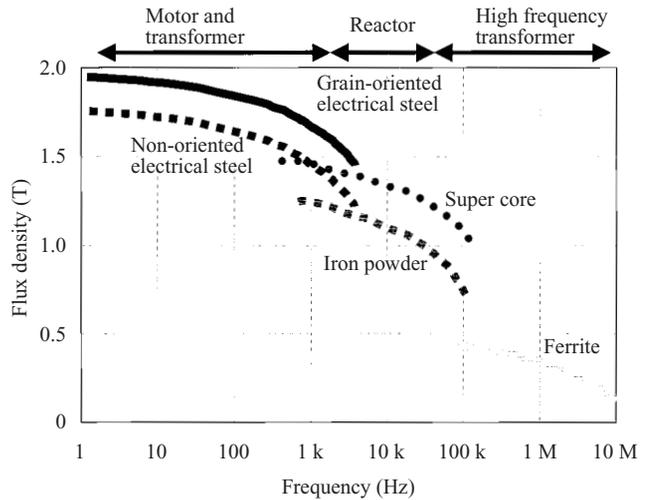


Fig. 8 Overview of the main application range of each material

- 5) 実川正治, 細谷佳弘. NKK 技報. no. 179, 2002, p. 36.
- 6) 石田昌義, 岡部誠司, 佐藤圭司. 川崎製鉄技報. vol. 29, no. 3, 1997, p. 164.
- 7) 田中靖, 日裏昭, 二宮弘憲, 鶴清, 小林英男, 升田貞和. NKK 技報. no. 131, 1990, p. 1.
- 8) 後藤聡志. 川崎製鉄技報. vol. 31, no. 1, 1999, p. 76.
- 9) 尾崎由紀子, 藤長政志. 川崎製鉄技報. vol. 31, no. 2, 1999



定廣 健一



後藤 聡志



上ノ 蘭 聡