

JFE スチールにおける高 Si 電磁鋼板の最近の進歩

Recent Progress of High Silicon Electrical Steel in JFE Steel

笠井 勝司 KASAI Shoji JFE スチール 東日本製鉄所（京浜地区）商品技術部薄板室 主任部員（課長）
浪川 操 NAMIKAWA Misao JFE スチール スチール研究所 数値解析研究部 主任研究員（副部長）
平谷多津彦 HIRATANI Tatsuhiko JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員（課長）

要旨

JFE スチールでは、高周波化に対応する高 Si 鋼板の開発を進めてきた。1993 年に 6.5% Si 鋼板（スーパーコア[®]）の営業生産を開始して以来、幾つかの新しい製品（傾斜磁性材料「JNHF」, 「JNSF」）を開発してきている。本稿では、スーパーコアの概要と代表的な適用例を紹介する。

Abstract:

JFE Steel has developed high silicon steel sheets in response to the demand for improved high switching frequency characteristics. Since starting commercial production of 6.5% Si steel sheet (Super Core[®]) in 1993, JFE Steel has developed several new products (Gradient silicon steel sheet: “JNHF” and “JNSF”) for high frequency applications. This paper introduces the overview and application of representative JFE Steel’s Super Core products.

1. はじめに

近年、再生可能エネルギーの活用や電気エネルギーを動力としたハイブリッド車の拡大など、市場における電気機器の使用用途は、増加している。使用される電気機器には、高効率、小型化が求められており、構成部材に対しても高効率、小型化を実現する為のパフォーマンスが要求されている。電気機器の高効率化や小型化は、作動周波数の高周波化の動きにつながり、その鉄芯材料にも高周波磁気特性の改善が求められている。

本稿では、JFE スチールが高周波対応磁性材料として、擁している高 Si 電磁鋼板スーパーコア[®]に関する磁気特性を中心とした材料基本特性の紹介と、高 Si 材料の市場拡大に必須と考えられる加工性に関する改善、および高周波化が進むモータ用途に関してスーパーコアを使用した場合の適用事例について述べる。

2. 高 Si 電磁鋼板スーパーコア[®] 「JNEX」, 「JNHF」, 「JNSF」

2.1 6.5% Si 鋼板「JNEX」

鋼板中の Si 含有量を高めることで、鋼板の電気抵抗が増加していき、渦電流損失が低減され、高周波鉄損が改善される。また、Si 含有量 6.5 wt% 付近で透磁率が極大、磁歪定数がほぼゼロになることが知られている。渦電流損失を低減するには、板厚を冷間圧延が必要となるレベルの厚さ

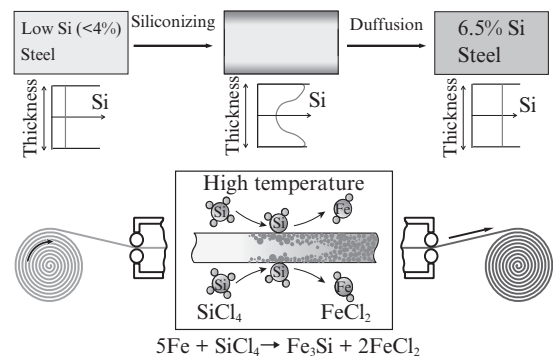


図 1 6.5% Si 鋼板製造方法概要

Fig. 1 Manufacturing process of 6.5% Si steel

とする必要がある。しかしながら、Si 含有量を増加させると冷間圧延に耐え得る機械特性が保持できないため、高 Si 鋼板の工業生産は実現されなかった。JFE スチールでは、この課題に対して、1980 年代後半より化学気送蒸着法（CVD 法）による生産技術開発を行ない、1993 年に世界初の工業生産を開始した¹⁾。図 1 に化学気相蒸着法による製造概要を示す。具体的には、冷間圧延可能な低 Si 鋼で圧延し、薄板化した後、無酸化雰囲気中で加熱を行なう、その高温環境下において鋼板表裏面に SiCl₄ ガスを吹き付け、鋼板表層において、鉄と Si の置換反応を発生させ、鋼板へ Si の添加を連続的に行なう。その後、高温で均熱処理を施し、連続的に均一な高 Si 薄板 JNEX の製造している。

2.2 傾斜高 Si 鋼板「JNHF」

JFE スチールは、化学気相蒸着法を用い連続浸珪処理し

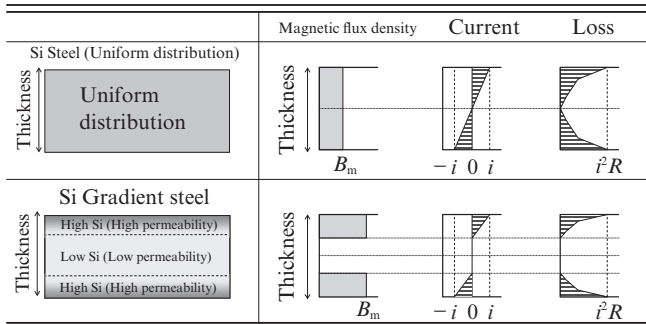


図 2 Si 傾斜磁性材効果概要

Fig. 2 Image of Si gradient steel performance

た材料において、板厚方向に Si 濃度の傾斜を有した材料が高周波鉄損に優れる現象を発見し、傾斜磁性材料「JNHF」の工業生産を開始した¹⁾。この傾斜磁性材料は、板厚方向の Si 濃度分布をコントロールし、表層部分を高透磁率層とすることにより、渦電流損失を低減することを可能とした。この渦電流損失の低減は、図 2 に模式的に示す考え方で整理できる。表内層の Si 濃度変化に起因する透磁率の差によって、励磁状態では、磁束が表層に集中する。その表層部分に磁束が集中し、それよりも内側での磁束変化がないとすると磁束密度変化によって生じる渦電流も表層のみの発生となるため、板厚方向に均一に磁束が通った場合と比較すると渦電流損失は低減される。特に 10 kHz 以上の周波数域では、均一な 6.5% Si 鋼板「JNEX」よりも優れた鉄損特性を有しており、高周波リアクトルの効率改善に貢献している。

2.3 高 Bs 傾斜 Si 鋼板「JNSF」

JFE スチールでは、傾斜磁性材料の高周波域における渦電流損失の低減効果を最大限活用する材料として、板厚方向の Si 濃度傾斜を従来の「JNHF」よりも拡大した「JNSF」を開発した²⁾。「JNSF」は、浸珪処理時に鋼板の相構造をコントロールし、相ごとに異なる Si の拡散速度の差を利用し、板厚方向の Si 濃度傾斜を大きくする。その結果、より大きな渦電流損失の低減効果を得ている。

また、従来の傾斜磁性材「JNHF」と比較して、平均 Si 濃度が低いことにより、高い飽和磁束密度特性を示す。図 3

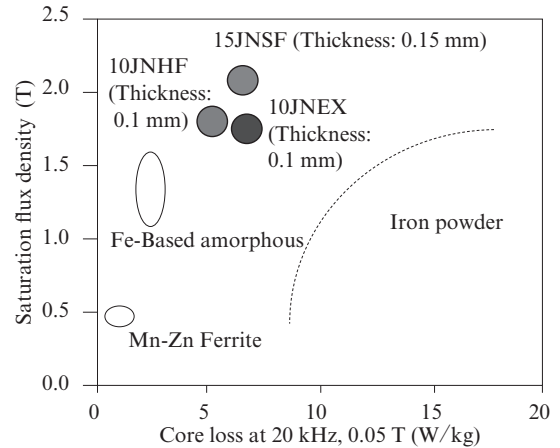


図 3 高周波磁性材磁気特性

Fig. 3 Overview of magnetic property at high frequency

に高周波コア材の磁気特性比較を示す。連続浸珪法の特長を最大限利用した傾斜磁性材である「JNSF」は、電気機器の高効率化に貢献する高周波鉄損を低減し、電気機器の小型化を実現する高磁束密度化を両立する材料として位置付け、用途拡大を期待している。

2.4 「JNEX」、「JNHF」、「JNSF」の素材基本特性

表 1 にスーパーコア[®]の代表特性例を示す。表には代表的な高周波対応材として極薄方向性電磁鋼板と鉄系アモルファスの特性例を示す。アモルファスは板厚が薄い効果により、全周波数域で良好な鉄損特性を示すが、磁歪定数が大きく、飽和磁束密度も電磁鋼板と比較すると低めとなっており、高周波リアクトル用途においては、大きさや騒音に難点がある。極薄方向性電磁鋼板は、飽和磁束密度は高いものの高周波鉄損が大きく、高周波リアクトルのコア材として用いた場合には、効率や発熱に関して難点がある。スーパーコアに関しては、飽和磁束密度と高周波鉄損のバランスが取れており高周波リアクトルとして使用された場合には、効率と体格に最適な設計に効果があると思われる。また、「JNEX」においては、磁歪定数が他材料と比較して小さくなっており、リアクトルの低騒音化に貢献できる。

リアクトルコア材としての加工に関して、アモルファスは、

表 1 磁気特性概要

Table 1 Typical magnetic properties

Material	Thickness (mm)	Saturation magnetic flux density (T)	Core loss (W/kg)				Magnetostriction at 400 Hz, 1.0 T ($\times 10^{-6}$)
			400 Hz	5 kHz	10 kHz	20 kHz	
			1.0 T	0.2 T	0.1 T	0.05 T	
10JNEX900	0.10	1.8	5.7	11.3	8.3	6.9	0.1
10JNHF600	0.10	1.9	10.1	11.2	7.1	5.4	3.1
15JNSF950	0.15	2.0	15.0	14.9	9.7	7.0	2.8
Grain oriented Si steel	0.10	2.0	6.4	20.0	18.0	14.0	-0.8
Fe-based amorphous	0.025	1.5	1.5	8.1	3.6	3.3	27.0

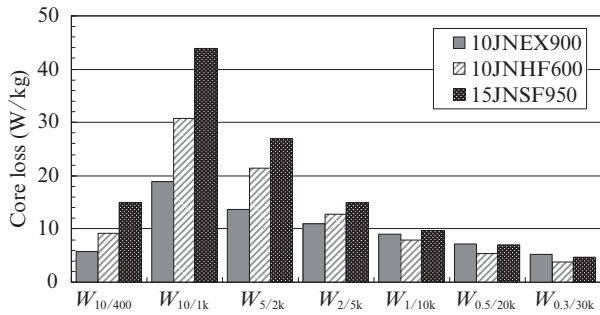


図4 「JNEX」, 「JNHF」, 「JNSF」の鉄損特性
Fig. 4 Core losses of "JNEX", "JNHF," and "JFSF"

板厚が薄いため、巻きコアが通常加工として考えられる。この場合、複数ギャップを導入するケースも踏まえるとコアカットやエッチングなどの工程数増加から設備投資が必要となり、量産性、コスト面に課題がある。スーパーコアは、型内接着技術を活用した積層コアを基本としており、プレス加工工程のみの製造工程となり、初期投資の低廉化や設計コア寸法の自由度も加味し、量産性と低コスト化の両立が可能となる。

図4にスーパーコア規格ごとの鉄損特性を示す。板厚0.1 mm 同士では、周波数 5 kHz よりも高い周波数域において傾斜磁性材である 10JNHF600 が板厚方向 Si 濃度が均一な 10JNEX900 よりも優れた鉄損特性を示す。また、高 B_s (飽和磁束密度) 傾斜磁性材 15JNSF950 は、周波数が 20 kHz 以上の周波数域において、板厚が厚いながら、均一材の 10JNEX900 よりも優れた鉄損特性を示す。これは、板厚方向 Si 濃度分布の効果によるもので、高周波鉄損を損なわずに、板厚を厚くすることで切り板加工の費用低減などの低コスト化が可能となる。スーパーコアの主要用途である高周波リアクトルで、騒音を重視した案件には、低磁歪特性を有した均一材の 10JNEX900 が採用されるケースが多く、効率重視の案件では 10JNHF600 の採用が多い。今後は、さらなるコスト重視のケースも想定され、15JNSF950 のニーズ拡大も考えられる。

3. スーパーコア® 加工性改善

3.1 加工性改善ニーズ

高周波磁気特性に優れたスーパーコア®の市場普及に際して、材料の加工性が製造当初より課題となっていた。化学気相蒸着法を用いた連続浸珪処理で製造された鋼板は、スリット加工を行ない、コア形状にプレス加工(せん断, 打抜き加工)を行なうケースが多い。また、スリット加工後、巻き加工を行なうケースもある。この加工に耐え得る材料の加工性が必要であり、至近では、用途拡大に伴って、複雑形状での打ち抜き加工要求もある。

3.2 加工性改善

開発当初よりスーパーコア®の室温での塑性加工においては、弾性域段階での割れ発生が多く、巻き加工においても巻き付け内径を大きくするなどの処置が必要とされていた。しかしながら、同工程で製造されたスーパーコアの中に室温加工に十分耐え得る製品も確認されるケースがあり、この加工性良好材に関して調査を進めてきた³⁾。

写真1に加工性の異なる材料の破断部外観を示す。加工性良好材は、結晶粒内の破壊が確認できるが、加工困難材は、結晶粒界での破壊が認められる。この破壊形態の違いから、加工性には結晶粒界の性状が影響していると考えられる。

そこで、調査対象材の結晶粒界面に存在する元素調査を行なった。調査は、試料を液体窒素温度に冷却し、真空容器内で衝撃を与え、粒界破壊させ、その面をオージェ分析することにより行なった。図5に測定結果を示す。加工困難材の粒界には、強い酸素のピークが認められ、加工性良好材とは、差異が認められる。高温焼鈍において雰囲気ガス中の微量酸素や水分により鋼板表面や結晶粒界が酸化することが知られており、スーパーコアにおいても同様に結晶粒界が酸化していると考えられる。

結晶粒界酸化と加工性の関係を明確にするため、実験室の温間圧延機で作製した0.3 mm厚の6.5 wt% Si鋼板に対し、炉内雰囲気露点を変えて1200℃で熱処理し、結晶粒界の酸化状態を変えたサンプルを製作し、加工性の評価として3点曲げで破壊するまでのストローク長さを測定し、評価サン

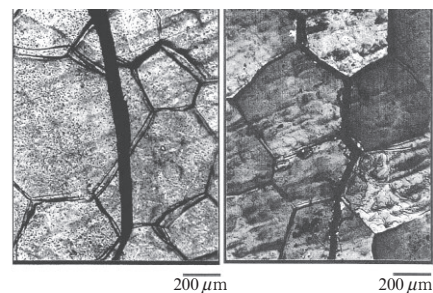


写真1 割れ発生状況
Photo 1 Appearance of the crack

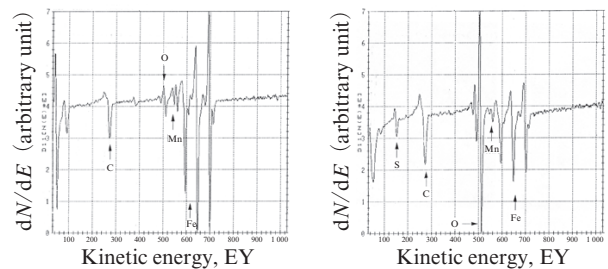


図5 粒界の分析結果
Fig. 5 Analysis of grain boundary

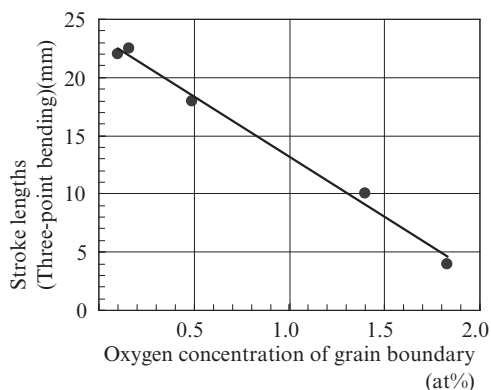


図6 3点曲げ試験結果

Fig. 6 Result of three-point bending test

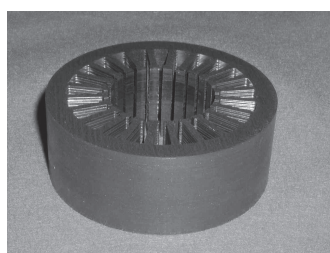


写真2 プレス加工品例 (10JNEX900)

Photo 2 Example of punching product (10JNEX900)

ブルは、オージェ分析で粒界の酸素濃度を測定した。図6に本評価の結果を示す。

粒界酸素濃度の増加に伴い、ストロークが短くなっており、加工性が低下していることが分かる。このような調査結果より炉内での酸化抑制対応を設備改善、材料設計で実施し、浸珪処理後製品の加工性改善を実現した。

加工性改善を行なった結果、従来では、常温加工は不可能と考えられていたモータ形状のような複雑形状の常温打ち抜き加工も可能となった。写真2にモータコア加工例を示す。材料は6.5% Si 鋼板 (10JNEX900) を用いて、打ち抜き加工は常温で行ない、積層固定は接着にて実施した。

JFE スチールでは、コア加工に関しても、加工先との技術連携を行ない、多岐に渡る加工の対応を行なっている。

至近では、次世代モータの評価に関する対応も多く、さまざまな形状のモータコア加工を実現し、市場への提供を行なっている。

4. スーパーコア® 適用例

4.1 モータコア材へのニーズ

モータ機器の高効率化、小型化が、エネルギーの有効活用の観点から著しい進歩を見せている。回転数の高速化による作動周波数の高周波化は徐々に進行しており、モータコア材の高周波低鉄損化が、求められている。スーパーコア®

は、優れた高周波低鉄損を有しており、モータコアへの適用が期待される。JFE スチールでは、自社のモータ評価システムを用い、材料特性改善の有効性評価を行なった。

4.2 スーパーコア® のモータへの適用例

JFE スチールでは、写真3に示すモータ評価システムを用いて、モータ効率へのコア材の有効性の評価を行なった⁴⁾。

図7にスーパーコア® をコア材として使用し、モータ効率の測定を行なった結果を示す。スーパーコアと比較材として評価した無方向性電磁鋼板の磁気特性を表2に示す。測定条件は、モータ形式をIPM モータとし、4極、ステータ外径φ105 mm、積厚45 mmのコア寸法で最大出力2 kWにて回転数を変えて、モータ効率を測定した。低回転数域から高回転域まで一般電磁鋼板の高グレード材料のモータ効率よりもスーパーコアのモータ効率は、上回っている。特に5000 rpm以上の高回転域では、効率で2%程度良好な結果が得られた。

表2に評価に使用した材料の磁気特性概要を示す。高周波域での素材の鉄損低減効果が高回転域でのモータ効率改善効果と同様の傾向を示している。今後、高速化されていく回転機のコア材としてスーパーコアを使用することにより、従来の無方向性電磁鋼板よりも効率改善が期待できる。

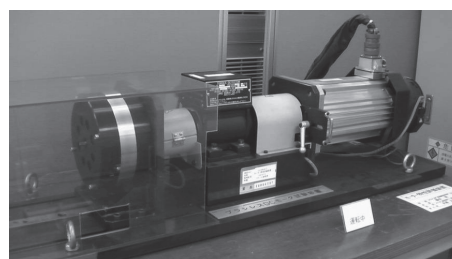


写真3 モデルモータ評価装置

Photo 3 Model motor evaluation system

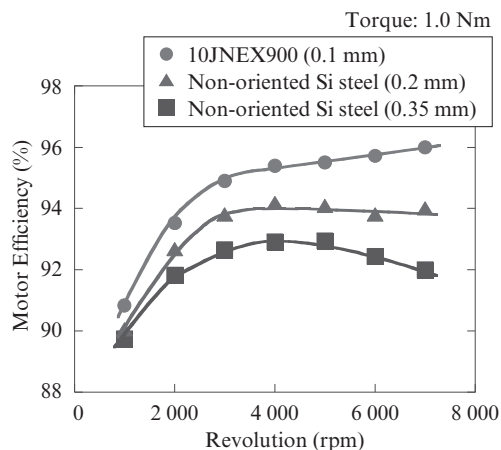


図7 モータ効率と速度相関⁴⁾

Fig. 7 Motor efficiency and motor speed⁴⁾

表 2 モータテスト用材料の磁気特性
Table 2 Magnetic properties of motor test material

Material	Thickness (mm)	Core loss (W/kg)				Permeability direct current	Magnetostriction at 400 Hz, 1.0 T ($\times 10^{-6}$)
		50 Hz	400 Hz	1 kHz	10 kHz		
		1.0 T	1.0 T	1.0 T	0.1 T		
10JNEX900	0.1	0.5	5.7	18.7	8.3	23 000	0.1
Non-oriented Si steel	0.2	0.9	10.9	39.7	20.2	10 500	3.5
	0.35	0.9	16.6	71.1	36.6	10 300	3.0

5. おわりに

JFE スチールでは、電気機器の高周波化の流れに対応し高効率、小型化を実現する高周波磁気特性に優れたスーパーコア®の開発、工業生産を世界に先駆けて行ってきた。従来では困難と考えられてきた高 Si 鋼板の常温加工を粒界酸化の抑制により実現し、多様なコア形状加工を実現する技術確立し、市場のニーズに対応したコア供給を行なっている。また、浸珪処理時の相構造制御による板厚方向の Si 濃度傾斜効果の最大限活用した「JNSF」を開発し、高周波磁性材料において、理想的な高飽和磁束密度と高周波低鉄損を両立する材料を実現した。今後、半導体素子の技術革新などにより、さらなる高周波化が予想されるパワーエレクトロニクス分野でのスーパーコアの貢献に期待しながら、JFE スチールは、さらなる高周波対応材料の開発を行なっていく。

参考文献

- 1) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘, JFE 技報. 2005, no. 8, p. 11-16.
- 2) 平谷多津彦, 尾田善彦, 浪川操, 笠井勝司, 二宮弘憲, まてりあ. 2014, vol. 53, no. 3, p. 110-112.
- 3) 平谷多津彦, 藤田耕一郎, 二宮弘憲, 笠井勝司. 【D】平成 23 年電気学会産業応用部門大会講演論文集. 2011, ronbun no. 3-36, p. 215-220.
- 4) 尾田善彦, 平谷多津彦ほか. ふえらむ. 2012, vol. 17, no. 12, p. 823-828.



笠井勝司



浪川 操



平谷多津彦