

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

財前 善彰^{*1)} 尾田 善彦^{*2)} 大久保智幸^{*1)}
笠井勝司^{*3)} 戸部輝彦^{*4)}

1. 緒 言

近年、地球温暖化に対する関心が世界的に高まっており、地球温暖化防止の観点からエネルギー高効率利用およびCO₂の排出削減が強く求められている。モータは国内総電力量の約50%を占め、特に産業用分野では70%以上の電力が消費されている。仮に国内で使用されるモータ効率を1ポイント高めた場合、50万kWクラスの原発1基分の省エネにつながるとの試算もあることから⁽¹⁾、モータ高効率化に寄与する技術開発が強く求められている。また、自動車業界においても、CO₂排出量削減の観点から、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)、燃料電池車の開発が急速に進展している。このような分野における駆動モータに対する高性能化・高効率化への要求は、ますます厳しくなっており、鉄心材料として使用される無方向性電磁鋼板にも更なる高性能化が求められている。

モータ高効率化の観点からは、高周波域での鉄損低減が強く求められる。JFE スチールでは薄鋼板の仕上圧延後にSiを付与するCVD(Chemical Vapor Deposition)連続浸珪プロセスにより、高周波鉄損の低い6.5%Si鋼(JNEX[®])、Si傾斜磁性材料(JNHF[®]、JNSF[®])を開発してきた⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。高速モータ用途では高周波域での鉄損低減とともに、高トルク化(高出力化)の観点から素材の高磁束密度化も強く求められるが、Si傾斜磁性材料は一般的な電磁鋼板(3%Si鋼)と比較して、磁束密度が低いという課題を有していた。著者らは、Si濃度分布の最適化と結晶方位制御技術を組み合わせることで、

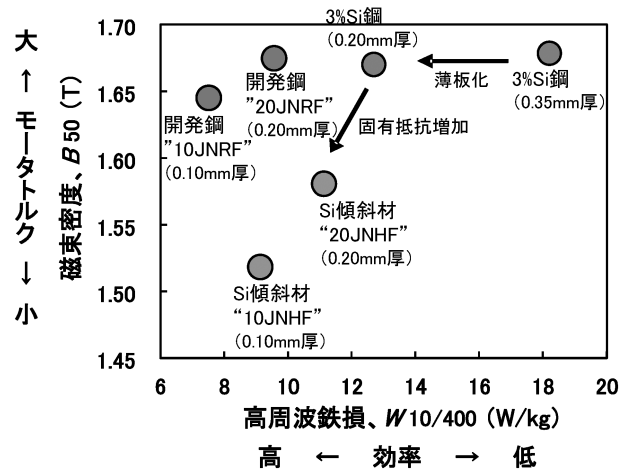


図1 高周波コア材料の磁気特性比較.

3%Si鋼並みの高い磁束密度と現行Si傾斜磁性材料(JNHF[®])を凌ぐ低鉄損特性を両立したSi傾斜磁性材料JNRF[®]を開発することに成功した(図1)。

2. 開発のコンセプト

はじめに鉄損について述べる。電磁鋼板の鉄損は、周波数に比例するヒステリシス損と周波数の約2乗に比例する渦電流損とから構成される。すなわち、周波数の上昇にともない鉄損に占める渦電流損の割合が高くなるため、高周波鉄損の低減には渦電流損の低減が重要となる。渦電流損の低減には固有抵抗増加と薄板化が有効な手段であるが、Si、Al等の合金添加による固有抵抗増加は添加量の増加とともに材料の磁束密度が低下する。一方、薄板化は鋼板の製造コスト上昇、およびコア加工コストの上昇を招く。

上記以外の渦電流損の低減手法として、連続浸珪プロセスによって板厚方向にSi濃度差を付与する技術が挙げられる。本手法で開発されたSi傾斜磁性材料は、10kHz以上の高い周波数域では6.5%Si鋼板よりも低鉄損を示すことが知られている⁽³⁾。このSi傾斜磁性材料は、表層がSi濃度の高

* JFE スチール株式会社
スチール研究所 電磁鋼板研究部：1)主任研究員 2)部長
東日本製鉄所 3)商品技術部：室長
4)冷延部：主任部員
Development of Si-gradient Steel Sheet JNRF Core for High-speed Motors: Yoshiaki Zaizen, Yoshihiko Oda, Tomoyuki Okubo, Shouji Kasai and Teruhiko Tobe(JFE Steel Corporation)
2021年10月14日受理[doi:10.2320/materia.61.44]

い高透磁率層，板厚中心層が Si 濃度の低い低透磁率層となっている．このような材料を板面と平行な方向に励磁すると，図 2 に示すように磁束は透磁率の高い表層に集中し，磁束変化によって生じる渦電流損も表層のみで発生する．このため，Si 傾斜磁性材料の渦電流損は，Si 濃度差を大きくすることで低下する．一方で，ヒステリシス損は Si 濃度差を大きくすることで表層と内層の Si 量の格子定数差にもなう残留応力により増加する⁽⁵⁾．

図 3 に板厚方向の表層と内層の Si 濃度差 (ΔSi) と鉄損の関係を示す．鉄損の極小値はヒステリシス損と渦電流損のバランスで決定されるが，従来の Si 傾斜磁性材料 (JNHF[®]) は高周波用電気機器 (リアクトル等) のコア材料として開発されており，10 kHz 以上の鉄損低減の観点から ΔSi の最適化がなされている．一方，高速モータ用途では 400 Hz ~ 1 kHz 域の鉄損低減が重要となる．本周波数域では鉄損に占めるヒステリシス損の割合が高いため，最適 ΔSi は従来の Si 傾斜磁性材料と比較して小さくなる．図 4 に従来の Si 傾斜磁性材料 (JNHF[®]) と開発材 (JNRF[®]) の Si 濃度分布の模式図を

示す．開発材は 400 Hz 域の鉄損低減を図るため表層と内層の Si 量の格子定数差にもなう残留応力制御の観点から，Si 濃度分布の最適化を行っている．

次に，磁束密度向上について述べる．低磁場域の磁束密度は鋼板内部の残留応力の影響を強く受けることから，図 4 に示した Si 濃度分布最適化による内部応力低減により，鉄損低減と低磁場域の磁束密度向上を両立できる．また，高磁場域の磁束密度向上には Si 量低減による飽和磁化向上が効果的であり，開発材の Si 濃度分布は高磁場域の磁束密度向上の観点でも有効である．

さらに高磁場域の磁束密度を高めるためには集合組織の制御も重要となる．本開発材は中間工程の最適化，および偏析元素の活用を行い，磁気特性に有害な {111} 方位粒を低減し，{100}，{110} 方位粒を増加させる集合組織制御技術を適用することで，低磁場域のみでなく高磁場域の磁束密度向上も図っている．

3. 開発材の磁気特性

開発材の磁気特性一例を表 1 に示す．開発材の板厚は，従来の Si 傾斜磁性材料 (JNHF[®]) と同様に 0.10 mm 厚，0.20 mm 厚である．表 1 より，開発材は従来の Si 傾斜磁性材料 (JNHF[®]) と比較して磁束密度の向上を図るとともに，50 Hz ~ 1 kHz 域の鉄損 $W_{15/50}$ ， $W_{10/400}$ ， $W_{10/1k}$ の低減が認められている．図 5 に開発材 (20JNRF) と従来の Si 傾斜磁性材料 (20JNHF) の製品板における板面に平行な {100} 面，{111} 面の X 線反射強度の比率を示す．20JNRF は磁気特性にとって悪影響を及ぼす {111} 方位粒の低減，および磁気特性にとって好ましい {100} 方位粒の増加が認められる．

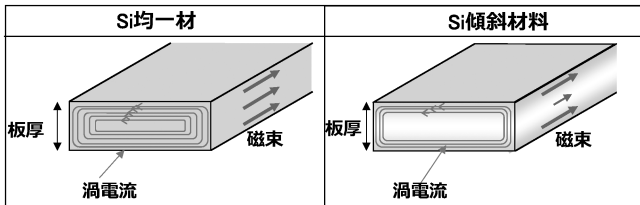


図 2 板厚方向の Si 濃度分布による渦電流損低減.

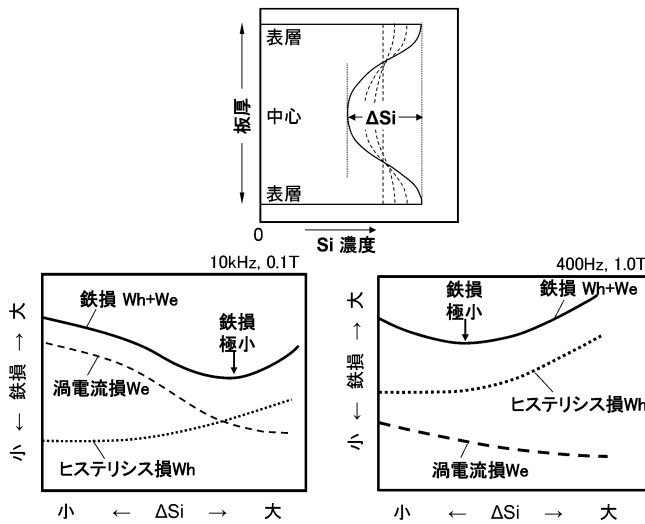


図 3 Si 傾斜磁性材料の板厚方向 Si 分布と鉄損の関係.

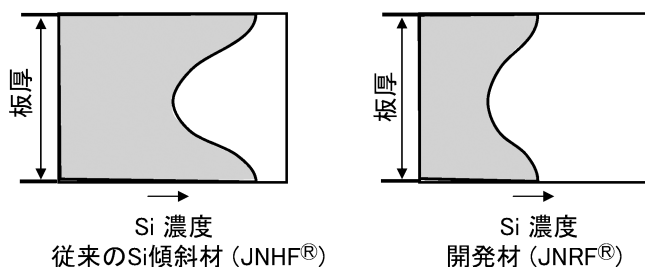


図 4 開発材の Si 濃度分布.

表 1 開発材 (JNRF[®]) の磁気特性一例.

名称	板厚 (mm)	$W_{15/50}$ (W/kg)	$W_{10/400}$ (W/kg)	$W_{10/1k}$ (W/kg)	B_{50} (T)	備考
10JNRF	0.10	1.65	7.50	25.5	1.65	開発材
20JNRF	0.20	1.55	9.50	37.5	1.68	
10JNHF600	0.10	1.89	9.20	27.5	1.51	従来 Si 傾斜材料
20JNHF1300	0.20	1.85	11.2	39.5	1.58	
20JNEH1500	0.20	2.40	12.7	48.0	1.68	

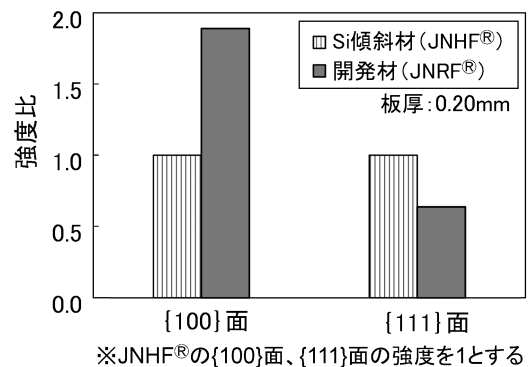


図 5 製品板の面強度比.

このように、板厚方向の Si 濃度分布制御と結晶方位制御を組み合わせることで、3%Si 鋼と同等の磁束密度特性と従来の Si 傾斜磁性材料を凌ぐ低鉄損特性(50 Hz~1 kHz)を両立する新しい Si 傾斜磁性材料を開発した。

4. HEV/EV 駆動モータへの適用

HEV/EV 駆動モータは、加速・登坂時は高トルクが要求されるため、電磁鋼板には高磁束密度が必要となる。一方、市街地走行、および高速走行時は高効率化が要求されるため、電磁鋼板には低鉄損が必要となる。開発材は高磁束密度と低鉄損特性を両立していることから、高トルク・高効率が必要される HEV/EV のモータコア材として有望であると考えられる。

HEV/EV 駆動モータにおける開発材の優位性を確認するため、出力15 kW の IPM(埋め込み磁石型、8 極)モータを対象に磁界解析、および実測評価によりモータ効率を評価した。ここでは、板厚0.20 mm 厚の開発材 20JNRF、従来の Si 傾斜磁性材料(20JNHF)、3%Si 鋼(0.20 mm 厚)の3種の材料について、ステータ鉄心に適用した場合の比較評価を実施した。

図6に磁界解析によって算出したモータ効率マップを示す。開発材(20JNRF)は、高トルク領域では3%Si 鋼(0.20 mm)適用時と同等のモータ効率を示すとともに、高速・低負荷領域(回転速度:3000 rpm~9000 rpm, トルク:0~20 Nm)では高効率領域の大幅な拡大が認められる。次に図7に市街地走行(4500 rpm, 7.5 Nm)、および高速走行(9000 rpm, 4.8 Nm)に相当する条件でのモータ効率を示すが、開発材(20JNRF)は従来の Si 傾斜磁性材料(20JNHF)、および3%Si 鋼(0.20 mm)適用時と比較して、0.21~0.56ポイントの効率向上が認められる。市街地・高速走行条件では、鉄損が主体となるため開発材の低鉄損特性を反映したモータ効率の向上が認められたものと考えられる。以上のことから、開発材は HEV/EV 駆動モータの高トルク化・高効率化に大きく寄与できるものと考ええる。

5. 結 言

開発した Si 傾斜磁性材料(JNRF[®])は、高磁束密度と低鉄損特性を両立していることから、特に高トルク・高効率が必要される EV, HEV 駆動モータのコア材料として好適であると考えられる。また今後、小型・高出力化が指向されるモータ分野での活用が期待され、モータの高効率化によってカーボンニュートラルの実現にも大きく貢献するものと考えられる。

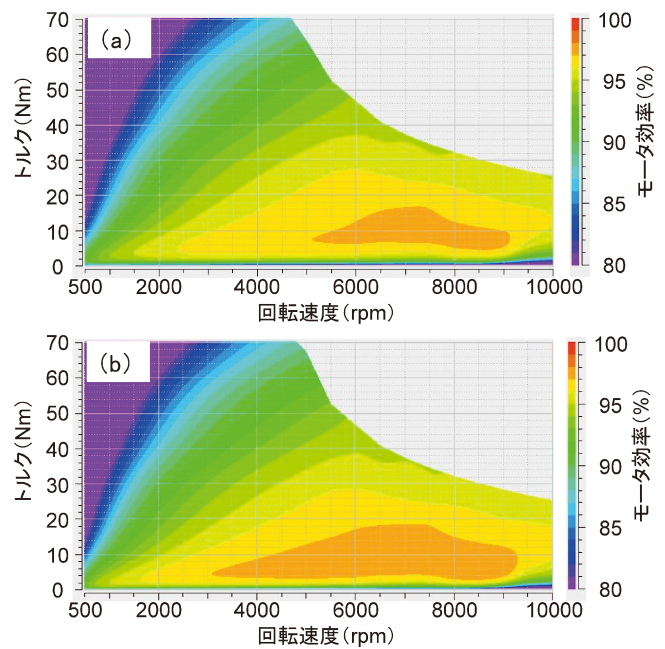


図6 モータ効率マップの比較(磁界解析)。
(a) 3%Si 鋼(0.20 mm 厚), (b) 開発材(20JNRF)

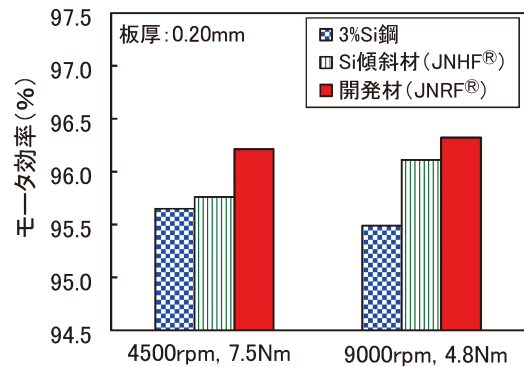


図7 市街地走行、高速走行条件でのモータ効率評価結果。

なお、Si 傾斜磁性材料に関する特許はこれまでに20件以上が登録され、本技術に関するものとしては、特許第6519725号、特許第6870791号等がある。

文 献

- (1) 森本茂雄: 大阪府立大学工学部大学院工学研究科ニュース, **34**(2004), 13-14.
- (2) H. Haiji, *et al.*: J. Magn. Magn. Mater., **160**(1996), 109-114.
- (3) 平谷多津彦 他: まてりあ, **53**(2014), 110-112.
- (4) 平谷多津彦 他: JFE 技報, **36**(2015), 12-16.
- (5) 尾田善彦 他: 電気学会論文誌 D, **135**(2015), 1199-1206.