



解説

受賞技術 - 40

電気機器の省エネに貢献する 省資源型 Si 傾斜磁性材料の開発

Development of Si Gradient Steel Sheet that Contributes to
Energy Saving in Electric Equipments

財前善彰
Yoshiaki Zaizen

JFE スチール (株)
スチール研究所
主任研究員

1 はじめに

モータ、変圧器、リアクトル等の電気機器の鉄心材料には電磁鋼板、アモルファス、圧粉磁心等が使用されているが、中でも電磁鋼板は国内生産量の95%以上を占めており、鉄心材料として広く使用されていることから、電気機器の高効率化には電磁鋼板の高性能化が重要な役割を担っている。電磁鋼板の特性の中でも鉄損は電気機器の効率・発熱に大きく影響するため低減が求められているが、特に最近では電気機器の小型・高効率化を目的として、機器の動作周波数が高くなる傾向にあるため、高周波域での鉄損低減が強く求められている。

無方向性電磁鋼板の鉄損は、ヒステリシス損と渦電流損から構成されるが、このうち渦電流損は式 (1) に示すように周波数の2乗に比例することから、励磁周波数の増加にともない大きく増加することとなる。

$$We = (\pi B_m f t)^2 / 6\rho \quad (1)$$

ここで、 B_m ：最大磁束密度、 f ：周波数、 t ：板厚、 ρ ：固有抵抗である。

式 (1) からわかるように、電磁鋼板を高周波で励磁した際の渦電流損を低減するためには、板厚の低減と固有抵抗の増大が効果的である。鋼板の固有抵抗を高めるためにはSi添加が最も効果的であり、特にSiを6.5%まで添加すると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¹⁾。しかしながら、Si添加量が増加すると材料の伸びが急激に低下し、圧延法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1993年、圧延法に代わりCVD法（化学気相蒸着法）による高けい素鋼板の製造技術が開発され、6.5%けい素鋼板が量産されるようになった²⁾。

一方で、電気機器の更なる小型・高効率化の観点から、6.5% Si鋼を凌ぐ高い飽和磁束密度、高周波低鉄損を有する材料が要求されはじめている。こうした要求に対し、CVD法（連続浸珪法）を用い、板厚方向のSi濃度分布制御という新技術によって高周波鉄損と高飽和磁束密度を両立した省資源型Si傾斜磁性材料（JNHF[®]、JNSF[®]、JNRF[®]）を開発した。本報ではその特長と用途について述べる。

2 Si 傾斜磁性材料の製造方法

図1に高けい素鋼板の製造プロセス（CVD連続浸珪法）を示す。Si量が3%程度の材料を冷間圧延によって所定の板厚とした後、四塩化珪素ガスを鋼板表面に吹き付けながら高温で焼鈍することによって、Siを鋼板表層に浸珪し、その後の

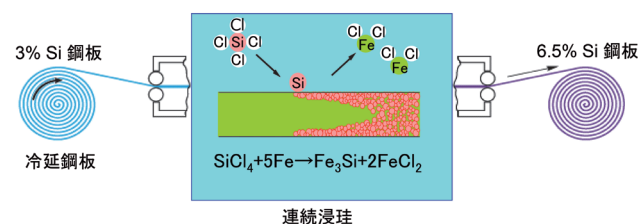


図1 高けい素鋼板の製造プロセス（CVD連続浸珪法）
(Online version in color.)

拡散焼鈍により鋼板内部に拡散させることにより板厚方向にSiを均一化させた6.5%けい素鋼板が製造されている²⁾。この連続浸珪プロセスにおいて、鋼板表面と四塩化珪素ガスを反応させた後、Siが板厚中心部まで十分に拡散して均一化する前に冷却すると、図2に示すような表層のSi濃度が高く、板厚中央部のSi濃度が低いという板厚方向にSi濃度分布を有

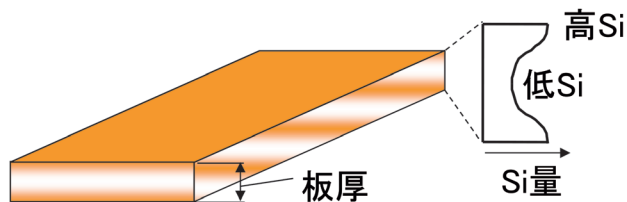


図2 Si傾斜磁性材料の板厚方向のSi濃度分布イメージ
(Online version in color.)

する鋼板を得ることができる³⁾。このような板厚方向にSi濃度分布を有する材料を板面と平行な方向に磁化した場合、図3に示すように磁束は透磁率の高い表層(高Si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⁴⁾。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量の格子定数差にともなう残留応力により増加する⁵⁾。

一例として、図4に周波数400Hz、および10kHzにおける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ことから、励磁周波数に応じて鉄損が極小となる ΔSi が異なる。そこで、周波数領域に応じてSi濃度分布の最適化を行い、Si傾斜磁性材料を製品化している。

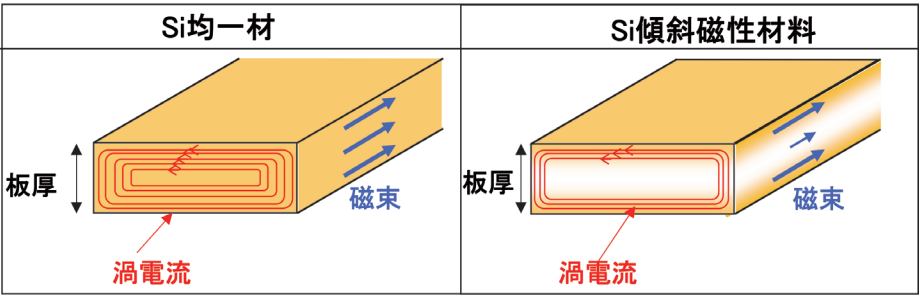


図3 板厚方向のSi濃度分布による渦電流損低減 (Online version in color.)

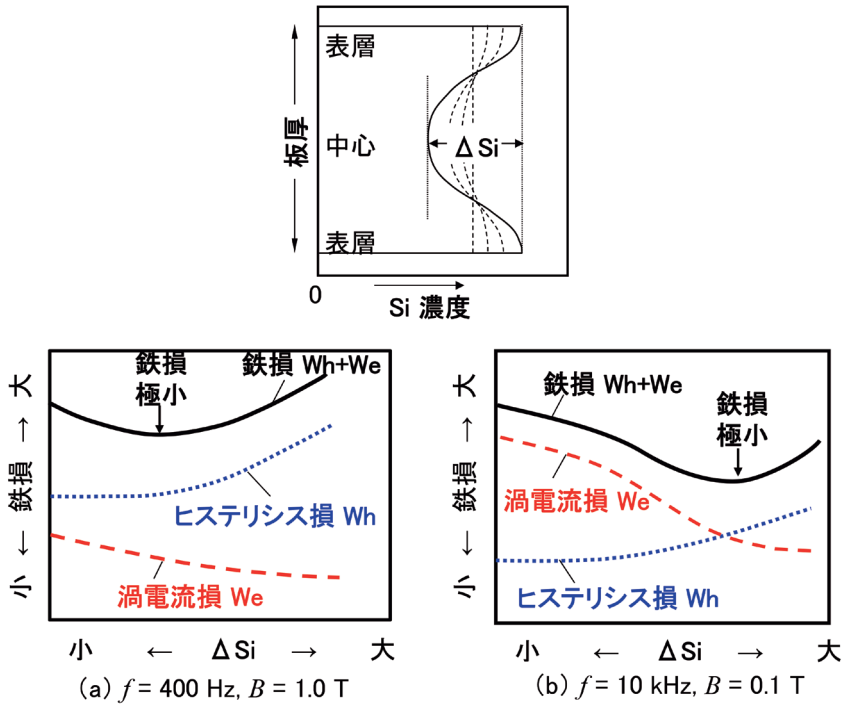


図4 Si傾斜磁性材料の板厚方向Si分布と鉄損の関係 (Online version in color.)

3 省資源型Si傾斜磁性材料の開発

3.1 Si傾斜磁性材料

Si傾斜磁性材料 (JNHF) は、板厚表層部のSi濃度が6.5%、板厚中心部のSi濃度が3%程度の材料である³⁾。図5にSi傾斜磁性材料の鉄損を6.5% Siけい素鋼板と比較して示す。Si傾斜磁性材料は10kHz以上の周波数領域において、6.5% Siけい素鋼板を凌ぐ低鉄損を示す。

図6に両者のヒステリシス損と渦電流損に分離して比較した結果を示す。Si傾斜磁性材料は、6.5% Siけい素鋼板と比較し

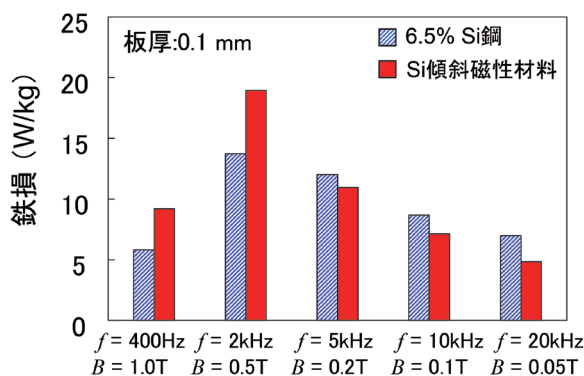


図5 Si傾斜磁性材料の高周波鉄損 (Online version in color.)

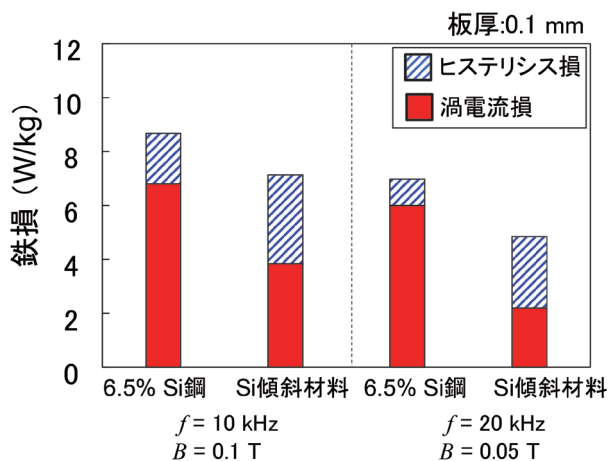


図6 Si傾斜磁性材料のヒステリシス損と渦電流損 (Online version in color.)

て、渦電流損が小さいという特長を有している。このため、渦電流損の比率が大きくなる高周波領域において、Si傾斜磁性材料は優れた鉄損特性を示す。

Si傾斜磁性材料のこうした特性は、2章で述べたように板厚方向のSi分布最適化によって鋼板表層に磁束が集中する効果と考えられている⁴⁾。鋼板の渦電流損を低減する従来手法としては、鋼板の薄板化、またはSi添加量の増加による固有抵抗の上昇が挙げられる (式 (1))。しかしながら、鋼板の板厚を薄くしすぎると、鋼板製品のコストアップを招くばかりでなくコア加工工数の増加による生産性の低下につながるため好ましくない。また、Si添加量の増加は、鋼板の飽和磁束密度を低下させてしまう。これに対して、Si傾斜磁性材料は、板厚方向にSi濃度勾配を付与することにより板厚を薄くすることなく鉄損を低減した材料であり、板厚中心部のSi量が低いことから飽和磁束密度も高いという特長を有している。

このようにSi傾斜磁性材料は、高い飽和磁束密度と低い高周波鉄損の両立が求められる分野に適したコア材料として、今後の展開が期待されており、特に高周波リアクトルや高周波モータコア材として好適である。

3.2 Si局在化材料

Si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した材料として、板厚方向のSi濃度勾配を従来よりも急峻にした材料を開発した⁶⁾。本報では、前節で述べたSi傾斜磁性材料と区別するため、Si局在化材料 (JNSF) と呼称する。

図7にSi傾斜磁性材料とSi局在化材料の板厚方向のSi濃度分布の模式図を示す。Si局在化材料は、 γ 域浸珪を活用することで相毎に異なるSiの拡散速度の差を利用することにより、鋼板表層部のみにSiを濃化させている。

図8にSi局在化材料とSi傾斜磁性材料および6.5% Siけい素鋼板の磁気特性を比較した結果を示す。Si局在化材料はSi傾斜磁性材料、6.5% Siけい素鋼板と比較して優れた高周波鉄損特性を示す。これは鋼板表層へのSiの局在化によって、渦電流損が大きく低下しているためである。

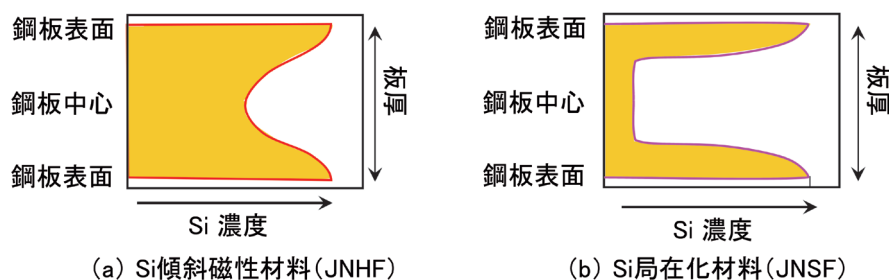


図7 Si傾斜磁性材料とSi局在化材料の板厚方向のSi分布模式図 (Online version in color.)

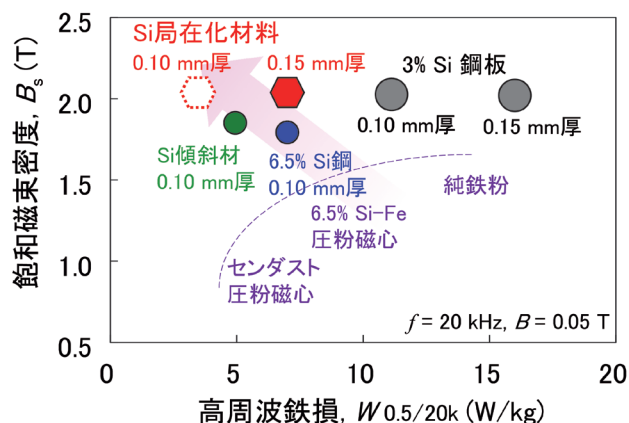


図8 Si局在化材料の磁気特性 (Online version in color.)

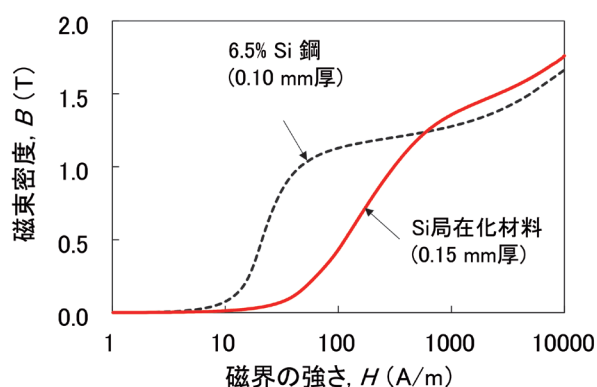


図9 Si局在化材料の直流磁化特性 (Online version in color.)

図9にSi局在化材料の直流磁化特性を示す。Si局在化材料は6.5%けい素鋼板と比較して、平均Si濃度が低いことにより飽和磁束密度が高く、高磁場域で高い磁束密度を示す。

Si局在化材料は飽和磁束密度が高く、高周波域での鉄損が低いことから高周波リアクトル等のコア材料として使用されている。

3.3 高磁束密度Si傾斜磁性材料

高速モータ用途では、モータの高効率・高出力化の観点から400Hz～1kHz域の低鉄損化とともに素材の高磁束密度化も要求されることから、低鉄損と高磁束密度を両立した高磁束密度Si傾斜磁性材料 (JNRF) を開発した⁷⁾。高速モータ用途で重視される周波数領域 (400Hz～1kHz) では鉄損に占めるヒステリシス損の割合が高いため、表層と内層のSi量の格子定数差にともなう残留応力制御の観点からSi濃度勾配の最適化を行うとともに、飽和磁束密度向上の観点から平均Si含有量を低減している。また、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。高磁束密度Si傾斜磁性材料は、磁気特性にとって好ましい {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、高磁場域の磁束密度向上も図っている。

図10に高磁束密度Si傾斜磁性材料の磁気特性を示す。高

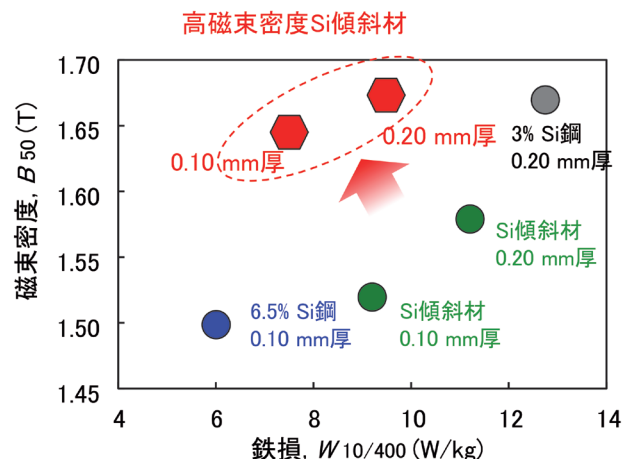


図10 高磁束密度Si傾斜磁性材料の磁気特性 (Online version in color.)

磁束密度Si傾斜磁性材料はSi傾斜磁性材料 (JNHF) と比較して、400Hz域の低鉄損化と大幅な高磁束密度化を両立している。このことから、高磁束密度Si傾斜磁性材料はEV駆動モータやドローンモータ等の高トルク化・高効率化に大きく寄与できるものと考えられる。

4 おわりに

本報では、板厚方向へのSi濃度分布制御技術を活用したSi傾斜磁性材料の特長、およびその磁気特性について述べた。Si傾斜磁性材料は、高い飽和磁束密度と低い高周波鉄損を両立した高性能電磁鋼板であり、モータやリアクトル等の電気機器の省エネルギー化を通じてカーボンニュートラルの実現に大きく貢献できるものと考えられる。

参考文献

- 1) R.M.Bozorth : Ferromagnetism, D. Nostrand Co. Inc., (1951).
- 2) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦 : まてりあ, 33 (1994), 423.
- 3) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘 : JFE技報, (2005) 8, 11.
- 4) 平谷多津彦, 浪川操, 二宮弘憲, 尾田善彦, 戸田広朗 : 電気学会論文誌A, 134 (2014) 11, 610.
- 5) 尾田善彦, 平谷多津彦, 笠井勝司, 大久保智幸, 千田邦浩, 千葉明 : 電気学会論文誌D, 135 (2015) 12, 1199.
- 6) 平谷多津彦, 尾田善彦, 浪川操, 笠井勝司, 二宮弘憲 : まてりあ, 53 (2014) 3, 110.
- 7) 財前善彰, 尾田善彦, 大久保智幸, 笠井勝司, 戸部輝彦 : まてりあ, 61 (2022) 1, 44.

(2023年2月14日受付)