飽和磁束密度が高く高周波鉄損の低い Si 傾斜磁性材料 JNSF の開発

平谷多津彦¹⁾ 尾田善彦¹⁾ 浪川 操²⁾
笠井勝司³⁾ 二宮弘憲⁴⁾

1. 緒 言

半導体のスイッチングにより電力制御を行うパワーエレクトロニクス分野において、電源の小型化・高効率化を図るための高周波化が進み、現在、太陽光発電のパワーコンディショナやハイブリッド車のような数 k~数十 kW 級の中容量電源においては 10 k~20 kHz で、メガソーラ等の数百 kW~数 MW 級の大容量電源においても数 kHz で駆動されるようになった。最近、より高電圧かつ高周波で駆動可能な SiC パワー半導体の量産技術も確立しつつあり、スイッチング周波数の高周波化は一層進むものと予想される。このようなパワーエレクトロニクス技術の発展にともない、リアクトル等の電源部品にもさらなる高性能化が求められている。

6.5%Si 鋼板は、最も軟磁気特性に優れた電磁鋼板として古くから知られている。しかしながら硬く脆いため、一般的な圧延プロセスによる製造は困難であった。これに対し、薄鋼板の仕上圧延後に CVD (Chemical Vapor Deposition) 法により Si を付与する連続浸珪プロセスが開発され、6.5%Si 鋼板の工業生産が可能となった¹⁾。6.5%Si 鋼の固有抵抗は 3%Si 鋼板の 2 倍近くあり、渦電流が流れ難く発熱し難いことから、高周波用途のコア材としても優れている。その反面、一般的な電磁鋼板に比べて飽和磁束密度が低いという課題を有している。コア材の飽和磁束密度低下は、電源小型化・高効率化にとって好ましくない。図 1 に高周波用コア材の特性バランスを示す。飽和磁束密度が高く、かつ高周波鉄

図 1 高周波用コア材の磁気特性比較。

損の低いものが理想的なコア材といえるが、その両立は難しい。著者らは γ 域浸珪という新しい技術を試み、3%Si 鋼板並みの高い飽和磁束密度と 6.5%Si 鋼板並みの低い高周波鉄損を両立した Si 傾斜磁性材料 JNSF を開発することに成功した。

2. 開発のコンセプト

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。周波数が高くなるほど渦電流損の占める割合が増すため、高周波用途のコア材としては渦電流損の低い材料が求められている。

鋼板の渦電流損を低減するには、固有抵抗増加と薄板化が有効である。実際、電磁鋼板には Si, Al 等の固有抵抗増加元素が添加されているが、添加量増加とともに材料の飽和磁束密度は低下してしまう。板厚に関しては、現在 0.1 mm 以下まで薄く圧延した極薄電磁鋼板が高周波用途に用いられている。しかしながら板厚を薄くするほど鋼板製造コストおよびコア加工コストが上昇してしまう。このように、電磁鋼板

* JFE スチール スチール研究所

1) 電磁鋼板研究部：主任研究員

2) 数値解析研究部：主任研究員

3) 東日本製鉄所 商品技術部：主任部員

4) 本社鋼材営業部門 電磁鋼板営業部：主任部員

Development of Si Gradient Steel Sheet with High Saturation Magnetic Flux Density and Low Iron Loss at High Frequency: Tatsuhiko Hiratani, Yoshihiko Oda, Misao Namikawa, Shouji Kasai, Hironori Ninomiya (JFE Steel Corporation)

2013年11月8日受理[doi:10.2320/materia.53.110]

の渦電流損低減手法として固有抵抗増加と薄板化は限界に近づきつつあり、新たな渦電流損低減手法の確立が望まれる。

著者らは、上述の連続浸珪プロセスを利用して、板厚方向に Si 濃度分布を有する Si 傾斜磁性材料を作製し、この材料の残留磁束密度が極めて低いこと⁽²⁾、高周波数では同板厚の 6.5%Si 鋼板より低鉄損となること⁽³⁾などの興味深い性質を既に見出している。図 2 に、板厚方向の平均 Si 量を一定とし、鋼板表層と板厚中心部の Si 濃度差 ΔSi を変えた場合の鉄損変化を示す。Si 傾斜磁性材料では、 ΔSi を増すほど渦電流損は減少し、ヒステリシス損は逆に増加する傾向がある。鉄損の極小点は両者のバランスで決まる。図 2 に示すように、Si 濃度分布を適正化することで、Si が均一な材料より鉄損を低減することが可能である。

この渦電流損低減について、古典渦電流損に単純化して考えると、図 3 のように模式的に表現することができる。Si 傾斜磁性材料においては、Si 濃度の高い表層が高透磁率、Si 濃度が低い板厚中心部が低透磁率となっている。このような鋼板を板面と平行な方向に励磁すると、磁束は透磁率の高い表層に集中する。仮に、表面から板厚 25% の深さに磁束が集中し、それより内側での磁束変化はないものとする、磁束変化によって生じる渦電流も表層のみとなり、その渦電流損は、磁束が均一に通った場合の半分の大きさになる。

渦電流損を低減するには、 ΔSi を大きくして図 3 下段のような磁束分布にするのが好ましい。また、板厚中心部で磁束が変化しないとすれば、この部分で渦電流が生じないため、あえて Si を添加して固有抵抗を高める必要はない。Si 傾斜磁性材料の板厚中心部の Si 濃度を従来より低くし、鋼板全体の含有量を低減すれば、材料の飽和磁束密度を高めることができる。すなわち、板厚中心部の Si 濃度を低い状態に保ったまま磁束が集中する表層のみを高 Si 濃度とし、高周波

図 2 Si 傾斜磁性材料の板厚方向 Si 分布と鉄損の関係。

	断面形態	相対比較			
		磁束分布	電流密度分布	損失分布	渦電流損
Si 均一材	透磁率 均一				We
Si 傾斜材	高 Si (高透磁率) 低 Si (低透磁率) 高 Si (高透磁率)				$0.5We$

図 3 Si 分布による渦電流損低減機構。

鉄損が極小となるように Si 濃度分布を調整すれば、高飽和磁束密度と高周波低鉄損を、より高いレベルで両立できると考えられる。

しかしながら従来の Si 傾斜磁性材料は、Si 均一化が必要な 6.5%Si 鋼板と同様に、鋼中で Si が拡散均一化しやすい α 相で浸珪処理を行っていた。このため Si 濃度分布を調整する過程で板厚中心部の Si 濃度も上昇してしまい、前述の理想的な形態が実現されているとは言えなかった。

そこで、板厚中心部の Si 濃度を低いまま留めておく手段として、高温で γ 相が生ずるような Si 濃度の低い素材を用い、これを γ 相から浸珪処理することを試みた。 γ 相の素材へ浸珪処理を施した場合、表層は Si 濃化によって α 相に変態するが、鋼板内部の γ 相の拡散係数は α 相より二桁以上小さいため、Si は深くまで拡散せず表層に局在化させることができる。従来の浸珪処理との違いを図 4 に示す。鋼板の耐食性改善のため、 γ 域で浸珪処理して表層に Fe_3Si 相を形成した例は過去にもあるが⁽⁴⁾、Si 濃度分布を残した状態での磁性評価はなされておらず、また実際、Si 濃度分布を適正化しなければ優れた磁気特性は得られない。

3. 開発商品の磁気特性

今回開発した JNSF は、 γ 域浸珪を利用することで表層にのみ効率よく高 Si 濃度域を局在化させ、高周波で低鉄損となるように Si 濃度分布を調整したものである。

図 5 に板厚 0.15 mm の開発材 15JNSF と板厚 0.1 mm の 6.5% Si 鋼板 10JNEX の直流磁化曲線の比較を示す。15JNSF の飽和磁束密度は 2.0 T と、3%Si 鋼板並みの高い値を示す。

図 6 に 15JNSF と 10JNEX および圧粉磁芯の鉄損評価結果を示す。圧粉磁芯は純鉄粉や Si 含有鉄粉をバインダで固めたものであるが、その中でも優れた特性を示す 6.5%Si-Fe 粉の圧粉磁芯を比較材として用いた。50 Hz の励磁条件で比較すると、15JNSF の鉄損は 10JNEX より大きいものの、圧粉磁芯と比べると十分小さいといえる。一方 10 kHz では、15JNSF と 10JNEX の鉄損差は縮まり、更に 20 kHz では

図 4 浸珪プロセスの違い。

図5 直流磁化曲線の比較.

図7 直流重畳特性の比較.

図6 各励磁条件における鉄損比較.

10JNEXと同様若しくは15JNSFの方がやや低鉄損となった。この結果は、固有抵抗増加や薄板化に依らない鉄損低減手法として、板厚方向のSi濃度分布制御が有効であることを示している。

このように、板厚Si濃度分布を利用した鉄損低減手法を検討し、 γ 域から浸珪処理して表層に局所的に高Si濃度域を構成しSi濃度分布の最適化を図ることにより、従来困難と考えられていた3%Si鋼板並みの高い飽和磁束密度($B_s \sim 2.0$ T)と6.5%Si鋼並みの低い高周波鉄損($W_{0.5/20k} \sim 7$ W/kg)の両立を、板厚0.15 mmのSi傾斜磁性材料で実現することができた。

4. 高周波リアクトルへの適用

エアコン、太陽光発電用パワーコンディショナ、HEVの車載電源等に使われる高周波リアクトルには、数k～数十kHzの高周波を含む、数十～数百Aの直流または交流が流れている。コア材が磁氣的に飽和に近づく、リアクトルのインダクタンスは急激に下がり、高周波電流が回路に混入して電子機器を損傷するおそれがある。磁気飽和を避けるにはコアの断面積を大きくせざるを得ず、リアクトルが大型化し

てしまう。3%Si鋼板は、高周波用コア材の中では最も飽和磁束密度の高い材料であるが、高周波での発熱が制約となり磁束密度を下げて設計されるため、やはりコアを大型化せざるを得ない。このような用途に、飽和磁束密度が高く高周波鉄損の低いSi傾斜磁性材料JNSFは適している。

10JNEXと15JNSFを用いて同一形態のリアクトルを作製し、直流重畳特性を比較した例を図7に示す。全体的に15JNSFの方が高いインダクタンスを示しており、小型化に有利といえる。また100～150 Aの電流域において10JNEXのインダクタンスが急激に低下するのに対し、15JNSFのインダクタンス低下は緩やかである。これは15JNSFの飽和磁束密度が高いことが影響している。リアクトルの中には、定格より大きな電流で一定以上の大きさのインダクタンスが必要とされるものもあり、そのような用途にも15JNSFは好適と考えられる。また図6に示したように、15JNSFは圧粉磁芯に比べて商用周波数の鉄損が極めて低いため、高周波に商用交流が重畳するACリアクトルのコア材としても期待される。現在、15JNSFはエアコンのリアクトルのコア材として採用され、使われている。

5. 結 言

γ 域浸珪によるSi傾斜磁性材料の製造を検討し、そのSi濃度分布を適正化することで、高飽和磁束密度と高周波低鉄損をこれまでにない高いレベルで両立した製品JNSFを開発した。今後、高周波化が進むパワーエレクトロニクス分野での活用が期待される。Si傾斜磁性材料に関する特許は、これまでに20件以上申請し、一部は登録されている。本件の γ 域浸珪に関するものとしては、特開2012-251191、特開2011-119298が公開されている。

文 献

- (1) H. Haiji, *et al*: J. Magn. Magn. Mater., **160**(1996), 109-114.
- (2) 浪川 操 他: まてりあ, **37**(1998), 289-291.
- (3) 浪川 操 他: JFE 技報, No. 6(2005), 12-17.
- (4) 三谷裕康: 金属表面技術, **15**(1964), 504-511.