

電磁鋼板

磁性材料としての“鉄”の特性を最大限に引き出す(下)

電磁鋼板はトランス（変圧器）やモーターなどの電気機器の鉄心として不可欠な材料だ。機器の特性により、磁気を一方向に通しやすくした「方向性電磁鋼板」（トランス用）と、ランダムに通しやすくした「無方向性電磁鋼板」（モーター用）が使い分けられている。

本シリーズ2回目では、飛躍的なエネルギーロス（鉄損）低減を実現した「結晶方位制御」をはじめ、高いハードルに挑み続ける新日鉄の電磁鋼板技術開発の挑戦を紹介する。

“匠の技”から生まれた「方向性電磁鋼板」

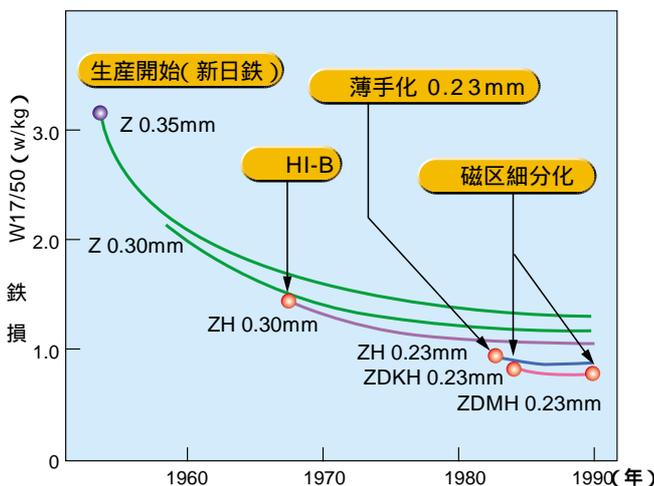
新日鉄が、1953年アメリカのアームコ社からの技術導入により日本での工業生産をスタートした方向性電磁鋼板は、1968年には新日鉄が開発した「オリエントコアハイビー」により、著しくトランス（変圧器）におけるエネルギー損失（鉄損）を低減できるようになった。そして、逆にアームコ社をはじめとする他社への技術供与が行われるようになった（図1）。

技術導入当時7度程度あった結晶方向の誤差は、商品の開発時に3度程度にまで先鋭化し、その後も結晶方位制御技術の研鑽が進められている。

その進化を実現したキーテクノロジーは、窒化アルミニウムを活用した「インヒビター制御」だ。方向性電磁鋼板の製造工程は、製鉄、製鋼、熱間圧延、冷間圧延と続いた後、脱炭を兼ねた焼鈍により圧延時の歪みを取り除く。ここまでは普通鋼の製造プロセスと基本的には同じだ。焼鈍すると加工歪みが入った結晶組織は再結晶（一次再結晶）して歪みが解放される。

その時点での結晶粒は直径約10～25μm程度で、結晶方位は揃っていない。方向性電磁鋼板の製造では、それを再び焼鈍し直径が1～2cm程度の肉眼でも見える巨大な結晶粒に育て上げる（二次再結晶）。その際、微細な窒化アルミニウムが鋼中に存在すると、一次再結晶した結晶粒の中でもごくわずかに存在する優れた磁氣的性質を持つ結晶粒、すなわち、鋼板の長手方向

方向性電磁鋼板の低鉄損化の推移 図1



新日鉄の電磁鋼板の進化は、「鉄損との戦い」の歴史だ。

二次再結晶のプロセス 図2



一次再結晶した結晶粒のうち優れた磁氣的性質を持つ「Goss方位粒」が、磁氣的性質に劣る結晶粒を“蚕食”しながら成長することにより、結晶方位が揃う。

が<100>方向で鋼板の面方向は<110>方向である“Goss方位粒”が、その周囲の<111>方向などを向く磁氣的性質に劣る結晶粒を“蚕食”しながら1~2cm程度まで成長して結晶方位が揃ってくる。一見無駄に見える<111>方向などの結晶粒は、二次再結晶に必要不可欠だ(図2)。

ではなぜそうした現象が起きるのだろうか。通常、焼鈍で温度を上げていくと結晶粒は徐々に大きくなるが、微細な窒化アルミニウムが鋼中に存在すると、それが一次再結晶後の直径約10~25μmの結晶粒と結晶粒の間(結晶粒界)に入り込み、ピン止め効果が生まれるため、結晶粒はなかなか大きくならない。これを、結晶粒の成長を抑制するという意味から「インヒビター」と呼ぶ。

大きくなろうとする結晶粒は、焼鈍の温度上昇に対して同じ大きさを保ち続け、最後に約1,000前後のある温度に達するとインヒビターとしての窒化アルミニウムの分解を契機に、たがが外れたように爆発的に二次再結晶する。この到達温度は方向性電磁鋼板に適した方位(Goss方位)を持つ結晶粒が優先的に二次再結晶する温度のため、結晶方位の磁氣的性質が望ましい方向に精密に揃った鋼板が生まれる。

インヒビターとしてさまざまな種類のものが考えられる中で、添加量まで含めた最適解を導き出した「窒化アルミニウムインヒビター制御」は、長年、新日鉄の研究者たちが何百、何千という実験を繰り返して確立した独自技術だ。

二次再結晶のための焼鈍は、10 /時オーダーのゆっ

くりした昇温パターン制御で行われ、二次再結晶した後の不要な窒素やアルミニウムを鋼中から抜く純化焼鈍がこれに続く。そして冷却パターン制御も含め、約一週間かけ、じっくりと方向性電磁鋼板を熟成する、“匠の技”だ。

シンプルな製造工程で作り込む「無方向性電磁鋼板」

一方、無方向性電磁鋼板の製造工程は、冷間圧延後の連続焼鈍による一次再結晶、結晶粒成長までだ。短い製造工程の中で、最終目標とする<100>方向を鋼板面にできるだけ平均的に配したランダムな結晶方位にしなければならない難しさがある。

焼鈍後の結晶粒には、冷間圧延前の結晶粒界近くから再結晶したものと、結晶粒内から再結晶したものがある。結晶粒界近くから再結晶する結晶方位は、磁氣的性質に劣る<111>方向を向いている。そこで、冷間圧延でできた結晶粒内の歪み蓄積部(変形帯)から再結晶する鋼板長手方向に<100>方向を向いた磁氣的性質の良い結晶粒などに優先的に制御することがポイントだ(写真1)。

また、熱間圧延後の板厚と冷間圧延後の板厚の比率(冷間圧延圧下率)などによっても焼鈍後の結晶方位が違ってくるため、それらの要因をうまく組み合わせ、要求特性に応じた最適な結晶方位と磁氣特性を導き出している。

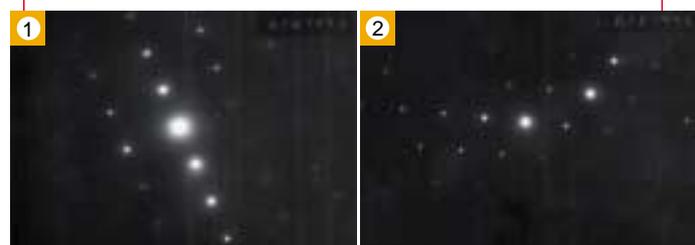
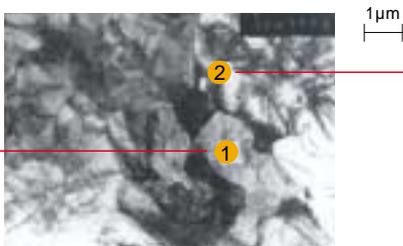
最終製品としての電磁鋼板は、磁束を通りにくくする不純物がない方がよい。方向性電磁鋼板では、上で述べた二次再結晶焼鈍の後、純化焼鈍で不純物が抜かれるが、無方向性電磁鋼板はその工程がない。このため、製鋼段階での高純度鋼化などは重要で、最先端の製鋼技術が駆使される。さらに、モーターなどの鉄心としてのトータルパフォーマンスに着目した、板厚精度、打ち抜き加工性、絶縁皮膜、高周波特性等々、新日鉄が持つ無方向性電磁鋼板の総合技術力は他の追随を許さない。

「磁区」の制御でさらに高いハードルに挑む

これまで結晶方位を<100>方向に揃えると磁化しやすくなると説明した。その磁化性能を左右する要因がもう一つある。それが「磁区」だ。磁区とは、磁気モーメントの方向が揃ったブロック(小領域)のことで、その一つひとつが小さな磁石だと考えるとわかりやすい。鉄などの強磁性体は、複数の磁区が寄り添った多

電子顕微鏡で観察した変形帯からの再結晶萌芽

写真1

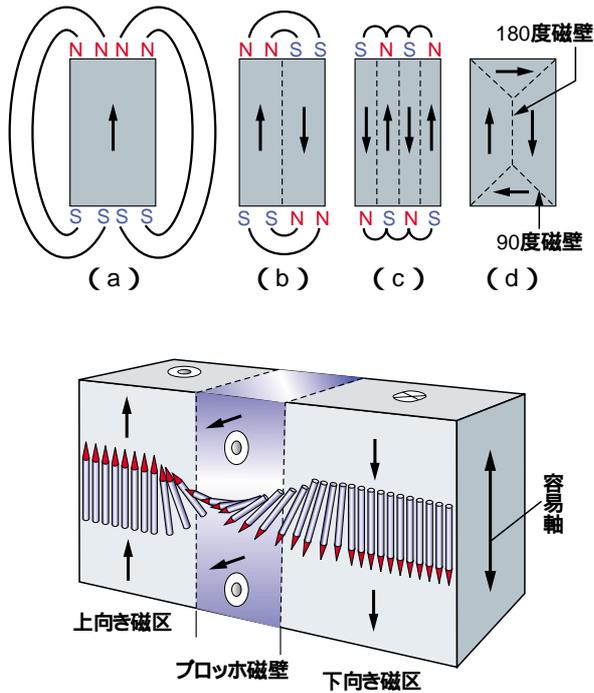


{110} 001
磁氣的性質に優れる

{111} 112
磁氣的性質に劣る

磁気モーメントと磁区構造

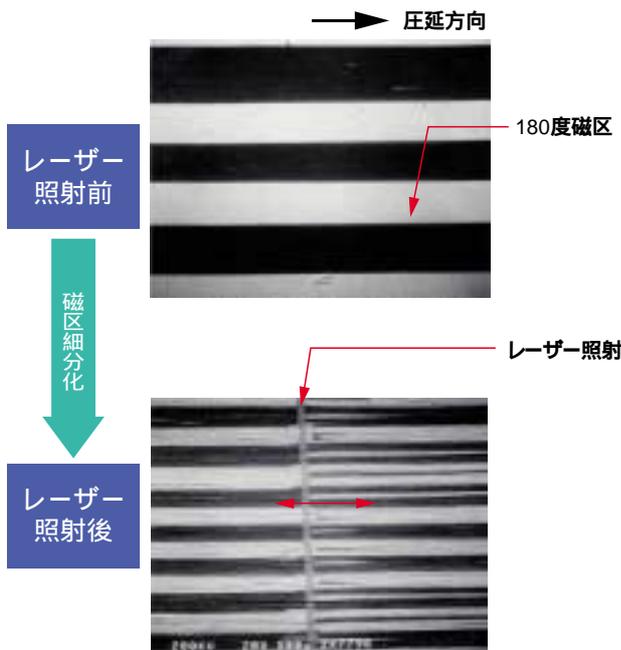
図3



電磁鋼板全体としての磁気エネルギーは、N極S極から生まれる静磁エネルギー以外に、磁気異性のエネルギーと、磁区同士の間にある壁(磁壁)内のエネルギーよりなる。磁区幅はこの磁気エネルギーがミニマムになるように自ずと決まる。

レーザー照射による磁区細分化技術

図4



「オリエンタコアハイビー・レーザー」

磁区細分化技術により、緻密な結晶方位制御と磁区構造制御を両立した画期的商品

磁区構造になっており、隣接する磁区は磁気モーメントの向きが逆になっている。電磁鋼板も数多くの磁区で分割されており、1つの磁区幅は、方向性電磁鋼板で数百 μm 程度、無方向性電磁鋼板で数十 μm 程度の大きさである。

全ての磁気モーメントの方向が完全に揃った高性能の磁石は、磁区が1つの単磁区構造の集合体で磁気エネルギーは非常に大きい。もともと物質は自ら持つエネルギーをできるだけ小さくして、安定しようとする性質がある。そこでこの磁区を、逆向きの磁気モーメントを持つブロックに分割して交互に並べると、ブロックの磁気エネルギー、すなわち静磁エネルギーが低減し、全体の磁気エネルギーが小さくなる(図3上)。

電磁鋼板についてもこの原理が当てはまる。静磁エネルギーを低めるために多磁区構造をとり、隣接する磁区間は磁気モーメントの向きが徐々に変化する領域「磁壁」を持つ(図3下)。磁区幅は電磁鋼板全体としての磁気エネルギー、すなわち、これまで述べてきた静磁エネルギーに前号で述べた磁気異性エネルギー、そして、磁壁エネルギーを加えたものがミニマムになるように自ずと決まる。

電磁鋼板、特に方向性電磁鋼板は、結晶方位を揃えていくと、二次再結晶によりできたその大きな結晶粒の静磁エネルギーは低まるため、磁区幅が大きくなる特性を持つ。しかし磁区幅が大きいと、磁界の向きを変える時に磁化の変化を妨げるように鋼板内に生じる渦電流が、磁壁の移動距離(磁区幅に相当)とともに増え、エネルギーをロスする(図3下)。

そこで新日鉄では、方向性電磁鋼板表面にレーザーを照射して磁気エネルギーのバランスを変化させ、結晶方位を先鋭に揃えた状態でも磁区幅を狭くすることができる「磁区細分化技術」を開発した。緻密な結晶方位制御と磁区構造制御を両立した画期的商品「オリエンタコアハイビー・レーザー」だ(図4)。

さらにレーザーではなく、鋼板表面に機械的に適度な溝を入れることで磁区幅を狭くすることにより、変圧器鉄心加工時の歪取り焼鈍後もその磁区構造制御効果を発揮する「オリエンタコアハイビー・パーマナント」も開発した。

トランス、モーターに次ぐ 第3の利用分野「磁気シールド」

電磁鋼板の結晶方位や磁区構造制御は、鉄損の低減による省エネルギーへの貢献だけではなく、「騒音」を減少させる効果がある。電磁鋼板は多くの磁区の集まりであるため、隣接する磁区の磁気モーメントが交

互に180度ずつ変化して並んでいればスムーズに磁壁移動が生じ、磁化に伴う結晶格子の伸び縮み（磁歪）は起こらない。

しかし、結晶方位が<100>方向からずれていると、180度磁壁以外の複雑な磁区構造をとり、磁化に伴い磁気モーメントが向きを変える時に結晶格子が伸び縮みを起こす。これが増幅され振動となり騒音の原因の一つとなる（図5）。

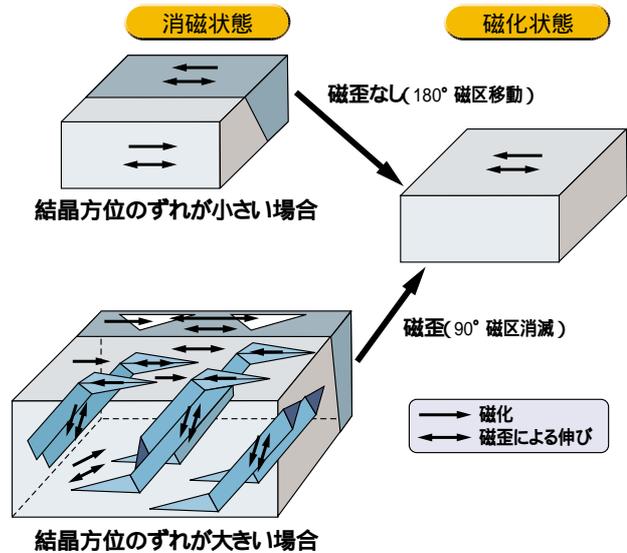
通常、例えば1m長さの方向性電磁鋼板があった場合、わずか約1μm程度の伸び縮みではあるが、それがトランスの唸のような音につながる（写真2）。身近なところでは、柱状トランスや鉄道車両用トランス、蛍光灯安定器などでそうした現象が見られる。新日鉄では、振動騒音測定解析システムを独自に開発し、これらを駆使して、電磁鋼板の利用環境にまで踏み込み、低騒音化に貢献する技術開発を進めている（写真3）。

さらに近年、「磁気シールド材（電子機器などの誤動作を招く磁気を吸収・遮断し、外に漏らさない材料）」としての電磁鋼板の機能が注目されている。結晶方位を磁化しやすい方向に揃えた電磁鋼板は、空気に比べて圧倒的に磁気を通しやすいため（透磁率は1～10万倍）、外部からの磁気を吸収しやすく一度吸収すると外に洩らさない。現在最も注目されている分野は、大きな磁場が発生する医療用MRI（磁気共鳴画像）設備などで、新日鉄ではすでに電磁鋼板を磁気シールド材として提供している。

今後、直流、交流を問わず、磁気シールド分野は新たな用途も期待できることから、トランス、モーターに続く電磁鋼板の“第3の利用分野”として積極的に技術開発に取り組んでいく。

騒音が発生する原理

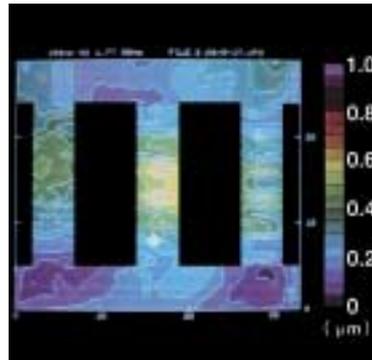
図5



モデルトランス鉄心の振動分布

無響室 写真3

写真2



ますます進化する高機能素材 電磁鋼板

電磁鋼板は、鉄鋼製品の中でも特に機能性の高い素材で、その100年余りの歴史の中でその性能は飛躍的な発展を遂げてきました。

主に、電力の送配電段階における変圧器用鉄心素材として用いられる方向性電磁鋼板は、変圧器で消費されるエネルギー節減、さらには騒音低減に寄与してきました。

また、主に、電力の発電段階での発電機や消費段階でのモータ等の鉄心素材として用いられる無方向性電磁鋼板も、それらの電気機器で消費されるエネルギー節減に寄与し、特に最近では、電気自動車の普及に貢献してきました。

電磁鋼板はさらには、磁気シールド用素材としてもそ

の機能性を発揮しています。地球環境への世界的要請とも相まって、電磁鋼板の発展は今後ますます加速されるでしょう。

監修 技術開発本部鉄鋼研究所
鋼材第一研究部 主幹研究員

久保田 猛（くぼた・たけし）

プロフィール
1952年生まれ。大阪府出身。
1977年入社。
基礎研究所（現先端技術研究所）で厚板関連研究を経て、
1981年より電磁鋼関連研究に従事し、現職。
1983年～1984年に慶應義塾大学物理学科（近角教授）に国内留学。

