

進化する電磁鋼板

Evolution of Electrical Steel Sheet

久保田 猛 新日本製鐵 鉄鋼研究所

T. Kubota, Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corporation

Electrical steel sheet is a soft magnetic material used in the cores of electrical devices, such as generators, transformers, and motors. It is also used as a magnetic shielding material. The evolution of electrical steel sheet over the past hundred years has been remarkable. It has helped to reduce energy consumption and noise in electrical devices, and has contributed to magnetic shielding. It is expected to evolve at an increasing rate.

Key words: reducing energy consumption, reducing noise, magnetic shielding, grain-oriented silicon steel, non-oriented silicon steel, core loss, magnetic flux density, magnetostriction, permeability

1. はじめに

今から約 100 年前、1900 年に英国で、Hadfield らは鉄に Si を含有させることによる磁性向上効果¹⁾を発見した。電磁鋼板の歴史はここにその端を発し、一世紀あまりにわたる“進化”の足跡が踏み出される。その後、1926 年に、本多、茅により鉄の結晶磁気異方性が発見され²⁾、結晶方位制御による磁性向上に着眼し、1934 年に $\{110\} \langle 001 \rangle$ 集合組織を有する方向性電磁鋼板が Goss により発明された³⁾。方向性電磁鋼板は主に変圧器の鉄心素材として用いられ、日本では 1953 年に工業生産が開始された。特に、1968 年からは、高磁束密度方向性電磁鋼板 HI-B⁴⁾により、著しく変圧器におけるエネルギー損失を低減できるようになった。一方、モータなどの回転機を中心とした鉄心材料として用いられる無方向性電磁鋼板においても、日本では 1924 年に熱間圧延電磁鋼板として生産が開始され、1956 年からは現在のような冷延無方向性電磁鋼板に置き換わってきた。

このように、電磁鋼板は電気機器の鉄心材料として用いられ、電力にかかわる各ステージ、すなわち、発電段階での発電機、送配電段階での変圧器、消費段階でのモータなど、いずれのステージにおいても基本的かつ不可欠な磁性材料である。電力にかかわる限り、エネルギー節減は必然的な命題である。また、これらの電気機器を発生源とする騒音の低減も、環境重視の観点からますます重要視されている。さらに、近年では、やはり地球環境問題への積極的

対応とも相まって、磁気シールド用素材としての機能も見逃せない。

ここでは、上述のような観点から、電気機器の鉄心素材、あるいは磁気シールド用素材として用いられる電磁鋼板について、その進化の軌跡を述べてみたい。

2. 方向性電磁鋼板の進化

2.1 方向性電磁鋼板の進化

電力の送配電段階で使用される変圧器では、そこで消費されるエネルギー損失を極力低減し、エネルギー節減を図ることが望ましい。変圧器の鉄心には方向性電磁鋼板が用いられるが、ここで消費されるエネルギー損失、すなわち鉄損は、上記の Hadfield らの発見以降、電磁鋼板の低鉄損化の歴史⁵⁾とともに著しい低減を実現してきた。

方向性電磁鋼板の鉄損低減は主に三つの技術要素から進展した。それは、高磁束密度方向性電磁鋼板の製造技術、薄手高磁束密度方向性電磁鋼板の製造技術、そして磁区細分化技術である^{5)~7)}。Fig. 1 に、これらの三つの技術要素による方向性電磁鋼板の鉄損低減効果を示す⁸⁾。高磁束密度方向性電磁鋼板 (①) により、製品板二次再結晶粒の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位への平均分散角は 7 度から 3 度へと先鋭化され、磁束密度 B_8 は 1.82 T から 1.92 T へと大幅に増大した。この結果、鉄損の構成要素のうち、ヒステリシス損を $W_{17/50}$ で約 0.2 W/kg 低減することができた。

その後、鉄損構成要素のうち、もう一方の渦電流損の低

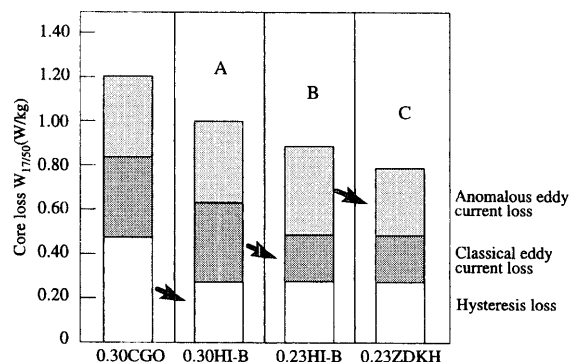


Fig. 1 Change in core loss reduction in grain-oriented silicon steel.⁸⁾

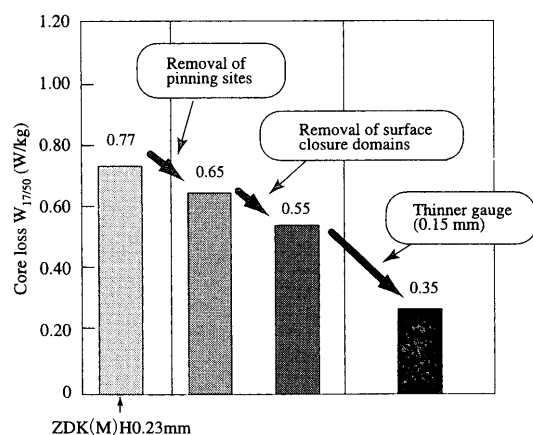


Fig. 2 Prospective core loss reduction in grain-oriented silicon steel.^{6), 7)}

減に着目し、まず、薄手高磁束密度方向性電磁鋼板 (②) が開発された。方向性電磁鋼板の製品板厚を、従来の 0.30 mm から 0.23 mm へ薄手化することにより、渦電流損を $W_{17/50}$ で約 0.15 W/kg 低減することが可能となった。ところで一般に、二次再結晶粒を $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位へ集積させると磁区幅は広くなり、この結果、渦電流損は逆に増加してしまう。そこで、広くなった磁区幅を物理的手法により制御するものとして、磁区細分化技術 (③) が開発された。レーザー照射⁹⁾、プラズマ照射¹⁰⁾、溝導入^{11), 12)}などがこの技術に相当し、渦電流損を $W_{17/50}$ でさらに約 0.1 W/kg 低減することができる。

さて、変圧器の鉄心素材として磁区細分化を施した最高級薄手方向性電磁鋼板を用いた場合、そのエネルギー節減量は莫大なものとなる。例えば、日本全国の送配電変圧器をすべて上記の最高級方向性電磁鋼板に置き換えると、約 22 億 kWh もの鉄損を低減することができ、ほぼ島根県の年間電力使用量を賄うことができる。このように方向性電磁鋼板は、変圧器鉄心でのエネルギー節減に大きく貢献している。

方向性電磁鋼板の鉄損をさらに低減するためには、上記 ①②③に引き続く新技術として磁壁移動制御技術が重要である。方向性電磁鋼板の表面には、絶縁性および鋼板への張力付与を目的としてセラミックス皮膜が被覆されている。

セラミックス皮膜と地鉄との界面は平滑ではないため、必然的に磁壁移動が妨げられる。表面を平滑化し、磁壁移動のピン止めサイトを除去することにより、 $W_{17/50}$ で約 0.1 W/kg の鉄損低減が可能である^{6), 7)} (Fig. 2 参照)。また、このような表面セラミックス皮膜による磁壁のピンギばかりでなく、二次再結晶粒内の亜粒界構造¹³⁾も磁壁との相互作用をもつことが確認されている。

一方、磁化過程においては、もう一つランセット状の還流磁区の生成、消滅があり、磁壁移動に伴うエネルギー散逸を引き起こす。還流磁区を抑制するためには二次再結晶

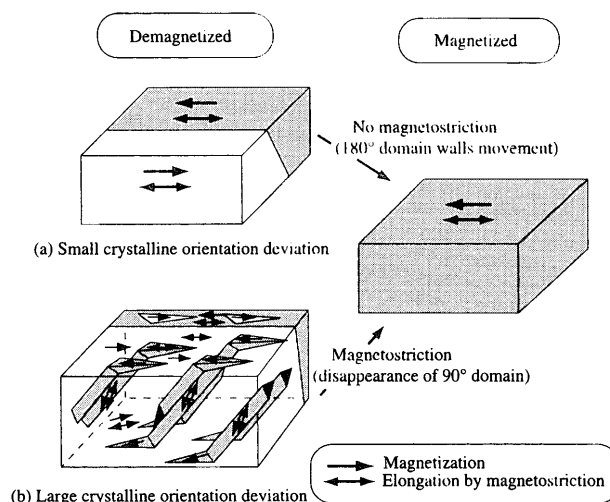


Fig. 3 Magnetic domain structure and magnetostriction of grain-oriented silicon steel.¹⁴⁾

粒の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位への集積度を高めることが効果的である。方位集積度を高め、磁束密度 B_8 を 0.04 T (1.92 T から 1.94 T へ) 増大させることにより、 $W_{17/50}$ で約 0.1 W/kg の鉄損低減が可能である^{6), 7)} (Fig. 2 参照)。さらに、製品板厚をいっそう薄くすることにより (0.23 mm から 0.15 mm へ)、 $W_{17/50}$ で 0.35 W/kg 程度のごく低鉄損を実現することが可能である^{6), 7)}。

2.2 方向性電磁鋼板と変圧器騒音

エネルギー節減とともに、電気機器から発する騒音の低減は、環境重視の観点からその重要性を増してきた。このうち、変圧器の騒音は、鉄心や導線を振動源とした変圧器全体の振動により生じる。

鉄心の振動原因の一つとして、鉄心素材である方向性電磁鋼板の磁歪が挙げられる。磁歪は磁区構造と密接な関係にあり、Fig. 3 にその模式図を示す¹⁴⁾。圧延方向において二次再結晶粒の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位からのずれが小さい場合には、磁区構造は単純な 180° 磁区だけで構成され、磁化過程は 180° 磁壁の移動だけで進行し、磁歪は生じない。一方、二次再結晶粒の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位からのずれが大きい場合には、表面自由磁極による静磁エネルギー増加を補償する形でランセット磁区が発生する。ランセット磁区は圧延方向と 90° の角度をなす下部磁区構造を有し、磁化過程では、この生成、消滅が起こるため必然的に磁歪が生じる。

このため、磁歪の低減は 90° 磁区の発生抑制が基本となる。90° 磁区の発生量については、下部磁区構造を単純な板状と仮定することにより計算もできる¹⁵⁾。90° 磁区発生抑制の手段としては、二次再結晶粒の $\{110\} \langle 001 \rangle$ 方位への集積度を高めること、また、皮膜張力を増大させることが有効である。方向性電磁鋼板製造時、あるいは、変圧器鉄心組立時において、可能な限り残留応力を低減することも効果的である。さらに製品板厚を薄くすることも磁歪低減に有効である。これは、板厚が薄いほど、90° 磁区の静磁

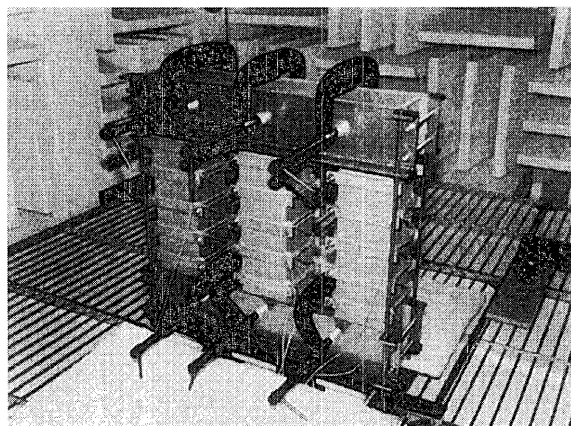


Fig. 4 3-Phase 3-limb model transformer core.²⁶⁾

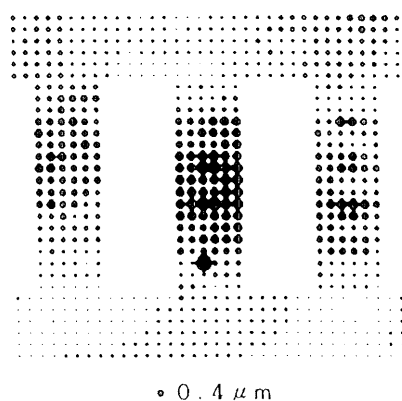


Fig. 5 Result of analyzing the vibration displacement of a model transformer core.¹⁶⁾

エネルギーは高くなるため、相対的に 90° 磁区の発生は減少することによる。加えて、板厚方向断面積が減少するため、上記の皮膜張力の効果も大きくなることが期待できる。

実際の変圧器では、鉄心構造や鉄心素材である方向性電磁鋼板の磁気特性の影響を受け、鉄心内の磁束波形は時間的、空間的に歪みを生じている。磁束波形の歪みは磁歪にも変化をもたらすため、非正弦波励磁下での磁歪挙動解析は重要である。例えば、PWM 波形励磁の場合、対応する周波数成分に加え高調波成分の磁歪が増加することが観察されている¹⁴⁾。

ところで、鉄心の振動原因には、上記の磁歪のほかに鋼板間に生じる電磁吸引力などによるものもあり、これらも含め変圧器の騒音低減を実現するためには、実際の鉄心にもどのような振動が生じ、騒音に結びつくのかを測定、解析する必要がある。そこで、変圧器鉄心の振動測定解析システムが開発され、鉄心振動の詳細な解析が可能となった¹⁶⁾。三相三脚モデル変圧器鉄心 (Fig. 4 参照) での振動解析結果の例を Fig. 5 に示す。鉄心の振動変位は脚部で最も大きく、共振が発生している可能性も示唆される。したがって、実際の変圧器鉄心の振動、騒音を解析する場合に

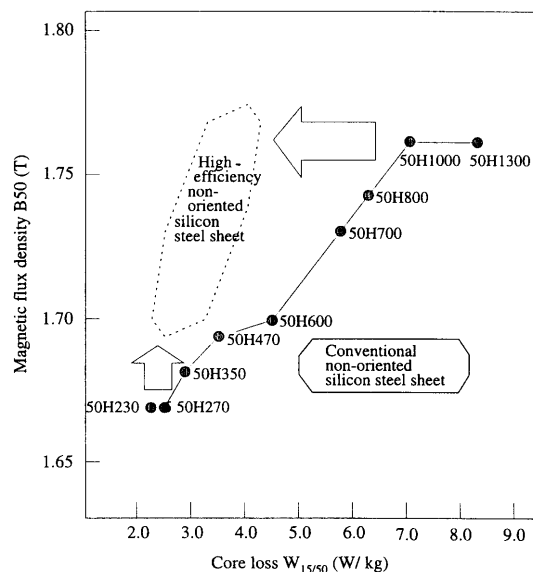


Fig. 6 Reduction in core loss and increase in flux density (higher efficiency) in non-oriented silicon steel.²⁶⁾

は、共振現象も重視する必要がある。

このように、変圧器の騒音低減に向けては、鉄心素材である方向性電磁鋼板の低騒音化が進展していると同時に、変圧器鉄心振動解析システムなどを駆使した実際の変圧器構造の解析、最適化への取り組みも進められている。

3. 無方向性電磁鋼板の進化

電力の発電段階での発電機、消費段階でのモータなどにおいても、当然エネルギー損失を可能な限り低減することが必要である。これらの鉄心には、主に無方向性電磁鋼板が用いられ、方向性電磁鋼板と同様、鉄損の低減が図られてきた。1. でも述べたように、日本では1956年に現在のような形の冷延無方向性電磁鋼板の製造が開始された。当初は、Si 含有量が1.5~2 wt%の、いわゆるミドルグレードがその出発点であった。その後の無方向性電磁鋼板のグレード開発は、二極分化の道をたどる¹⁷⁾。一つは、Si 含有量を高め、電気抵抗増大による渦電流損低減などを狙いとしたハイグレード化の道であり、発電機などの大型回転機をその主対象としていた。もう一つは、逆に Si 含有量を低くし飽和磁束密度を高めたローグレード化の道であり、家電用の小型モータなどをその主対象としていた。その後、特に1980年代以降は、省エネルギー、省資源の世界的動向の中で、電気機器の高効率化、小型化の要請にこたえるため、無方向性電磁鋼板の低鉄損かつ高磁束密度化（高磁化特性化）が進展した。無方向性電磁鋼板の鉄損低減技術としても、結晶方位制御による磁性向上効果の活用は重要であり、ヒステリシス損の低減と磁化曲線の改善を実現し、従来の製品に比べ低鉄損かつ高磁束密度化が進展した¹⁸⁾ (Fig. 6 参照)。

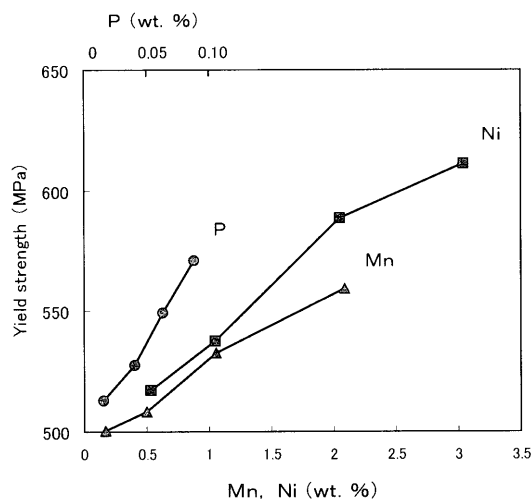


Fig. 7 Effects of solute elements on yield strength.²²⁾

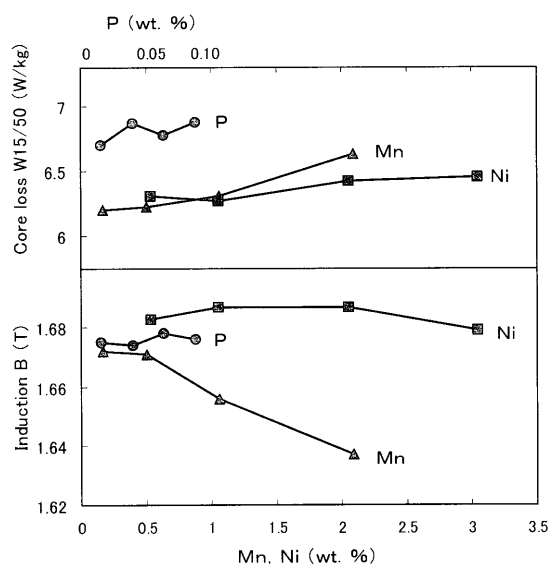


Fig. 8 Effects of solute elements on core loss and magnetic induction.²²⁾

特に、最近では、モータなどの回転機のよりいっそうの高効率化、小型化に向け、高速回転化が進展しており、高周波用途^{19)~21)}、高強度用途^{22), 23)}など、通常の商用周波数帯での磁気特性以外の諸特性に着眼した無方向性電磁鋼板が多く開発されている。高張力無方向性電磁鋼板は、回転機の超高速回転化や発電機の可変速化に伴う鉄心素材である電磁鋼板への、高張力化、高疲労強度化に対応したもので、磁気特性と高強度を同時に具備したものである。磁気特性への悪影響を最小限に抑えるため、固溶体強化を主体とした成分設計を基本に (Fig. 7, Fig. 8 参照)、降伏強度が 570 MPa 級、および、780 MPa 級の高張力無方向性電磁鋼板が開発された²³⁾ (Fig. 9 参照)。また、数百 Hz から 10 kHz 程度の周波数帯における高周波鉄損の低減を実現した薄手高周波用無方向性電磁鋼板が開発された。無方向性電磁鋼板の板厚を 0.20 mm もしくは 0.15 mm にまで薄

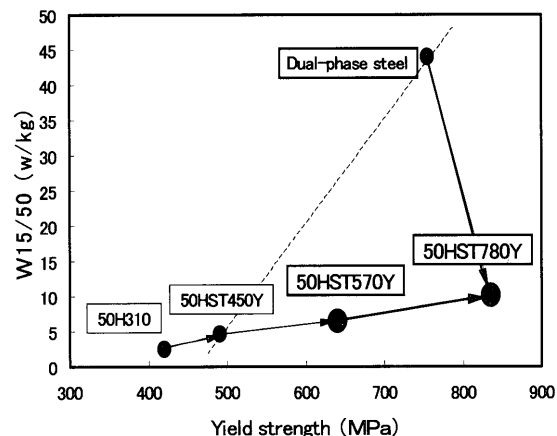


Fig. 9 Magnetic and mechanical properties of high-strength non-oriented silicon steel in comparison with conventional steel.²³⁾

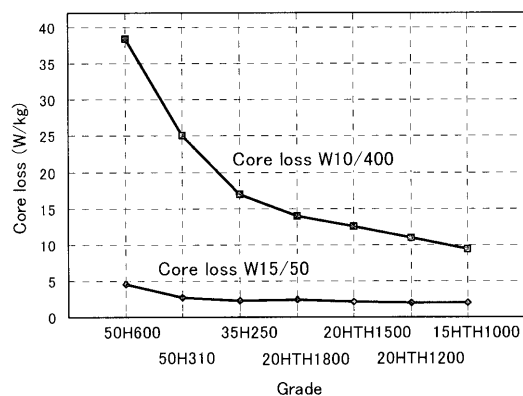


Fig. 10 Magnetic properties of non-oriented thin-gauge silicon steel in comparison with conventional steel.²⁴⁾

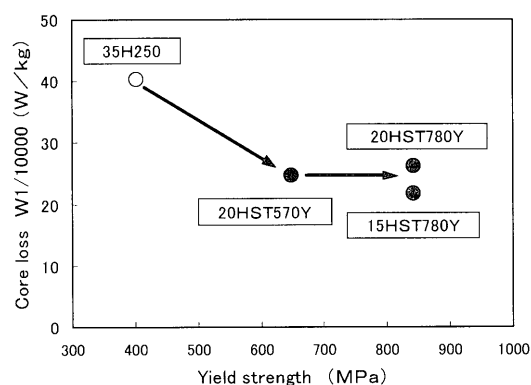


Fig. 11 Magnetic and mechanical properties of high-strength non-oriented thin-gauge silicon steel in comparison with conventional steel.²⁴⁾

くすることにより、通常板厚材 (0.50 mm, 0.35 mm) の 1/3~1/5 程度にまで渦電流損を低減し、かつ板厚薄手化に伴う磁束密度低下を回避した製造工程を組み合わせることにより、高周波特性の優れたものが実現されている (Fig. 10 参照)²⁴⁾。さらに、高強度特性と高周波鉄損特性とを兼ね備えた薄手高張力無方向性電磁鋼板も開発されてい

る (Fig. 11 参照)²⁴⁾.

無方向性電磁鋼板の低鉄損高磁束密度化, 言い換えれば高効率化は, 特にモータにおけるエネルギー節減顕著な効果をもたらした. 日本の総電力消費量のうち約 60% がモータで消費されているが, 上記の高効率無方向性電磁鋼板を鉄心に用い, モータの効率を 1% 向上させるだけで, 年間約 100 億 kWh もの鉄損を低減することが可能である. これは, 富山県や熊本県の年間電力使用量に相当する莫大なエネルギー節減である. 今後, OA 機器, 電気自動車の普及などにより, モータのエネルギー損失低減はますます重要となり, モータ, 発電機, EI 小型トランスをはじめとする各種電気機器の用途に適合した形での, 無方向性電磁鋼板の高効率素材化が加速するであろう.

4. 磁気シールドへの展開

外部に電磁波を放射するとともに, 電磁波の影響を敏感に受けてしまう電子機器や精密機械などが急速に普及し, また, 電車や自動車, エレベータ, 送電線, 変電所など, 低周波の磁気ノイズ発生源も増え続けている. このような複雑な電磁環境のもと, 機器や装置の誤動作, 機能障害の防止のための方法の一つとしてシールド技術がある. その中で特に, 低周波磁気ノイズのシールドには強磁性材料を利用した磁気シールド技術が用いられる. この磁気シールド性能を決定するのは, 素材の透磁率と板厚であり, 透磁率が高く, かつ, 板厚もバラエティーに富む電磁鋼板や電磁厚板が磁気シールド素材として用いられる場合が多い. 電磁鋼板が用いられる場合には, 上で述べてきた方向性電磁鋼板および無方向性電磁鋼板のいずれもが用いられる.

通常, 磁気シールド性能の評価は, 評価対象である磁気シールド素材でシールド体を作製し, シールド体全体としての性能を測定する場合が多い. しかしながら, そこには素材の性能以上に, 磁気シールド設計の要因が寄与してしまう. そこで, 素材そのものの磁気シールド性能を評価するためには, Fig. 12 に示すような装置が有効である²⁵⁾. 下部励磁用鉄心および上部鉄心と試料からなるシールド体を交流磁界により十分消磁した後, 励磁コイルによってシールド体に磁場を印加し, シールド体内部の試料近傍のセンサにより試料に平行な板厚方向の磁場 B_{lz} を測定する. 板厚方向の磁場は, 水平に置かれた試料のシールド効果により減衰するから, シールド体がない場合の磁場 B_{0z} と比較すれば, 素材のシールド性能を評価することができる. 磁気シールド効果 S は, $S = B_{0z}/B_{lz}$ で定義できる. ただし, シールド体は均一な磁場の中に置かれているわけではないので, 評価結果は絶対値を示すものではない.

Fig. 13 に, 無方向性電磁鋼板の磁気シールド効果の励磁力に伴う変化を, シールド体がない場合の磁場 B_{0z} を横軸にして示す²⁶⁾. ここで, 50H250 は, Si を約 3% 含有する透磁率の高い無方向性電磁鋼板, 50H1000 は, Si を約

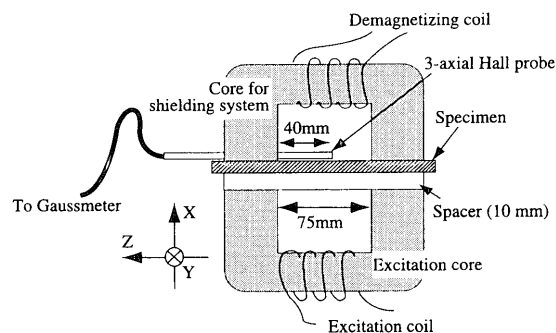


Fig. 12 Device for measuring magnetic shielding performance.²⁵⁾

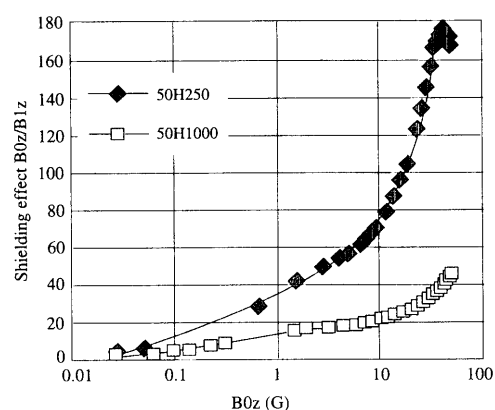


Fig. 13 Shielding effects of non-oriented silicon steels with different permeabilities.²⁶⁾

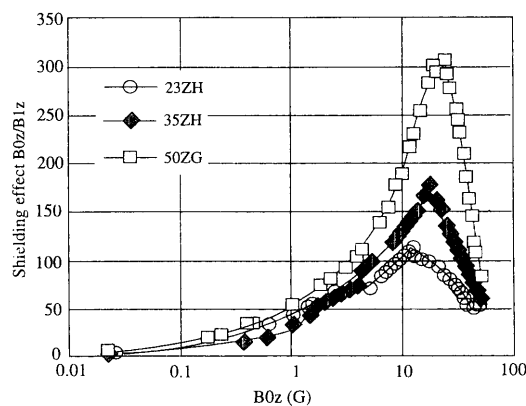


Fig. 14 Shielding effects of grain-oriented silicon steels with different thicknesses.²⁶⁾

0.3%含有する透磁率の低い無方向性電磁鋼板とみなすことができる. 透磁率の高い 50H250 の方が顕著に高い磁気シールド性能を有することがわかる. この磁気シールド効果曲線は, 励磁が低い場合にはシールド効果は小さく, 一方, 励磁の増加とともにシールド効果は高まり, 極大値をとった後, 低下に転じる. これは, 励磁に伴う磁気シールド素材の透磁率の変化を反映しているためである.

Fig. 14 に, 製品厚が 0.23 mm, 0.35 mm, 0.50 mm の方向性電磁鋼板の磁気シールド効果を示す²⁶⁾. 直流磁化曲線は, 三つの素材ともほぼ同様の形をしているので, 磁気

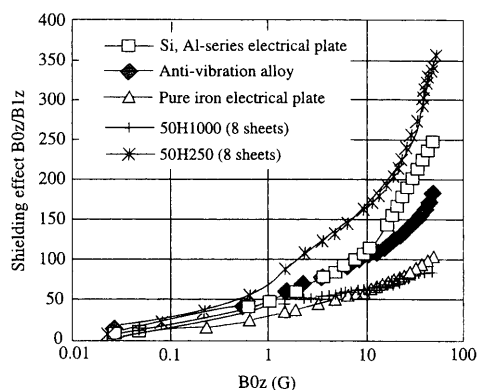


Fig. 15 Shielding effects of electrical plates for shielding use (4 mm thickness).²⁶⁾

シールド効果の違いは、主に板厚の影響である。板厚が厚いほど、磁気シールド効果は大きいことがわかる。

磁気シールド素材の透磁率が高いほど、また、板厚が厚いほど、磁気シールド性能に優れることがわかったが、電磁鋼板の製品厚みは通常、0.50 mm 程度までである。このため、所定の磁気シールド性能を得るためには、鋼板を積層して用いられる場合がある。また、磁気シールド体の製造工程上、このような積層が望ましくない場合には、磁気シールド素材として厚板が用いられる場合がある²⁷⁾。Fig. 15 に、各種の磁気シールド用厚板を用いた場合のシールド効果を示す²⁶⁾。Fig. 13 で示した透磁率の高い無方向性電磁鋼板である 50H250 を積層した場合にかなり近い磁気シールド効果が得られる場合があることがわかる。

5. ま と め

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 年あまりの歴史の中で磁氣的性質は飛躍的な進化を遂げてきた。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など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、OA 機器や電気自動車の普及に貢献してきた。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る。地球環境への世界的要請とも相まって、電磁鋼板の進化は今後ますます加速されるであろう。

参考文献

- 1) W. F. Barret, W. Brown, and R. A. Hadfield: *Sci. Trans. Roy. Dublin. Soc.*, **1**, 67 (1900).
- 2) K. Honda and S. Kaya: *Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ.*, **15**, 751 (1926).

- 3) N. P. Goss: U.S. Patent No. 1965559 (1934).
- 4) S. Taguchi, A. Sakakura, and H. Takashima: U.S. Patent No. 3287183 (1966); S. Taguchi, A. Sakakura, and A. Wada: U.S. Patent No. 3636579 (1972).
- 5) Y. Ushigami, H. Masui, Y. Okazaki, Y. Suga, and N. Takahashi: *J. Mater. Performance*, **5**, 310 (1996).
- 6) T. Kubota, M. Fujikura, and Y. Ushigami: *J. Magn. Magn. Mat.*, **215-216**, 69 (2000).
- 7) 森戸延行, 小松原道郎, 清水 洋: 川崎製鉄技報, **29**(3), 129 (1999).
- 8) T. Sakai: Tranfotech-94, 4th Int. Conf., IEEMA, p. 27 (1994).
- 9) T. Iuchi, S. Yamaguchi, T. Ichiyama, M. Nakamura, T. Ishimoto, and K. Kuroki: *J. Appl. Phys.*, **53**, 2410 (1982).
- 10) B. Fukuda, K. Sato, Y. Shimizu, and Y. Ito: *J. Appl. Phys.*, **55**, 2130 (1984).
- 11) H. Kobayashi, K. Kuroki, E. Sasaki, M. Iwasaki, and N. Takahashi: *Physica Scripta*, **T24**, 36 (1988).
- 12) K. Sato, A. Honda, K. Nakano, M. Ishida, B. Fukuda, and T. Kan: *J. Appl. Phys.*, **73**, 6609 (1993).
- 13) Y. Ushigami and K. Kawasaki: 日本金属学会報, **34**, 552 (1995).
- 14) 藤倉昌浩, 溝上雅人, 増井浩昭, 松尾征夫, 藪本政男, 久保田 猛: 日本応用磁気学会誌, **22**, 166 (1998).
- 15) 新井 聡: 日本応用磁気学会誌, **25**, 1612 (2001).
- 16) 溝上雅人, 藪本政男, 岡崎靖雄: 電気学会論文誌 A, **116-A**, 744 (1996).
- 17) 新日鐵: 「電磁鋼板」, 製鉄研究, **310**, 150 (1982).
- 18) T. Kubota and T. Nagai: *J. Mater. Eng. Performance*, **1**, 219 (1992).
- 19) M. Yabumoto, T. Wakisaka, and C. Kaidou: 20th Annual Conference on Properties and Applications of Magnetic Materials (2001).
- 20) 小松原道郎, 小畑良夫, 山田茂樹: 川崎製鉄技報, **32**(3), 210 (2000).
- 21) 近藤 修, 河野正樹, 本田厚人, 高城重彰, 小松原道郎: 平成 12 年電気学会基礎・材料共通部門大会, p. 146 (2000).
- 22) I. Tachino, T. Kubota, A. Sakaida, T. Uemura, and S. Nishida: *Anales de Fisica, Ser. B*, **86**, 250 (1990).
- 23) 久保田 猛, 坂井田 晃, 立野一郎: 電気学会マグネティックス研究会, MAG-95-174, 9 (1995).
- 24) 久保田 猛, 藪本政男, 山本政広, 佐藤浩明, 東根和隆: まてりあ, **42**, 242 (2003).
- 25) 藤倉昌浩: 第 22 回日本応用磁気学会学術講演会概要集, 20pB-6 (1998).
- 26) 久保田 猛, 藤倉昌浩, 溝上雅人, 牛神義行: 新日鉄技報, **371**, 53 (1999).
- 27) 富田幸男, 熊谷達也, 小山邦夫, 津田幸男: 新日鉄技報, **348**, 71 (1993).

(2003 年 4 月 11 日受理)



久保田 猛 くばた たけし

昭 52 大阪大学基礎工学部物性物理工学科修士課程修了, 同年 新日本製鐵(株)入社, 基礎研究所, 昭 56 生産技術研究所, 昭 59 第三技術研究所, 平 3 八幡技術研究所, 平 7 鉄鋼研究所, 昭 56 より電磁鋼板の研究開発に従事, 現在に至る。
専門 鉄鋼材料, 磁性物理