

電磁鋼板でエコデザイン

—省エネルギー，騒音低減，磁気シールド—

Electrical Steel Sheet for Eco-Design of Electrical Equipments

久保田 猛^{*(1)}
Takeshi KUBOTA

藤倉 昌浩^{*(2)}
Masahiro FUJIKURA

溝上 雅人^{*(2)}
Masato MIZOKAMI

牛神 義行^{*(2)}
Yoshiyuki USHIGAMI

抄 録

電磁鋼板は機能性素材として発電機，変圧器，回転機等，電力に関わる各ステージでの鉄心，更には磁気シールド等にも用いられる磁性材料である。電磁鋼板としての素材性能向上はもとより，電気機器としての省エネルギー，騒音低減，そしてシールド性と，実際のアセンブル状態としてのエコデザイン化をめざし，利用技術研究も著しい進展をなした。環境を制御する素材としての電磁鋼板について述べた。

Abstract

Electrical steel sheet is a soft magnetic material used for cores of electrical equipments, such as generators, transformers, motors and so on. It is also used for magnetic shielding materials. The progress of not only material properties, but also performance assembled in electrical equipment and magnetic shielding are remarkable. Electrical steel sheet is going to develop as an eco-material for saving energy, reducing noise, and as a magnetic shielding.

1. 緒 言

電磁鋼板は電気機器の鉄心材料として用いられ，電力に関わる各ステージ，すなわち，発電段階での発電器，送配電段階での変圧器，消費段階でのモータ等，いずれにおいても基本的には不可欠な磁性材料である。電力であるかぎり省エネルギーは必然的な命題であり，また，これらの電気機器から発する騒音の低減も環境重視の観点から重要視されている。更に最近では，やはり地球環境問題への対応とも相俟って，磁気シールド用素材としての機能も見逃せない。

このような電磁鋼板は，1900年にHadfield等によって発見された鉄にSiを添加することによる磁性向上効果¹⁾にその端を発する。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効果を活用して，1934年に{110}〈001〉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年に新日本製鐵により生産が開始された。特に1968年からは，新日本製鐵の発明による高磁束密度方向性電磁鋼板(HI-B)⁴⁾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，主にモータ等の回転機の鉄心材料として用いられる無方向性電磁鋼板は，日本では1924年に新日本製鐵により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間圧延無方向性電磁鋼板に置き換わってきた。

ここでは，上述のような省エネルギー，騒音低減，磁気シールドの三つの観点から，機能性材料，そしてエコマテリアルとしての電磁鋼板の活用について述べる。

2. 電気機器の省エネルギー

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等の発見以降，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。図1に，これら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⁶⁾。高磁束密度方向性電磁鋼板(①)により，製品二次再結晶粒の{110}〈001〉方位への平均分散角は7度から3度へと尖鋭化され，磁束密度B8(800A/mで磁化した時の磁束密度)は1.82Tから1.92T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 $W_{17/50}$ (磁束密度：1.7テスラ，周波数：50Hzでの鉄損)で約0.2W/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減に着目

*⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-2313

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主任研究員

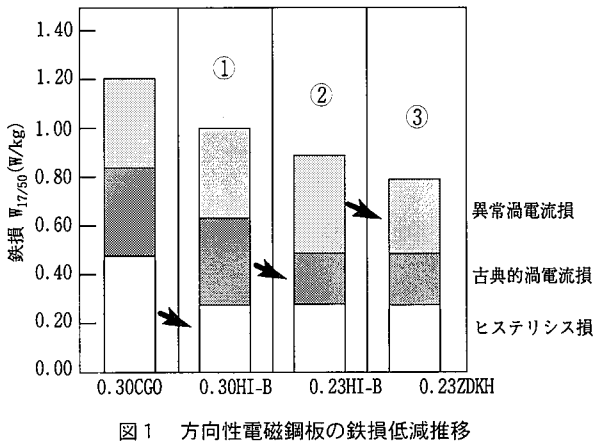


図1 方向性電磁鋼板の鉄損低減推移

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0.30mmから0.23mmへ薄手化することにより、渦電流損を $W_{17/50}$ で約0.15W/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}⟨001⟩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⁷⁾や溝導入⁸⁾がこの技術に相当し、渦電流損を $W_{17/50}$ で更に0.1W/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技術を施した最高級薄手方向性電磁鋼板を用いた場合、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、変圧器でのエネルギー損失低減を通じ、省エネルギーに大きく貢献している。

方向性電磁鋼板の鉄損を更に低減するためには、上記①②③に引き続き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、図2に示すように絶縁性及び鋼板への張力付与を目的としてセラミックス被膜が被覆されている⁵⁾。セラミックス被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0.1W/kgの鉄損低減が可能である⁵⁾(図3参照)。また、このような表面セラミックス被膜による磁壁のピンニングばかりでなく、二次再結晶粒内の亜粒界構造⁹⁾も磁壁との相互作用を持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環流磁区の生成、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。環流磁区を抑制するためには二次再結晶粒の{110}⟨001⟩方位への

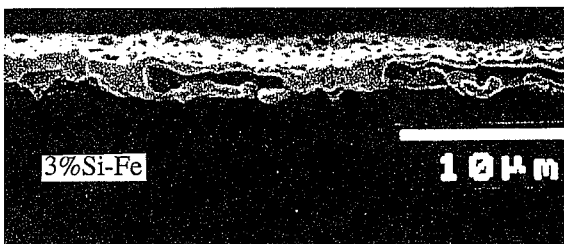


図2 方向性電磁鋼板の表面酸化層(セラミックス被膜)構造

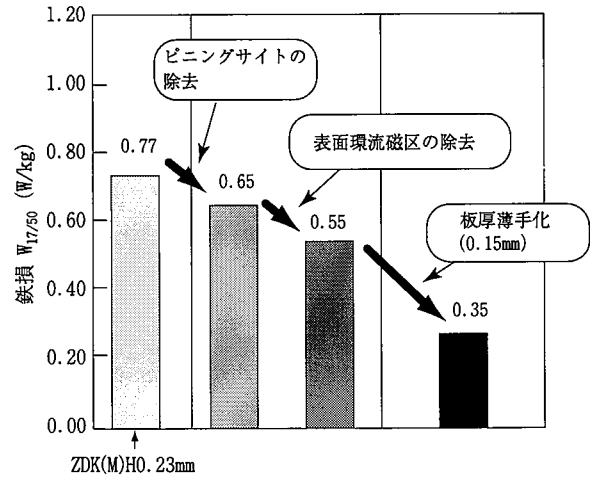


図3 方向性電磁鋼板における低鉄損化の展望

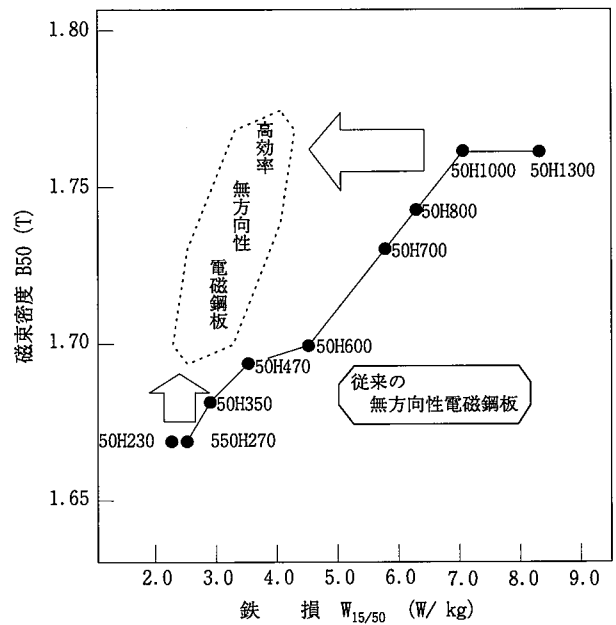


図4 無方向性電磁鋼板における低鉄損高磁束密度(高効率)化

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0.04T(1.92から1.96Tへ)増大させることにより、 $W_{17/50}$ で約0.1W/kgの鉄損低減が可能である⁵⁾(図3参照)。更に、製品板厚を一層薄くすることにより(0.23から0.15mmへ)、 $W_{17/50}$ で0.35W/kg程度の極低鉄損を実現することが可能である⁵⁾。

電力の発電段階での発電機、消費段階でのモータ等においても、当然エネルギー損失を可能なかぎ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。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、従来の製品に比べ低鉄損かつ高磁束密度化を実現してきた¹⁰⁾(図4参照)。

無方向性電磁鋼板の低鉄損かつ高磁束密度化、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に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

できる。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省エネルギーである。今後、電気自動車の普及等により、モータのエネルギー損失低減は一層重要となり、モータ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更に進展しつつある。

3. 変圧器の騒音低減

省エネルギー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あげられる。磁歪は磁区構造と密接な関係にあり、図5にその模式図を示す¹¹⁾。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。その手段としては、二次再結晶粒の $\{110\langle 001 \rangle$ 方位への集積度を高めること、また被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、可能なかぎり残留応力を低減することも効果的である。更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、板厚が薄い程 90° 磁区の静磁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、上記の被膜張力の効果も大きくなることを期待できる。

実際の変圧器では、鉄心構造や素材特性に由来し、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(Pulse Width Modulation)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¹¹⁾。

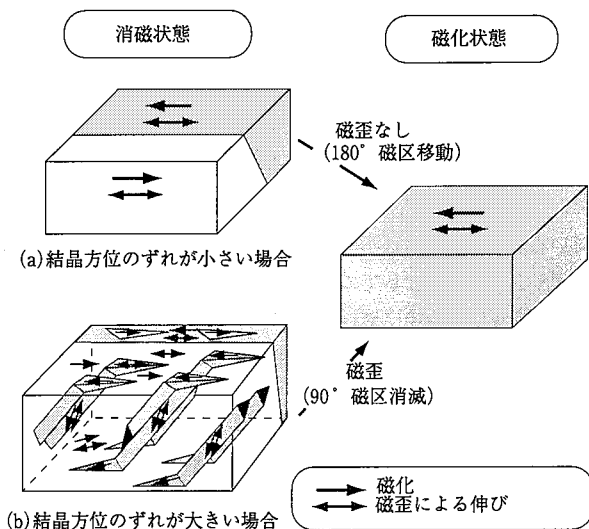


図5 方向性電磁鋼板の磁区構造と磁歪

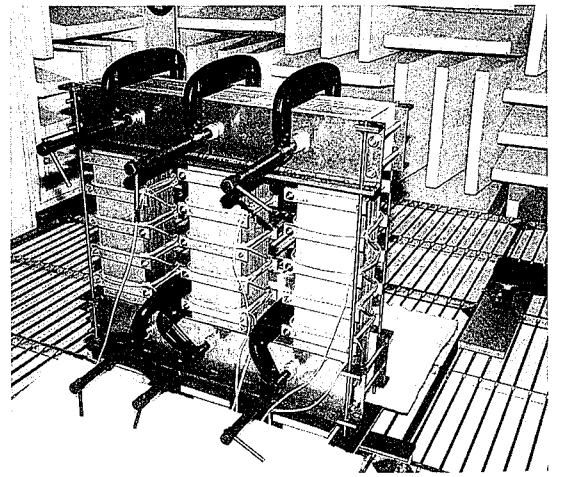


図6 モデル変圧器鉄心の外観

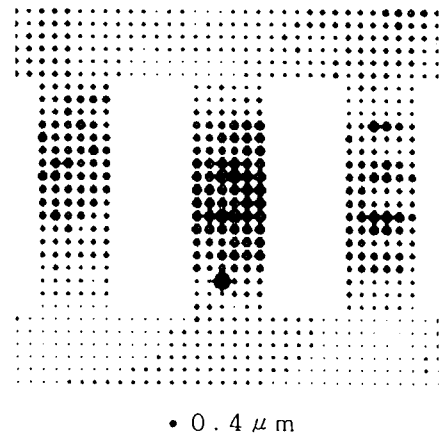


図7 モデル変圧器鉄心の振動変位解析結果

ところで鉄心の振動原因には、上記の磁歪の他に鋼板間に生じる電磁吸引力等によるものもあり、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を開発し、鉄心振動の詳細な解析が可能となった¹²⁾。三相三脚モデル変圧器鉄心(図6参照)での振動解析結果の例を図7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。従って、実際の変圧器鉄心の振動、騒音を解析する場合には共振現象も重視する必要があると考えられる。

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磁歪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等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。

4. 電磁鋼板を活用した磁気シールド

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っ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、エレベーター、送電線、変電所など低周波の磁気ノイズの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、装置の誤動作、機能障害の防止のための一つの方法に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使われる。そのシールド性能を決定する

のは材料の透磁率と板厚であり、透磁率が高く、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材料として使われることが多い。

通常、磁気シールド性能の評価は評価対象の材料でシールド体を作製し、シールド体全体の性能を測定するが多い。しかしながらそこには材料の性能以上に設計の要因が寄与してしまう。材料性能を評価するためには図8に示すような装置が有効である¹³⁾。下部励磁用鉄心及び上部の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あと、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ーにより試料に平行な板厚方向の磁場 B_{1z} 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って減衰するから、シールド体がない場合の磁場 B_{0z} と比較すれば材料のシールド性能を評価することができる。シールド効果 S は $S=B_{0z}/B_{1z}$ で定義できる。ただし、シールド体は均一な磁場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。

図9に無方向性電磁鋼板の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束密度を横軸にして示す。ここで、50H250はSiを3wt%含む透磁率の高い無方向性電磁鋼板、50H1000はSi:0.3wt%の透磁率の低い無方向性電磁鋼板である。50H250の方が非常に高いシールド効果を持つことが分かる。このシールド効果の曲線は、励磁が低い場合シールド効果は小さく、励磁力の増加と共に増大し極大値をとり減少する。これは励磁に伴う材料の透磁率の変化を反映しているためである。図10に厚さが0.23, 0.35, 0.50mmの方向性電磁鋼板のシールド効果を示

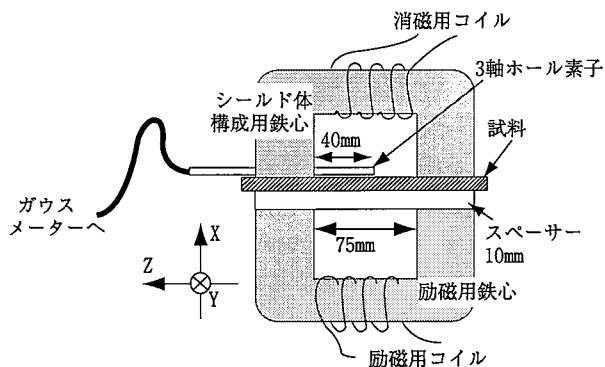


図8 磁気シールド性能測定装置

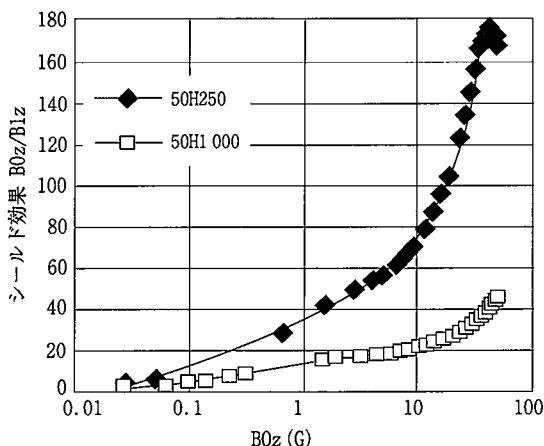


図9 透磁率の異なる無方向性電磁鋼板のシールド効果

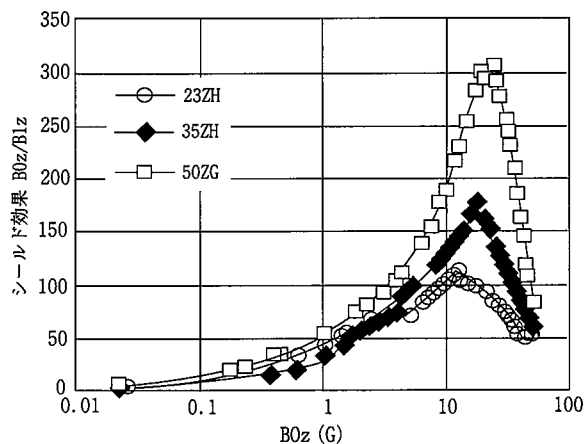


図10 厚さの異なる方向性電磁鋼板のシールド効果

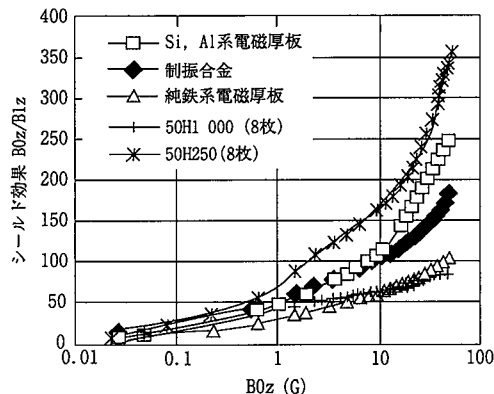


図11 磁気シールド用厚板(厚さ4mm)のシールド効果

す。直流磁化曲線は3種類ともほぼ同様の形状をしているので、シールド効果の違いは主に板厚の影響である。板厚が厚いほどシールド効果が大きい事が分かる。

透磁率が高いほど板厚が厚いほどシールド性能に優れることを見てきたが、電磁鋼板の厚みは一般には0.5mm厚程度までである。そのため所定のシールド性能を得るために鋼板を積層して使うことがある。工程上このような積層を嫌う場合、磁気シールド用の厚板¹⁴⁾を用いる事ができる。図11に示すように、無方向性電磁鋼板50H250を積層したものに近い特性が得られる。

5. 結 言

電磁鋼板は鉄鋼製品の中でも特に機能性の高い素材である。その用途は電力に関わる各ステージでの鉄心をはじめ磁気シールド等への拡がりを見せるなど、まさに、“エコマテリアル”として注目を浴びている。このため電磁鋼板としての素材性能向上はもとより、実際のアセンブル状態としてエコデザイン化すべく利用技術研究も著しい進展を見せ、環境に優しいというよりも、むしろ環境を制御する素材として今後の発展がますます期待される。

参考文献

- 1) Barret, W. F., Brown, W., Hadfield, R. A.: Sci. Trans. Roy. Dublin. Soc. 1, 67(1900)
- 2) Honda, K., Kaya, S.: Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 15, 721(1926)
- 3) Goss, N. P.: U. S. Patent No. 1965559. 1934

- 4) Taguchi, S., Sakakura, A., Takashima, H. : U. S. Patent No. 3287183.
1966
Taguchi, S., Sakakura, A., Wada, T., Ueno, K., Yamamoto, T.,
Urushiyama, N. : U. S. Patent No.3636579. 1972
- 5) Ushigami, Y., Masui, H., Okazaki, Y., Suga, Y., Takahashi, N. : J. Mat.
Eng. and Performance. 5, 310(1996)
- 6) Sakai, T. : Trafotech-94, 4th Int. Conf. 1994, IEEMA. p.27
- 7) Iuchi, T., Yamaguchi, S., Ichiyama, T., Nakamura, M., Ishimoto, T.,
Kuroki, K. : J. Appl. Phys. 53, 2410(1982)
- 8) Kobayashi, H., Kuroki, K., Sasaki, E., Iwasaki, M., Takahashi, N. :
Physica Scripta. T24, 36(1988)
- 9) Ushigami, Y., Kawasaki, K. : 日本金属学会報. 34, 552(1995)
- 10) Kubota, T., Nagai, T. : J. Mat. Eng. and Performance. 1, 219(1992)
- 11) 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)
- 12) 溝上雅人, 藪本政男, 岡崎靖雄 : 電気学会論文誌A. 116-A, 744(1996)
- 13) 藤倉昌浩 : 第22回日本応用磁気学会学術講演会概要集. 1998, 20pB-6
- 14) 富田幸男, 熊谷達也, 小山邦夫, 津田幸夫 : 新日鉄技報. 348, 71(1993)