

技術資料

UDC 669.14.018.5 : 669.15'782-194 : 548.735.6 : 538.21

珪素鋼板における最近の進歩*

田 口 悟**

Review of the Recent Development of Electrical Sheet Steel

Satoru TAGUCHI

1. 緒 言

欧米で生産の始まった珪素鋼板はやがて米国を中心に著しい発達を遂げた。わが国の製造技術は非常に遅れていたため 1952 年頃から米国より技術導入が始まり、またこの頃より設備などの関連技術も急激に発達してきたので、わが国独自で類似の製品の開発も可能になり、生産量は増大し品質も向上してきた。特に最近の 10 年間の進歩は著しい。外国では珪素鋼板は品質的には安定の状態に到達していてほとんど見るべき変化はなかつたが、わが国はこの間に方向性珪素鋼板では高磁束密度方向性珪素鋼板が世界にさきがけて開発され、無方向性珪素鋼板では表面の絶縁皮膜のすぐれたものが開発され、各種の用途に応じられるようになった。これらの進歩について触れてみたいと思う。

2. 珪素鋼板の進歩

珪素の添加が始まったのは 1900 年頃からである。ドイツでは 1903 年にはじめて工業的な生産が行なわれた。

1903 年に Hadfield の特許¹⁾が出たが、米国ではこの特許の使用権を得て珪素鋼板の工業生産が始まった。1906 年頃までには 3% Si まで作った。技術面では、Si 量を上げること、炭素含有量を下げること、焼鈍温度を高くすること、また製鋼技術の進歩によつて品質が向上してきた。すべて熱間圧延による珪素鋼板であつたが、回転機用のものから次第に冷間圧延の鋼帯に変わり、鉄心材を連続打抜機によつて打抜くことができるようになった。変圧機用の珪素鋼板としては Si 量が高い熱延珪素鋼板が開発され 5% Si 位までになった。これらは焼鈍分離剤を塗布して積層して窒素雰囲気中で 1100°C 以上で長時間焼鈍して鉄損を減少させた。

珪素鋼板の発展で画期的なものが方向性珪素鋼板である。1934 年に Goss が製造法の特許²⁾を発表した。中間焼鈍を含む 2 段冷延法である。米国のアームコ社を中心

として発展してきた。Goss の特許では仕上焼鈍は連続焼鈍であつたため鉄損が悪かつたので、高温長時間の箱焼鈍が採用された。処理工程中に脱炭素を行なう必要があり、湿水素中で連続焼鈍して脱炭する方法³⁾が開発された。コイル状で行なう焼鈍では焼鈍分離剤を塗布する必要があるが、MgO 粉を塗布して仕上焼鈍中に脱炭焼鈍で生成した酸化層との作用によつてガラス被膜を生成させる技術⁴⁾が開発された。またこの製造法の大きな特徴である高温にスラグを加熱する熱間圧延⁵⁾によつて方向性が向上し、製品特性が安定した。このような多種類の技術の開発によつて方向性珪素鋼板が発達し、主として変圧器用として熱間圧延珪素鋼板にかわつて使用されてきた。アームコ社は方向性珪素鋼板の製造に必要な特許を 1950 年にアレゲニー社に、1953 年に U. S. スティール社に提供した。1952 年から外国に対して熱間圧延珪素鋼板のライセンスの提供をはじめ、続いて方向性珪素鋼板のライセンスを始めた。これによつて方向性珪素鋼板は世界の 80% 位がアームコの技術に従つて製造されるようになった。他の 20% も類似の製造方法である。

方向性珪素鋼板は著しい進歩をしたが、1960 年頃からは大きな変革はなく安定した状態が続き、技術的にも行き着く処まできたと考えられてきたようである。これに大きな変化を与えたのが新日本製鉄からオリエンコア・ハイビー (ORIENTCORE・HI-B) の名称で出現した高磁束密度方向性珪素鋼板である⁶⁾⁷⁾⁸⁾。1964 年に工業化試験を開始し、1968 年から正式に販売を始めた。1971 年にはアームコ社に、1972 年に西独の ATH 社へ、1974 年にフランスのシャション社とベルギーのコックリル社に、1975 年に BSC にライセンスを提供した。川崎製鉄は高磁束密度方向性珪素鋼板 RGH を 1973 年に発表し、1974 年頃から販売を開始した⁹⁾。1974 年にスウェーデンのスラハマ社にライセンスを提供した。

Fig. 1 はわが国における珪素鋼板の生産量の推移で

* 昭和50年8月29日受付 (Received Aug. 29, 1975) (依頼技術資料)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 工博 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

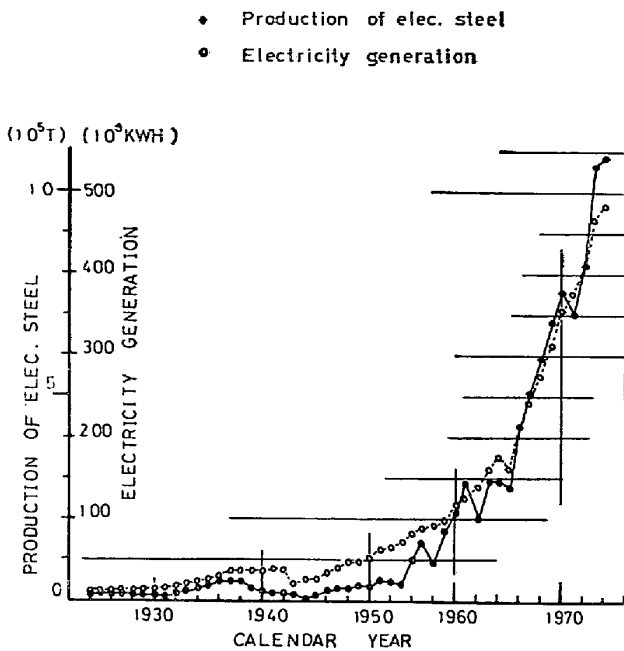


Fig. 1. Electrical steel production and electrical power used in Japan.

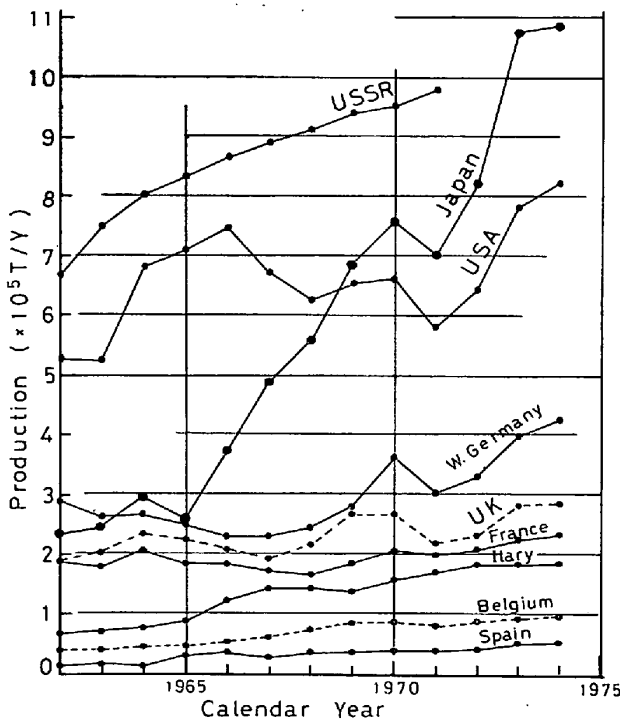


Fig. 2. Electrical steel production in various countries.

ある。発電量の推移に伴って増大している。Fig. 2は主要国別の生産量の推移である。過去 20 年間のわが国の伸びは極めて著しい。米国の場合は小型電動機用に普通の薄鋼板と同様のものが多量使用されているため、わが国のような低級品位の S 30~S 60 相当のものの使用が非常に少ないので全生産量はあまり多くない。

最近における珪素鋼板の進歩は方向性珪素鋼板においては高磁束密度方向性珪素鋼板の出現であるが、無方向性珪素鋼板では新品種の開発はなく、主として家電などの小形電動機用の低級品位のものとこれに対する絶縁被膜の開発である。

3. 無方向性珪素鋼板

一般に Si 0.5% 以上の中級品位、高級品位の珪素鋼板と Si 0.5% 以下の低級品位のものがある。その他に家庭電気機器などの小形電動機の鉄心用としては鉄損は多少増加してもよいので珪素を含まない価格の安い磁性鋼板が製造されている。また一般の薄鋼板とほとんど同様のものが使用され、打抜き加工後需要家で焼鈍して使われるものもある。わが国では低級品位の珪素鋼板が非常に発達しているので薄鋼板の使用は極めて少ないが、米国では多量使われている。需要家での使用上からはフルプロセス製品と加工後需要家で焼鈍して磁性を発揮させるセミプロセス製品に大別される。鉄損を要求される高級品位の製品ほど珪素量が多いので磁束密度は低くなるが、低級品位のものは珪素量が少ないかあるいは含有しないので磁束密度が高いのが特徴である。一般に低級品位のものは需要家の加工費の節減のため厚さ 0.5 mm のものか、場合によってはさらに厚い製品が使われている。中級品位のものも厚手が多いが、厚さ 0.35 mm のものもある。鉄損の低いことが要求される高級品位のものは厚さ 0.35 mm と 0.5 mm が製造されている。

3-1 無方向性珪素鋼板の発達の経過

わが国では冷延無方向性珪素鋼板は JIS 規格の S 23 ないし S 18 の中級品位のものの製産から始まり、Fig. 3 に示すように低級品位と高級品位の製品が製造されるようになった。小形電動機などでは多少鉄損が悪くても高磁束密度を有し、かつ価格が安いことが望まれ珪素含有量の少ない S 30 以下の級のものが出現することとなった。また大形回転機あるいは小形の変圧器などでは低鉄損が要求され、S 12、S 14 級が生産され、さらに JIS

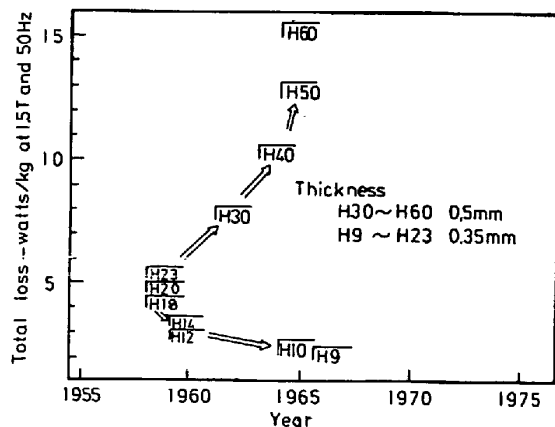


Fig. 3. Status of commercial grades of non oriented electrical steel in Japan.

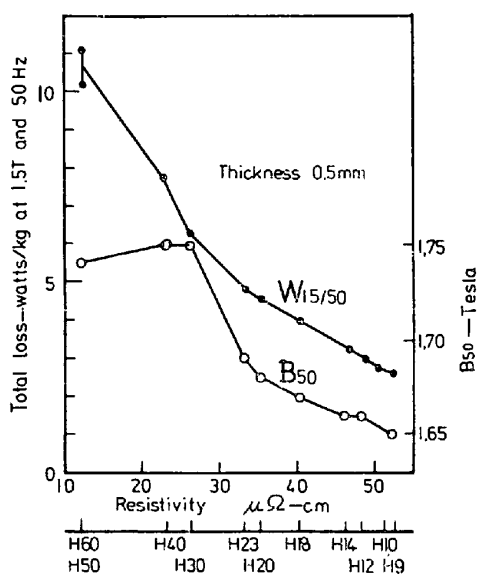


Fig. 4. Typical electrical and magnetic properties of commercial grades of non oriented electrical steel.

には定められていないが H10, H9 の高級品位のものが製造されるようになった。

高級品位のものほど Si 含有量が多く固有抵抗が高く低鉄損が得られるが、飽和磁束密度が低くなる欠点がある。

Fig. 4 に H60 (JIS の S60 相当品) から H9 までのフルプロセス製品の各級のものに対応する代表的な固有抵抗に対する代表的な鉄損 $W_{15/50}$ (1.5 Tesla, 50 Hz における鉄損) と磁束密度 B_{50} (5000 A/m における磁束密度) の関係を示す。H50, H60 は H30 に比し Si 量が少ないので飽和磁束密度は高いが、磁化特性が劣るので 5000 A/m 位ではまだ磁束密度が H30 よりも高くなっていない。小形電動機では磁束密度が重要であるので低級品位のものが適し、鉄損が重要になる大形回転機では高級品位のものが使用される。無方向性珪素鋼板では低, 中, 高級品位はともに特性上それぞれの用途によつて必要な製品である。

セミプロセス製品は一般に 750°C, 2hr の需要家焼鈍後の磁気特性を規格値としており、わが国では S30 と同一規格の HS30 の 0.5mm 板厚のものが主として使用されている。

この他に各種の用途に応じた珪素鋼板が開発されてきた。高い周波数で使用する機器のために厚さ 0.15mm, 0.20mm の薄手無方向性珪素鋼板が製造されるようになった。また高速回転機には機械的な強度が要求されるので、引張強さが 60 kg/mm² 位の高張力無方向性珪素鋼板が製造されている。また磨耗に強いマグネトスイッチ用無方向性珪素鋼板も製造されるようになった。

3.2 加工性の向上

最近の進歩は小形電動機用の低級品位のものと同様

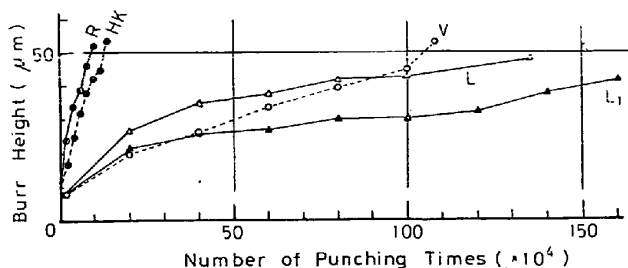
に対する絶縁被膜の開発が主要なものであつた。これらには多少鉄損は増加しても高い磁束密度を有し、加工性がすぐれ、かつ低廉であることが望まれた。絶縁被膜といえは文字どおり積層された鉄心の層間の絶縁がおもな目的であつた。ところが小形電動機では絶縁抵抗はごくわずかであればよく、それ以外の打抜性、溶接性、焼鈍での焼付防止、耐食性とといった被膜の性質に効用が求められた。従来絶縁被膜としては磷酸塩、クロム酸塩などの無機被膜が利用されてきていたが、樹脂特に水溶性あるいは水分散系の樹脂の発達によつて、これらと無機塩特にクロム酸塩との組み合わせによる加工性と耐熱性を兼ね備えた半有機被膜が開発された。この被膜は従来の無機被膜に比べて打抜性が非常にすぐれ、無機の特徴である耐熱性も十分あり、またフロンガスなどに対する耐食性も十分である。このような点から低級品位用にはほとんどこの種の被膜が利用されるようになった。

打抜性は鋼板の機械的性質、表面の酸化層によつても左右されるが被膜の影響は非常に著しい。Fig. 5 のように被膜は打抜性に非常に大きな効果を与える。この試験のように直径 5mm の丸形で打抜試験をした場合は、被膜の種類によつて、かえりが 50μ になるまでの打抜数は 10 万ないし 300 万枚くらい変化する。しかし実際の鉄心の打抜では形の形状が複雑なためこのような大きな差は出ないが、被膜の改良によつて打抜性は非常に進歩した。わが国では小型電動機のステーターは外周を溶接で固定する場合が多く溶接性の向上、またローターのアルミニウム合金ダイキャストの使用、切削性の改善などによつて加工性は非常に向上した。

4. 方向性珪素鋼板

Fig. 6 は 1.5 Tesla (1.5 Wb/m²), 50Hz における鉄損の向上の様子を示す。2 段冷延法による方向性珪素鋼板の出現で鉄損は著しい減少を示し、1960年頃まで進出が続いたが以降はほとんど変化は見られなかつた。しかし高磁束密度方向性珪素鋼板 HI-B の出現によつて再び著しい変化が起こっていることがわかる。

Fig. 7 はわが国の級位の推移を示す。1.7 Tesla, 50



Material; H40, 0.5mm thick
R, HK : Inorganic coating tool steel die
L, L₁ : Semi-organic coating 5mm dia.
V : Organic Coating 340 stroke/min clearance 5%

Fig. 5. Effect of coating on punchability.

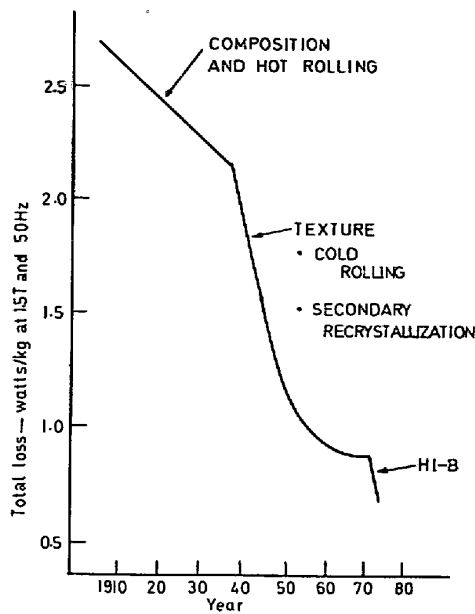


Fig. 6. Lowest values of total loss of commercial electrical steel in various years.

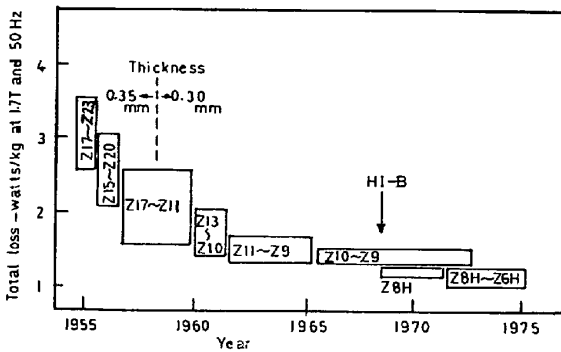


Fig. 7. Improvements in total loss of commercial grades of grain oriented electrical steel in Japan.

Hz における鉄損値で示してある。

方向性珪素鋼板は極く一部が発電機用に使われるがほとんどは変圧器鉄心に使用され、鉄損の低い珪素鋼板を使用すれば鉄損の少ない変圧器になるため、品質的には低鉄損の高級品位のものであるほどよい。より高級品位のものが販売されると他のものは値段が安いという以外には存在価値がないので次第に減少し、高級品位に向けて発展する製品である。

鉄は結晶方位によって磁化のされ方が異なり、[001]軸は磁化の容易な方向、[111]軸は磁化の困難な方向、[011]軸は磁化の中間軸である。方向性珪素鋼板は圧延方向に平行に[001]軸を持つ(110)[001]の方位の結晶粒の集まりで、磁化特性の向上と鉄損の減少に画期的な進歩をもたらした。鉄損は主としてヒステリシス損と渦流損に分けられるが、これにおよぼす要因は次のようである。

- ヒステリシス損
 - 結晶方位
 - 鋼板純度 (介在物, 析出物)
 - 内部歪
- 渦流損
 - 比抵抗 (Si含有量)
 - 板厚
 - 鋼板に及ぼす張力 (表面被膜)
 - 磁区の大きさ (結晶粒度)

従来の製品ではヒステリシス損については純度をよくするとか、内部歪みを減少するとかによつて向上が計られ、また渦流損については Si 量を高くして電気抵抗を増すとか、板厚を薄くするとか、結晶粒を細かくするなどの努力によつて向上が計られてきた。その結果品質の向上は著しいものがあつたが、Si 量では製造上 3.25% までが限度で、また鋼板の純度の向上、内部歪みの減少、板厚の減少などについても改良の余地がないと考えられるようになった。しかし高磁束密度方向性珪素鋼板では結晶方位の画期的な向上によつてヒステリシス損の著しい減少と表面被膜による張力効果で渦流損が減少して鉄損の向上が達成された。

珪素鋼板は積層して使用されるため厚さが均一であり、平坦であることが必要である。また最近では変圧器の騒音が重要な問題となり、騒音の要因の一つである珪素鋼板の磁歪が小さいことが必要である。

方向性珪素鋼板では 0.35 mm, 0.30 mm および 0.28 mm の板厚のものが生産されている。板厚を薄くすれば渦流損が減少し鉄損が減少するが変圧器の鉄心の加工、組立てで工数が増す。米国およびヨーロッパでは 0.28 mm は巻鉄心と鉄損の厳しい積鉄心用に使用され、0.30 mm は積鉄心用に使用される。わが国では一般に 0.30 mm が巻鉄心用に、0.35 mm が積鉄心用に使用される。

4.1 製造上の特長

従来の方向性珪素鋼板は 2 段冷延法で各国で製造されてきた。Table 1 に製造法を示す。2 段冷延法では MnS をインヒビターとして使用している。すなわち製鋼で Mn, S を添加し、分塊、熱延した後中間焼鈍をはさむ 2 回の冷延で最終板厚とし、脱炭焼鈍後最終焼鈍によつて大結晶を成長させる。この場合熱延の際にスラブを高温に加熱して MnS を固溶させて熱延後に MnS を微細に分散させ、これによつて最終の仕上焼鈍に際して一次再結晶の成長を抑制してその間に二次再結晶の成長を促進し、そして高温長時間の焼鈍中に MnS は分散し拡散して表面に形成されるガラス被膜中に吸収され磁気特性に対して無害化する。一般にはさらに連続焼鈍をして平坦にし無機系の絶縁被膜をほどこす。インヒビターとしては川崎製鉄だけが MnS のかわりに MnSe を使用している。Fig. 8 (b) の (100) 極点図が示すように各結晶粒の磁化容易軸 [001] の圧延方向への集積度は 10° 以内が 75% で平均 7° 位である。この方向性は 800 A/m (約 10 α) における磁束密度 B_s と対応して

Table 1. Manufacturing process and guaranteed maximum total loss.

Manufacturing Process	HI-B			Conventional		
		Steel making (Al, N) Slabbing Hot rolling High temp. annealing Cold rolling ↓ Decarburizing Box annealing			Steel making (Mn, S) Slabbing Hot rolling Annealing Cold rolling Annealing Cold rolling Decarburizing Box annealing	
Guaranteed Total Loss (Watts/kg at 1.7 T and 50Hz)	Grade	0.30 mm*	0.35 mm*	JIS Grade	0.30 mm*	0.35 mm*
	Z9H Z8H Z7H Z6H	— 1.22 1.13 1.05	— 1.37 1.26 1.17	G12 G11 G10 G9	— 1.62 1.47 1.33	— 1.83 1.66 1.51

* Sheet thickness of ORIENTCORE-HI-B and conventional grain oriented electrical steel.

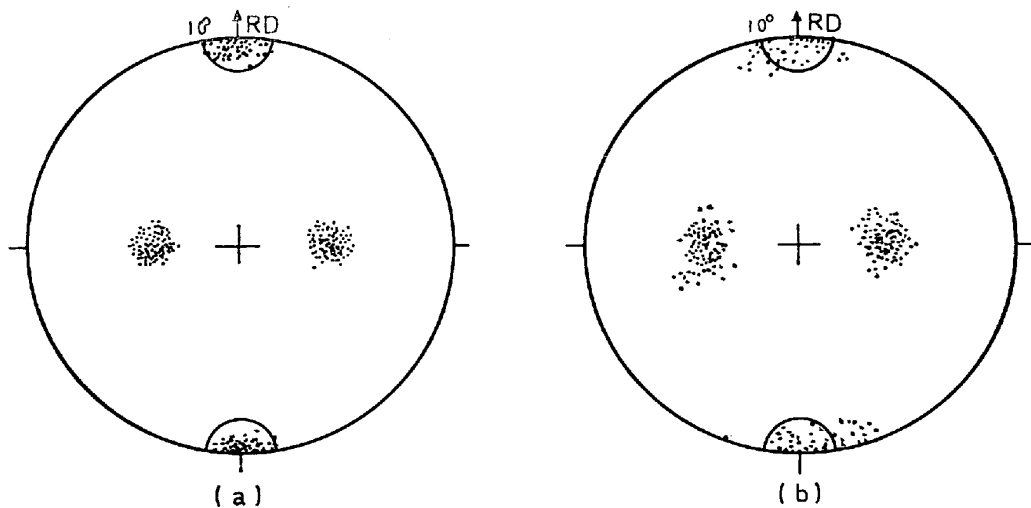


Fig. 8. (100) pole figures showing the orientation of grain-oriented silicon steel:
(a) ORIENTCORE HI-B, (b) conventional grain-oriented steel.

おり、方向性のよいものほど B_8 が大となる。 B_8 は約 1.82 Tesla である。2 段冷延法では方向性の向上に努力してきたが、 B_8 が 1.83 Tesla 位で頭打ちとなり、これ以上の方向性の向上は工業的には不可能とされてきた。このため板厚を薄くすることにより鉄損の減少をはかり米国では一時厚さ 0.23 mm のものの製造が試みられたが、この工業化はコスト高になることと、予測された低鉄損が得がたいため行き詰った。工業製品としては 2 段冷延法では 0.28 mm が現在得られている最高の特性を示している。この 2 段冷延法は将来その製造条件を検討したとしても改良の余地はあまりなく、ほぼ完成した方法と考えられている。鉄板の JIS 規格値は Table 1 に示してある。

これに対し、高磁束密度方向性珪素鋼板 HI-B は AlN

をインヒビターとし、1 段冷延法によつて作る。すなわち Table 1 に示すように製鋼で Al, N を添加し、分塊、熱延した後、AlN 析出焼鈍をし、次に 1 段強冷延によつて最終厚さとした後、脱炭し、仕上焼鈍を行なう。従来の方向性珪素鋼板では 1 段冷延法による製造は不可能とされていた。また AlN は有害とされていた。しかし AlN のすぐれた特長^{10)~12)}を生かし、1 段冷延と組み合わせて著しく方向性を向上させることができた。AlN は 1100°C 以上で分解し、拡散してガラス被膜中に吸収される。この製品は Fig. 8(a) の極点図が示すように [001] 軸の圧延方向への集積度は非常にすぐれ、10° 以内が 100% で平均 3° 位である。 B_8 は 1.92 Tesla で従来品の 1.82 Tesla とくらべると大幅に向上している。高温でガラス被膜が形成されるが、このガラス被膜は一

種のセラミックスであり、熱膨張係数は非常に小さい。したがって板が冷却によつて縮むので板に張力が生じることとなる。またさらにこの上にほどこす無機系被膜も同様の効果を与えることが可能である。この張力効果の磁気特性におよぼす効果は B_8 が 1.82 Tesla 位の方向性では僅少であるが、 B_8 が 1.9 Tesla 位になると鉄損を減少させる効果が顕著になり、方向性の向上と相乗的に作用して鉄損の低下に役立つ効果がある。鉄損の規格は Table 1 に示してある。

4.2 磁氣的性質

Fig. 9 は鉄損の分離についての典型的な例で、1.7 Tesla における 1 サイクルあたりの鉄損と周波数の関係を示す。ヒステリシス損は周波数に比例する値で、1 サイクルあたりのヒステリシス損は一定と考えられる。古

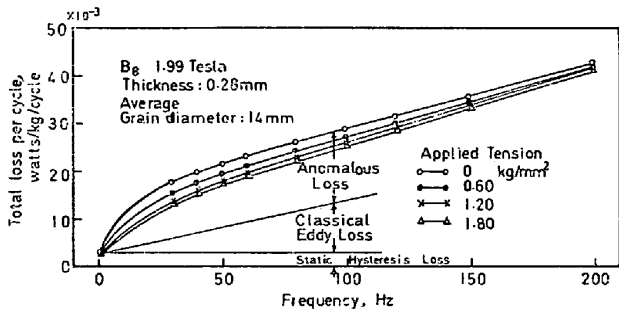


Fig. 9. Effect of applied tension on total loss per cycle against frequency curve for grain-oriented 3% silicon iron. Measurement of total loss were made at 1.7 Tesla. The surface was chemically polished.

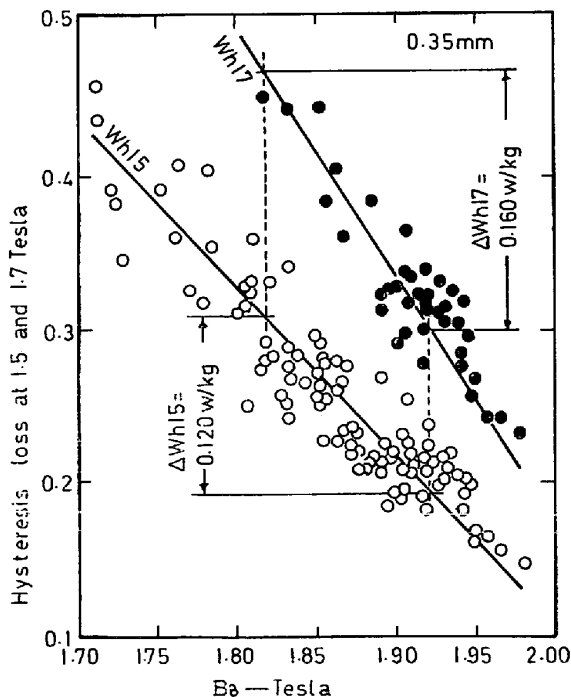


Fig. 10. Effects of B_8 value on hysteresis loss for grain oriented electrical steel.

典的渦流損は材料の中で磁化の変化が一様な場合の渦流損で、熱として失われる。この損失は板厚と周波数と最高磁束密度のそれぞれの自乗に比例し、固有抵抗に反比例する。したがって 1 サイクルあたりでは周波数に比例している。異常渦流損は磁壁の移動に基づく渦流損で、磁壁の移動速度の自乗に比例する。この磁壁の移動速度は磁化の周波数に比例するので、1 サイクルあたりの異常渦流損は周波数に比例する。しかし 30 Hz 以下のような低い周波数では磁区の数が周波数によって変化する現象などのためにこの比例関係は失われている。同じ周波数の場合では速度は磁壁の移動の距離に比例するので、磁区の幅の大きいものほど速度が早くなり渦流損が増加する。しかし磁区の幅が大きくなると磁壁の数が減るので異常渦流損は磁区の幅の 2 乗には比例しなくて、およそ磁区の幅に比例する。異常渦流損は商用周波数 50, 60 Hz においては鉄損の 50% 程度を占めている。異常渦流損は方向性珪素鋼板が進歩するに従つてその占める割合が増大してきている。この減少のためには磁区の幅を小さくすることが重要である。このためには方向性の向上すなわち B_8 の向上にともなう張力効果の増大が重要である。

4.2.1 方向性とヒステリシス損

方向性は B_8 特性で表現することができるが、Fig. 10 に示すように B_8 が向上するとヒステリシス損が著しく減少する¹³⁾。図は板厚 0.35 mm の場合であるが、 B_8 が 1.82 Tesla から 1.92 Tesla に向上すると最大磁束密度が 1.7 Tesla の場合のヒステリシス損 W_H 17/50 (直流ヒステリシス損を 50 倍したもの) は 0.16 W/kg 減少する。結晶方位を揃え B_8 特性を向上させることが鉄損減少の第一の要因である。

4.2.2 方向性と張力効果¹⁴⁾¹⁵⁾

表面被膜を除いた試料に張力および圧縮力を加えると張力の場合には 90° 磁区が減つて 180° 磁区が増し磁区構造が変わるため鉄損が減少し、圧縮の場合は 90° 磁区が増して鉄損が増大するが、方向性の程度によつて著し

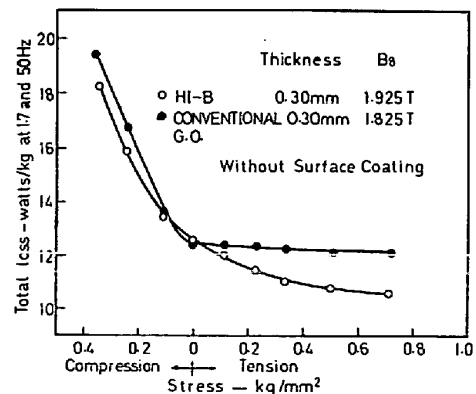


Fig. 11. Effect of stress applied along the rolling direction on total loss for HI-B and conventional G.O.

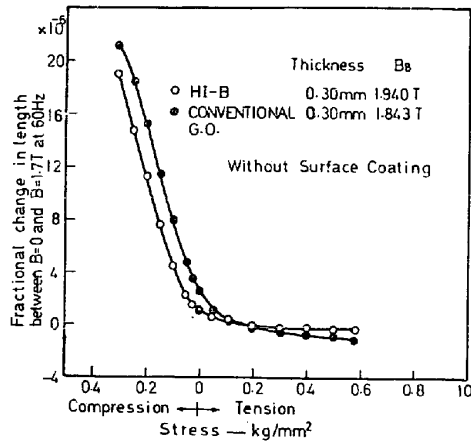


Fig. 12. Effect of stress applied along the rolling direction on magnetostriction for HI-B and conventional G.O.

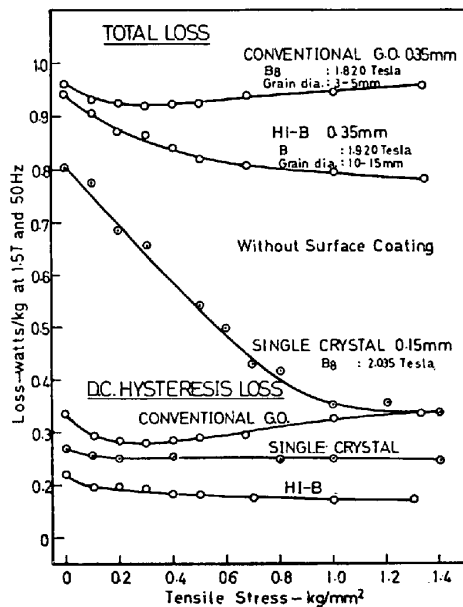


Fig. 13. Effect of the degree of grain orientation on the tensile stress dependence of total loss and d.c. hysteresis loss for grain-oriented electrical steel.

く様相が異なる。Fig. 11 のように方向性のよい $B_8=1.925$ Tesla のものは張力によつて鉄損減少が大で、また圧縮による鉄損の増大は少ない。この現象は磁歪に対しても顕著に現われる。Fig. 12 は $B=1.7$ Tesla における磁歪であるが、方向性のよい $B_8=1.94$ Tesla のものは張力によつて磁歪は負になるが絶対値は小さい。圧縮に対しては磁歪の増大が少ない。磁歪は変圧器騒音の主要因とされているので、磁歪が小さくて歪に対して劣化し難いことが望ましい。方向性がよくなるほどこの要求に応えることができる。この結果から方向性のすぐれたものは圧延方向の張力下の磁気特性の改善効果が大いことがわかる。このような張力を与えることができれば特性の大幅な向上が期待できる。

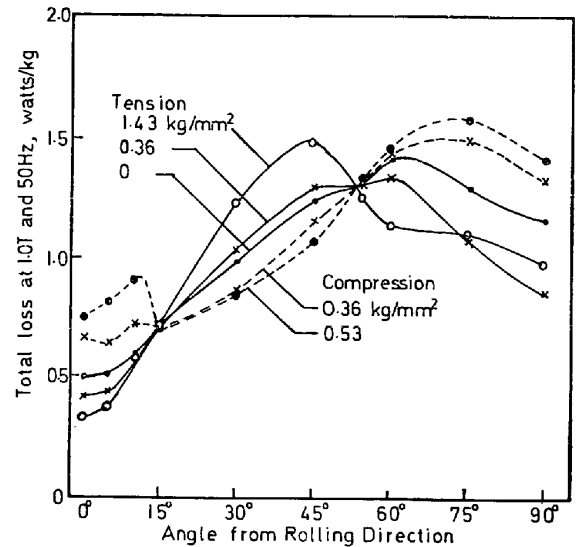


Fig. 14. Angular dependence of effect of applied stress on total loss for HI-B without surface coating ($B_8=1.95$ T). Thickness is 0.27 mm.

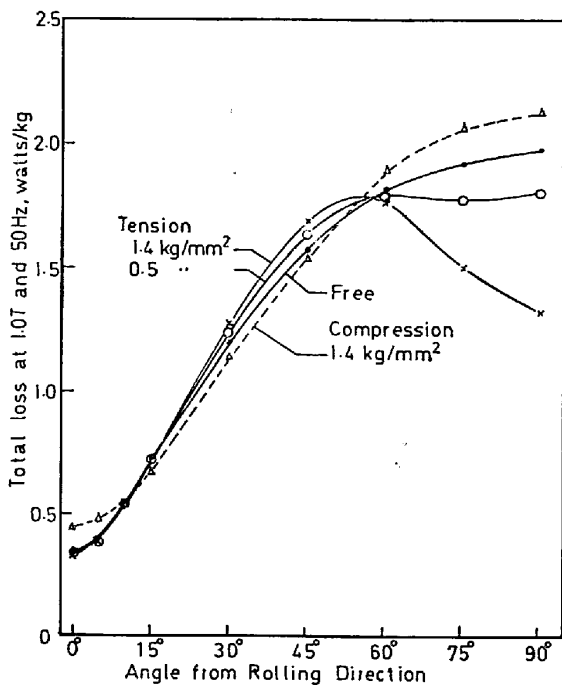
Fig. 13 は圧延方向の張力下の鉄損と直流ヒステリシス損との関係を示す。参考のため (110) [001] 単結晶 (厚さ 0.15 mm, $B_8=2.03$ Tesla) の [001] 方向の特性を併記した。方向性のよいものが鉄損の減少が大きい。 $B_8=1.92$ Tesla のものは張力による鉄損の減少は大部分渦電流損の減少であるが、 $B_8=1.82$ Tesla のものでは鉄損の張力による減少は少なく、その振舞はほとんどヒステリシス損のそれと同じである。また単結晶では張力によるヒステリシス損の変化は小さくほとんど渦電流損の減少によるもので鉄損の減少は非常に著しい。

Fig. 14 は圧延方向から各種の角度をなす方向に試料を採取してその方向に磁化した場合の 1.0 Tesla における鉄損を示す¹⁶⁾。試料は $B_8=1.95$ Tesla の方向性のよいもので表面被膜は除いてある。圧延方向から 10° 位外れた方向の試料では磁化の方向に平行な張力による鉄損の減少はほとんどなくなり、 15° 以上では張力によつて鉄損が増大する。このことは方向性がよいものでないことと張力効果によつて鉄損の減少が期待できないことを示している。なお 55° 方向は [111] 軸方向に相当するので外力によつて鉄損が変化していない。

工業的には張力は表面被膜によつて加えることができる¹⁵⁾。表面被膜の鋼板におよぼす張力は面内で様な張力であり、前述のような圧延方向に加えた外部張力とは質的に異なっている。しかし (110) [001] の結晶方位のために圧延方向の外部張力と類似な効果があり、圧延方向の鉄損と磁歪特性が向上する。Table 2 に示すように圧延方向と直角方向ではこの方向に外部張力を加えた場合はこの方向の鉄損も磁歪も改善されるが、表面被膜では圧延方向の磁気特性は改善されるが、直角方向では鉄損も磁歪も大きくなり劣化する。 B_8 が 1.92 Tesla 程

Table 2. Effect of applied tensile stress and surface coating on total loss and magnetostriction ($\delta l/l$) of HI-B in the rolling direction and cross-rolling direction.

(a) Rolling direction						
	Applied stress (kg/mm ²)					Surface coating
	0	0.11	0.23	0.33	0.47	
Total loss (watts/kg) at 1.7 T and 50 Hz	1.31	1.27	1.27	1.17	1.11	1.15
$\delta l/l \times 10^{-6}$ between 0 and 1.7 T	+1.7	+0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2
(b) Cross-rolling direction						
Total loss (watts/kg) at 1.0 T and 50 Hz	1.25	1.08	0.92	0.86	0.87	1.80
$\delta l/l \times 10^{-6}$ between 0 and 1.0 T	+8.9	+7.8	+5.3	+2.2	+0.7	+10.7

Fig. 15. Angular dependence of effect of applied stress on total loss for HI-B with surface coating ($B_s = 1.92T$).

度の試料では表面被膜による鉄損と磁歪の改善は外部張力による改善と同程度の効果を示している。

Fig. 15 は表面被膜のある場合の各方向の 1.0 Tesla における鉄損である。圧延方向から外れるに従って鉄損が大きくなっている。外部張力を加えることによって直角方向では鉄損が低下するが、圧延方向から 10° 以内では被膜によって既に鉄損は減少しているので外部張力によって鉄損はあまり変化しない。

この表面被膜による張力効果は方向性のよいものほどまた被膜による張力の大きいほど著しい。このためガラ

ス被膜の上にさらに張力効果の大きな無機系の被膜 (S 2 被膜) をすることによって効果を一層高めることができた¹⁵⁾。

4.2.3 歪敏感度¹⁵⁾¹⁷⁾

方向性珪素鋼板でとくに変圧器に重要な特性を歪敏感度の大きいものから順にならべると、磁歪、励磁実効ボルトアンペア、鉄損となり磁歪がもつとも敏感である。磁歪を小さくするための表面被膜による弾性面張力自身はそれほど必要でないが、実際の変圧器鉄心の組立加工の工程での歪を考えた場合、歪敏感度を鈍くすることが必要である。

板に加わる歪は引張歪と圧縮歪に大別できる。鋼板の圧延方向の圧縮歪が磁歪を劣化させる。実際には湾曲による片面の圧縮歪が問題である。鋼板の表面からの圧縮は均等であれば問題はないが、実際には不均一になり、湾曲などによって長さ方向の圧縮歪を誘発して磁歪を劣化させる恐れがある。

Fig. 16 は従来品と HI-B の磁歪の圧縮特性を示す。方向性のよいものは歪敏感度が小さく、弾性面張力の大きい表面被膜のものはとくに歪敏感度が鈍ですぐれていることがわかる。

以上述べたように高磁束密度方向性珪素鋼板は方向性を改善して B_s 特性を向上させ、表面被膜による張力効果と相まって非常にすぐれた磁気特性のものが得られるようになった。

4.3 高磁束密度方向性珪素鋼板の変圧器における実績

現在方向性珪素鋼板 HI-B は国内および世界各国に輸出されて使用されているが、Fig. 17 はこれら電機メーカーの報告に基づくものである。まず重要な鉄損特性については、大きいものは 60 万 kVA の超大型変圧器から、小さいものは 10 kVA 程度の巻鉄心変圧器に至るまで大体素材特性の向上に相応して 15% 程度の向上が

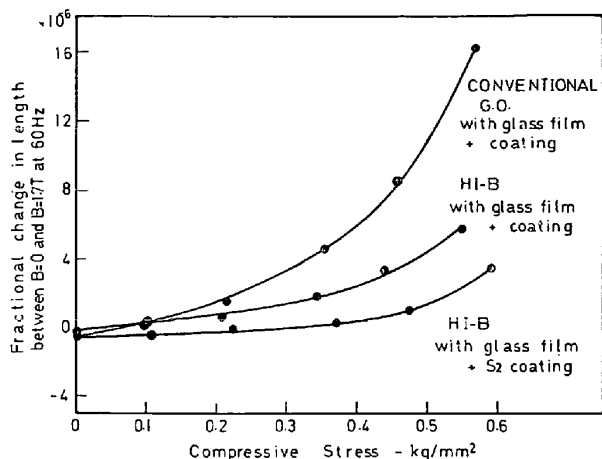


Fig. 16. Effect of the degree of grain orientation and surface coating on the compressive stress dependence of magnetostriction for grain-oriented silicon steel. Thickness : 0.30 mm

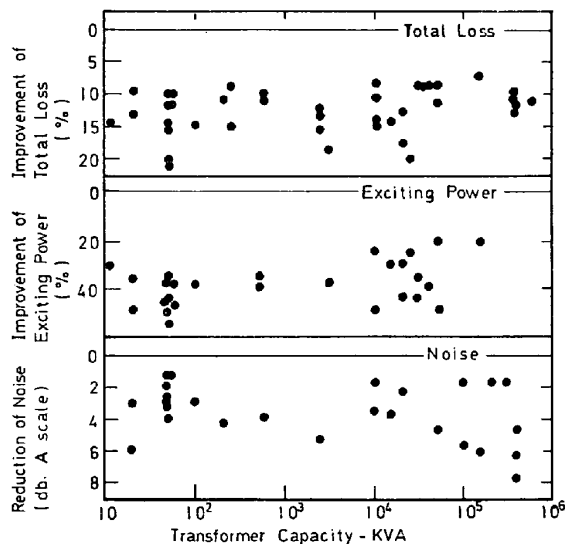


Fig. 17. Comparison of characteristics of actual transformers made from same design using HI-B and conventional material.

得られた。また励磁電力は約半分となつている。さらに騒音は平均 4~5 フォン低く、8 フォン低いという実績も得られた¹⁷⁾。

最近日本の電機メーカーの発表によると¹⁸⁾、厚さ0.35 mmの HI-B を使用して 3 相の 500 から 1000 MVA の変圧器を 10 台以上製造した結果は従来の方向性珪素鋼板を使用した変圧器と比較して、鉄損が 10% 減少し励磁電力が約 40% 減少し、変圧器騒音が 4~7 フォン減少した。

4.4 最近の高磁束密度方向性珪素鋼板の進歩と将来の発展

鉄損の向上は B_0 特性の向上、被膜による張力効果、板厚の減少、純度の向上、Si 量の増加あるいは結晶粒を

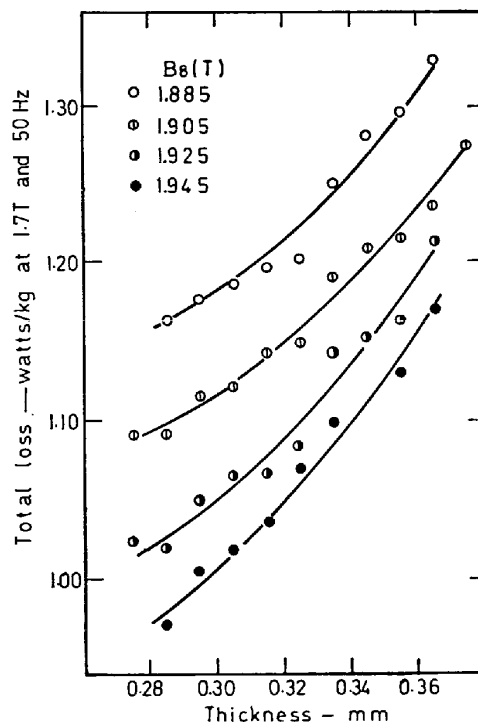


Fig. 18. Effect of thickness on total loss at 1.7 Tesla.

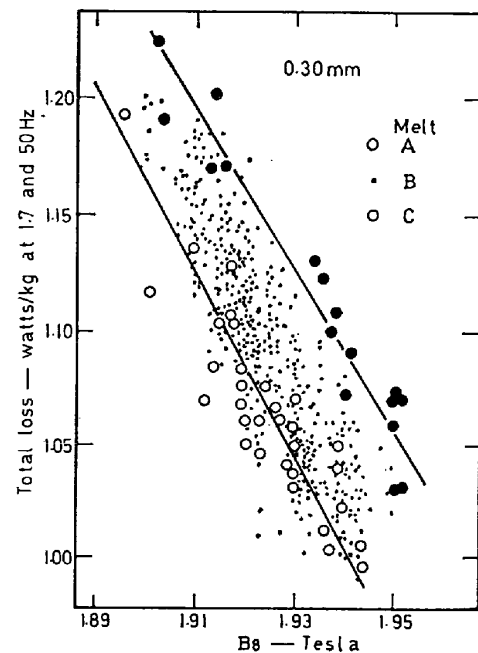


Fig. 19. Effect of melting method on total loss at 1.7 Tesla.

小さくすることなどによつて達成された。

Fig. 18 は鉄損と板厚の関係を示し、方向性が向上し B_0 が 1.925 あるいは 1.945 Tesla になると板厚の減少に比例して鉄損が減少することがわかる。鉄損に対して方向性と板厚の影響が非常に大きい。

Fig. 19 は鉄損におよぼす鋼板の純度の影響を示す。MnS あるいは AlN は仕上焼鈍中に除去されるが、 SiO_2

Table 3. Typical total loss values in the experimental products of HI-B due to new technical development.

Sheet thickness	Total loss at 1.7 T, 50 Hz
0.35 mm	1.13 Watts/ kg
0.30 mm	0.98 Watts/ kg
0.28 mm	0.95 Watts/ kg

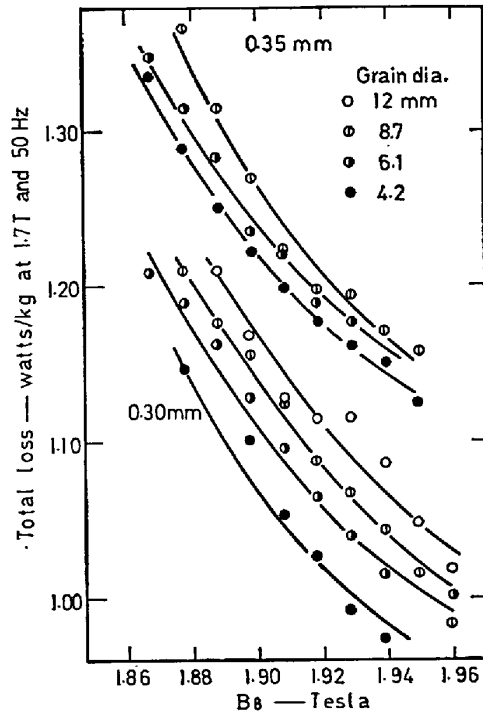


Fig. 20. Effect of permeability on total loss at 1.7 Tesla.

とか Al₂O₃ のような介在物は残存するので鉄損に悪影響をおよぼす。図中の A, B, C, は異なる溶解法で製造されたもので微小介在物を減らした A が鉄損がすぐれている。Fig. 20 は鉄損と B₈ の関係を示し、結晶粒の大きさが鉄損に影響することを示している。

Fig. 21 は鉄損におよぼす Si 量の関係を示す。板厚の厚い 0.35 mm の場合に最も影響が大きく、板厚が薄くなると Si 量の影響は少なくなる。

このような目標に向って努力した結果、試験的な生産の典型的な特性として 1.7 Tesla, 50 Hz の鉄損 W_{17/50} を Table 3 に示す。

すでに述べたように方向性のよい鋼板に圧延方向の張力を加えると鉄損が著しく減少する。さらに大きな張力は鋼板表面にスクラッチをけがくことによつて生ずる¹⁶⁾。スクラッチの近傍は強い圧縮をうけるが離れたところでは強い張力をうける。圧延方向に直角な方向のスクラッチが鉄損の減少に最も有効である。Fig. 22 は 3 種類の方向性の鋼板の表面に直角方向に 10 mm 間隔にスクラッチを加えた場合の結果である。スクラッチのな

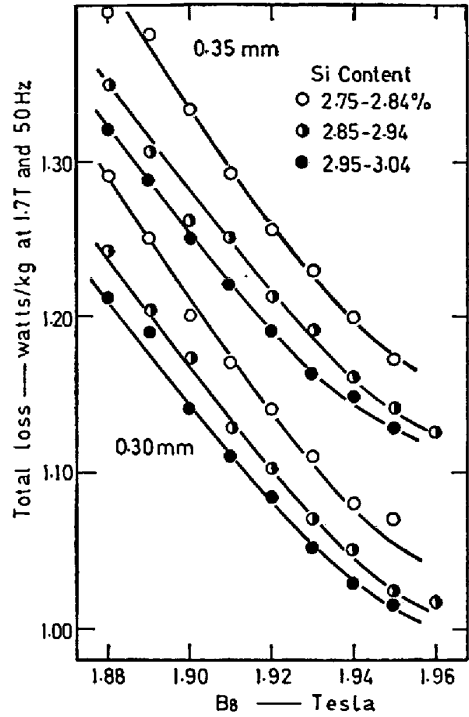


Fig. 21. Effect of [Si] content on total loss at 1.7 Tesla.

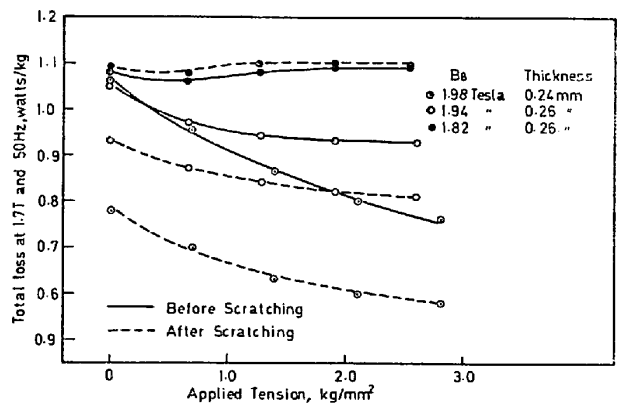


Fig. 22. Effect of scratching on total loss for grain-oriented 3% silicon iron. The surface was chemically polished and then scratched in the cross-rolling direction with an interval of 10 mm on the upper side. Surface roughness: about r.m.s. 10 μ inch.

い場合も B₈ が 1.98 Tesla のものは張力によつて鉄損は激減するが、この方向性のよい鋼板にスクラッチを加えると W_{17/50} は 0.8 watt/ kg 以下になり、これに張力を加えると W_{17/50} は 0.58 watt/ kg になっている。この値は現在の高磁束密度方向性珪素鋼板の鉄損の約半分である。方向性を向上させ張力効果を強くすることができれば磁区の幅が狭くなり異常渦流損が減少して、このような極端な低い鉄損値が得られることがわかつた。このような鉄損値が実験室的に得られたことは将来の発展の余地が大きいことを示しているのではなかろうか。

5. 特殊な珪素鋼板

特殊なものとしては高い周波数で使用される極薄珪素鋼板と(100)面を圧延面にもついわゆる二方向性珪素鋼板がある。

5.1 極薄珪素鋼板

二方向性珪素鋼板の製品を酸洗して冷間圧延したものを連続焼鈍し、表面に絶縁被膜をほどこして極薄珪素鋼板を製造する²⁰⁾。主として厚さ 0.1 mm, 0.05 mm, 0.025 mm のものが製造されている。アームコ社では長年間製造されてきたが、1973 年頃自社での製造を中止した。わが国では 0.1 mm と 0.05 mm のものを極少量生産している。

5.2 二方向性珪素鋼板

F. Assmus ほかによつて 1957 年に発表²¹⁾されてから暫らくの間世界中の研究者の注目を集めた。結晶面の表面エネルギーの差を利用して表面を酸化させないで清浄な状態で高温焼鈍をして二次再結晶により(100)面を得る方法である。圧延方向に[001]が揃えば圧延と直角方向も[010]軸の容易軸となるので二方向性珪素鋼板と呼ばれた。その製造はアームコ社で開発され²²⁾、厚さ0.30 mmの(100)面をもつ3% Siの珪素鋼板が工業化された。月に10ないし20t程度生産されたようで、航空機727などの発電機の鉄心などに使用されたが、1973年に製造が中止された。またVaccumshmelze社でも極く少量生産されたようであるが製造は中止されている。特殊な仕上焼鈍を必要とするため製造費が高いことその他に方向性珪素鋼板の主要な用途である変圧器用の鉄心としては変圧器騒音の主要因である磁歪が悪いという本質的な欠点を持っている。二方向性珪素鋼板は技術的に成功したが工業的には失敗した。現在この研究はされていない。

6. 結 言

最近におけるわが国の珪素鋼板の進歩は質、量ともに著しいものがあつた。特に画期的な製品である高磁束密度方向性珪素鋼板は世界にさきがけて開発され高い評価をうけた。この製品は将来さらに大幅な向上が期待される。

文 献

- 1) R. A. HADFIELD: U.S.P. 745,829 (1903)
- 2) N. P. GOSS: U.S.P. 1 965 559 (1934)
- 3) V. W. CARPENTER and J. M. JACKSON: U.S.P. 2 287 467 (1942)
- 4) V. W. CARPENTER: U.S.P. 2 385 332 (1945)
- 5) M. F. LITTMANN and J. E. HECK: U.S.P. 2 559 340 (1952)
- 6) 田口悟, 坂倉昭: 日本特許, 公昭 33—4710
- 7) 田口悟, 坂倉昭, ほか: 日本特許, 公昭 40—15,644
- 8) 坂倉昭, 植野清, 田口悟, ほか: 日本特許, 公昭 46—23,820
- 9) 今中拓一ほか, 日本特許, 特開昭 49—61019
- 10) S. TAGUCHI and A. SAKAKURA: Acta Met., 14 (1966), p. 405
- 11) A. SAKAKURA: J. Appl. Phys., 40 (1969), p. 1534
- 12) F. MATSUMOTO, K. KUROKI, and A. SAKAKURA: AIP Conference Proceedings No. 24 M.M.M., (1974), p. 716
- 13) S. TAGUCHI and A. SAKAKURA: J. Appl. Phys., 40 (1969), p. 1539
- 14) T. YAMAMOTO and T. NOZAWA: J. Appl. Phys., 41 (1970), p. 2981
- 15) T. YAMAMOTO, S. TAGUCHI, A. SAKAKURA, and T. NOZAWA: IEEE Trans. on Mag., 8 (1972), p. 677
- 16) T. YAMAMOTO and S. TAGUCHI: Conference on Soft Mag. Materials 2 (1975)
- 17) S. TAGUCHI, T. YAMAMOTO, and A. SAKAKURA: IEEE Trans. on Mag., 10 (1974), p. 123
- 18) S. WADA, S. SHIMIZU, and S. TAGUCHI: Conference on Soft Mag. Materials 2, (1975)
- 19) A. SAKAKURA, et al.: AIP Conference Proceedings No. 24 M.M.M., (1974), p. 714
- 20) M. F. LITTMANN: U.S.P. 2 473 156 (1949)
- 21) F. ASSMUS, K. DETERT, and G. IBE: Z. Metalk., 48 (1957), p. 344
- 22) D. M. KOHLER: J. Appl. Phys., 31 (1960), p. 408