

# 新機能を有する電磁厚板の開発

## Development of Electrical Steel Plates with New Functions

富田 幸男<sup>\*(1)</sup> 熊谷 達也<sup>\*(2)</sup> 小山 邦夫<sup>\*(3)</sup> 津田 幸夫<sup>\*(4)</sup>  
Yukio TOMITA Tatsuya KUMAGAI Kunio KOYAMA Yukio TSUDA

### 抄 録

近年、磁気応用技術の発展に伴い電磁厚板の需要が拡大している。主要用途は粒子加速器等の直流マグネットと磁気シールドである。それらに要求される磁気特性を中心とした各種特性を達成するため成分、粒径、製造条件の影響を検討し、従来にない知見を見いだした。その検討結果に基づき、新機能を有する電磁厚板の開発例を示した。それらは、純鉄系をベースとする粒子加速器用極厚電磁厚板、純鉄系で新製造法を活用した積層型薄手電磁厚板、中 Si-Al 系で新製造法を活用した MRI 用磁気シールド材、高 Si-Al 系の弱磁場用磁気シールド材等である。

### Abstract

With recent advances in technologies for magnetic applications, demand for electrical steel plates has been increasing. The major areas of application for electrical steel plates are DC magnets and magnetic shields for particle accelerators. To achieve the properties required for these applications, particularly electromagnetic properties, fundamental studies were made on the effects of chemical composition, grain size and manufacturing conditions. As a result, various new findings were obtained. Based on the results of fundamental studies, electrical steel plates with new functions have been developed. These plates are pure-iron grade ultra-heavy electrical steel plate for particle accelerators, pure-iron grade laminated type thin-gauge electrical steel plate produced by a new manufacturing method, medium-Si-Al grade magnetic shielding steel for magnetic resonance imaging which is produced by a new manufacturing method, and high-Si-Al grade magnetic shielding steel for weak magnetic fields.

### 1. 緒 言

近年、磁気応用技術の発展に伴って磁性材料の重要性はますます高くなり、厚板分野においても軟磁性材料としての厚板すなわち電磁厚板の需要が拡大している。電磁厚板に要求されるのは優れた直流磁気特性であり、現在の主要用途は粒子加速器等の直流マグネット材と、静磁気シールド材である。

粒子加速器装置は、高エネルギーを得るために次々と大型化してマグネット等も巨大になり、高エネルギー研究所のトリスタン計画では、500mm に達するような極厚の電磁厚板が検出器用のマグネットとして用いられた。更に大型の米国 SSC 計画<sup>1)</sup>の粒子加速器では、6 mm の鋼板が円周87km にわたって積層され、ヨーク材として用いられる計画である。こうした用途には、磁場の均一化を図るため磁気的特性が板内で均一であることが最も強く要求され、その上飽和磁束密度が高いこと、又、積層材では打抜き性も重要な要素である。

磁気シールドは、近年非常に重要性を増している。その理由は二つあり、一つは既に医療分野で広く普及しつつある MRI (核磁気共鳴診断装置)<sup>2)</sup> に代表される超電導応用機器により、強磁場が一般に

利用されるようになってきたことである。超電導による強磁場利用分野は、現在開発研究されている磁気浮上式列車<sup>3)</sup>や、超電導発電、超電導蓄電<sup>4)</sup>など今後大きな発展が期待される。もう一つの理由は、コンピュータや精密機器の著しい普及と共に外部から受ける磁気的なノイズの問題が増えてきたことである。更に、磁場が人体に与える影響も考慮されるようになってきている。

これらの問題に対しては、磁場を地磁気レベルにまで低減することが一つのめやすとされている。そのために透磁率の高いパーマロイ等が用いられているが、非常に高価であり、低コストで磁気シールドができれば、市場は広く非常に有望な分野である。このように磁気シールドには、強磁場と微弱磁場の二つの方向へ向かう用途があり、材料に要求される特性もかなり異なる。

一般に磁気シールド効果は磁束密度と板厚の積で表され、従って厚板は磁気シールドには非常に有利といえ、この分野で電磁厚板が最近急速に注目されている。中でも強磁場のシールドに対しては、鉄ほど安価で高い飽和磁束密度を有する材料はなく、特性面で競合しうる材料はない。ただし厚みが増せば重量が増え、特に MRI のように病院の建屋内に設置される装置では重量減が大きな課題である。そこで強磁場シールド用材としては、飽和磁束密度をより理論値に

<sup>\*(1)</sup> 技術開発本部 名古屋技術研究部 主任研究員  
<sup>\*(2)</sup> 技術開発本部 名古屋技術研究部 掛長

<sup>\*(3)</sup> 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究部 主任研究員  
<sup>\*(4)</sup> 名古屋製鐵所 品質管理部 掛長

近づけ、かつ比較的弱磁場から強磁場までできるだけ高い磁束密度を得ることが望まれる。

微弱磁場のシールドに対しては、透磁率が最も重要である。普通鋼は勿論、これまでの電磁厚板ではパーマロイ等に対して透磁率はずっと低く、地磁気レベルではシールド効果はあまりない。少なくとも一方向性電磁鋼板に近いレベルにまで透磁率を高めれば、コストの優位性がクローズアップされるはずである。

強磁場、微弱磁場とも、用途により磁気特性以外にもさまざまな特性が要求される。厚板には当然切削などの加工が施される場合が多いが、磁気特性と切削加工性は一般に相反する特性である。更に磁気浮上式列車の車体のシールドに用いる場合、重量減のため強度部材を兼ねることが有利であるので強度、靱性や疲労特性が重要になり、その上溶接性、曲げ加工性なども要求される。このように用途はますます多様化する傾向にあるので、これらの特性を、磁気特性の低下を最小限に抑えつつ満足させることが必要である。

表1に用途ごとの要求特性と開発のポイント、使用される板厚範囲を示す。

表 1 電磁厚板の要求特性

1. マグネット (1) 一体使用 高飽和磁束密度, ◎磁気特性の均一性, 板厚範囲: 80~610mm (2) 積層使用 高飽和磁束密度, ◎磁気特性の均一性, ◎打抜き加工性 板厚範囲: 1.5~6 mm 2. 磁気シールド (1) 強磁場磁気シールド (MRI, 超電導発電, 超電導蓄電) 高飽和磁束密度, ◎弱~強磁場磁気特性, ◎切削加工性, ◎溶接性 板厚範囲: 6~200mm (2) 低磁場磁気シールド (リニア, 地磁気シールド) ◎高透磁率, ◎強度, 疲労強度, 曲げ加工性, ◎切削加工性, 靱性, ◎溶接性 競合材料: パーマロイ, 積層電磁鋼板, アモルファス 板厚範囲: 3~10mm 程度
---

## 2. 基礎検討

電磁厚板の磁気特性面でのポイントは高飽和磁束密度と高透磁率である。鉄は固有の特性として高い飽和磁束密度を有しており、従って開発の目的は、“飽和磁束密度をあまり低下させないで透磁率を高くすること”, が第一であり、それに、更に切削性や溶接性等の要因が付随する。

磁気特性を向上させる要因には、1) 磁歪, 磁気異方性の低減(例: 6.5% Si<sup>9)</sup>, パーマロイ), 2) 第二相組織, 不純物, 非金属介在物の低減, 3) 結晶粒界の低減すなわち粗粒化<sup>6,7)</sup>, 4) 結晶方位の集積: 集合組織利用<sup>8)</sup>, 5) 加工による転位, 歪の除去等がある。

新機能を有する電磁厚板の開発において、純鉄系材料をベースとして室温でのフェライト単相組織とすること、圧延後熱処理により歪を除去すること等は前提と考えられ、又、磁歪等を十分に下げような成分までは考慮していないので、2)のうち不純物, 非金属介在物の影響と、3)の粗粒化及び4)の結晶方位の集積の3点が重要な因子となる。これらについて以下で検討する。

### 2.1 成分系の検討

#### 2.1.1 純鉄系成分 (不純物元素の影響検討)

強磁場 (10000A/m) に関しては、各種成分の磁気特性に及ぼす影響が調査されているが<sup>9)</sup>、検討の目的の一つとした弱磁場での影響は明確でない。そこで、弱磁場における成分の影響を調べた。

成分としては、C, Mn, S, Al, N 量を変化させた。実験室で真空溶解した50kg 鋼塊を利用した。真空溶解した鋼塊は、1250°Cで加熱後、900°C以上で熱間圧延し、板厚15mm に仕上げた。圧延後、一部は圧延のまま、一部は750°Cで2時間焼鈍熱処理を行った。その後、機械的性質、組織測定を行った。磁気測定用のリング試験片は、板厚10mm で外径75mm, 内径63mm で、測定に当たっては、コイルの一次側の巻数を1000, 二次側を100とした。磁気測定は750°Cで2時間のリング試験片焼鈍の前後で測定した。

図1に、磁化力80A/m (1 Oe) での磁束密度に及ぼすC量の影響を示す。同図にはパーライト分率も示す。弱磁場の80A/m での磁束密度はC量が0.01%以下で高い値を示し、特に0.005%以下で急激に高い値を示す。この範囲のC量ではパーライト面積率は0%である。弱磁場の80A/m での磁束密度は、Mn量に関しては0.10%以下で高い値を示す。その他、S, Al, N量に関してはそれぞれ、0.003%以下、0.030%以下、0.0050%以下で高い値を示す。

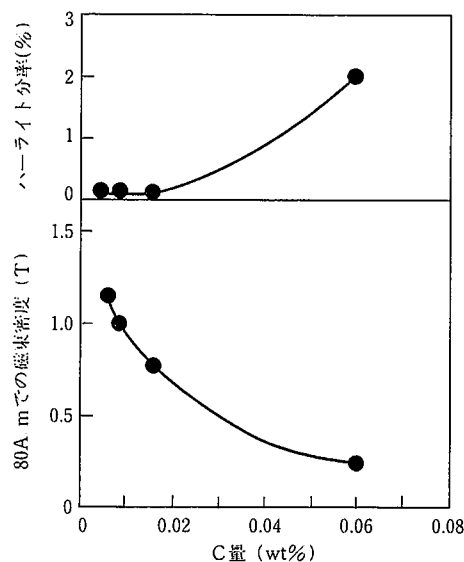


図 1 弱磁場での磁束密度に及ぼすC量の影響

以上の成分系の検討の結果、80A/m程度の弱磁場での磁気特性向上には、C, Mn, S, Al, N等を極力低減することが必要であることが判明した。特に、C量の影響が顕著である。C量を0.005%以下に下げることが重要である。その他の元素についても同様の調査をした結果、表2に示す範囲の成分が良好であることが判明した。以後、純鉄系電磁厚板と呼ぶものは、この成分範囲のものである。

表 2 純鉄系電磁厚板の成分範囲 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	Al	N
≤0.005	≤0.02	≤0.15	≤0.015	≤0.003	≤0.03	≤0.03	≤0.01	≤0.030	≤0.0050

#### 2.1.2 合金元素の影響

##### (1) Si

電磁鋼板は一般に珪素鋼板とも呼ばれるように、Siは鉄系の軟磁性材料では最も代表的な添加元素である。Siが添加される理由はいくつかあるが<sup>9,10)</sup>、電磁厚板では直流磁化特性への影響が特に重要である。図2は純鉄をベースとしてSi添加量と、磁化力20A/mでの磁束密度(以下  $B_{0.2}$  と記す)及び磁化力80A/mでの磁束密度(以下  $B_{0.8}$

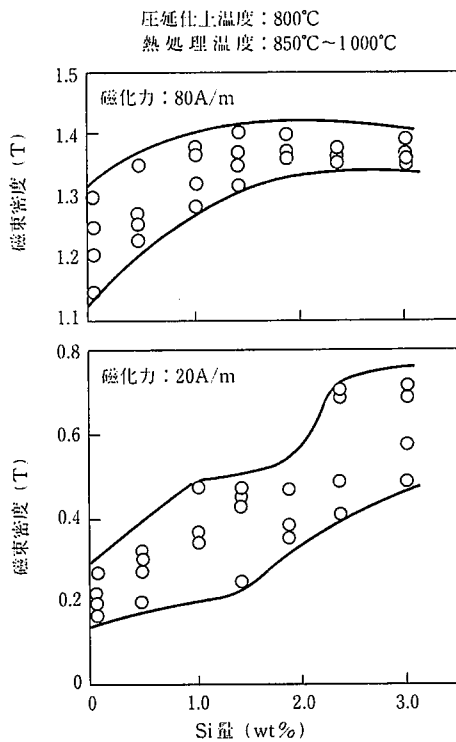


図 2 Si量と磁気特性の関係

と記す)の関係をみたものである。これらの磁場領域ではSi添加によって磁気特性を大幅に向上できることがわかる。特にSi量2.5%以上で $B_{0.2}$ の上昇が著しい。これは材料のC量が低いので、Si量2.5%以上では $\gamma$ 変態がなく高温まで $\alpha$ 一相となり、熱処理後の結晶粒が粗大化することが大きく寄与している。

2%以下の範囲での向上効果には後述する圧延集合組織の効果が大きいことがわかっており、Siが $Ac_1$ 変態温度を上げて $\alpha$ 域を拡げる効果が影響している。Siは強度向上にも有効な元素であるが、2%を越えると靱性を大きく低下させるため、添加量はある程度制約される。このようにSiは電磁厚板においても非常に重要な元素である。特に、圧延、熱処理条件と適当に組み合わせれば結晶粒粗大化と圧延集合組織強化の両方に寄与し、透磁率を大きく向上させる。

(2) Al

純鉄系の材料で結晶粒の粗大化に対して最も影響の大きいのはAINの大きさと分布状態である。即ちAINを微細分散析出させないことが重要である<sup>11)</sup>。それにはまずNを極力低減し、2.1.1項で述べたようにAlを低減してAINを減らすか、あるいは逆に大量添加してAINを粗大析出させて無害化することである。図3はAl及びN量と磁気特性の関係である。Nは30ppm以下とすることが望ましい。低NでAlが0.3%以上の場合には写真1のようにAINが極めて粗大化する。

Si, Alについての更に詳しい検討の結果、SiとAlは複合添加すると効果が大きく、安定することがわかった。これはSiの集合組織強化を主体とする効果と、AlのAIN無害化効果による粗粒化効果がそれぞれ有効に働くためであると考えられる。

(3) P

電磁厚板、特に純鉄材は切削性が劣ることが時に問題となる。これは軟らかいことと、非金属介在物や固溶元素が非常に少ないこと

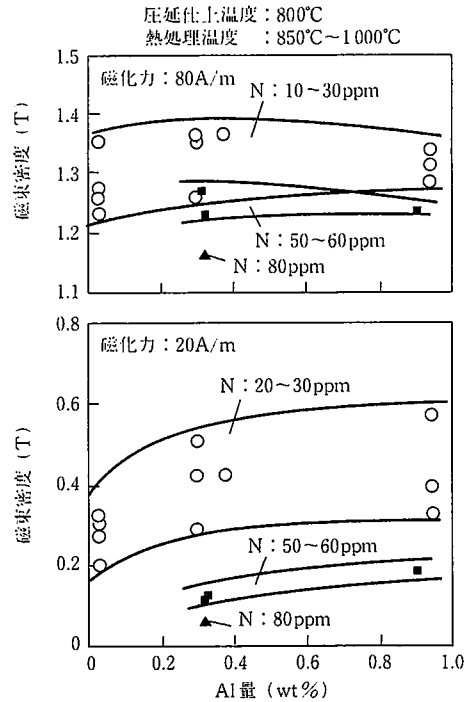


図 3 Al量と磁気特性の関係

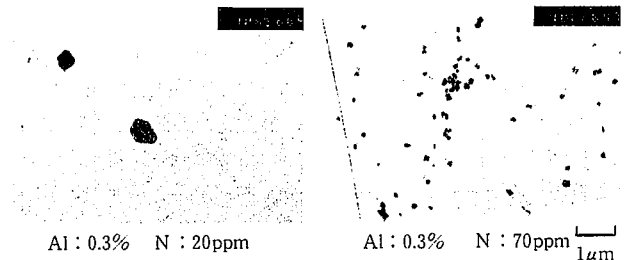


写真 1 AIN析出物に及ぼすN量の影響

が原因で<sup>12-14)</sup>、一般的には切削性と磁気特性は相反する要素である。Pは、磁気特性の低下がほとんど無く切削性を改善できる有効な元素である。P添加は若干結晶粒径を微細にする傾向があるが、Pが $Ac_1$ 変態点を上げる分、焼鈍温度を上げられることもあり、磁気特性の実質低下はほとんどない。純鉄材では切削抵抗が大きいこと、工具の摩耗が早いこと、切屑の処理性が良くないこと等が問題となる。Pは図4に示すように切削時の抵抗を軽減し、図5に示すように工具の摩耗も低減する。工具の摩耗として、ここでは逃げ面最大摩耗幅を示したが、これ以外に外周コーナー摩耗幅、チップング等も測定しており、同様の結果が得られた。更にP添加材は切屑が細かく折れやすくなるので切屑処理性も良くなる。

いくつかの要因を総合的にみると、S10C鋼と同等以上の切削性を得るにはPを0.10%程度添加すればよい。この程度であれば磁気特性への影響は少なく、靱性低下も実用上問題にならないレベルである。

2.2 製造プロセス条件の検討

厚板材で優れた直流磁気特性を得るための手段として、上述したSiやAlのような成分元素の効果は、薄板の電磁鋼板とある程度共通している。しかし製造プロセスは薄板の電磁鋼板とは大きく異なり、比較的単純な、加熱-圧延-熱処理という厚板の製造プロセスのな

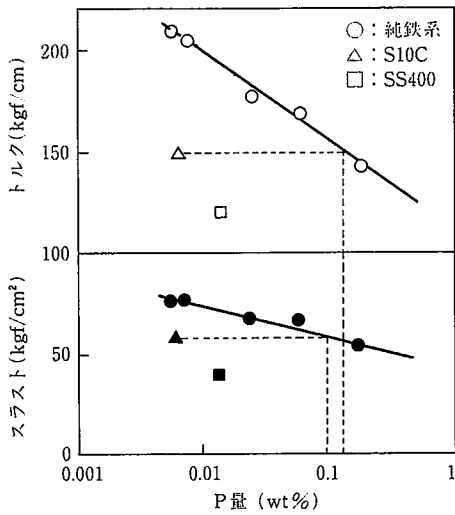


図4 P量と切削抵抗(スラスト,トルク)の関係

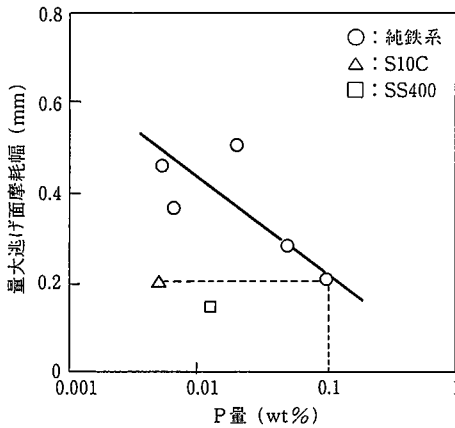


図5 P量とドリル摩耗量の関係 (逃げ面最大摩耗幅)

かで、いかに粗粒化と結晶方位分布の集積を実現するかが課題となる。従来より材料を高温で熱処理して粗粒化し、磁気特性を高めることは行われていた<sup>15)</sup>。より優れた磁気特性を得るためのプロセスを検討した結果、制御圧延を利用して強い圧延集合組織を導入し、かつ歪導入によって再結晶を促進させることが非常に有効な手段であることが明らかとなった<sup>16)</sup>。すなわち、制御圧延条件と熱処理条件の最適な組合せを考えることが、上記課題に対する一つの解である。

又、成分面での検討結果から、Si-Alの複合添加が有効であることがわかったが、これらの元素は変態温度の上昇効果によって製造プロセスの效果に大きく影響する。ここでは典型的な3つの成分系、すなわち、1)純鉄系、2)中Si-Al系(Si+Al:0.9%~1.2%,  $\gamma$ 変態あり)、3)高Si-Al系(Si+Al:1.9%~2.3%,  $\gamma$ 変態なく高温まで $\alpha$ 一相)について、製造プロセス条件の磁気特性への影響をみる。

図6に制御圧延の圧延仕上げ温度を変化させた時の磁気特性への影響を示す。磁気特性は圧延仕上げ温度を適切に選ぶことにより大幅に向上することがわかる。そして各成分系において最高値を与える圧延仕上げ温度はSi, Alが多いほど高温側になっている。 $B_{0.8}$ は中Si-Al材、 $B_{0.2}$ は高Si-Al材が最も良い値を示している。又、仕上げ圧延時の累積圧下率は60%前後が良く、それより高くとも低くとも

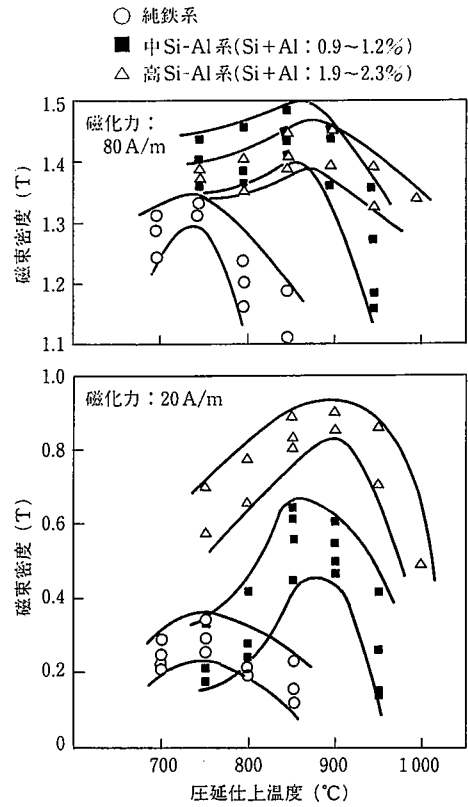


図6 圧延仕上げ温度と磁気特性の関係

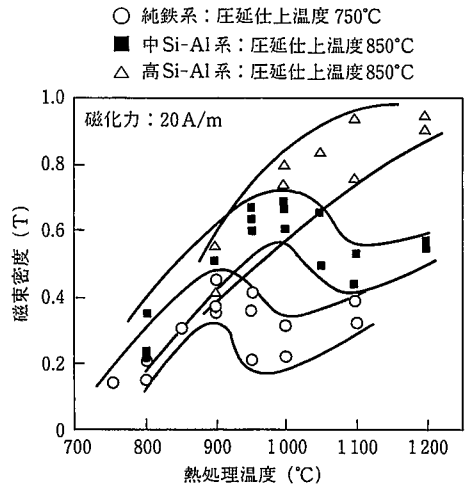


図7 熱処理温度と磁気特性の関係

磁気特性は低下する。圧延後の熱処理温度も成分系によって考慮すべきである。

図7に示すように $B_{0.2}$ は高Si-Al成分系で高温熱処理で大幅に向上する。これは結晶粒径の粗粒化傾向をそのまま反映している。ただしこの場合でも圧延条件は無視できない。 $\gamma$ 変態のある成分系では変態温度直下の熱処理が、弱磁場から強磁場にかけて高特性を得る要件であることがほぼ共通している。又、熱処理時の冷却速度は歪が残らないように小さめにとることが必要である。

これら3つの成分系について更に検討を行い、それぞれの最適製造プロセス条件で得られた磁気特性の磁化力-磁束密度カーブを普

通鋼のそれと共に図8に示す。これらにはそれぞれ特徴があり、純鉄系は飽和磁束密度が高く、中Si-Al系は飽和磁束密度は純鉄に近くて透磁率も高い。高Si-Al系は飽和磁束密度は若干低下するが、透磁率が極めて高い。従って、純鉄系はマグネット用途、中Si-Al系は強磁場の磁気シールド用途、高Si-Al系は弱磁場の磁気シールド用途に適している。

### 2.3 影響因子の解析

これまで純鉄系及び純鉄をベースとしてSi-Alを添加した成分系で、制御圧延と高温熱処理によって粗粒化と集合組織強化の観点で磁気特性向上を図ってきた。実際これらの磁気特性は、ほぼ結晶粒度と圧延集合組織で整理できる。図9は結晶粒度と磁気特性の関係であるが、集合組織の影響を除くために、高温で圧延仕上げを行って、強い集合組織を持たない材料について整理したものである。図より、特に $B_{0.2}$ は結晶粒度に大きく依存し、-4番程度まで粗粒化するだけでも0.7~0.9T程度の値が得られる。すなわち透磁率向上には粗粒化が第一の条件である。ただし-4番より更に粗粒化しても効果は少ない。

これまでの検討範囲では、制御圧延によって安定かつ有効に導入

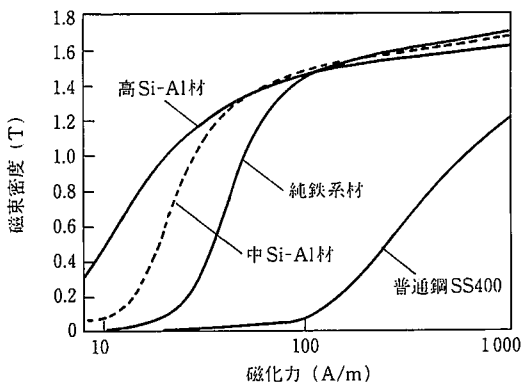


図8 各成分系の最適製造プロセスでの磁気特性

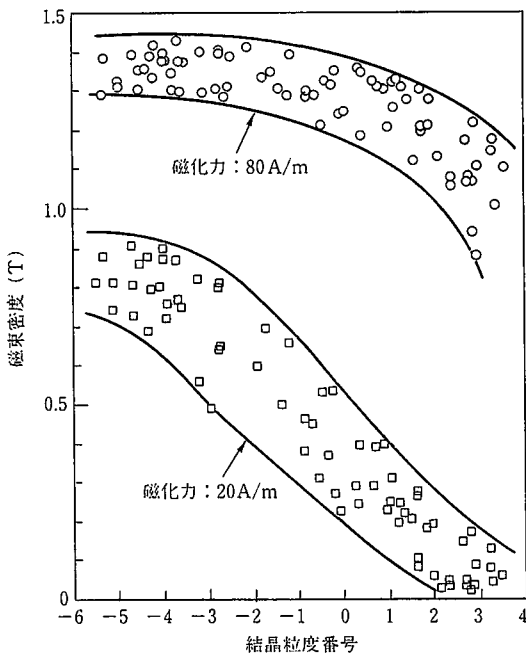


図9 結晶粒径と磁気特性の関係

できる集合組織は(100)[011]を主方位とするものである。この集合組織は、磁化容易<100>の3軸のうち2軸を鋼板の面内に含むので、磁気シールド材としては理想的な集合組織の一つである。集合組織の影響をある程度定量的にとらえるために、いくつかの結晶軸について圧延面に垂直な方向のX線反射強度すなわち軸強度を測定した。

図10に示すような(100)をはじめ4つの軸強度について、2.2項の中Si-Al材での板厚方向分布を調べた。結果を図11に示す。圧延仕上げ温度の影響と熱処理による変化を調査した。(100)[011]集合組織の強さは(100)軸強度でかなり代表され、特に板厚中心部でこの集合組織が非常に強く現れる傾向が顕著である。仕上げ温度との関係でみると、磁気特性が高かった850°C圧延仕上げでは圧延集合組織が強く、かつ熱処理後にもかなり残留しており、集合組織と磁気特性の関係が示唆される。

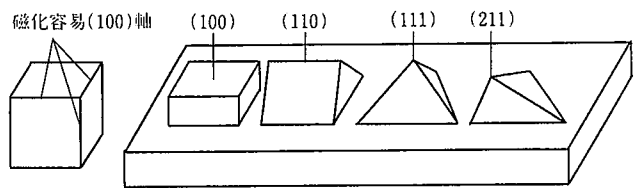


図10 面強度を測定した軸と結晶方位の関係

この材料の圧延のままのポルフィギュアを図12に示す。(100)軸強度の影響を以下の方法で抽出した。まず薄いリングサンプルで板厚方向の0/4t~4/4tでの磁気特性を測定し、同時に結晶粒度も測定した。そして図9の結晶粒度と磁気特性の関係より平均値を求め、図13に示すごとく磁束密度Bの測定値と平均値との差 $\Delta B$ を算出した。 $\Delta B$ は結晶粒径以外の因子による磁気特性変化分とみなせる。同図に(100)軸強度と $\Delta B$ の関係を示す。 $\Delta B_{0.2}$ 、 $\Delta B_{0.8}$ とも(100)軸強度と相関関係があることがわかる。従って磁気特性向上のためには、適当な圧延条件を選択することによって(100)[011]圧延集合組織をより強く、かつより板厚内の広い範囲で得、熱処理による粗粒化を図る際にも、その集合組織をできるだけ残すことが重要である。

いくつかの成分系での検討より、 $\gamma$ 変態のある成分系では強い(100)[011]集合組織は $\alpha$ の高温域で圧延を開始終了したときに得られる。2.2項図6での純鉄系と中Si-Al系で高い磁気特性となっているのはこの領域である。そして $\gamma$ 変態のない高Si-Alでもこの集合組織が強くなる適正圧延温度域が存在する。圧延仕上げ温度が高すぎると熱処理再結晶のための歪が不足し、低すぎると圧延組織が細かい伸長粒になって再結晶時の粗粒化の妨げになるので粗粒化の面でも圧延仕上げ温度は重要である。

又、2.2項図7での純鉄系及び中Si-Al系では変態温度直下の熱処理で高磁気特性が得られているが、これは集合組織の維持と粗粒化のバランスが最も良い熱処理温度であると考えられる。ただし微弱磁場での特性が重要であるときには、結晶粒の粗大化のみを狙って高Si-Al成分で1000°Cを越える高温で熱処理する方法も有効である。

### 2.4 電磁厚板の溶接材料の検討

溶接部においても良好な磁気特性を確保するには溶接金属の高純化、特に極低C化、低O化が必要である。

表3に各種溶接法での溶接金属成分の一例を示す。又、図14に溶接部の磁気特性に及ぼす溶接金属のC含有量の影響を示す。EBWあるいはTIG溶接は優れた磁気特性が得られる。EBWは溶接材料が

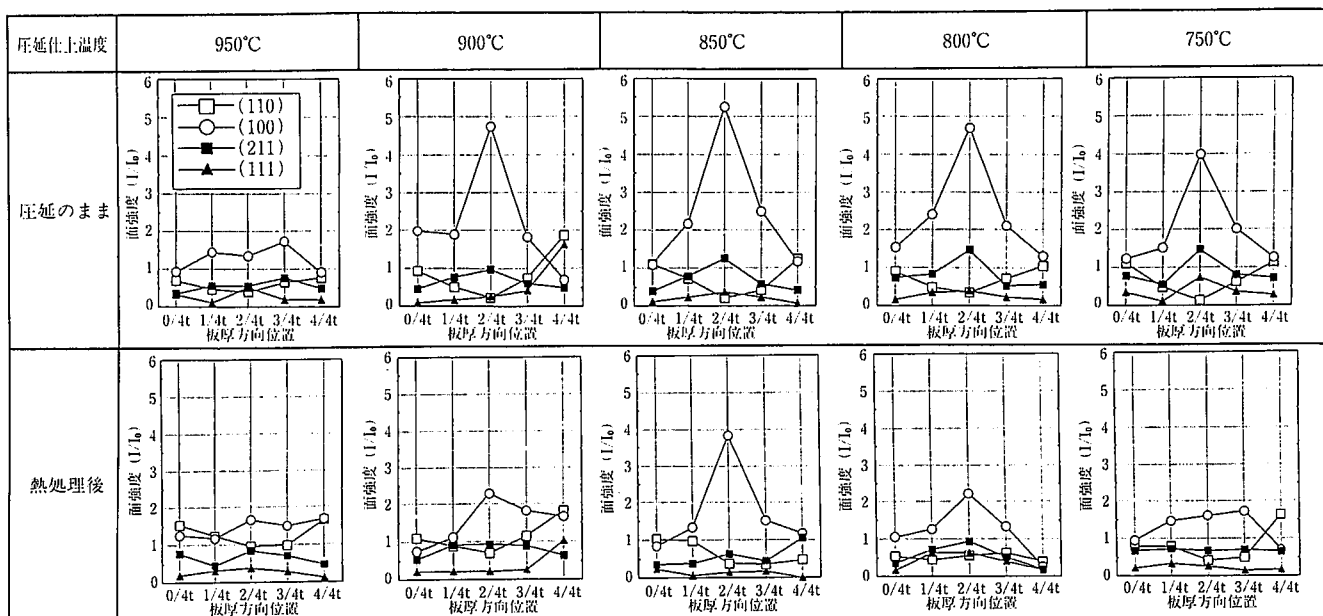


図 11 軸強度の板厚方向分布(中Si-Al系)

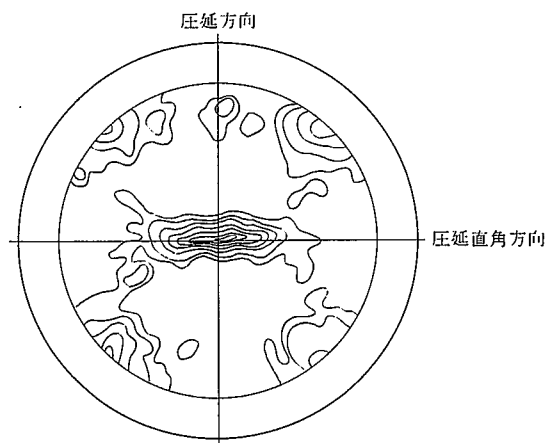


図 12 圧延集合組織の{200}極点図  
(中Si-Al, 850°C仕上げ, 板厚中心部, 圧延のまま)

表 3 各種溶接法での溶接金属成分の一例 (wt %)

	C	Si	Mn	N	O
母材の一例	0.004	0.04	0.09	0.004	0.003
エレクトロンビーム溶接 (EBW)	0.004	0.04	0.08	0.003	0.002
タングステンナートガス溶接 (TIG) (Ar シールド)	0.006	0.19	0.15	0.002	0.007
メタルナートガス溶接 (MIG) (2% CO <sub>2</sub> -Ar)	0.012	0.25	0.25	0.005	0.060
交流でのガスシールド溶接 (ACMIG) (O <sub>2</sub> -Ar)	0.008	0.06	0.10	0.004	0.045
サブマージアーク溶接 (SAW)	0.011	0.01	0.05	0.005	0.043
手溶接 (SMAW)	0.031	0.33	0.03	0.013	0.029
非消費ノズル式エレクトロスラグ溶接 (SESNET)	0.004	0.25	0.44	0.004	0.011

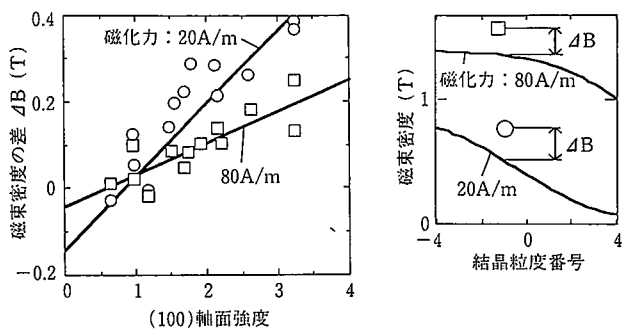


図 13 (100)軸面強度の磁気特性への影響

不要で、母材と同じ溶接金属組成が得られ、TIG は共金系ワイヤの使用で、若干の酸素の増加が認められるが、ほぼ母材と同じ溶接金属組成が得られる。一方、CO<sub>2</sub>-Ar ガスを使用した MIG 溶接は極低 C のワイヤを使用しても、雰囲気ガスからの影響で極低 C の溶接金

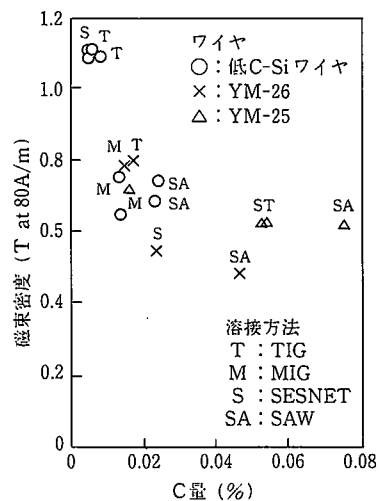


図 14 溶接部の磁気特性に及ぼす溶接金属のC量の影響

属の実現は難しい。

これに対し、O<sub>2</sub>-Ar シールド溶接で溶接金属の極低 C 化ができるが、溶接作業性の点からは難点がある。SAW あるいは SMAW においても、フラックスからの C のピックアップがあり、極低 C ワイヤを使用しても溶接金属の極低 C 化は難しい。更に、非消耗ノズル式エレクトロスラズ溶接は若干のフラックスを使用するが、あらかじめ十分脱炭したフラックスを使用することで極低 C 化が可能であり、かつ大入熱で溶接金属の結晶粒も粗大化し、優れた磁気特性が得られる。

### 3. 新機能を有する電磁厚板への展開

#### 3.1 粒子加速器

##### 3.1.1 リターンヨーク用厚手 (550mm) 電磁厚板

厚手の高級電磁厚板は、粒子加速器用磁極材、検出器用リターンヨーク材や MRI 等の医療機器用磁気シールド材に使用される。この鋼材には、弱磁場から強磁場にわたって高い磁束密度が要求されると同時に均一性が要求される。前章までに述べた実験室的検討に基づいて工場試作した結果を示す。

表 4 に供試材の化学成分を示す。C, Mn, P, S 等の不純物元素を極力低減している。磁気特性向上のために、C 量を 0.005% 以下に下げることが重要である。新精練技術と高純化技術によってこれが可能となる。製造プロセスとしては、磁気特性向上のため、高温加熱、高温仕上圧延、圧延後の焼鈍を行った。板厚は 550mm である。磁気測定用のリング試験片は、鋼塊の頭部、底部の幅方向の中心及び端部より採取し、更に、リング試験片は圧延方向に平行な方向と垂直な方向に採取した。

表 4 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	N
0.002	0.004	0.06	0.004	0.002	0.01	0.027	0.016	0.001	0.018	0.0040

図15, 16に磁化力と磁束密度、及び磁束密度と透磁率の関係を示す。鋼板焼鈍したのと同様の特性を示すリング試験片焼鈍(リング試験片加工時に歪が挿入されるため、試験片焼鈍により歪を除去する)の磁気特性は弱磁場から強磁場まで高い磁束密度を示すと同時に均一性を有する。図16では比較のため、軟鋼、薄手の電磁鋼板のデータも示しているが、開発した板厚550mmの電磁厚板は、それらよりも優れた磁気特性を弱磁場から強磁場まで示している。

##### 3.1.2 積層型アイアンヨーク用薄手 (6mm) 電磁厚板

SSC (Superconducting Super Collider) に代表される巨大粒子加速器には、アイアンヨーク材料として薄手の電磁厚板が積層して使用される。この鋼材には弱磁場から強磁場にわたって高い磁気特性が要求される。

表 5 に供試材の化学成分を示す。C, Mn, P, S 等の不純物元素を極力低減している。低温加熱、低温側での累積圧下率を十分に確保した低温仕上圧延、高温焼鈍により製造した。板厚は 6mm である。図17に磁化力と磁束密度の関係を示す。鋼板焼鈍したのと同様の特性を示すリング試験片焼鈍の磁気特性は弱磁場から強磁場まで高い磁束密度を示す。

#### 3.2 MRI 磁気シールド用

MRI では磁場が強いほど精度が良くなるので、近年は超電導によるハイテスラタイプが主流となっている。磁気シールド方法には装

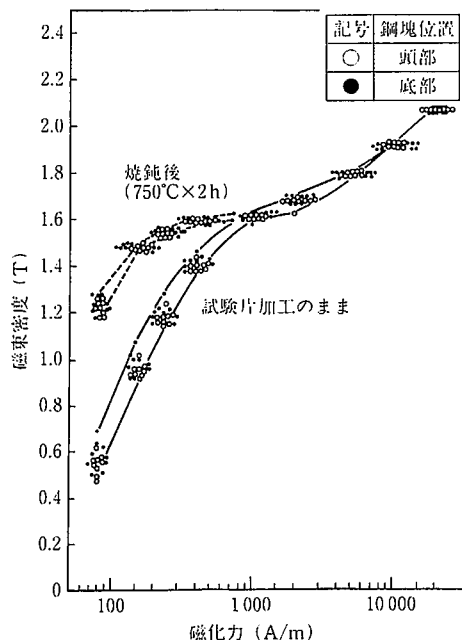


図 15 磁化力と磁束密度の関係

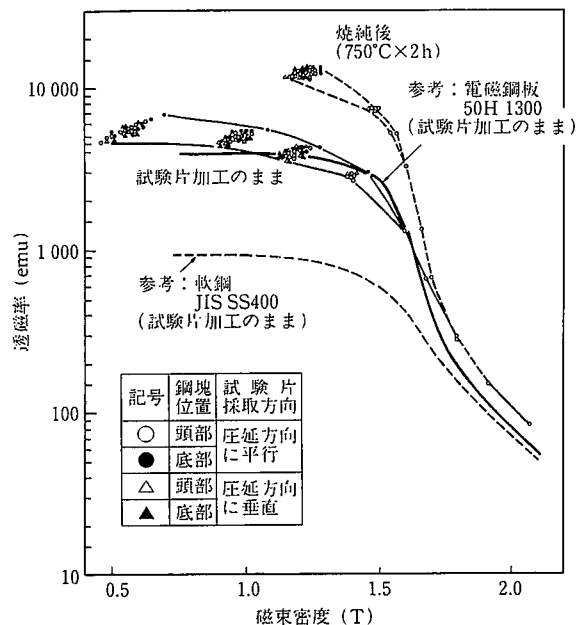


図 16 磁束密度と透磁率の関係

表 5 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	N
0.002	0.005	0.05	0.007	0.002	0.010	0.0037

置自体を厚手材で囲うセルフシールドと、部屋を薄手材で囲うルームシールドがある。セルフシールド材には厚さ最大200mm、20~30トン程度の鋼材が使用される。競争激化のためこの重量軽減がメーカーの大きな課題となっており、磁気特性を高めて鋼材を軽量化する要求が強い。一方で磁石に近い部分では飽和磁束密度に近い磁界がかかり、高い飽和磁束密度の維持も必要である。

MRI 磁気シールド材としては、従来は純鉄系材料が用いられてい

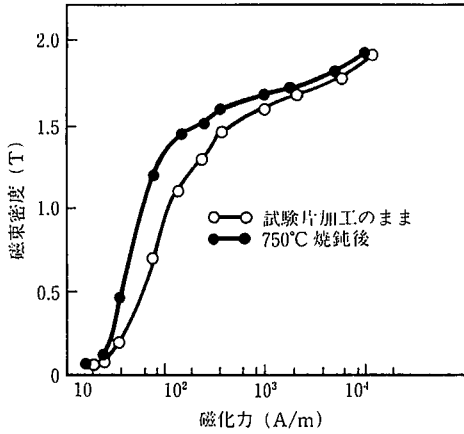


図 17 磁化力と磁束密度の関係

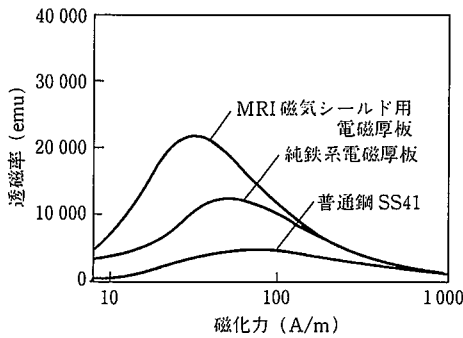


図 18 MRI 磁気シールド用電磁厚板工場製造材の磁気特性

たが、新たに高透磁率、高飽和磁束密度の材料を開発した。純鉄をベースとして Si, Al を添加した成分系 (中 Si-Al) で、適度な圧延、熱処理を施す。工場で製造した 180mm 厚材の磁気特性を図 18 に示す。又、磁気シールド用途では一般に穴あけや、フライス加工等の切削加工が施される。純鉄ベースでは切削性が劣るが、2.1.2 項で述べたように P を添加すれば改善される。

### 3.4 微弱磁場の磁気シールド用

磁気浮上式列車の車体の磁気シールド材は、人体への影響等を考えた微弱磁場の磁気シールドが必要である。この用途にはある程度の強度、靱性も要求されるので MRI 磁気シールドと同じ中 Si-Al 成分として制御圧延を加えた 3mm 材を試作している。この材料の磁気シールド効果を普通鋼、純鉄系材と比較した結果を図 19 に示す。

微弱磁場シールド用途には、更に高 Si-Al 成分で制御圧延を利用した材料を検討している。この材料は結晶粒が極めて粗大化しており、又、結晶方位もある程度方向性を持ち、図 20 に示す極めて高い透磁率が得られている。

## 4. 結 言

近年、磁気応用技術の発展に伴い、電磁厚板の需要が拡大している。粒子加速器等の直流マグネットや磁気シールドに利用される電磁厚板に要求される磁気特性を中心とした各種特性を達成するため、成分、粒径、製造条件の影響を検討し、従来にない知見を見いだし

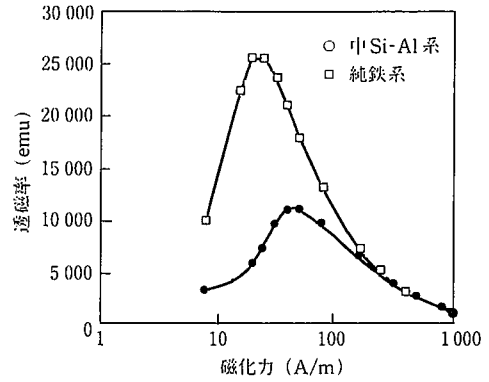


図 19 微弱磁場用電磁厚板の磁気特性

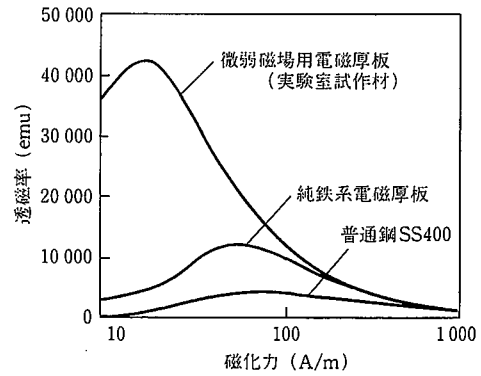


図 20 微弱磁場用電磁厚板の磁気特性

た。その基礎検討に基づき、新機能を有する電磁厚板の開発例を示した。それらは、1) 純鉄系をベースとする粒子加速器用極厚電磁厚板、2) 純鉄系で新製造法を活用した積層型薄手電磁厚板、3) 中 Si-Al 系で新製造法を活用した MRI 用磁気シールド材、4) 高 Si-Al 系の弱磁場用磁気シールド材等である。

### 参 照 文 献

- 1) 新富孝和, 石丸肇 ほか: 鉄と鋼, 78 (8), 31 (1992)
- 2) 山田進, 松澤大樹 ほか: MRI 装置, 磁気シールド方式の進歩, 日本臨床, 45(1), 39 (1987)
- 3) Hayes, William F.: Proc. of IEEE, 1987. p.53
- 4) 金丸保典: 生体電磁環境研究, (86), 8 (1988)
- 5) 高田芳一, 阿部正広 ほか: 材料とプロセス, 4, 1882 (1991)
- 6) Jaguszty, W., Szipunar, J. A.: Influence of Texture and Grain Size on Static Magnetic Permeability in Fe-Si Steel Sheet
- 7) 大森俊道, 鈴木治雄 ほか: 材料とプロセス, 3, 930 (1991)
- 8) Brechna, H.: 2nd Intern. Conf. on Magnet Technology, 1979, p.305
- 9) Goss, N. P.: U. S. Patent 196559. Electrical Sheet and Method and Apparatus for its Manufacture and Test
- 10) 田口悟, 板倉昭: 日本特許出願広告昭40-15664
- 11) 氏家信久: 日本金属学会報, 5 (1), 17 (1966)
- 12) 荒木透, 谷地重男: 日本機械学会誌, 70, 577 (1967)
- 13) Tomas, K.: Stahl Eisen, 83, 1209 (1963)
- 14) 山本俊郎, 熊谷憲一: 鉄と鋼, 62, 72 (1976)
- 15) 山本, 花井: 日本金属学会報, 23 (5), 404 (1984)
- 16) 熊谷達也, 富田幸男 ほか: 材料とプロセス, 3, 855 (1991)