

氏 名	やま しろ やす まさ 山 城 康 正
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭 和 63 年 3 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 43 年 3 月 九州大学大学院工学研究科電気工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	4.5 %珪素鉄合金急冷薄帯における (100)〔001〕集合組織の成長と磁気特性に関する基礎的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 村上 孝一 東北大学教授 脇山 徳雄 東北大学教授 藤森 啓安

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

珪素鋼板の磁気特性を向上させるには、珪素含有量を増し、できるだけ薄くして、且つ(110)〔001〕集合組織の配向性を高くし、結晶粒寸法を小さくすればよい。しかし、鋼板中の珪素含有量が増すと鋼板は硬く且つ脆くなり、圧延が困難になる一方、板厚が薄くなると配向性が低く、配向性が高いと結晶粒が大きくなる傾向があり、磁気特性におよぼすこれらの因子は互いに相反する性質を持っている。それ故現在では、珪素含有量は高々 3.5 %、板厚は 0.28 mm 前後のものしか生産されていない。そこで、本研究では、急冷双ロール法により作製した比較的厚い高珪素薄帯を冷間圧延後高温焼鈍することにより、50～100 μm 厚の配向性の高い珪素鉄薄帯を実現して、磁気特性を改善することを目的にした。

第 2 章 4.5 %珪素鉄合金薄帯の作製

一般に、珪素鋼板の軟磁気特性は珪素含有量が 6.5 % において最も優れていることは周知のことである。しかし、6.5 % 珪素鉄合金の急冷薄帯は、厚さが 100 μm 以上になると急冷効果が十分に現われず、硬く且つ脆くなる傾向を示す。そこで本研究では、300 μm 程度の厚さの急冷薄帯でも、90 % 程度までの冷間圧延が可能であり、しかも現在使用されている珪素鋼板より珪素含有量が多い、4.5 % 珪素鉄合金を研究対象にした。

急冷双ロール法を適用すると、厚さが $320\mu\text{m}$ 前後の4.5%珪素鉄合金急冷薄帯が容易に作製できた。作製された薄帯では、両表面から中心部へ向って柱状晶粒が成長していて、中心部では等軸結晶組織が形成されていた。そして、平均の結晶粒径は約 $15\mu\text{m}$ であった。また、この薄帯の抗磁力 H_c は 87.7A/m であり、 800A/m の磁界における磁束密度 B_0 は 1.15T であった。

第3章 集合組織の生成と結晶成長

本章では、高配向(110)[001]集合組織を有する4.5%珪素鉄合金急冷薄帯を実現するために、 $280\mu\text{m}$ の厚さに作成された薄帯を $60\mu\text{m}$ まで圧延した後、次のような実験を行った。

まず、二段圧延機を用いて直接圧延を行った。この圧延法による1回ごとの圧下率は平均1%であった(低圧下率又は弱圧延法)。圧延された薄帯を $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ の高真空中で1時間焼鈍を施した。焼鈍温度が 1040°C を越えたあたりから(110)面を持つ二次再結晶粒が成長を始め、温度の上昇につれて薄帯全表面積に占める(110)面の面積割合が増加する一方で、(100)面も幾分成長した。そして、 1200°C の高温焼鈍後でも、5%程度の(100)面を持つ二次再結晶粒の他に一次再結晶粒も、幾らか、残存していた。(110)面は薄帯全表面積の85%を占めたのみであった。しかも、[001]軸の圧延方向からの平均のずれ角は 22.6° であった。

そこで、1回ごとの圧下率が15~35%もとれる圧延法(高圧下率又は強圧延法)により圧延を施した。それは薄帯試料をステンレス板にはさんだままで圧延を行う方法である。この薄帯でも、 1040°C 付近において(110)および(100)面を持つ二次再結晶粒の成長がほぼ同時に始まった。しかしこの場合は、(100)面は 1175°C ではほとんど完全に消滅した。それに対して、(110)面は焼鈍温度の上昇につれて急激に成長が進み、 1150°C では40分間の焼鈍で薄帯全面を覆うようになった。また、その[001]軸の配向性は極めて高く、圧延方向からのずれ角の平均値は 1.5° であった。その結晶成長の測定結果を、図1に、焼鈍温度の関数として示す。

このように、圧延法の違いにより(110)[001]集合組織の成長が異なる原因をさぐるために、両圧延法により圧延された薄帯の極点図を観察した。その結果、強圧延薄帯においては、圧延状態で既に、(110)[001]集合組織の対応粒組織で

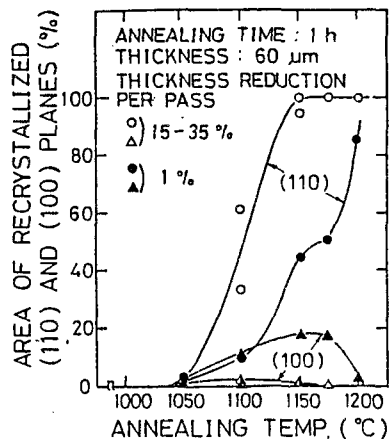


図1 二次再結晶粒の面積割合の焼鈍温度依存性

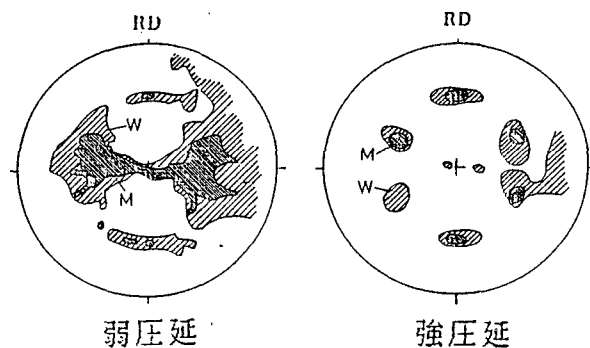


図2 焼鈍薄帯の(200)極点図
(薄帯厚: $60\mu\text{m}$, 焼鈍時間:1時間)

あるところの(111) [112]集合組織が存在し、この集合組織は焼鈍によって集積度が増した。そして、二次再結晶が始まる直前までは、他の組織を食い尽くして薄帯全面をほぼ覆い、極めて強い集積度を示した。ところが、弱圧延薄帯においては、その組織の集積度は

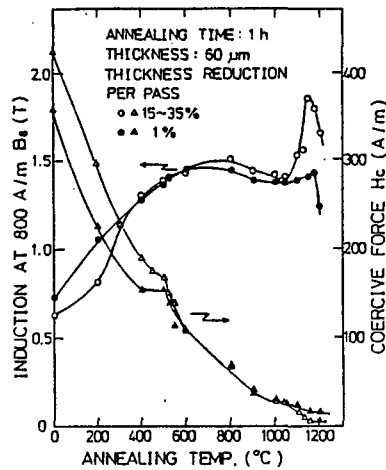


図3 B_s および H_c の焼鈍温度依存性

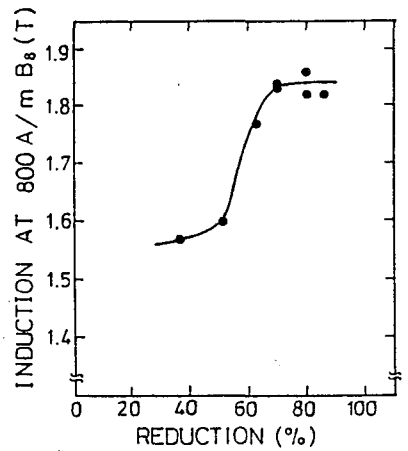


図4 B_s の圧延率依存性

極めて弱く、二次再結晶化温度になっても(111) [112]集合組織の集積度は高くなり、他の組織が強く残っているのが観察された。その様子を、1000℃-1時間焼鈍後の(200)極点図に取って、図2に示す。

図3は両圧延法のより圧延された薄帯の、800A/mの磁界における磁束密度 B_s と抗磁力 H_c の、焼鈍温度依存性を示す。両薄帯の磁気特性は二次再結晶化が始まると際立った違いを見せた。強圧延薄帯における最大の B_s は飽和磁束密度の96%にも相当する1.86T、抗磁力 H_c は6.0A/mとなり、その磁気特性は飛躍的に向上した。しかし、弱圧延薄帯では最大の B_s が1.43T、 H_c は15A/mを示すに止まった。

つぎに、[001]方位の配向度の目安となる最大の B_s を圧延率の関数として図4に示す。同図から判断すると、高配向の(110) [001]集合組織を成長させるには、70%の圧延率で圧延する必要があることが分る。

また、同薄帯に最良の磁気特性を付与するには、二次再結晶化温度以上で、できるだけ低温側で、焼鈍するほうが良いことも明らかになった。

第4章 交流磁気特性

高配向化した4.5%珪素鉄合金急冷薄帯の鉄損を測定した結果を図5に示した。また同薄帯に張力を印加したり、スクラッチを入れて、鉄損特性に与える影響についても検討した。各条件下での鉄損の測定結果を図5に示す。同薄帯の鉄損は、従来の珪素鋼板に比べて、大きく改善されている。例えば、1.25T、50Hzにおける鉄損は従来鋼板の鉄損の65%であり、

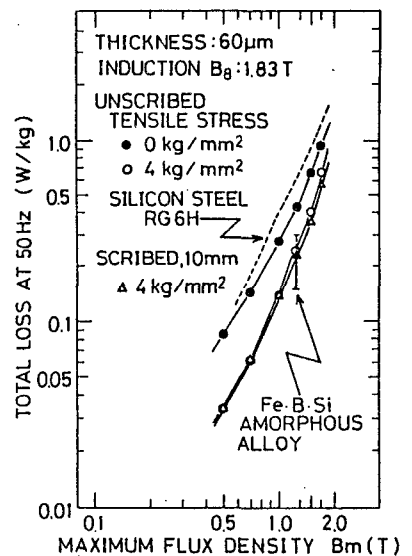


図5 鉄損特性

それに 4 kg/mm^2 の張力を印加すると37%に減少し、その上10mm間隔のスクラッチを入れると34%まで減少した。なお、この最小の鉄損はFe-Si-B系アモルファス材料の鉄損値に匹敵する程である。なお、張力印加やスクラッチにより磁区が細分化されているのが確認された。また、張力やスクラッチによる鉄損減少分の80%以上は渦電流損の減少に依っていることも明らかとなった。

第5章 ガス雰囲気中焼鈍効果

技術的観点から見て、操作の容易なガス雰囲気中焼鈍を行って、(110)[001]集合組織成長の可能性について検討した。

強圧延薄帯を水素中焼鈍すると、(110)[001]集合組織が十分に成長することが分った。水素流量が増すと同組織の成長温度は低くなり、4l/minの流量の水素を流すと、真空焼鈍の場合とほとんど同温度で薄帯全面を(110)面で覆うことができた。

一方、弱圧延薄帯を6l/minの流量で水素中焼鈍すると、真空焼鈍の場合と同温度で薄帯全面を(110)面で覆うことが可能なことが明らかになった。しかし、それには真空焼鈍より長時間を要した。

アルゴンや水素と窒素の混合ガス雰囲気中でも焼鈍してみたが、いずれの場合も(110)[001]集合組織を十分に成長させるには適当でなかった。

第6章 結 論

以上第2章～第5章までに述べた研究結果により、4.5%珪素鉄合金急冷薄帯を強圧延後高温焼鈍することにより、高配向(110)[001]集合組織を十分に成長させ得ることが明らかとなった。また同薄帯の鉄損は高配向3%珪素鋼板の鉄損の約1/3に減少することも分った。

審査結果の要旨

珪素鋼板は電気機器の主要な鉄心材料として大量に用いられており、その低損化は省エネルギーの観点から重要な研究課題の一つである。従来、鉄損を低減させる方法としては、(110)[001]集合組織の配向度の向上、珪素含有量の増加、薄板化等が試みられてきた。しかしながら、薄板化は集合組織の配向度の向上を阻害し、珪素含有量の増加は冷間圧延を困難にするなど、多くの問題点があった。

著者はこのような観点から、珪素鋼板の低鉄損化を試みるために、双ロール急冷法により4.5%珪素鉄合金を薄帯化し、さらに冷間圧延と熱処理を施すことにより、高度に配向した(110)[001]集合組織を実現する方法を見出し、低鉄損化を実現した。本論文はその成果をまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の目的と背景、ならびに4.5%珪素鉄合金を取り上げた理由について述べている。

第2章では、4.5%珪素鉄合金を双ロール急冷法により薄帯化するに際し、良好な薄帯を得るための条件と、得られた薄帯の結晶粒組織及び磁気特性を明らかにしている。

第3章では、厚さ280 μm の4.5%珪素鉄合金の急冷薄帯を60 μm まで冷間圧延した後、真空中で焼鈍した場合の結晶粒集合組織と直流磁気特性について述べている。1回の圧延率が数%程度の場合には、1200 $^{\circ}\text{C}$ の高温においても、薄帯全面を(110)面を持つ2次再結晶粒で覆うことはできなかったが、1回の圧延率が15~35%の場合には、1150 $^{\circ}\text{C}$ で1時間焼鈍することにより、薄帯全面を(110)面で完全に覆い尽し、更に、[001]軸の圧延方向からの平均ずれ角が1.5 $^{\circ}$ 以内の高配向の集合組織を実現することができた。また、この薄帯の磁束密度 B_8 は1.86T、抗磁力は2.4A/mであり、軟磁気特性も優れていた。これらの結果は実用上有用な知見であり、高く評価される。

第4章では、前章で述べた優れた軟磁気特性を有する薄帯に、スクラッチや張力を印加して磁区の細分化をはかることにより、磁束密度が1.5Tにおいて、従来の高配向性珪素鋼板の鉄損値の約36%に相当する低鉄損が得られたことを述べている。

第5章では、冷間圧延後に水素、窒素等の雰囲気中で焼鈍した場合の効果について検討し、水素中で焼鈍によっても高配向(110)[001]集合組織が実現できることを実証している。これは重要な成果と言える。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、4.5%珪素鉄合金の急冷薄帯を作製し、高配向(110)[001]集合組織を実現してその低鉄損化をはかり、幾つかの重要な知見を得たものであって、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。