

氏名	の 野	ざわ 沢	ただ 忠	お 生
授与学位	工	学	博	士
学位授与年月日	昭和 56 年 3 月 5 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 38 年 3 月 北海道大学理学部物理学科卒業			
学位論文題目	一方向性 3%珪素鋼板の鉄損に関する研究			
論文審査委員	東北大学教授	高橋	実	東北大学教授 穴山 武
	東北大学教授	小島	浩	東北大学教授 津屋 昇

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

一方向性 3%珪素鋼板の鉄損を改良するには、鋼板をできるだけ薄くし、(110)[001]方位の配向性を高く、結晶粒寸法を小さくすればよい。しかし、実際には、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一般的に大きくなる傾向があり、鉄損におよぼすこれらの因子は互いに相反する性質をもっている。

一方、1968年、(110)[001]方位の配向性の高い一方向性 3%珪素鋼板（商品名 HI-B）の発見がなされたが、当時の鋼板は結晶方位の配向性がすぐれていたにもかかわらず、結晶粒が大きいため、鉄損はそれまでのものにくらべあまり改良されなかった。そこで、この配向性の高い鋼板の鉄損を下げるため、まず鉄損におよぼす諸因子を詳細に検討し、ついで鉄損の低い鋼板の工業的製作法を開発することを目的として本研究を行うことにした。

第 2 章 磁化および鉄損測定装置と磁区観察法

一方向性珪素鋼板の鉄損と結晶方位の関係を検討するために、局所領域の鉄損測定用装置を試作した。本装置の原理は鉄損に起因する温度上昇率をサーミスタを用いて測定するものである。サーミスタブリッジとロックインアンプを組合せた方式を採用し、微分器を用いて温度上昇率を

直接測定することによって安定度・精度の向上と実験時間の短縮を可能とした。なお実験にあたっては周囲温度の変化を 1°C 以下にし、サーミスタに流れる電流を $5.5 \times 10^{-7}\text{A}$ 以下とし、サーミスタと装置の時定数は 1.0 秒とした。

試料全体の平均鉄損の測定にあたっては電力計法による単板測定器を用いた。

磁区模様の観察は 200KV 走査型電子顕微鏡を用いて背面散乱電子像による方法によった。なお試料の結晶方位はX線背面反射ラウエ法によって決定した。

第3章 3%Si-Fe 単結晶の鉄損におよぼす張力の効果

従来、一方向性珪素鋼板の圧延方向に外部張力（以下 σ と略記する）を印加した場合、一般に σ の小さいところで鉄損はわずかに減少するが、 σ を増加すると鉄損は逆に増大することが知られている。

そこで透磁率、結晶粒度および板厚の異なる3%Si-Fe単結晶を製作し、鉄損の σ 依存性をしらべた。その結果 σ による鉄損の減少は μ_{10} が大きい程顕著であるが、 $\sigma = 1.0\text{kg/mm}^2$ 以上になるとその減少率は緩やかになる。さらに結晶粒度が大きいほどまた板厚の薄いほど減少効果が大きいことがわかった。

すなわち、 μ_{10} を高くするならば、結晶粒度が大きくとも $\sigma = 1.0\text{kg/mm}^2$ 以上印加すれば著しく鉄損が改善できることが明らかとなった。

第4章 一方向性3%珪素鋼板の鉄損におよぼす張力の効果

圧延方向に加えた σ による鉄損減少効果が何に起因するかをしらべるために、まず $\sigma = 0$ および $\sigma = 1.5\text{kg/mm}^2$ を加えたままの状態での消磁した後の磁区模様を観察した。

図1(a)、(b)、(c)、(d)はそれらの結果を示したものであるが、図にみるように、 σ によっていずれの場合も 180° 磁区が細分化されている。これらの結果を前章でのべた σ による鉄損減少の様子と対応させてみると磁区幅と鉄損の間には一義的な関係がないことがわかる。

磁区幅と鉄損の関係を実験的に確かめるために、磁区を観察した場所の鉄損を局所鉄損測定器を用いて直接測定することにした。その結果を図2に示した。

図2は結晶粒の大きい一方向性珪素鋼板の粒内の $\sigma = 0$ および $\sigma = 1.5\text{kg/mm}^2$ を加えた場合の局所鉄損と磁区模様との関係を示したものである。 $\beta = 6.5^{\circ}$ (β は $[001]$ 軸の試料表面に対する傾き角である)のa領域では還流磁区が高密度でくしの歯状にならんでいる。 σ によってこれらの還流磁区の数が増減し、 180° 磁区幅が $0.1 \sim 0.2\text{mm}$ と非常に狭くなるが、 180° 磁区中に多くの還流磁区が残っている。 $\beta = 1.5^{\circ}$ のb領域では還流磁区がほとんど含まれず、 σ による磁区幅の減少も小さく、 $\sigma = 1.5\text{kg/mm}^2$ のときに約 0.5mm である。しかし張力下の鉄損はa領域の方が、その磁区幅がb領域の $1/2$ 以下であるにもかかわらず大きい。

上にのべた結果から、 β が約 1° 附近に張力下の鉄損の最小値があることが推察された。

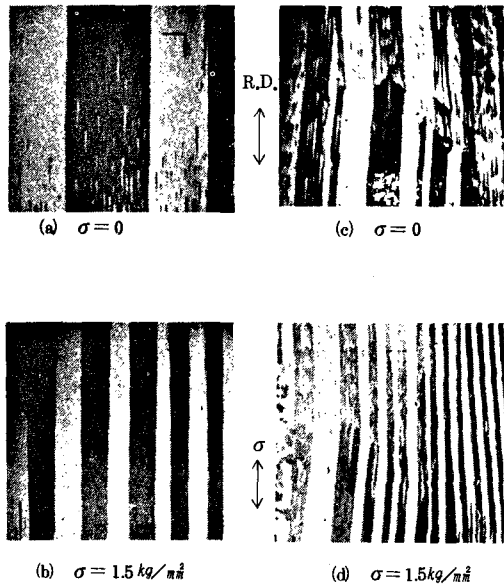


図1. 圧延方向 (R.D.) に加えた張力 σ による一方向性 3% 珪素鋼板の磁区模様の変化 (a), (b): $\mu_{10} = 1950$, (c), (d): $\mu_{10} = 1820$

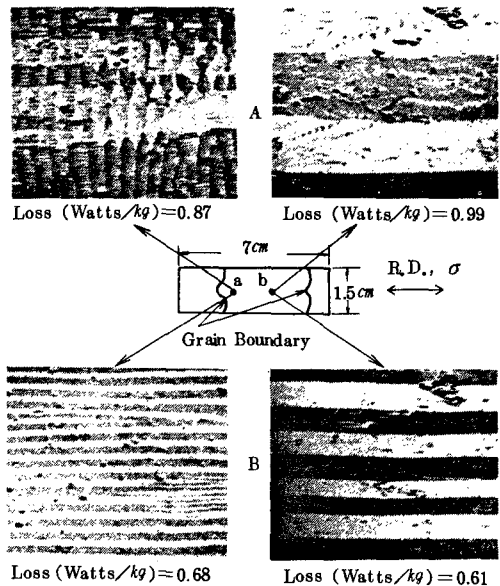


図2. 磁区模様と局所領域鉄損 ($B_m = 17 \text{ KG}$, $f = 50 \text{ Hz}$, 板厚 $= 0.18 \text{ mm}$) との関係, a および b 領域の試料面は (110) 面に対してそれぞれ $\beta = 6.5^\circ$ および $\beta = 1.5^\circ$ である。A: $\sigma = 0$, B: $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$

第5章 張力による鉄損減少効果の機構

β , σ による磁区の細分化および鉄損の3つの関係を明らかにするため, β の異なった 3% Si-Fe 単結晶をつくり, 張力下の鉄損と β との関係を詳細にしらべた。

図3は $\sigma = 0$ の場合および $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ を加えた場合の β に対する鉄損の変化の様子を示したものである。図より, β が増加するにつれて全鉄損は直線的に減少し β が約 2° のときに σ による全鉄損の減少が最大で全鉄損値が最小となる。さらに β が 2° より大きくなると, 全鉄損は直線的に増加する。一方, 直流ヒステリシス損は β の増大と共にわずか大きくなる。従って β の増大による全鉄損の著しい減少および増加は渦電流損の β 依存性とと考えてよい。

次に各単結晶の $\sigma = 0$ および $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ を加えた場合の磁区模様を観察し, 180° 磁区幅および還流磁区密度の β 依存性についてしらべた。

図4に β に対する $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ における 180° 磁区幅と 180° 磁区中に占める還流磁区の面積率の変化の様子を示した。 180° 磁区幅は $\beta = 0^\circ$ のときに最大で, β が約 2° まで急激に減少しその後は β の増大と共に徐々に減少する。一方, 還流磁区は $\beta = 0^\circ$ のときは全く存在せず, β の増大と共に徐々に増え $\beta \approx 2^\circ$ のときに急激に増加し, その後, β の増大と共に徐々に増える。

以上の結果から, 一方向性珪素鋼板の張力下の鉄損は β に強く依存し, β が約 2° のときに最低鉄損の得られることがわかった。

第6章 表面被膜法による鉄損の減少

圧延方向に加えた σ による鉄損減少効果の実用化を考える場合、圧延方向に σ を加えた状態で鋼板を使用することは困難である。そこですでに張力を印加した鋼板を製品とする必要がある。

鋼板の表面被膜の熱膨脹係数が鋼板のそれに比べて小さいときは冷却過程で鋼板に張力（以下 σ_B と略記する）がかかることが知られている。そこで表面被膜の一方向性珪素鋼板の鉄損におよぼす影響についてしらべた。その結果、配向性の低いもの（ $\mu_{10} = 1820$ ）は、コーティングによる鉄損の減少は小さいが、配向性の高いもの（ $\mu_{10} = 1920$ ）はコーティングによって鉄損が大きく減少し、さらに σ_B の大きいコーティングの方が鉄損の減少が大きいことがわかった。

σ_B が面張力であるにもかかわらず圧延方向の鉄損および磁気ひずみに対しては σ と同様な効果があるのは（110）〔001〕方位を有する鋼板の磁気ひずみの非等方性から理論的に説明できる。

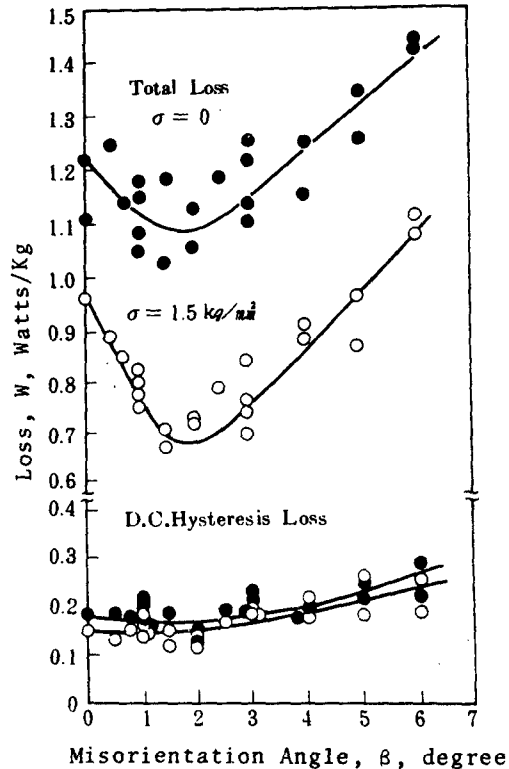


図3. (110)〔001〕方位に近い方位を有する3% Si-Fe単結晶の β と鉄損（ $B_m = 17 \text{ KG}$, $f = 50 \text{ Hz}$, 板厚 = 0.20 mm ）との関係

第7章 結晶方位の微小変動法による鉄損の減少

本章では第5章で得られた知見をもとにして実用化を検討した。 β が約 2° のときに張力下の鉄損は最小になるが、鋼板全体にこのような傾きを生じさせることは非常にむずかしい。

そこで、この傾きを鋼板全体でなく、局部的にかつ周期的に生じさせ、これに σ_B を適用することによって 180° 磁区が細分化できるかどうかを検討した。

すなわち、2次再結晶が起る前に波形ロールを用いて鋼板に微小な彎曲を入れておき、2次再結晶後、鋼板を平坦にすることによって、高配向性の結晶粒内に〔001〕軸の傾きを周期的に形成できることを見出した。このような鋼板に σ 又は σ_B を加えることによって結晶粒内で〔001〕軸の傾きのない領域の 180° 磁区も、傾きのある領域の 180° 磁区と同様に細分化されることがわかった。

第8章 鉄損におよぼすスクラッチの影響

鉄損を小さくするための有効な方法の一つとして圧延方向と直角の方向にスクラッチを入れる方法がある。

本章では、第5章で用いたと同様な単結晶を用いて、スクラッチ効果の結晶方位依存性、鉄損減少効果の原因を調べた。

$\sigma = 0$ の場合、 β が小さくなるにしたがって、スクラッチによる鉄損の減少は大きくなり、 $\beta = 0^\circ$ のときに減少が最大で鉄損も最小になること、また $\sigma = 1.5 \text{ kg/mm}^2$ を加えた場合は鉄損は全般的にさらに減少するが、 $\beta = 0^\circ$ のところでは減少が小さく $\beta \approx 1^\circ$ で最小鉄損となることがわかった。また磁区模様の観察の結果、スクラッチによる鉄損の減少は 180° 磁区の細分化と反転磁区の形成によるものであることがわかった。すなわちスクラッチによって生じた磁極や内部応力に起因する反磁場は 180° 磁区の細分化に有利な反転磁区の形成を容易にしていること、さらにスクラッチの方向と直角の方向に広範囲に生じている張力によってスクラッチ近傍の還流磁区が減少することが 180° 磁区の細分化を助長させることがわかった。

第9章 結 論

以上第2章から第8章までにのべた研究結果によって、 $(110)\{001\}$ 方位の配向性の高い一方向性珪素鋼板の鉄損減少におよぼす諸因子およびその実用化の方法を明らかにすることが出来た。

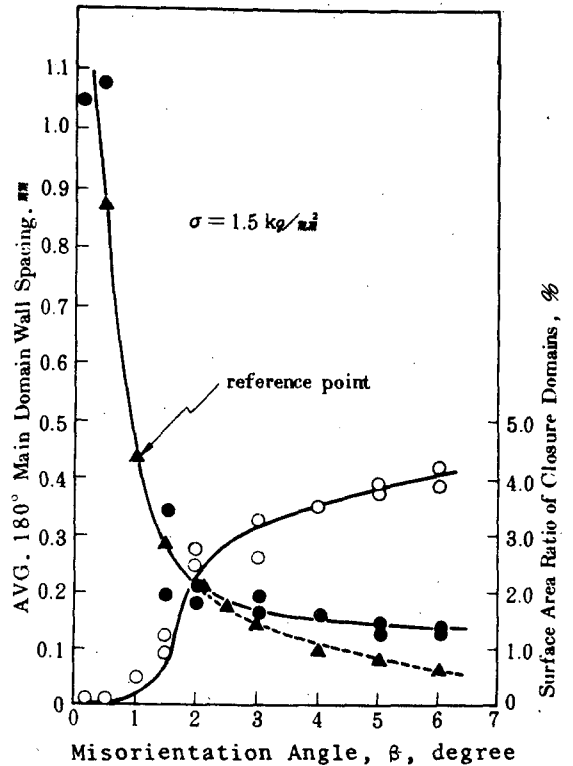


図4. $(110)\{001\}$ 方位に近い方位を有する3%Si-Fe単結晶の β と 180° 磁区幅および 180° 磁区中の還流磁区の占める面積率との関係

- : 180° 磁区幅の観測値
- ▲ : 180° 磁区幅の計算値
- : 180° 磁区中の還流磁区表面積率

審査結果の要旨

変圧器用一方向性3%珪素鋼板の鉄損を減少させるには、鋼板をできるだけ薄くして、(110)〔001〕方位の結晶粒の配向性を高め、かつ結晶粒を小さくすればよい。しかし一般的な傾向として、板厚を薄くすると配向性が低くなり、配向性を高くすると結晶粒が大きくなる。1968年に我が国で開発された一方向性3%珪素鋼板(商品名HI-B)は(110)〔001〕方位の配向性が非常にすぐれ世界的に注目されたが結晶粒が大きいため鉄損は従来のものにくらべ余り改良されなかった。本論文はこの点に着目し、先ず鉄損におよぼす諸因子を詳細に検討し、ついで鉄損の低い鋼板の製作法を開発することを目的として行った研究の成果をまとめたもので、全文9章よりなる。

第1章は序論であり、珪素鋼板の鉄損の低減に関するこれまでの研究と本研究の意義および目的について述べている。

第2章では電子顕微鏡法による磁区観察法と新たに試作開発した一つの結晶粒内の局所領域の鉄損測定装置について述べている。著者は鉄損に起因する温度上昇の測定法としてサーミスターブリッジとロックインアンプを組合せた方式を採用し測定精度と安定度の向上をはかるとともに、測定時間の短縮を可能にした。これは磁気物理実験学上価値のあることである。

第3章では、透磁率、結晶粒度および板厚の異なる夫々の材料について、鉄損に及ぼす張力の影響を詳細に検討した結果について述べ、透磁率(μ_{10})が高く、結晶粒度が小さく、板厚が薄いほど鉄損に及ぼす張力の効果が大いことを確認している。さらに結晶粒度が大きくとともに1.0 kg/mm²以上の張力を印加することによって鉄損を著しく減少させることを見出している。これは実用上重要な知見である。

第4章および5章は本論文の中心となるものであり、圧延面に対する結晶粒の磁化容易軸の傾き角が約2°で張力による鉄損が極小となること、180°の磁壁数と鉄損の間には一義的な関係がなく磁化容易軸の圧延面に対する傾き角に関係した微細磁区の発生が鉄損を大きく支配することを実験的に明らかにするなど鉄損減少法に対する工業的方法の指針となる有用な結果を得ている。

第6章では、第4、第5章で得た基礎的な実験結果をもとに、配向性の高いHI-Bに表面被膜を施すと被膜による張力は面張力であるにも拘らず、鉄損が著しく減少することを見出し、その効果を磁気歪の非等方性によって説明している。

第7章では圧延面に対して(110)面の〔001〕軸の傾きを約2°とするための方法として波型ロールが有効であることを示し、第8章では圧延方向に垂直にスクラッチを導入することによって鉄損が著しく改善できることを示している。第9章は結論である。

以上要するに、本論文は一方向性3%珪素鋼板の鉄損と、局所的な結晶方位の傾きと磁区模様の張力依存性の関連性を実験的に明らかにし、鉄損減少の新しい工業的手法を提案したものであり磁気工学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。