

## 方向性珪素鋼板の動的磁区構造と渦電流損に関する 基礎研究

|     |   |
|-----|---|
| 著者  | 本田 厚人   |
| 号   | 1799  |
| 発行年 | 1997  |
| URL | <a href="http://hdl.handle.net/10097/10606">http://hdl.handle.net/10097/10606</a> |

|           |   |
|-----------|---|
| 氏名        | ほんだ あつひと<br>本田 厚人                           |
| 授与学位      | 博士(工学)                                      |
| 学位授与年月日   | 平成10年2月12日                                  |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第2項                                  |
| 最終学歴      | 昭和57年3月<br>東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 修了           |
| 学位論文題目    | 方向性珪素鋼板の動的磁区構造と渦電流損に関する基礎研究                 |
| 論文審査委員    | 主査 東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 高橋 研<br>東北大学教授 一ノ倉 理 |

## 論文内容要旨

変圧器の鉄心として用いられる方向性珪素鋼板は、1900年に開発されて以来さまざまな努力によってその鉄損が低減され、電力損失の削減に寄与してきた。最も大きなブレークスルーは、冶金的な手法による2次再結晶を利用した(110)[001]結晶方位尖鋭化の技術開発と、物理的手法による磁区細分化技術の開発であった。しかしながら現在でも方向性珪素鋼板の鉄損起因の損失は膨大で、国内総電力量の約1%にあたる80億kWhにも達しており、省エネルギー化のためのさらなる鉄損低減が望まれている。本論文は、より効果的な鉄損低減策を見出し、電力損失低減に繋げるため、方向性珪素鋼板の損失の起源を明らかにすることを目的とした。

方向性珪素鋼板の鉄損は履歴的と渦電流損とに分けられ、渦電流損はさらに古典的渦電流損とそれ以外の損失（以降はこれを従来からの慣習にしたがって異常渦電流損と呼ぶ）に分けられる。このうち履歴損と古典的渦電流損に関してはほぼその生成メカニズムが明らかとなっている。残る異常渦電流損の起源を詳細に検討考察するため、本論文では磁区細分化前後の方向性珪素鋼板を用いて、静的および動的な磁区観察を行い、さらに動的磁区モデルを構築して実験値と比較評価した。その結果、異常渦電流損に及ぼす磁区幅、結晶粒方位、鋼板中の磁束の流れ方などの影響が定量的に明らかとなり、さらなる鉄損低減方法に関する具体的なヒントを得ることができた。

第1章では、方向性珪素鋼板の鉄損低減の歴史と従来行われた研究の概略を述べ、本研究の目的と論文構成を述べている。

第2章では、川崎製鉄において開発されたプラズマジェット法（非耐熱型-微小歪型）とエッチング法（耐熱型-溝型）の二つの磁区細分化技術を適用することによって、多結晶体である方向性珪素鋼板に対する両者の鉄損低減効果を定量的に比較評価し、異常渦電流損低減のメカニズムを検討した。磁区細分化処理前のPlain板、プラズマ照射材およびエッチング処理材の磁区幅を測定してその値からPry-Beanモデルにより磁区幅起因の異常渦電流損を計算した結果、この異常渦電流損値はいずれの材料でもその渦電流損のうちの約半分にしかならず、半分程度が磁区幅起因以外の異常渦電流損として残ることが明らかとなった（図1）。また計算と実測の差は特に

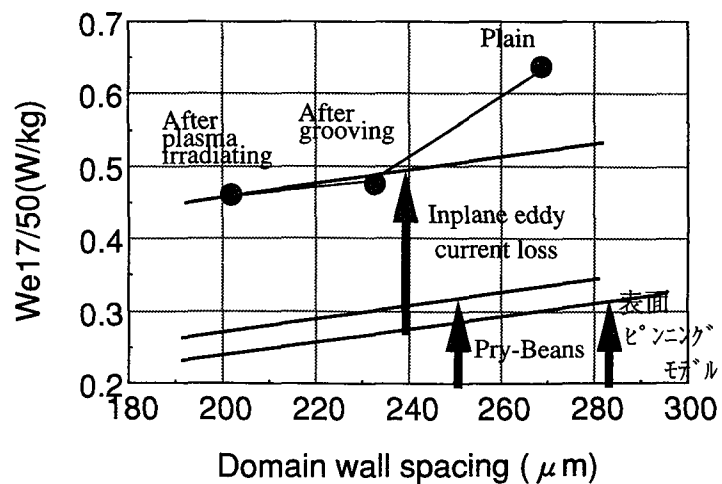


図1 プラズマ照射と溝付与前後の磁区幅と実測および計算渦電流損の比較

Plain板で大きかったことから、プラズマ照射材もエッチング処理材も、磁区細分化効果そのものから計算される以上の鉄損低減効果があったことが示唆された。これらの磁区細分化処理は磁区幅を低減するだけでなく均一化する効果も有するため、これが計算以上の鉄損低減効果に寄与した可能性が期待された。

第3章では、方向性珪素鋼板中の磁束不均一による異常渦電流損分を評価することを目的として、探針法を用いて鋼板の局所磁束と局所磁区幅および局所鉄損を測定した。鋼板全体を1.7Tで励磁したときに、局所的には不均一に磁化され、局所磁束密度は1.55Tから1.85Tに、鉄損は0.75から1.30W/kgまで分布した(図2)。もしこれが鋼板全体にわたって均一に1.7Tで磁化されたとしても、鋼板全体では不均一磁化時と同じ鉄損になることを明らかにした。つまり、磁束不均一による異常渦電流損は無視できるほど小さい。また実用方向性珪素鋼板においては局所的な磁区幅と磁束密度の間には特に相関は見られないため、第2章で磁区細分化技術に期待されたような、局所磁束密度および磁区幅を均一化することによる異常渦電流損の低減効果も存在しないことが明らかとなった。ただし磁束不均一化により局所的な磁束波形歪が生じているのか、またこれによる高調波成分が過剰な渦電流損を生じさせるのかに関する調査検討は行っておらず今後の課題である。

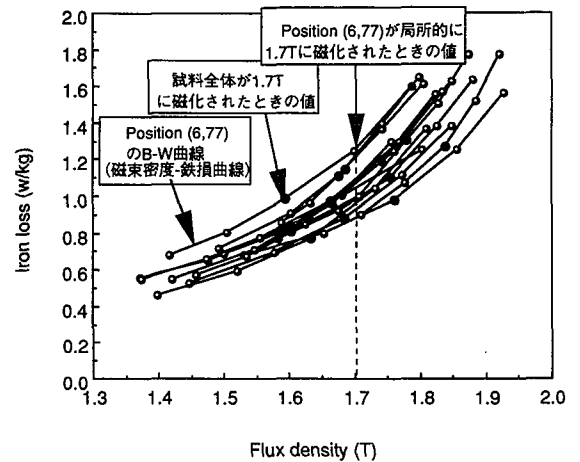


図2 探針法により測定した局所鉄損と局所磁束密度

第4章では、Pry-Beanの磁区幅理論からは説明できない磁区幅起因以外の異常渦電流損のうち、板面内渦電流損の寄与分を評価することを目的として、鋼板面からの[001]軸の傾き角 $\beta$ の異なる単結晶を用いて鉄損および板面垂直方向の磁束密度を測定した。その結果板面垂直方向の磁束密度は、 $180^\circ$ 磁区の動きにともなって変化する板面平行方向の磁束密度に $\tan \beta$ を掛けた分だけではなく、補助磁区であるLancet磁区生成成分の合計で決定されることがわかった。これらの成分は、互いに反対方向を向き、ほぼ相殺する量となるため板面垂直方向の磁束密度はほぼ0となる。それにもかかわらず $\beta$ 角が増すほど渦電流損が増加(異常渦電流損)するのは、Lancet磁区の生成消滅により極局所的にその近傍に生じるうず電流が原因することが明らかとなった。この単結晶の異常渦電流損測定結果と、第2章で使用した方向性珪素鋼板実験材の $\beta$ 角分布測定(図3)とから、第2章の材料の板面内渦電流起因の異常渦電流損を評価した結果、これが約0.23W/kgであることが推定できた。

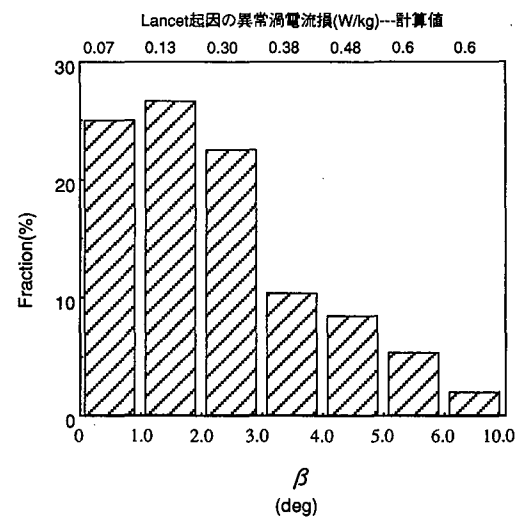


図3 供試材の結晶粒の $\beta$ 角分布とその面積率

第5章では、第2章において行ったPry-Beanモデルを用いた平面磁壁磁区構造に起因する異常渦電流損の解析に対して、これに磁壁の湾曲を加えて考慮することによりさらに精度を上げることを目的として、Bishopの動的湾曲磁壁モデルを用いて計算を行い、これを実験データと比較検討し評価した。さらには、Bishopモデルでは考慮されていないが実用上は非常に重要である表面粗さの影響を実験的にもとめ、この影響を加味できるようBishopモデルを修正し新たに表面ピンニングモデルとして提案した。表面が粗い場合には、表面ピンニング力によって特に低磁場域における表面近傍の磁壁がその動きをさまたげられる。この結果相対的に板厚中深部の方が速く進み(図4)、磁壁湾曲が緩和されることにより渦電流損がむしろ増加する。高磁場域では表面ピンニング効果より渦電流による効果が大きくなるため表面磁壁は先進し(図4)、このため渦電流損におよぼす表面粗さの影響は小さくなる。これらを実験および理論的に明らかにした。この表面ピンニングモデルとPry-Beanモデルを比較すると、高磁場になるほどPry-Beanモデルの

値が実測の鉄損より大きな値を示すのに対して、表面ピンニングモデルの方が実測値に近い。ただし実際の方向性珪素鋼板の絶縁被膜と同じ程度の張力がかかった場合には、商用周波数50HzであればPry-Bean損と表面ピンニングモデルの損失との差はさほど小さく約1割程度であることを明らかにした(図5)。

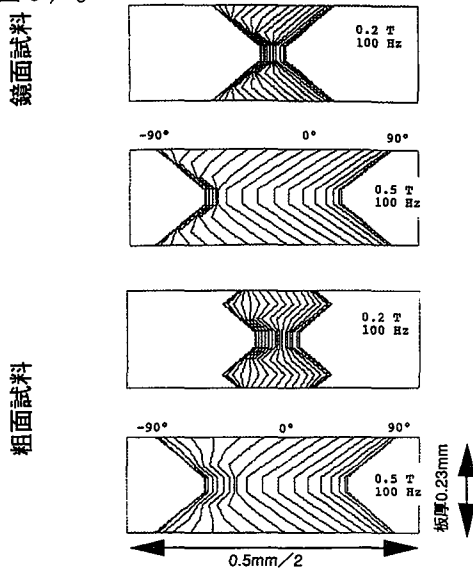


図4 表面ピンニングモデルによる動的磁区挙動に及ぼす表面粗さと磁束密度の影響

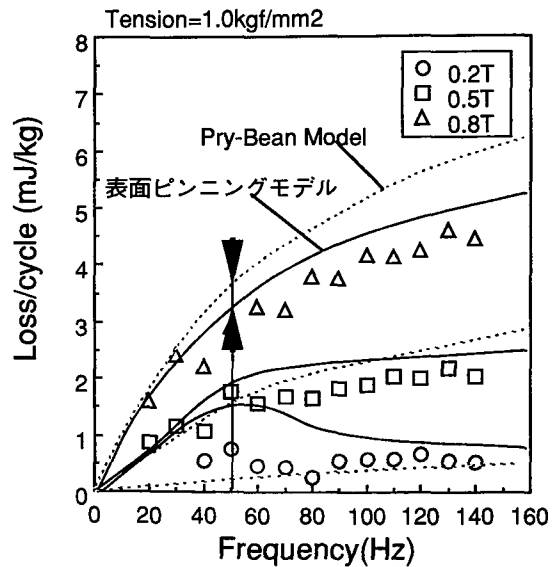


図5 鉄損の周波数依存性の実験値と計算値の比較

第6章は結論を述べている。本研究により、磁区細分化処理方向性珪素鋼板の異常渦電流損は磁区幅起因分と板面内渦電流(Lancet磁区生成消滅)起因分がほとんどを占めることが明らかとなった。また磁区細分化処理をしていないPlainな方向性珪素鋼板の異常渦電流損はこれらの損失だけでは説明できなく約2割を不明分として残す。換言すれば、磁区細分化処理によって磁区幅起因の異常渦電流損が低減されるとともにその不明分も低減されることが定量的に明らかとなった(図1)。この不明分は、今回調査していない局所的な磁束歪による高調波成分による可能性が残されているため、今後この定量化を進めたい。また、磁区細分化処理後の方向性珪素鋼板においても、Lancet磁区起因と考えられる異常渦電流損が比較的大きな割合を占めていることから、今後はこの異常渦電流損を低減することが重要となる。最も直接的な方法は結晶方位の制御により[100]軸のずれを低減することであるが、現在以上の制御はかなり困難と予想される。これ以外の方法として、(1)板厚をさらに薄くして、Lancetが生成しなくても良いように $\mu^*$ 効果を高めて板面垂直方向の静磁エネルギーを低下させること、(2)圧延方向張力をさらに高めて磁気弾性的にLancetが生成しにくくすること、を提案した。ただし、いずれも現実的には製造コストの増加を避けるためのブレークスルーが必要となる。一方、履歴損を劣化させない磁区を細分化方法を開発することによりさらに渦電流損および全鉄損を低減できる余地のあることを示した。

最後に、素材鉄損そのものを低減させる努力とともに、電力損失低減のため、実機鉄損の起源を明らかにし、これを低減するための実機的设计あるいは材料のあるべき姿を追及する研究に力を注ぐ必要があるとの結論を述べた。

## 審査結果の要旨

近年変圧器における電力損失は種々の技術開発により大幅に低減されてきたが、未だに総電力需要量の約1%にも達する。この損失の低減化のためには、鉄心材料である方向性珪素鋼板のさらなる鉄損の低減が必要である。

方向性珪素鋼板の鉄損は、約3割を占める履歴損と残り7割の渦電流損からなる。この渦電流損の内の7割は異常渦電流損と呼ばれ、磁区幅、不均一な磁束の分布、磁壁の湾曲、板面内渦電流の4つの効果に起因すると言われていた。しかしながら市販の方向性珪素鋼板におけるこれら損失の定量的な寄与に関してはほとんど明らかにされていない。

本論文は、市販の方向性珪素鋼板の損失、とくに異常渦電流損の起源を定量的に明らかにすることを目的とし、局所鉄損測定および動的な磁区観察などを行い、新たな動的磁壁移動モデルを提案して実験値と比較検討し、異常渦電流損に及ぼす磁区幅、結晶粒方位、鋼板中の磁束の流れ方などの影響を定量的に明らかにしたもので、全編6章よりなる。

第1章は、市販の方向性珪素鋼板の鉄損低減の歴史と従来研究の概略、および本研究の目的を述べている。

第2章では、プラズマジェット法と化学エッチング法による磁区細分化技術を利用して方向性珪素鋼板に対する鉄損低減効果を定量的に求め、磁区幅に起因する渦電流損が異常渦電流損の半分程度を占めることを明らかにしている。

第3章では、方向性珪素鋼板中の磁束の不均一分布による鉄損を評価することを目的として、探針法を用いて鋼板の局所磁束と局所鉄損を測定し、鋼板全体では磁束が均一に分布している場合とほぼ同じになることを明らかにしている。これは従来からの基本的な疑問を解決したものと重要な成果といえる。

第4章では、板面内渦電流損の寄与分を評価することを目的として、鋼板面からの[001]軸の傾き角 $\beta$ の異なる単結晶を用いて鉄損および板面垂直方向の磁束密度を測定し検討している。その結果 $\beta$ が増すほど損失が増加するのは、Lancet磁区の生成・消滅によりその近傍に生じる渦電流が原因であること、さらにその渦電流損は市販の方向性珪素鋼板では約0.23W/kgであることを明らかにしている。

第5章では、磁壁の湾曲および表面粗さの影響を考慮した新たな磁壁移動モデルを提案し、これを用いて鉄損の評価を行い実験データと比較検討している。この結果表面が粗い場合には、磁壁は相対的に板厚中心部の方が速く移動するようになり、磁壁湾曲は緩和されるが渦電流損は増加するなどのことを明らかにしている。このことは表面粗さの鉄損への影響を初めて定量化した点で実用上重要な成果といえる。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、市販の方向性珪素鋼板の渦電流損の起源を実験と理論により明らかにしたものであり、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。