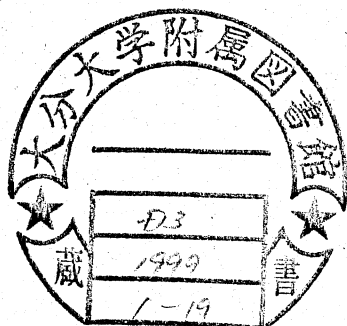


ベクトル磁気特性による有限要素磁界解析

大分大学大学院工学研究科
博士後期課程
博士論文



1999年3月

祖田 直也

目 次

第 1 章	序論	1
第 1. 1 節	本研究の社会的意義	1
第 1. 2 節	従来の研究の到達点と課題	4
第 1. 3 節	本研究の目的	6
第 1. 4 節	本論文の概要	8
第 2 章	ベクトル磁気特性の瞬時モデル	9
第 2. 1 節	緒言	9
第 2. 2 節	ベクトル磁気特性測定装置の概要	10
第 2. 3 節	ベクトル磁気特性について	13
第 2. 4 節	ベクトル磁気特性の瞬時モデル	24
2. 4. 1	モデルの定義	24
2. 4. 2	無方向性けい素鋼板	29
2. 4. 3	方向性けい素鋼板	36
2. 4. 4	有限要素磁界解析のための定式化	43
第 2. 5 節	モデル検証のための磁界解析	45
2. 5. 1	解析モデルと解析条件	45
2. 5. 2	交番磁束条件下の磁界解析	47
2. 5. 3	回転磁束条件下の磁界解析	50
2. 5. 4	従来モデルとの比較検討	53
第 2. 6 節	交番磁束条件下での磁界解析	55
2. 6. 1	解析モデルと解析条件	55
2. 6. 2	解析結果と検討	56
第 2. 7 節	交番及び回転磁束が混在する条件下での磁界解析	62
2. 7. 1	解析モデルと解析条件	62
2. 7. 2	解析結果と検討	63
第 2. 8 節	結言	66

第 3 章	ベクトル磁気特性の過渡モデル	67
第 3. 1 節	緒言	67
第 3. 2 節	ベクトル磁気特性の過渡モデル	68
3. 2. 1	モデルの定義	68
3. 2. 2	有限要素磁界解析のための定式化	84
第 3. 3 節	交番ヒステリシスのみを考慮した磁界解析	87
3. 3. 1	解析モデルと解析条件	87
3. 3. 2	解析結果と検討	87
3. 3. 3	鉄損分布と検討	92
第 3. 4 節	交番及び回転ヒステリシスを考慮した磁界解析	94
3. 4. 1	解析モデルと解析条件	94
3. 4. 2	解析結果と検討	95
3. 4. 3	鉄損分布と検討	100
第 3. 5 節	結言	102
第 4 章	ベクトル磁気特性を導入した有限要素磁界解析の応用	103
第 4. 1 節	緒言	103
第 4. 2 節	三相変圧器鉄心の鉄損低減に関する研究	104
4. 2. 1	解析モデル	104
4. 2. 2	解析結果と検討	105
4. 2. 3	鉄損分布と検討	108
第 4. 3 節	結言	111
第 5 章	結論	112
第 5. 1 節	本研究の総括	112
第 5. 2 節	今後の課題	115
謝辞		116
参考文献		117

第 1 章 序論

第 1. 1 節 本研究の社会的意義

電気エネルギーは制御が容易で、クリーンかつ安全性の高いエネルギーであるため、我々の生活に必要不可欠なものであると言える。そのため電気機器がエネルギー変換機器として、発電所、変電所、工場、一般家庭などあらゆる分野で使用され、我が国の近代工業社会を支える重要な役割を果たしてきた⁽¹⁾。また今後においても電気機器は、電気自動車やリニアモーターカーなど様々な方面での活用が期待されている。しかしその一方、現代社会における電気機器の大容量化や需要拡大により、エネルギー消費量は毎年増加傾向にある。そのため新しいエネルギーの開発と共に、省エネルギー化の対策が重要視され、電気機器のより一層の高効率化が要求されている。この高効率化のための一手段として、電氣的損失を低減させることが挙げられるが、これはすなわち電気機器鉄心内の鉄損を小さくすることである。これまで鉄損を低減するための研究は2つの方面からアプローチされてきている。一つは電気機器に使用される材料そのものの磁気特性を向上させること、もう一つは磁性材料の磁気特性を正確に把握した上で、それをどこにどのような形状で使用するかという構造上の改良である。

前者の材料における磁気特性の向上という面では、様々な研究がなされ、低損失材料が開発されてきた。各種電気機器の鉄心に使用されているけい素鋼板は1889年にR.A.Hadfieldが鉄心材料にけい素を加えることにより鉄損が小さくなることを発見して以来、大量生産されると共に製造技術は急速に発展してきた。また方向性鋼板における鉄損の向上はFig. 1.1.1⁽²⁾に示すように1968年に新日鐵、1973年に川崎製鉄で高品位の高配向性けい素鋼板が開発され、電気機器の高効率化に大きく寄与してきた。さらに現在のところ商用とはなっていないが、次世代の鉄心材料として試作に成功した二方向性けい素鋼板がある。

後者の構造上の改良という面では、従来まで技術者の経験に頼ることが多かったが、近年のコンピュータ技術の発展に伴い、有限要素法や境界要素法を代表とする磁界解析技術が発達し、技術開発の重要な手法として広く取り入れられている。

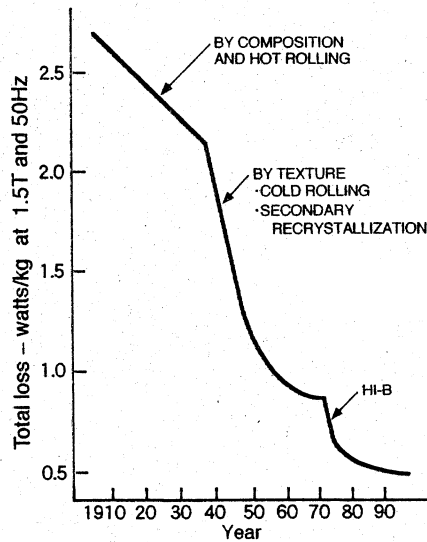
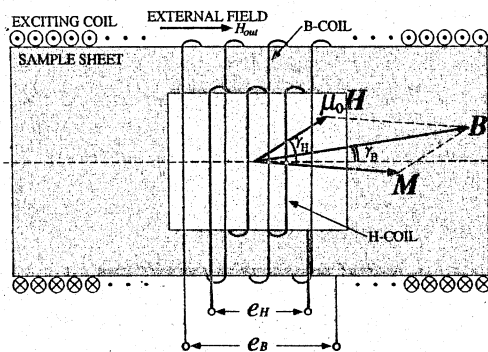


Fig. 1. 1. 1 Lowest total loss attained by commercial electrical steels in each year⁽²⁾

しかしながら、この磁気特性の向上と構造上の改良という両者はそれぞれの面において優れた研究成果を得ているが、両者を結合する研究が不十分であるために生じる問題も少なくない。例えば変圧器においては、鉄心に方向性けい素鋼板が一般に使用されるが、この鋼板をエプスタイン試験法などで測定すると非常に優れた特性が得られる。しかし実際に変圧器に使用した場合、変圧器のT接合部において回転磁束が発生し、計算より損失が大きくなることがほとんどである。この回転磁束が損失増大の要因の一つであり、これは交流回転機の鉄心内においても発生することが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。このような実際と計算結果との違いが生じた理由は、正確な磁気特性の測定が成されていないことと、その磁気特性を導入した磁界解析が行われていないことに起因する。

従来の磁気測定法は、Fig. 1. 1. 2 に示すようにエプスタイン法や単板試験法といった一次元的測定法であった。



$$e_B = N_B S_B \frac{dB \cos \gamma_B}{dt}$$

$$e_H = N_H S_H \frac{d\mu_0 H \cos \gamma_H}{dt}$$

$N_B S_B$: Effective area-turns of B-coils

$N_H S_H$: Effective area-turns of H-coils

Fig. 1. 1. 2 Conventional magnetic measurement.

これらの従来測定法では交番磁束条件下のみを対象とし、ベクトル量であるはずの磁束密度と磁界強度を測定方向への写像量であるスカラー値として測定している。そのため、これらの従来法では材料の特性を十分に把握できないのではないかと考えられる。当然ながら従来測定法によって得られた磁気特性を導入した従来の磁界解析手法も正しいとは言えない。

このような観点から、交番、回転の様々な磁束条件下において、磁性材料中の磁界強度、磁束密度をベクトルとして直接測定するベクトル磁気測定が提案され、各材料の詳細な磁場の振る舞いが明らかになってきている⁽⁵⁾⁽⁷⁾。しかしながら磁界解析を行う際、この磁気測定で得られた磁気特性をそのまま用いるのでは解析に必要なメモリが増大するだけではなく、測定に含まれるノイズの為に非線形計算が困難になる。そこで、ベクトル磁気測定により得られたベクトル磁気特性をどのようにモデリングし磁界解析に導入するかが問題となる。このベクトル磁気特性の重要な特徴は、非線形性を磁束密度の大きさのみならず、角度においても有することである。そのためベクトル磁気特性の非線形性を考慮するためには、材料の任意方向の特性を表現できるモデルが必要となる。しかし磁気特性のモデリングに関しては、様々な取り組みが成されているが交番磁束条件下の異方性材料のみを取り扱ったものが多く、未だ不十分である。またベクトル磁気特性のヒステリシスを考慮できるモデルもあるが、これは回転磁束条件下だけであり交番磁束条件下をも統一したモデルではない。交番及び回転磁束条件下におけるヒステリシスを表現できなければ、電気機器鉄心内の鉄損分布を得ることも困難となる。先にも述べたように、高効率化の一手段として電気機器鉄心内の鉄損を小さくすることは大変有効であり、そのためには電気機器鉄心内の鉄損分布を求めなければならない。

このように、磁界解析の際の磁性材料の非線形性の取り扱いに関して様々な問題点があり、解決しなければならないことが多い。従って、電気機器のより一層の高効率化のための磁界解析及び鉄損解析を考える場合、材料の異方性を含む非線形性の把握は重要な問題と言える。すなわち、磁性材料中における詳細な磁場の振る舞いを解明し、その磁気特性を導入した磁界解析手法の確立は重要な意義があるものと考えられる。

第 1 . 2 節 従来の研究の到達点と課題

従来、磁性材料の磁気特性は単板試験法、エプスタイン試験法によって測定されてきた。これらの測定法は磁束密度と磁界強度が平行であることを前提とし、印加磁界方向と同じ方向に磁束密度などの出力値を測定するものである。つまり従来の測定法では観測方向における写像量をスカラー値として測定したに過ぎない。しかしながら、異方性を有する磁性材料に磁化容易軸方向に対し傾きを持って磁界を印加した場合や回転磁界下においては、磁束密度と磁界強度の間に空間的位相差を生じる。そのため従来の磁気測定法によるスカラー特性表示（これを一次元磁気特性と称することにする）では全体像を捕らえることが困難であると言える。磁気特性を正確に把握するためには、材料中の磁束密度と磁界強度をベクトル量として直接測定しなければならない。ベクトル量として測定するには三次元磁気測定が必要であるように思われがちだが、通常の電気機器の積層鉄心は0.23～0.5mm厚の鋼板から構成されているため、一枚の鋼板の磁気特性は内面方向の磁気特性を考えるだけで十分である（鋼板の厚み方向の磁気特性は内面のそれに比べて極めて小さい）。そこで x 、 y 方向の二方向励磁によるベクトル磁気測定装置（二次元磁気測定装置）が提案された^⑤。この測定法によって得られた磁気特性はベクトル磁気特性（二次元磁気特性）と呼ばれている^⑥。ベクトル磁気特性は、 x 、 y 方向の二方向励磁及び波形制御により所望の磁束条件下において、磁界強度と磁束密度をベクトル量として測定した磁気特性である。そのため任意方向の磁気特性及び回転磁束条件下における鉄損評価等が可能となり、各種材料の磁気特性が報告されている^{⑦⑧}。測定法に関してはほぼ確立されたと言えるが、励磁周波数の変化に対する特性、渦電流の効果などについての検討が未だ十分になされていない。

さらに、一歩進んで実際の電気機器鉄心内において、前で述べたベクトル磁気特性がどのように分布しているかを三相変圧器鉄心を用いて探針法によって測定しようという試みもなされてきている^⑨。この測定法では2組の探針を用いた特殊なベクトル磁気特性測定用局所測定センサーによって、試料内部に流れる磁束の変化から生じる渦電流場による電位差により磁束密度を測定し、磁界強度はHコイルによって測定される。この測定法の長所は、探りコイルのための穴を試料にあける必要がないことであり、三相変圧器鉄心の回転磁束、透磁

率テンソル、鉄損分布等が報告されている。

また磁界解析においても、従来の測定法により得られた磁気特性を用いて解析を行っても正しい解析結果が得られるとは言えない。また従来の解析法は、圧延方向（磁化容易軸方向）とそれに垂直な方向（磁化困難軸方向）のみの磁気特性を用いて解析を行っていた。そのため磁束密度と磁界強度はベクトル量としてモデリングされておらず、ベクトル磁気測定によって得られる任意方向の磁気特性を従来法に入力することは出来ない。つまり磁界解析を行う場合も、データとして入力する物性値、即ち磁気特性はベクトル量として取り扱われるべきである。また、ベクトル測定により得られる磁気特性をそのまま磁界解析に用いたのではメモリが増大し、測定に含まれるノイズの為に非線形計算が困難となる。そのため磁界解析に有効なベクトル磁気特性のモデリングが必要となる。これまでのベクトル磁気特性の報告によると異方性及び回転ヒステリシスにより磁束密度と磁界強度は空間的位相差を持つことが分っている。またベクトル磁気特性において重要なことは、非線形性が磁束密度の大きさのみならず、角度においても存在するという点である。以上の点を考慮したベクトル磁気特性のモデリングが望ましい。

最近、特に異方性材料に対する新しい磁界解析法がいくつか提案されている。以下にその概要を示す。

(1) 異方性エネルギー法⁽¹⁰⁾

シルベスターらによって提案された方法である。任意方向の磁気特性から磁気エネルギー、磁気随伴エネルギーの分布を算出しその分布を磁界解析に適用しようとするものである。また、その分布を微分することで任意方向の磁気特性が逆算できる。ただし、その際高精度の微積分の数値計算が必要とされる等の問題点がある。また、磁界解析への適用法がまだ確立されていない。回転磁束条件下についての議論もまだなされていない。

(2) 直接法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

この方法は任意方向の磁気特性の測定結果を、直接磁界解析に適用するものである。しかしながら磁界解析ではあらゆる磁束条件下の測定結果をあらかじめ入力しておく必要があり、この手法ではメモリが増大してしまう。また測定に含まれるノイズの為に非線形計算が困難となり、収束し難くなってしまう。

(3) 異方性磁界法⁽¹³⁾

異方性を有する磁性材料の磁気特性は、等方性の磁気特性に異方性という特徴を加えたものだと考え、磁束密度と磁界強度の関係を等方性透磁率と実効異方性磁界から構成されると定義し、磁界解析に適応する方法である。回転磁束条件下についてはまだ検討されていない。

(4) 磁気抵抗率テンソル法⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

磁束密度と磁界強度の関係を磁気抵抗率テンソルを用いて表現し磁界解析に適用する方法である。従来まで磁性材料の磁気特性の表現は x 軸方向と y 軸方向が別々に取り扱われてきた。しかし、ベクトル磁気特性から考えると回転磁束条件下では回転ヒステリシスによる磁束密度と磁界強度の空間的位相差のためにテンソルの非対角項は 0 にならないことが報告されている。またテンソル法は高磁束密度領域に適用するため、磁界強度波形の第 3 高調波までを考慮した表現法へと拡張された。高磁束密度領域では磁界強度波形の歪みが激しいため本来なら第 5、及び第 7 高調波位まで考慮すべきだが、入力データの増大化を防ぐため第 3 高調波までを考慮している。交番磁束条件下については非対角項成分を 0 とすればテンソル化が可能となる。しかしながらこの手法では交番磁束条件と回転磁束条件とでは定義方法が異なり、それぞれの比較検討が出来ない。

以上のように各種解析法が提案されているが、それぞれに問題点、未解決な点があり、未だ確立されているとは言えないのが現状である。そこで、本研究では各種励磁条件下のベクトル磁気特性に適応可能なモデルの開発を行い、これを導入した有限要素磁界解析を電気機器に適応した場合に実際の磁場の挙動との差をなくすことを目的とする。さらにこの磁界解析手法を電気機器内の鉄損低減に関する研究にも応用していく。

第 1. 3 節 本研究の目的

前節で述べたように数値解析における磁性材料の磁気特性の表現法およびそれを考慮した有限要素法による磁界解析手法を確立するためには、以下の諸点に関して詳細な検討が必要であると考えられる。

- (1) 磁性材料の交番及び回転磁束条件下での磁気特性を把握し、有限要素法に適用するための表現法を確立する。
- (2) ベクトル磁気特性を考慮した新しい磁界解析手法を確立し、従来法との違いを検討する。
- (3) ベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析手法の応用を行う。

以上の観点から次の研究を行った。

(1) についてはベクトル磁気特性を考慮した磁界解析に適用できる磁性材料の新しい2通りのモデル、瞬時モデル及び過渡モデルを提唱する。ここで、瞬時モデルとは磁束密度及び磁界強度の関係を瞬時毎に表現するモデルであり Fig. 1.3.1 に示す初磁化曲線①及びヒステリシス曲線②に対応できる。また、過渡モデルとはヒステリシス曲線②上の周期的な磁束密度及び磁界強度の関係を表現するモデルである。

(2) についてはベクトル磁気特性を考慮した磁界解析手法を提唱し、ベクトル磁気測定装置、検証用単相鉄心モデル及び検証用三相鉄心モデルに適用し、従来法、実測結果との比較検討を行う。さらに有限要素磁界解析結果から直接検証用鉄心モデル内の鉄損分布を計算し、実測結果との比較検討を行う。

(3) についてはベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析の応用例として、T接合部における接合方法の違う三相変圧器鉄心に適用し、それぞれの鉄心内の磁場の挙動や鉄損分布を比較し鉄損低減について検討する。

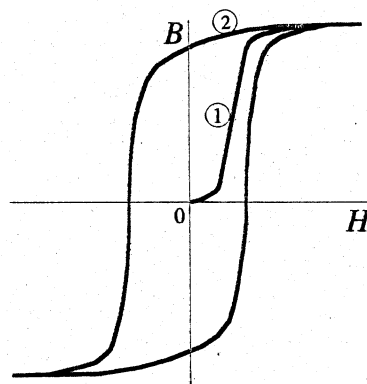


Fig. 1.3.1 Magnetization curve and hysteresis loop.

第 1. 4 節 本研究の概要

本論文では、本章を含めて 5 章からなっており、以下にその概要を示す。

第 1 章は序章であり、本研究における社会的意義と目的を明確にし、従来の研究の到達点と問題点を述べている。

第 2 章では、まずベクトル磁気特性の測定法について簡単な説明を行い、本研究を進めるにあたり重要であるベクトル磁気特性の特徴を示し、モデリングを行う際の注意点を明らかにする。そして本章では磁束密度と磁界強度の空間的位相差及び圧延方向からの角度変化に対する透磁率の違いに着目し、磁場の挙動を正確に表現することを目的とした瞬時モデルの定義と有限要素磁界解析への導入を行う。また検証用鉄心モデルに適用し、実測値との比較検討を行いその有用性を明らかにする。

第 3 章では、交流電気機器に見られる交番及び回転ヒステリシス特性を表現することを目的とした過渡モデルの定義と有限要素磁界解析への導入を行う。また解析結果から直接検証用鉄心モデルの鉄損分布を求め、実測値との比較検討を行う。

第 4 章では、ベクトル磁気特性を導入した有限要素磁界解析の応用として、一般三相変圧器鉄心の T 接合部における接合法の違いによる鉄損分布の変化を過渡モデルを用いて解析し、変圧器鉄心内の鉄損低減について検討する。

最後に第 5 章では本研究の総括を行い、今後の研究課題を考察する。