

第4.1節 緒言

電気機器のより一層の高効率化は、機器に組み込まれた磁性材料の損失を軽減することである。それゆえに鉄損の小さい材料の開発や磁性材料の特性評価に厳密な配慮が要求される。大きく分けてヒステリシス損と渦電流損の2種類からなる鉄損は電気機器の高効率化のために重要な特性であり、電磁鋼板はけい素を添加して固有抵抗を上げ、板厚を薄くし積層して用いられている。しかしながら変圧器鉄心として多く用いられる方向性けい素鋼板は、圧延方向に優れた磁気特性を持っているが、その他の方向での磁気特性は非常に悪い。特に三相変圧器鉄心におけるT接合部では入力電圧の周波数を基本波とする回転磁束が発生しており、この回転磁束による鉄損が通常の交番磁束鉄損より大きく、鉄心内の鉄損を増加させる原因となっている。このため鉄鋼メーカーにおいては損失評価の方法を見直す必要に迫られ、回転磁束下での磁気特性による損失評価が注目され始めた。電気メーカーにおいては有限要素法等の磁界解析を応用とした電気機器設計が主流になった。このような計算機による解析的手段の思考実験は「ソフトの実験」と呼ばれ、磁界解析の重要性が高まってきている。これに対し従来の磁性材料の特性評価である測定器や実験装置を用いての研究・開発は「ハードの実験」と呼ばれる。「ソフトの実験」として注目されつつある磁界解析技術は、これまでの「ハードの実験」と比べて比較的容易に磁束分布や鉄損を求めることができる。例えば、静止器の鉄心内の磁束分布や回転機の稼動状態にある回転子内の磁束分布及び鉄損分布は、「ハードの実験」では磁束分布を得るためには極めて複雑かつ困難な測定を強いられるが、「ソフトの実験」では基本的に静止器並びに回転機は同様な扱いで磁束分布を得ることができる。そのため「ソフトの実験」は磁性材料の磁気特性をどのように表すかによって、その結果の信頼性が決定される。最近ではこの磁気特性はベクトル的な測定によるベクトル量としての取り扱い、即ちベクトル磁気特性が注目されてきた。しかしながらこのベクトル磁気特性は従来用いてきた磁気特性モデルでは表現できず、またそのまま得られた実測データを解析に用いるとなると多大なメモリが必要になってしまうため新たな磁気特性モデルが必要と

なった。そこでこれまでベクトル磁気特性を導入した有限要素磁界解析を開発し、その妥当性を明らかにしてきた。

本章では前章で提唱したベクトル磁気特性のモデルを導入した有限要素磁界解析の応用として、電気機器鉄心の鉄損低減に関する研究を行う。これは電気機器最適設計技術のためにも必要不可欠である。

第4.2節 三相変圧器鉄心の鉄損低減に関する研究

4.2.1 解析モデル

本章では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。

解析モデルは Fig. 4.2.1 に示した三相変圧器鉄心を用いた。解析領域は対称性を考慮して1/2領域のみを用いた。要素分割は Fig. 2.7.2 に示したものと同様のものを使った。また鉄心に使用してある磁性材料は方向性けい素鋼板(23ZDKH90)とし、積層枚数を40枚と想定する。しかし本解析手法では積層による影響は考慮していないため、積層方向には一様であると仮定する。さらにT接合部における接合法の違いを調べるため、左右の脚部の接合は変えない。

T接合部における接合法は Fig. 4.2.2 に示す4種類の接合法について検討を行っ

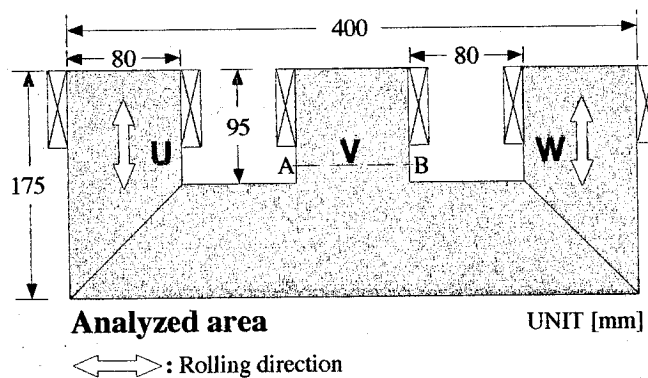


Fig. 4.2.1 The three-phase transformer model core.

図に示す矢印は鋼板の圧延方向を示す。Type-1はエプスタイン測定法等で用いられている90°接合⁽²⁴⁾の場合、Type-2はU相側が45°接合⁽²⁴⁾、W相側が90°接合の場合、Type-3はType-2の裏返しの場合でU相側が90°接合、W相側が45°接合の場合、さらにType-4はU、W相両側において45°接合の場合である。

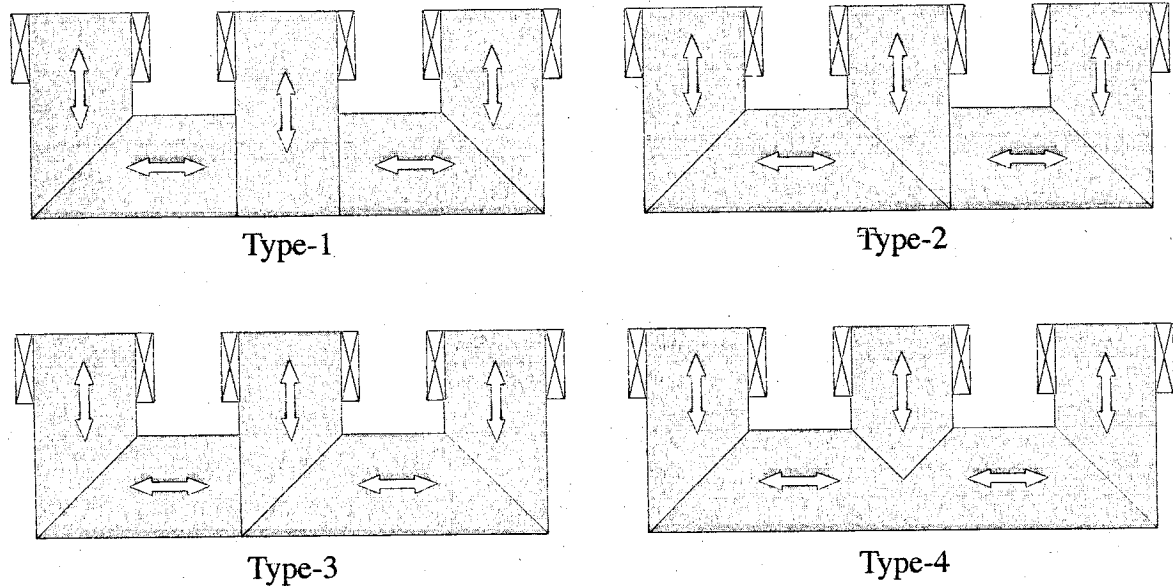


Fig. 4. 2. 2 Four lamination methods at T-joint part.

4. 2. 2 解析結果と検討

一般三相変圧器鉄心のT接合部における接合法の違いを、過渡モデルを用いて解析した結果について検討する。同じ強制電流値を与えた場合の各種接合法の $\omega t = 0$ [deg.]における磁束分布をFig. 4. 2. 3に示す。図より圧延方向に沿って磁束が通っているのが分かる。Type-1及びType-4は三相変圧器中央部を中心軸とし対称の形状だが、磁束分布は非対称である。またType-2とType-3はお互いに裏返した場合の形状と同じであるが、磁束分布は裏返しても同様の分布にはなっていない。これはFig. 2. 7. 6で説明したことと同様の理由で、発生する回転磁束の回転方向はU相側、W相側の両側とも同じであるが、圧延方向に対する回転磁束の傾き角が異なるため、磁化過程がU相側、W相側で違ってくるためである。

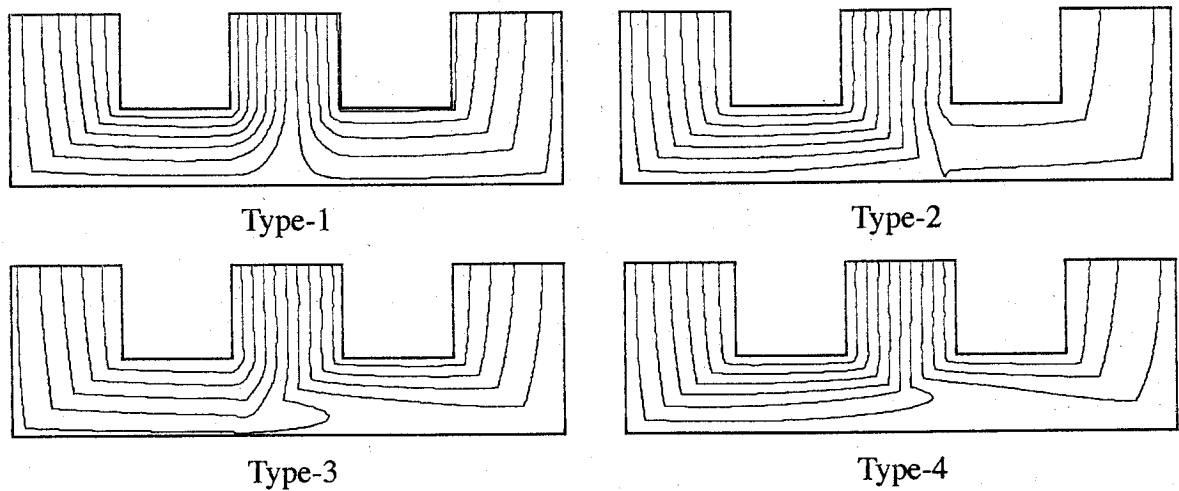


Fig. 4. 2. 3 Magnetic flux distributions. ($\omega t=0[\text{deg.}]$)

次に Fig. 4. 2. 4 ~ Fig. 4. 2. 7 にそれぞれ、同じ強制電流下におけるT接合部における磁束密度及び磁界強度の軌跡分布を示す。Type-1は Fig. 4. 2. 4 に示すようにU、W相両側において 90° 接合のためT接合部での磁束の流れが悪く軌跡に歪みが生じており、結果的に磁界強度の軌跡分布は圧延方向に垂直な交番磁界となっている。Type-2は Fig. 4. 2. 5 に示すようにU相側の 45° 接合部での磁束の流れは悪くないが、W相側の 90° 接合部での磁束及び磁界強度の軌跡は歪みが激しくなっている。Type-3の場合もType-2と同様、Fig. 4. 2. 6 に示すように 90° 接合部での磁束及び磁界強度の軌跡の歪みが大きい。Fig. 4. 2. 7 に示すようにType-4の場合が4種類の接合法の中で最もT接合部での磁束の流れが良く、磁束の歪みが少ない。ただし、この接合法の場合はT接合部中心において大きな回転磁束が発生しており、そのためこの点における磁界強度も大きな回転磁界となっている。

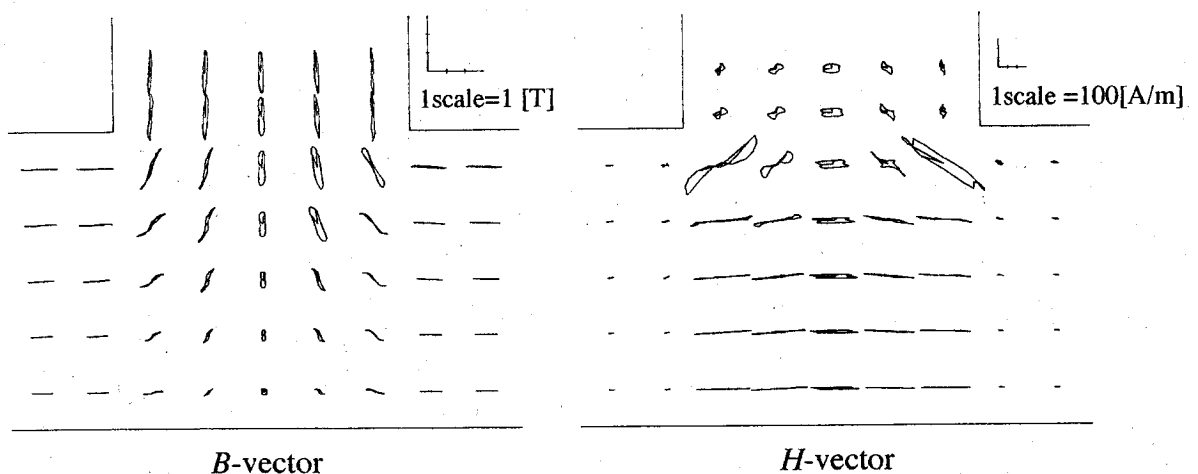


Fig. 4. 2. 4 Distributions of loci of B- and H-vector (Type-1).

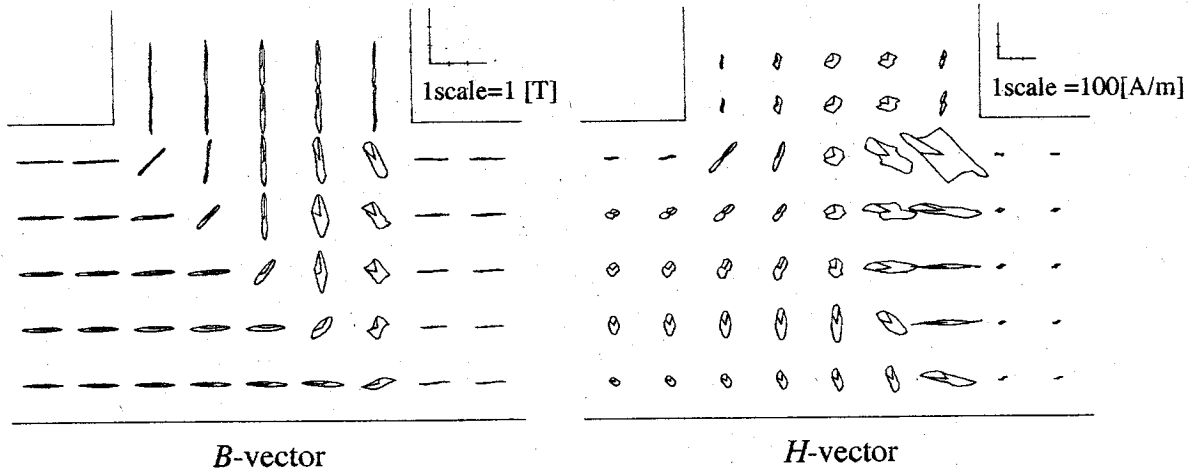


Fig. 4. 2. 5 Distributions of loci of B - and H -vector (Type-2).

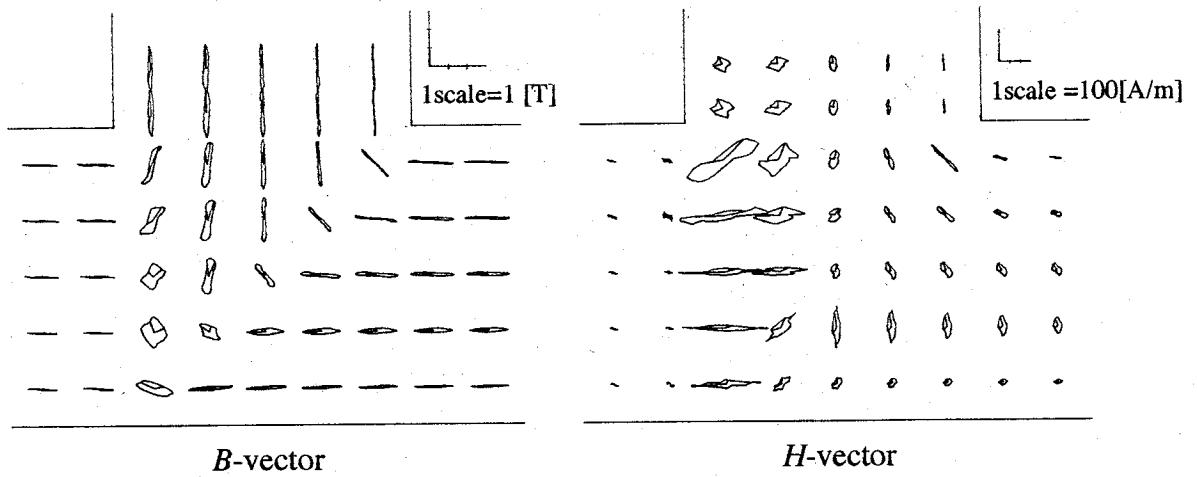


Fig. 4. 2. 6 Distributions of loci of B - and H -vector (Type-3).

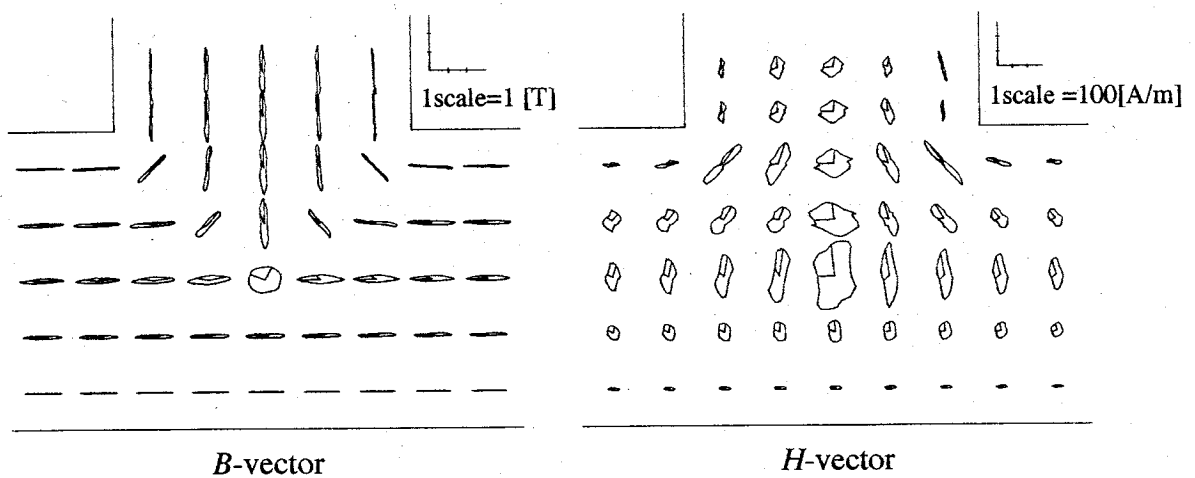


Fig. 4. 2. 7 Distributions of loci of B - and H -vector (Type-4).

4. 2. 3 鉄損分布と検討

前項でT接合部における接合法の違う4種類の三相変圧器鉄心を、過渡モデルを用いて解析を行った。そこで具体的にどの接合法が鉄損低減につながるのかを検討するため、前項で行った磁界解析から直接鉄損計算を行う。

同じ強制電流下における磁界解析結果から、(3.3.1)式を用いて直接計算した接合法の違う4種類の三相変圧器鉄心内の鉄損分布をFig. 4.2.8 ~ Fig. 4.2.11に示す。Type-1はFig. 4.2.8に示すように90°接合のT接合部における鉄損が異常に

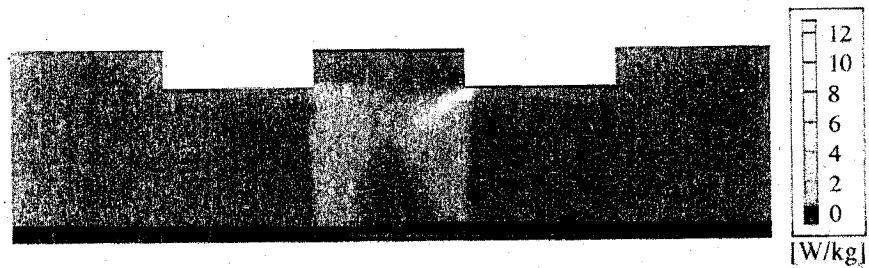


Fig. 4. 2. 8 Distribution of iron loss (Type-1).

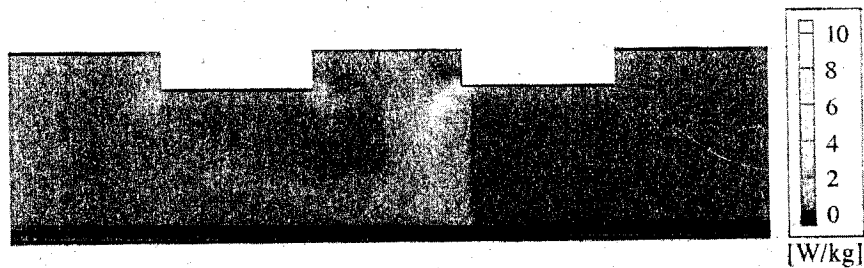


Fig. 4. 2. 9 Distribution of iron loss (Type-2).

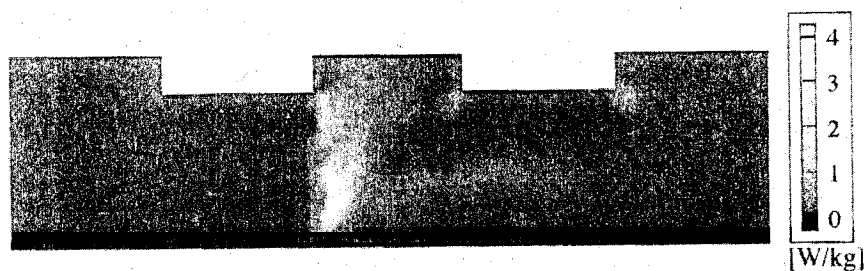


Fig. 4. 2. 10 Distribution of iron loss (Type-3).

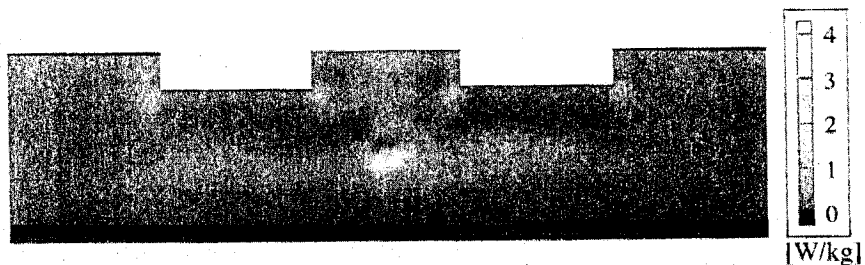


Fig. 4. 2. 11 Distribution of iron loss (Type-4).

高くなり、その他の部分での鉄損は逆に低くなっている。Type-2 及び Type-3 は Fig. 4.2.9、Fig. 4.2.10 に示すように、90° 接合の境界上で最も鉄損が高くなり、45° 接合部の方へと鉄損が広がる分布となっている。Type-2 と Type-3 の鉄損分布は傾向的には似通った分布となったが、Type-2 の鉄損の最大値は、Type-3 の鉄損の最大値の2倍近くにもなっている。Type-4 では Fig. 4.2.11 に示すように、変圧器の形に沿って広がる鉄損分布となっている。特に、磁界解析において回転磁束及び回転磁界が発生していた T 接合部中央にて鉄損値が最も高くなっている。

次に変圧器鉄損分布中の最大鉄損値と平均磁束密度の関係を Fig. 4.2.12 に示す。Type-4 の最大鉄損が常に低く、続いて Type-3、Type-2、Type-1 の順に最大鉄損が大きくなっており、接合法による違いが明確に現れた。この結果を見る限り、4種類の接合法のなかで Type-4 が最も鉄損値が小さく損失が少ないように見えるが、変圧器鉄心全体としての鉄損がどれだけ発生しているのか分からない。そこで、鉄心全体としての鉄損を全鉄損として次式のように定義する。

$$P_{total} = \rho \cdot D_p \cdot N_{os} \cdot \sum_{i=1}^{N_{es}} P_i \cdot S_i \quad [\text{W}] \quad (4.2.1)$$

ただし、 ρ は材料密度、 D_p は鋼板の厚み、 N_{os} は鋼板の積層枚数、 N_{es} は鉄心要素数、 P_i は要素内の鉄損、 S は要素の面積とする。鉄心材料に用いた方向性けい素鋼板 (23ZDKH90) の厚みは 0.23[mm]、密度は 7650[kg/m³] である。

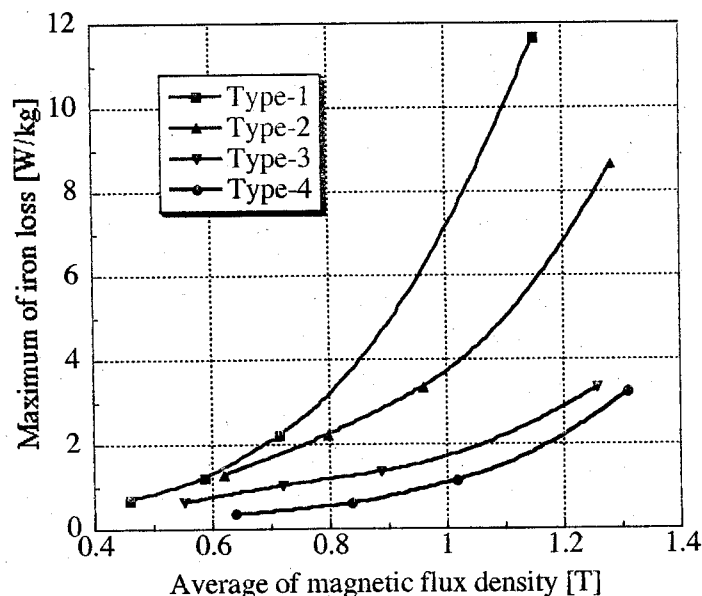


Fig. 4.2.12 Relation between maximum of iron loss and average of magnetic flux density.

(4.2.1)式を用いて接合法の異なる4種類の三相変圧器鉄心の全鉄損を計算した。各種変圧器の全鉄損と平均磁束密度の関係を Fig. 4.2.13 に示す。平均磁束密度は、Fig. 4.2.1 に示すモデル中の A-B 間の磁束密度を平均したものである。平均磁束密度が低い場合は Type-2 が最も全鉄損が小さく、平均磁束密度が高い場合は Type-4 が最も全鉄損が小さい。しかしながら各種の全鉄損の値にはそれほど開きがなく、似通った傾向を示している。これは全鉄損が鉄損分布の平均となるため、Fig. 4.2.8 に示す Type-1 のように鉄損が T 接合部付近で局所的に高くても、その他の場所の鉄損が低ければ結局全鉄損の値はそれほど高くないためである。そのため最大鉄損で比較する方が全鉄損の場合に比べ接合法の違いが明確となる。また Fig. 4.2.12 及び Fig. 4.2.13 の結果から Type-4 が4種類の中で最も低鉄損の接合法であると言える。

Type-4 が4種類の中で最も鉄損が低くなった理由は、 45° 接合による磁束の流れの向上であると言える。 90° 接合の場合は磁束及び磁界強度の軌跡の歪みが大きくなり、鉄損も大きくなっている。しかしながら以上の結果だけでは 45° 接合が最適な接合法であるとは言えず、様々な角度の接合法を検討する必要がある。

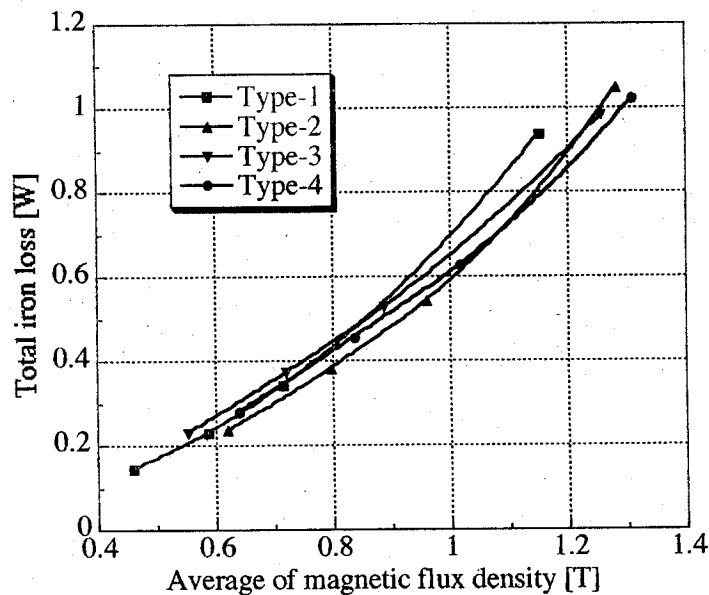


Fig. 4.2.13 Relation between total iron loss and average of magnetic flux density.

第 4 . 3 節 結 言

本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を行った。以下に要約する。

- (1) 変圧器鉄心に用いられている方向性けい素鋼板は圧延方向（磁化容易方向）の磁気特性に優れているが、圧延方向に垂直な方向（磁化困難方向）の磁気特性は非常に悪い。そのためT接合部にて 90° 接合を行うと、 45° 接合に比べ圧延方向に垂直な方向への磁界印加が多いため磁束の流れが悪く、磁束密度及び磁界強度に歪みを発生させる。
- (2) 全鉄損を用いた接合法の違いによる鉄損の変化はそれほど見られない。これは全鉄損が鉄心内の鉄損の平均を求めているからであり、そのため鉄損分布において局所的に鉄損が大きくても全鉄損はそれほど高くない。最大鉄損を用いて比較すると、 90° 接合に比べて 45° 接合の方が鉄損低減となることが分かる。またType-2とType-3は 90° 接合と 45° 接合の複合接合で接合方法が互いに逆の場合だが、Type-3の方がType-2よりも鉄損が低い。これはU相側とW相側での磁化過程が異なるためである。このことはすなわち、電気機器鉄心に使われている磁性材料の磁気特性を正確に把握した上で、それをどのように用いるかを検討する必要性があることを示す。これはまた電気機器の最適設計技術にベクトル磁気特性を考慮した有限要素磁界解析が有用であることを示した。