UDC 621.314.21.025.3.042.1: (621.3.013.23+621.3.017.3

論 文

50-B 55

3 相 3 脚モデル変圧器鉄心の T 接合部における回転磁束分布と鉄損分布

九州大学 成 田 賢 仁
九州大学 山 口 俊 尚
九州大学 千 田 功

1. ま え が き

3 相 3 脚変圧器鉄心の T 接合部においては回転磁束が発生しており、また、磁束波形に含まれる高調波成分が脚部のそれに比べて多いことは従来からある程度知られている。このような磁束分布の乱れは T 接合部にかなり大きい局部鉄損をもたらすと同時に、最近特に問題となっている変圧器騒音の主因である鉄心の磁気振動⁽¹⁾にも関係しているものと思われる。近年、方向性けい素鋼板の製造技術は著しい進歩をとげ圧延方向に対してきわめてすぐれた鉄損および磁気ひずみ特性を有する鋼板が得られるに至っているが⁽²⁾、これらの鋼板においては、圧延方向に直角な磁束成分が存在する場合、鉄損、磁気ひずみとともに大幅に増加する。したがって、このような鋼板のすぐれた特性を十分に生かした鉄心設計を行なうためには、 T 接合部などの局部的な磁束の乱れに対しても慎重な配慮をする必要があらう。

かかる問題に有効に対処するためには、 T 接合部の磁気状態についての定性的な知識を有しているだけでは十分とはいえず、磁束分布や鉄損分布を詳細に知る必要がある。しかるにこれらについての定量的な研究は従来ほとんど⁽³⁾見られなかった。

筆者らは上記の観点からこの問題に注目し、これまで幾種類かのモデル鉄心について T 接合部の回転磁束

および鉄損分布の詳細な測定を行なってきた^{(4)~(6)}。

本論文はこれらの結果を総括したもので、まず無方向性けい素鋼板を用いたモデル鉄心により T 接合部の基本的性質を明らかにしたうえで、最近、わが国で開発された結晶配向性のきわめてすぐれたけい素鋼板を用いた 2 種類のモデル鉄心における T 接合部の状態を測定し、それらの比較・検討を行なった。なお、最近 Moses 氏ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾も T 接合部の磁束および鉄損分布に関する報告を行なっているが、筆者らの行なってきた研究とは、鉄心材料、鉄心の構成方法および測定法などに相異があり、測定結果にも後述するようかなり大幅な差異が認められた。

2. モデル鉄心および測定方法

〈2・1〉 モデル鉄心 T 接合部の磁束および鉄損分布は接合部の構成方式や鋼板の種類によってかなり異なると思われたので、次のような 3 種類のモデル鉄心を作成した。

I 形…… T 接合部の基本的性質を知るために、無方向性けい素鋼板 (S14 級, 0.35 mm) を用いて作成した鉄心。 T 接合部および肩部ともに 90° 重ね接合とした。

II 形……実際にひんばんに使用されている形式の鉄心構造で、第 1 図 (a) に示されているように、 T 接合部および肩部ともに 45° 重ね接合とした鉄心。鉄心材料としてはすぐれた方向性をもつハイビーけい素鋼板 (G9 相当, 0.35 mm) を用いた。

III 形……鉄心材料および肩部の構成は II 形と同じとし、 T 接合部を第 1 図 (b) に示されているように 90° 重ね接合とした鉄心。

Distributions of Rotating Flux and Iron Loss in the T-joints of Three-phase Three-limbed Model Transformer Cores. By K. NARITA, Member, T. YAMAGUCHI, Member & I. CHIDA, Associate (Faculty of Engineering, Kyushu University).

成田賢仁：正員，九州大学工学部電気工学科教授
山口俊尚：正員，九州大学工学部電気工学科助手
千田 功：准員，九州大学工学部電気工学科教官

第 1 図 モデル鉄心の構成

Fig. 1. Structures of the model cores.

第 2 図 直交さぐりコイル配置図

Fig. 2. Positions of the orthogonal search coils.

なお、Ⅱ形のほかに 45°-90° T 接合部方式も多く実用的に用いられており、45° 接合方式との優劣は断定し難いものがあるが、本論文では最も基本的な形と思われる 45° および 90° 接合方式のみについて検討を行った。

いずれの形式についても外形寸法は同一とし、鋼板の積層数は 32 とした。また、45° 接合部の重ね幅は 5mm とした。励磁巻線はほぼ脚全長にわたる長さのわくに均等に巻き、 γ 結線とした。

〈2・2〉 回転磁束分布測定法 T 接合部の磁束ベクトルの分布を測定するために、この部分に第 2 図に示されたような直径 1mm の穴を 12.5mm 間隔に鉄心の中心線に対して左右対称にあげ、破線で例示したような幅 25mm, 5 回巻の直交さぐりコイル対を 12.5mm 間隔に全部で 23 個所に施した。磁束分布を詳細に知るためにはさぐりコイルの間隔は小さい方が望ましいが、穴の間隔を小さく取りすぎると本来の磁束分布を損うおそれがあるので上記の間隔にとどめ、また加工に当っては穴周囲に大きなひずみを生じないように注意を払った（なお、後述する鉄損分布の測定に用いた鋼板には上述のような加工は全く施していない）。さぐりコイルを巻く鋼板の層数は、Ⅰ形では 4 層、Ⅱ形では 8 層、Ⅲ形では〈3・3〉節で述べるような理由で

2 層とし、Ⅲ形の場合を除いてさぐりコイルを施した鋼板を上層に置き、これを含めた全層数をいずれの形式についても 32 とした。なお、第 2 図に示したように横方向ならびに縦方向の磁束を検出するためのさぐりコイルをそれぞれ X さぐりコイル、 Y さぐりコイルと呼ぶ。

各点の X , Y さぐりコイルの出力電圧はサンプリング変換器を通して記録し、それを電子計算機を用いてフーリエ解析したのち積分し、その結果を計算機の X - Y プロッタの X , Y 軸にそれぞれ入力して各点での磁束密度ベクトルの軌跡を描かせた。

なお、 T 接合部とその近傍における位置表示のため第 2 図に示したように 12.5mm 間隔に縦方向および横方向にそれぞれ $A \sim D$ および 1~6 などの符号を付けた直線をひき、それらの交点上の位置をたとえば $A1$ などと名づけた。

〈2・3〉 鉄損分布測定法 鉄損分布の測定は熱電対法⁽⁹⁾によるのが最適と思われるのでこれを用いた。

一般に場所によって異なる損失 $w(r)$ (W/kg) が発生している一枚の鋼板中のある場所における温度 T (°C) の変化は次の熱伝導方程式で表わされる。

$$\frac{k}{g} \nabla^2 T + \frac{1}{4.19} w(r) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k : 鋼板の熱伝導率、 g : その密度、 C : その比熱 (cal/deg·kg), t : 励磁開始後の時間 (s), 4.19: 熱の仕事当量

励磁開始前に鋼板の温度が一様であったとすれば、励磁開始後の初期の範囲では拡散項 $(k/g) \nabla^2 T$ は $w(r)/4.19$ に比べて十分小さいと見なせるので⁽⁹⁾、次式から近似的に局部鉄損 $w(r)$ が求められる。

$$w(r) = 4.19 \times C \frac{dT}{dt} \text{ (W/kg)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

実際には、励磁開始後約 10 秒程度以内の T - t 曲線の直線領域において dT/dt を決定した。

上記の原理を用いて局部鉄損の測定を行なうためには鉄心に生ずる 0.005°C 程度の温度変化を測定する必要があるため、次のような対策を施した。

(1) 2 個の銅-コンスタンタン熱電対を差動的に接続し、一方を鉄心の中央脚の中心に、他方を T 接合部の被測定点に貼り付け、両点の温度変化の差を測定することにより測定の安定化をはかった。もちろん、この結果から得られるのは両点に発生する鉄損の差であるから、別に脚の中心における鉄損のみを注意深く測定しこれに加算した。

(2) 熱電対は最上層の鋼板の表面に貼り付けたが表面からの対流などによる熱放散を防ぐために約 10

第 3 図 層による磁束密度の変化
(I 形, $B_t=15\text{kG}$)

Fig. 3. Variation of flux density in different layers.

mm 厚の発ぼうスチロール板で鉄心を囲んだ。

(3) 熱起電力の増幅は高利得(電圧増幅率 5×10^5)でかつ本測定に必要な応答速度をもつ検流計増幅器⁽⁹⁾を用いて行なった。

比熱 C の値としては 0.116×10^3 を用いた。そのほか、熱電対法による鉄損測定にあたっての諸問題に関しては、すでに著者の一人が発表している研究⁽⁹⁾に基づいて十分な注意を払った。

なお、上に述べたように熱電対は最上層の鋼板に貼り付けたが、これは熱電対を中間層にそう入した場合熱電対の厚みにより積層のずれが生ずるためである。この場合、最上層鋼板の磁束分布が鉄心全体のそれを代表しうるか否かを一応調べる必要がある。そこで I 形鉄心について、その一層の継鉄部および脚部鋼板に 0.05mm 銅線で一回巻のさぐりコイルを施し、それをそう入する層を順次変化させて誘起電圧とその波形の変化を測定した。第 3 図はそう入された層(最上層は 1 で最下層は 32 で示す)と最大磁束密度(中央層にそう入した場合を基準として百分率で表示)の関係を示すが、最大磁束密度の変化は中央層を基準として 5% 以内に、平均値を基準とすれば 3.5% 以内にあることがわかる。一方、磁束波形については、しゃへい効果のため中央層に近いほどリップル分および磁束密度の最大変化率 $(dB/dt)_{\max}$ が抑えられる傾向が見られたが、磁束波形のひずみ率の変化は 15kG において 0.8% 以内であった。これらの結果から、最上層における鉄損分布が鉄心全体のそれをほぼ代表しているものと見なしてさしつかえないと思われる。

3. 回転磁束分布測定結果とその検討

以下に〈2.2〉節で述べた方法によって描かせた各形式の鉄心の T 接合部における磁束密度ベクトルの軌跡と、磁束に含有される高調成分の分布を示し、鉄心の形式によるそれらの相異、特徴を比較・検討する。こ

こで、回転磁束のひずみ率 H は通常のひずみ波のそれに準じて、次式により定義した。

$$H = \sqrt{\frac{\sum_{n=3}^m (B_{nx}^2 + B_{ny}^2)}{B_{1x}^2 + B_{1y}^2}} \times 100\% \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 B_{nx} , B_{ny} はそれぞれ磁束密度ベクトルの横方向および縦方向成分中の n 次調波分を示し、第 9 調波までとった。脚磁束密度 (B_l) は脚のほぼ全長にわたって巻かれた 2 次巻線によって測定し、無方向性けい素鋼板を用いた鉄心では 15kG まで、方向性けい素鋼板を用いた鉄心では 17kG までとしたが、この範囲では脚磁束波形のひずみ率は 0.7% 以内であった。なお、励磁電源の周波数は 60Hz である。

〈3.1〉 I 形鉄心の場合 第 4 図は、I 形鉄心の T 接合部における磁束密度ベクトルの軌跡の分布を示す。ここでベクトルの原点は各さぐりコイル対の中心すなわち A1~D5 の各点である。この図において内側の軌跡は B_l が 10kG の場合、外側のそれは 15kG の場合である。この図から A5 点付近ではほぼ円形の回転磁束が生じており、これより脚側では縦に長いだ円磁束が生じて、その反対側では横に長いだ円磁束が生じて

第 4 図 I 形鉄心における磁束密度ベクトル軌跡の分布 ($B_l=10, 15\text{kG}$)

Fig. 4. Spatial variation of the locus of the flux-density vector in type I core.

第 5 図 I 形鉄心における磁束波形ひずみ率の分布 ($B_t=15\text{kG}$)

Fig. 5. Distribution of the harmonic flux content in the type I core.

いることがわかる。また、D1~5, C6 などの点では最大磁束密度は B_t にほぼ等しいが、他の点ではこれより小さく、特に A1~3 では約 $0.72B_t$ とかなり小さくなっている。これらの特徴は、最近、中田氏ら⁽¹⁰⁾により発表された解析結果と基本的には一致しており T 接合部における基本的な磁束分布を示しているものと考えられる。

第 5 図には $B_t=15\text{kG}$ の場合について、磁束波形のひずみ率の分布を示す。全体として 10% 弱のひずみ率であるが、コーナ部の C5~6 付近では 13% 強とやや大きくなっている。これらの高調波磁束の大部分は第 3 調波で、最もひずみ率の大きい C5 点でも第 5 次および第 7 次の高調波はそれぞれ基本波に対して 5.2% および 1.7% であった。

〈3・2〉 II 形鉄心の場合 第 6 図に II 形鉄心における $B_t=10\text{kG}$ (内側) および 17kG (外側) の場合の磁束密度ベクトルの軌跡の分布を示す。II 形鉄心の場合 A2, B4, C5 を結ぶ 45° 接合線より脚側では鋼板の圧延方向が縦方向に、継鉄側では横方向に向いているので、磁束ベクトルの軌跡は鋼板の磁気異方性の影響を受けて、I 形のそれと比較すると著しく扁平なだ円となっており、その長軸は圧延方向にほぼ平行になっていることが認められる。回転磁束成分を最も多く含んでいるのは A4 点で、この点での磁束の基本波成分は (短軸/長軸) 比が 0.34 のだ円となっている。B4 および C5 で長軸が約 45° 傾斜しているのは、これらの場所では第 2 図からもわかるように縦方向と横方向の鋼板にまたがってさぐりコイルが巻かれているためであろう。最大磁束密度は I 形の場合と異なってほとんどの場所で B_t の値にほぼ等しい。

第 7 図はひずみ率の分布を示すが、これによれば、C6, D5 などのコーナ部、 45° 接合線上および A1, A2 付近でひずみ率が 18~20% と相対的に大きく、3 列

第 6 図 II 形鉄心における磁束密度ベクトル軌跡の分布 ($B_t=10, 17\text{kG}$)

Fig. 6. Spatial variation of the locus of the flux-density vector in the type II core.

第 7 図 II 形鉄心における磁束波形ひずみ率の分布 ($B_t=17\text{kG}$)

Fig. 7. Distribution of the harmonic flux content in type II core.

上の各点で小さいことが認められる。また、全体的に、磁束の圧延方向に直角な成分は圧延方向の成分に比べてひずみ率が大きく、かつ次数の高い高調波成分を多く含む傾向が見られることが明らかとなった。たとえば A4 点では圧延方向の成分のひずみ率が 1.4% であるのに対し、圧延方向に直角な成分のそれは 30% であった。

〈3・3〉 III 形鉄心の場合 III 形鉄心の T 接合部では層ごとに鋼板の圧延方向が交互に縦・横にかわっているため、磁束分布も層ごとに異なっていると考えられる。そこで、縦・横それぞれについて同方向の鋼板を2枚重ねたものにさぐりコイルを巻き、これらを層間にはさんで磁束分布を測定した。

第8図に $B_t=17\text{ kG}$ の場合について、圧延方向が横方向となっている層（横方向板と呼ぶ）の磁束密度ベクトルの軌跡を実線で、縦方向となっている層（縦方向板と呼ぶ）のそれを点線で示した。磁束の横方向の成分は横方向板に、縦方向の成分は縦方向板に集中する傾向があり、そのためたとえば横方向板ではD列で、縦方向板では6列で最大磁束密度が19~20 kGに達するなど全体として圧延方向の磁束密度がかなり大きくなっていることが認められる。これに加えて、鋼板の飽和特性によってこの磁束集中化の傾向には限界があるため、圧延に直角な方向の磁束密度も、たとえば横方向板のA5点で13 kGに達するなど、II形鉄心の場合に比べて大幅に増加している。

第9図(a), (b)にそれぞれ横方向板および縦方向

第8図 III形鉄心における磁束密度ベクトル軌跡の分布（実線：横方向板，点線：縦方向板， $B_t=17\text{ kG}$ ）

Fig. 8. Spatial variation of the locus of the flux-density vector in type III core.

(a) III形鉄心の横方向板における磁束波形ひずみ率の分布 ($B_t=17\text{ kG}$)

(a) Distribution of the harmonic flux content in the transverse lamination of type III core.

(b) III形鉄心の縦方向板における磁束波形ひずみ率の分布 ($B_t=17\text{ kG}$)

(b) Distribution of the harmonic flux content in the longitudinal lamination of type III core.

第9図

Fig. 9.

板における磁束のひずみ率の分布を示す。上述の磁束集中による最大磁束密度の増加および圧延に直角な方向の磁束密度の増加などの影響で、たとえば横方向板では6列で、縦方向板ではD列で35%以上の大きさに達するなど、全体としてII形鉄心の場合に比べて著しくひずみ率が高いことが認められる。

以上のような磁束分布が T 接合部の局部鉄損に及ぼす影響については次節で検討するが、ここでは磁わい振動に及ぼす影響について簡単に触れる。第6図および第8図に見られたように $B_t=17\text{ kG}$ においてII形鉄心のA4, B3, C3, D3などの点で5~6.5 kGの、またIII形鉄心の T 接合部上の多くの点で8~13 kGの圧延方向に直角な磁束が発生している。ここで用いられたような結晶配向性の極めてすぐれた鋼板では圧延方向の磁化過程はほとんど 180° 磁壁の移動によるため磁気ひずみは小さいが⁽²⁾、圧延に直角な方向の磁化過程は磁束密度の小さい範囲でもほとんど 90° 磁区の成長によって進行するため⁽¹¹⁾、磁気ひずみは大きくなる。また、第7図および第9図に見られたような大きい高調波磁束は高い周波数の磁わい振動を誘起するで

あろう。このような点から、すぐれた方向性を有するけい素鋼板を使用した3相3脚鉄心では、磁わい振動の励振源としてT接合部の果す相対的な役割は小さくないものと思われる。

4. 鉄損分布測定結果とその検討

前節で明らかにされたような磁束分布の乱れは、T接合部にかなり大きい局部鉄損を発生せしめるものと思われる。前節の結果から鉄損の増加をもたらすと考えられる要因を列挙してみる。

(1) 回転磁束の発生 このことは方向性けい素鋼板では圧延方向に直角な磁束の発生を意味するので鉄損に及ぼす影響は大きいものと考えられる。

(2) II形鉄心に特に顕著に見られたような磁束の集中現象による最大磁束密度の増大。

(3) 磁束波形のひずみ。

(4) 鋼板の継ぎ目などでの磁束のわたりに伴う鋼板面に垂直な磁束の発生⁽⁷⁾⁽⁸⁾。磁束の集中現象が顕著な場合は磁束のわたりも大きいであろう。

以下に〈2・3〉節に述べた方法に従って測定した各鉄心のT接合部における鉄損分布を示し、磁束分布測定結果との比較を行なって上記の諸要因がどのように影響しているかを定性的に検討する。

〈4・1〉 I形鉄心の場合 第10図にI形鉄心のT接合部における $B_t=15\text{kG}$ での鉄損分布を示す。S種のけい素鋼板にも多少の方向性があるため熱電対を縦方向板に貼り付けた場合と、横方向板に貼り付けた場合とで鉄損分布に多少の相異が認められたが、第10図には両者の平均値を示した。中央脚の中心における鉄損 (W_0) は 2.5W/kg であった。

D列上では鉄損が平均 3.4W/kg とかなり大きい値

を示しているが、これは継ぎ目での磁束のわたりのためであろう。また、 $B5\sim6$, $C5\sim6$ 付近でもかなり大きい鉄損が発生しているがこれは第5図に見られるように磁束のひずみ率が比較的大きく、かつ継ぎ目での磁束のわたりの影響も加わっているためと思われる。 $A4\sim5$ 付近では最大磁束密度は約 $0.75B_t$ と小さく、磁束のひずみ率も $5.9\sim7.7\%$ と比較的小さいにもかかわらず鉄損が $2.8\sim3.1\text{W/kg}$ とかなり大きいのはこの付近で円に近い回転磁束が発生しているためと考えられる。すなわち、この種の鋼板では磁束密度が、 0.75 倍となった場合交番磁界鉄損は約 0.57 倍となり⁽¹²⁾、無方向性けい素鋼板では磁束密度 11kG で回転磁束下と交番磁束下での鉄損の比が約2であるとすれば⁽¹³⁾、 $0.57 \times 2 \times W_0 = 2.85\text{W/kg}$ としてほぼ上記の値が説明できる。一方、 $A1\sim2$ 付近で 2.1W/kg と W_0 より小さくなっているのは最大磁束密度が小さいためであろう。T接合部 (D列と6列で区切られる正方形の領域を指す) の平均鉄損は 3.1W/kg ($=1.2W_0$) であった。

〈4・2〉 II形鉄心の場合 第11図にII形鉄心について $B_t=17\text{kG}$ における鉄損分布を示す。この場合、 W_0 は 1.32W/kg であった。この図から $A3$, $B4$, $C5$ 点を結ぶ接合線上とその近傍 $A4$, $B3$ などの点で特に大きい鉄損が発生していることが認められるが、これは磁束のわたりの影響に加えて、この付近ではかなりの大きさの圧延方向に直角な成分をもつ円磁束が発生していること、磁束のひずみ率が $10\sim20\%$ と大きいことなどの諸要因が重畳されているためと思われる。最も鉄損が大きい点は 45° 接合線の交点にあたる $A3$ で、 3.7W/kg であった。また、T接合部における平均鉄損は 2.4W/kg ($=1.8W_0$) であった。

第10図 I形鉄心のT接合部における鉄損分布 ($B_t=15\text{kG}$)

Fig. 10. Distribution of the localized iron loss in the T-joint of type I core.

第11図 II形鉄心のT接合部における鉄損分布 ($B_t=17\text{kG}$)

Fig. 11. Distribution of the localized iron loss in the T-joint of type II core.

〈4・3〉 III 形鉄心の場合 III 形鉄心の場合、縦方向板と横方向板で鉄損分布が大きく異なり、これらが交互に密着して積層されているから、層間の熱伝導が無視できず、個別の鉄損分布を正確に測定することは困難であることがわかった。そこで第 12 図には I 形鉄心の場合と同様に縦および横方向板にそれぞれ熱電対を貼り付けて測定した結果の平均値の分布を示した。この図から全体として II 形の場合に比べてかなり大きい鉄損が発生していることが認められるが、これは前に述べたように磁束の集中化が生ずる結果、最大磁束密度、圧延方向に直角な磁束、磁束のひずみ率および層間の磁束のわたりが II 形のそれに比べてかなり増加しているためであろう。特に鉄損が大きい部分は D 列および 6 列の接合線上、ならびにそれらに隣接した C 列および 5 列の上である。これは D 列、6 列上では磁束のわたりの影響に加えて第 9 図に見られたように磁束のひずみ率が 35% 以上と大きいこと、また C 列、5 列上では第 8 図に見られたように圧延に直角な方向の磁束密度が最も大きい点で 13 kG に達するなどかなり大きいことが特に主な原因になっているためと思われる。鉄損の最大値は A5 点における 4.1 W/kg であった。また、T 接合部における平均鉄損は 3.2 W/kg でこれは $W_0 (=1.32 \text{ W/kg})$ の 2.4 倍であった。

なお、II 形および III 形鉄心における局部鉄損に及ぼす回転磁束の影響については、この種の方向性けい素鋼板における回転磁界鉄損の測定例が少なく⁽¹³⁾、またひずんだ円磁束下での鉄損について明りょうな知見が得られていないため、本段階においては定量的評価ができなかった。しかし、一例として III 形鉄心の横方向板の A5 点では回転磁束の圧延に直角な方向の成分は最大 13 kG であり、この磁束密度での圧延に直角な方向の交番磁界鉄損が約 2.8 W/kg である⁽¹⁴⁾ことを

第 12 図 III 形鉄心の T 接合部における鉄損分布 ($B_t = 17 \text{ kG}$)

Fig. 12. Distribution of the localized iron loss in the T-joint of the type III core.

考慮すると、上に述べた A5 点における鉄損 4.1 W/kg に与えている回転磁束発生の影響は相当に大きいものと推測される。

5. む す び

以上に述べた実験により、基本的な 3 種の 3 相 3 脚モデル変圧器鉄心の T 接合部における磁束ベクトルの軌跡および局部鉄損の分布の詳細が明らかにされたがこれらは次のように要約されよう。

(1) 無方向性けい素鋼板を用いた鉄心においては T 接合部の中心点から、やや中央脚方向にはいった位置ではほぼ円形の回転磁束が生じ、この位置から離れるに従って磁束は次第に扁平な円となっている。中央脚中心線の延長上とその近傍では最大磁束密度は脚磁束密度よりかなり小さい。これに対し、方向性けい素鋼板を用いた鉄心においては磁束ベクトルの方向は鋼板の磁気異方性に強く支配され、圧延方向に長軸を持つ著しく扁平な円磁束が生じている。しかし、いずれのモデル鉄心についても、回転磁束は T 接合部全体にわたる広範な領域で発生していることがわかった。Moses 氏ら⁽⁸⁾は 45° 接合方式および 45°-90° 接合方式の T 接合部について、回転磁束は鋼板の重ね部分を中心とするきわめて限定された領域でのみ発生している旨を報告しているが、これは上に述べたわれわれの測定結果と大幅に異なる。両者の相異は、鉄心材料、鉄心構成法および測定法の相異に起因するものと思われるが、最近発表された中田氏ら⁽¹⁰⁾の磁束分布解析結果は、われわれの測定結果ときわめてよく一致している。

(2) 方向性けい素鋼板を用いた鉄心においては、T 接合部を 45° 接合とした場合は鋼板の圧延方向にそって比較的一様な磁束分布が生じているのに対し、90° 接合とした場合は層ごとの磁束の集中化が生じるため、最大磁束密度、磁束波形のひずみ率および圧延に直角な方向の磁束密度などが前者に比較して大きくなっている。

(3) このような磁束分布に対応して方向性けい素鋼板を用いた鉄心においては脚磁束密度が 17 kG の場合、T 接合部の平均鉄損は 45° 接合方式では脚部鉄損の約 1.8 倍、90° 接合方式では約 2.4 倍であった。ここで用いたモデル鉄心のような寸法構成の場合、T 接合部の体積は鉄心全体積の約 9% であることを考慮すると T 接合部における鉄損の増加分が鉄心の全鉄損中に占める割合は 45° 接合の場合約 7.2%、90° 接合の場合約 13% であるが、これらの値は変圧器磁心鉄損のエプスタイン試験値からの増加分のうちのかなりの

部分を説明できよう。なお、上述の値は Moses 氏ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾の報告している値に比べてかなり大きいものであるが、この相異も前述の磁束分布の場合と同様の原因によるものであろう。

また、 T 接合部における磁束分布が変圧器騒音の主因である鉄心の磁わい振動に与える影響について今後検討する必要があると思われる。

終わりに、本研究にあたり電算機によるデータ処理についてご援助をいただいた岡山大学の石原好之氏、鉄心の作成にご協力をいただいた大阪変圧器株式会社および安川電機株式会社の各位に厚く感謝の意を表する。
(昭和 49 年 10 月 11 日 受付)

文 献

- (1) IEEE Committee: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. **87**, 2, 372 (1968)
- (2) T. Yamamoto, et al.: IEEE Trans. Magnetic **8**, 677 (1972)
- (3) A. Kozłowska: Acta Technica Čsava **6**, 624 (1970)
- (4) 成田, 他: 昭47電気四学会九州支部連大 No. 561
- (5) 成田, 他: 昭48電気学会全国大会 No. 229
- (6) 成田: 電気学会磁性材料研資 MAG 74-10 (昭 49)
- (7) A. J. Moses, et al.: IEEE Trans. Magnetic **8**, 4, 785 (1972)
- (8) A. J. Moses, et al.: IEEE Trans. Magnetic **9**, 4, 655 (1973)
- (9) 成田, 他: 電気学会論文誌 **94-A**, 167 (昭 49-4)
- (10) 中田, 他: 電気学会磁性材料研資 MAG 74-8 (昭 49)
- (11) 成田, 他: 電気学会磁性材料研資 MAG 74-9 (昭 49)
- (12) 新日鉄カタログ (HILITE COR)
- (13) C. R. Boon, et al.: Proc Inst. Elect. Engrs **112**, 11, 2147 (1965)
- (14) 新日鉄カタログ(ハイビー)