

JFE スチールの変圧器特性解析技術

Evaluation and Analysis Techniques of Transformer Performances in JFE Steel

岡部 誠司 OKABE Seiji JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副部長)
大村 健 OMURA Takeshi JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (副課長)
井上 博貴 INOUE Hiroataka JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (係長)

要旨

JFE スチールでは、モデル変圧器を用いて方向性電磁鋼板の主な用途である変圧器の鉄損と騒音の調査、解析を行なっている。本論文では、モデル変圧器において鉄損と鉄心振動を局所的に測定する技術について述べる。変圧器の鉄損を解析するため、探針とホールプローブを用いた局所磁気測定により、三相積鉄心における磁束密度と鉄損の分布を調査している。さらに、赤外線サーモグラフィによる鉄損測定方法の開発により、鉄心の接合部近傍における局所的な鉄損増大を可視化した。騒音の解析では、レーザ振動計により鉄心の局所振動を三次元的に測定し、三相励磁による鉄心の振動挙動を明らかにした。また、変圧器の励磁条件の影響調査の一つとして、直流偏磁条件における鉄損と騒音を測定した。

Abstract:

Iron losses and acoustic noise in transformers are analyzed using model transformers in JFE Steel. In this paper, techniques to measure local iron losses and vibrations in the model transformer core are described. Distributions of magnetic fluxes and iron losses in three-phase stacked cores are analyzed using stylus probes and a hall probe. In addition, development of iron loss measuring technique using infrared thermograph enabled to visualize iron loss increase near the joint in cores. Three dimensional measurement using laser vibrometer helped clarify the vibration behaviors of the cores under three phase excitation. As one of the investigations of effects of excitation conditions, iron loss and acoustic noise are measured under direct current (DC) biased excitation.

1. はじめに

JFE スチールが製造する方向性電磁鋼板は、主に電力用の変圧器の鉄心に用いられており、変圧器の特性に直結する重要な素材である。近年の世界的な環境保全への認識の高まり、およびそれに対応する規制強化のため、変圧器に対する省エネルギー化のニーズはますます高まってきている¹⁾。変圧器のエネルギー効率に大きく影響する方向性電磁鋼板に対しても、鉄心で生じるエネルギー損失、すなわち鉄損を低減することが常に求められている。その要求を満たすべく、さまざまな研究開発を進めているが、変圧器の鉄損は、通常、使用された方向性電磁鋼板の鉄損よりも増加する。したがって、素材の鉄損低減に加えて、変圧器に適用した際の鉄損増加の抑制も重要な開発課題である²⁾。そこで、JFE スチールにおいても、これまでにモデル変圧器を用いて、各種の調査、解析を行なってきた³⁾。

素材の測定時よりも変圧器における鉄損が増大する原因にはいろいろあるが、切断した方向性電磁鋼板を組み合わ

せて製作された鉄心では、複雑な磁束が局所的に生じることの影響も大きい²⁻⁵⁾。たとえば、磁束の回り込みや回転磁束の発生、磁束の部分的な集中、積層した鋼板間の磁束の渡りなどである。これらの影響を評価するためには、鉄心における局所的な磁束の測定が有用である。近年、電磁界解析の数値計算技術が進歩してきているが、方向性電磁鋼板における磁気特性の強い異方性や、多数の薄板の積層体である鉄心のモデル化などには、いまだ多くの課題があるため⁶⁾、実験による解析が依然として重要である。

変圧器の鉄心の局所的な磁束を測定するため、JFE スチールでは、絶縁被膜のついた方向性電磁鋼板を非破壊で測定できる探針法を開発し、応用してきた^{3,7)}。さらに、鉄損によって発生する熱を赤外線サーモグラフィにより測定することで鉄損分布を可視化する方法を開発した⁸⁾。これらの技術とその測定結果について、2章に述べる。

また、変圧器の低鉄損化と並んで、低騒音化も重要な環境対応技術の一つである⁹⁾。鉄心における変圧器騒音の発生原因としては、鋼板の磁化に伴う微小な伸縮、すなわち磁歪と、鋼板間に発生する電磁力による振動が主たるものと考えられている²⁾。これらがどのように騒音を生じさせる

かを理解するためには、鉄心の振動の形態を詳細に把握することが重要である。そこで、モデル変圧器の鉄心振動を測定し、振動の挙動を解析した^{9,22)}。その方法と結果について、3章に述べる。

さらに、十分に鉄損や騒音を考慮して設計、製作された変圧器であっても、その使用条件が鉄損や騒音に大きな影響を及ぼすことがある。近年のパワーエレクトロニクスの進歩と適用拡大により、電力用変圧器の鉄心の磁束に高調波や直流成分が重畳するケースが増えており、鉄損や騒音の増大が問題となる場合がある¹¹⁾。これらの現象の影響の評価や、鉄心材料による違いの検討においても、モデル変圧器を使った調査を行なっている。その例として、4章では、直流偏磁が可能なモデル変圧器を製作して鉄損と騒音の測定を行なった結果について述べる¹²⁾。

2. モデル変圧器の局所磁気特性の解析技術

2.1 探針法による局所磁束・鉄損測定

2.1.1 目的

変圧器の鉄心における局所的な磁束測定方法として探りコイル法が用いられているが、鋼板に穴をあける必要がある上、導線で生じる鋼板間の隙間のために磁束密度分布に影響が生じることが懸念される。これに対し、最近では非破壊で測定できる、探針を用いた方法が開発され、適用されてきている⁷⁾。JFE スチールでは、この探針法をモデル変圧器の鉄心における局所磁束の測定に用いる方法を開発し、磁束挙動の解析に用いている³⁾。以下に、3相積鉄心モデル変圧器の測定に適用した技術と、測定結果の例を示す。

2.1.2 測定装置

探針、およびホール素子を用いた鉄心局所磁気特性の測定原理を図1に示す。鉄心表面の鋼板に接触させた2本の探針間に生じる誘起電圧は、探針接触点の下部が挟む断面部分の1/2の面積に鎖交する磁束が誘起する電圧に等しいとする理論に基づいて、鉄心の局所磁束密度を求めた¹³⁾。探針間の距離は5mmとし、空隙補償コイルを設置した。

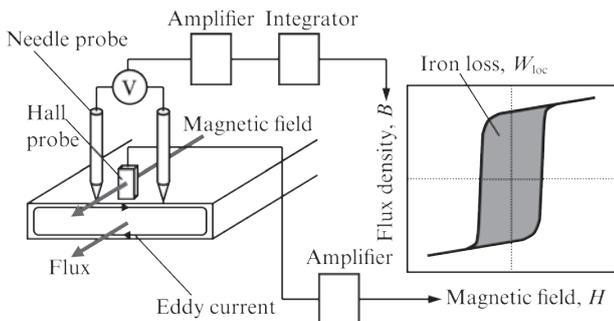


図1 探針法とホール素子による局所磁気測定方法

Fig. 1 Method of local magnetic measurement using needle probes and a Hall probe

鋼板表面の磁界強度は、感受部長さ約1mmの小型ホール素子によって測定した。感受部の中心と鋼板表面の距離は約0.5mmとした。探針とホール素子は90°回転でき、鋼板表面の2方向(x, y方向とする)の磁束密度および磁界強度を検出できる。また、鉄心表面の全面を測定できるように、これらのプローブをロボットアームに組み込み、鉄心表面の測定点を連続的にスキャンする機構を設けた。

磁束密度および磁界強度の信号はデジタルオシロスコープを用いて測定、記録した。各測定点における鉄損は、上記の磁束密度Bおよび磁界強度Hの波形により描かれるヒステリシスループの面積から次式によってx方向成分W_x、およびy方向成分W_yに分けて計算し、その和を2次元局所鉄損W_{2d}とした。

$$W_{2d} = (f/\rho) \int H \cdot dB = W_x + W_y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$W_i = (f/\rho) \int H_i dB_i \quad (i: x, y) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、fは励磁周波数、ρは電磁鋼板の密度を示す。周回積分は励磁周期1回分について行なう。

モデル変圧器は3相3脚の積鉄心で、幅100mmの脚およびヨークで構成される。外形は一辺500mmの正方形、積層厚は約16mm、鉄心重量は約22kgである。ヨークと中央脚の接合部はVノッチ式で、接合方式は2枚重ねの5段ステップラップとした。鉄心の励磁は各脚40ターンの1次巻線によって行ない、その内側に巻いた60ターンの2次巻線によって磁束を検出した。鉄心全体の鉄損は、各相の1次電流および2次電圧から電力計を用いて測定した。

鉄心材料には、0.30mm厚の高配向性方向性電磁鋼板30JGS®を用いた。単板磁気測定装置で測定した鉄損W_{17/50}は1.01W/kgである。

2.1.3 測定結果

図2に鉄心の半面における磁束密度分布の変化を示す。脚、ヨークの磁束密度分布には幅方向の不均一が認められる。この不均一な磁束分布は、主に方向性電磁鋼板の圧延方向と直交方向の透磁率の異方性によって生じる磁束の回り込みに起因しており、局所的な磁束密度波形にひずみを生じさせる。磁束密度波形のひずみは、鉄損の増加や磁歪振動における高調波成分の増大をもたらすため²⁾、変圧器の鉄損や騒音を解析する上で重要な情報である。

図3にヨークとその周辺の鉄損分布を示す。ヨークのT接合部付近、およびヨークと脚の接合部付近に非常に大きい鉄損発生箇所が認められ、それぞれ、回転磁束および磁束集中の影響と考えられる。

これらの局所的な鉄損増大には、使用される方向性電磁鋼板の磁気特性の違いや、接合方式などが影響するが、その機構の解析においても本技術を利用している。

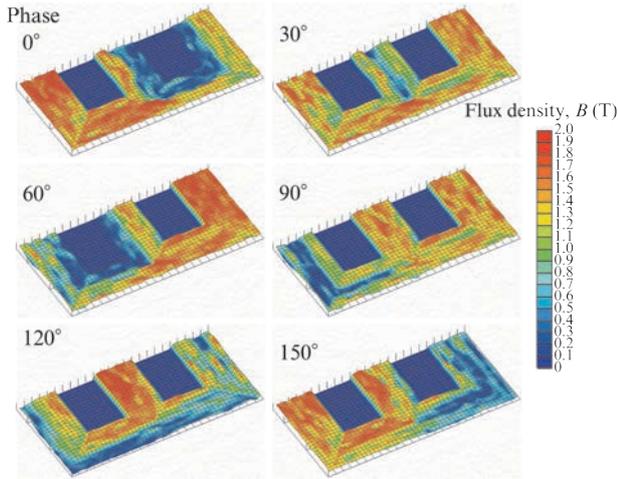


図2 探針法で測定した磁束密度分布

Fig. 2 Magnetic flux density distribution measured by stylus probe method

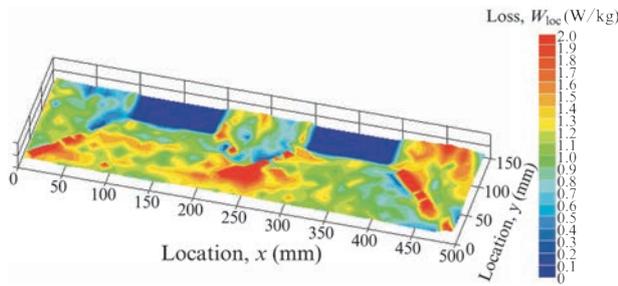


図3 探針法で測定した鉄損分布

Fig. 3 Distribution of iron loss measured by stylus probe method

2.2 サーモグラフィーによる局所鉄損測定

2.2.1 目的

探針法による局所磁気測定は、鉄損、磁界強度、磁束密度を同時に測定できる有効な手段であるが、鋼板を重ね合わせた接合部の近傍では、鋼板の層間を渡る磁束によって生じる面内渦電流が生じるため、鋼板断面の渦電流測定に基づく磁束密度の測定値に誤差が生じる¹⁴⁾。そのため、接合部近傍の鉄損の解析では、別の手法を組み合わせることが望ましい。他の局所鉄損測定方法として、鋼板の温度上昇率から鉄損を算出する方法が知られている¹⁵⁾。特に赤外線サーモグラフィーを用いる温度計測は、熱電対やサーミスタ温度計を用いる方法に比べて、鉄心表面の広範囲を同時に測定することができるため、鉄損分布の測定に適している。そこで、温度分解能が向上した赤外線サーモグラフィーを利用する鉄損分布の測定方法を開発した⁸⁾。

2.2.2 測定方法

測定に使用した赤外線サーモグラフィーは、温度分解能 0.02 K、最大画素数 76 800 (320×240) で、最大で毎秒 380 フレームの動画の撮影が可能である。赤外線カメラは鉄心

の 1 m 上方に設置し、鉄心全体を撮影できるようにした。

鉄心表面に他の発熱物が影響して誤差が生じるのを防ぐため、鉄心と赤外線カメラと最小限の配線のみを照明を消した無人の防音ルーム内に設置し、励磁と測定は外から制御するようにした。また、鉄心の温度分布が安定し、全体の温度差が 1 K 未満になった状態を確認してから測定を行った。

鉄心は次のパターンで励磁し、温度測定を行った。

- (i) 励磁電圧をかける前に、バックグラウンドを測定
- (ii) 所定の磁束密度まで、一定比率で一次電圧を上昇
- (iii) 所定の磁束密度で一定時間保持し、温度分布を測定
- (iv) 励磁電圧を零に下げ、温度が一定になることを確認

この励磁パターン (iii) における各点の温度上昇率 dT/dt から、次の式で鉄損を求めた。

$$W = C dT/dt \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 W は鉄損、 C は鋼板の比熱である。

モデル変圧器は 2.1 節で述べたのと同じ構造であるが、鉄心表面のより広範囲を測定するため、1 次、2 次の巻線を 20 ターンに減らした。鉄心材料には 0.23 mm 厚の方向性電磁鋼板 23JGS[®] を用いた。

2.2.3 測定結果

図 4 に本実験で測定された典型的な温度測定結果を示す。この測定における最大磁束密度は 1.7 T、周波数は 50 Hz である。磁束密度を 1.7 T に保持した状態では、一定の温度上昇率とみなすことができる。また、励磁を零に下げた後の温度低下はわずかであることから、抜熱の影響は小さいと考えられる。

写真 1 に 1.7 T まで励磁した状態での鉄心の温度分布画像を示す。ヨークの T 接合部近傍に非常に大きく温度上昇し

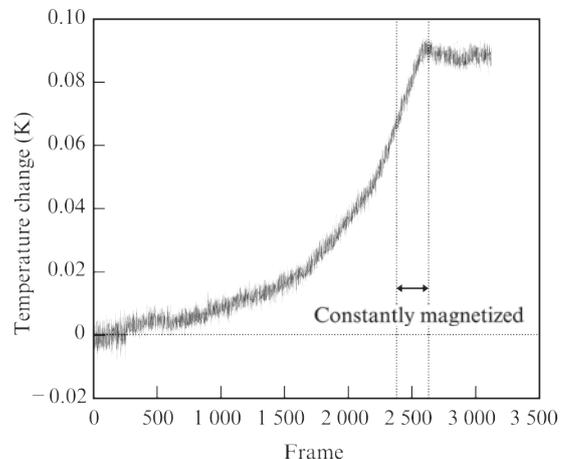


図4 赤外線サーモグラフィーによる温度変化の測定例

Fig. 4 Example of temperature change measured by infrared thermograph

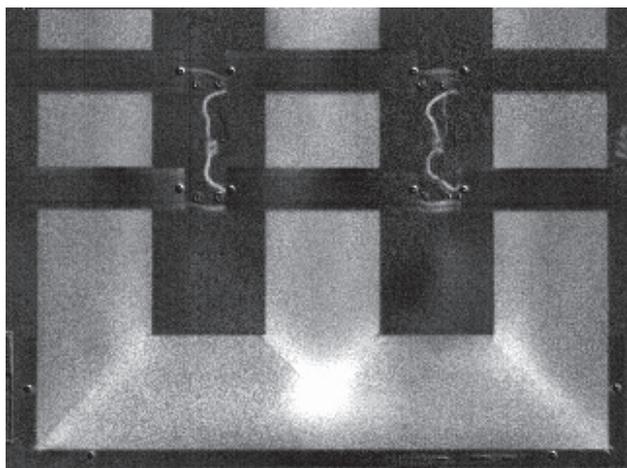


写真 1 赤外線サーモグラフィによる鉄心の温度分布画像
Photo 1 Temperature distribution of model transformer core measured by infrared thermograph

た領域があり、前章で述べた探針法による測定結果と合致している。また、U脚とヨーク、およびW脚とヨークの接合部にも大きな温度上昇が見られる。これらの箇所の下層には鋼板の突き合わせ部があり、下層の鋼板からの磁束の渡りによる磁束集中、および面内渦電流の影響により鉄損が増大したものと考えられる。また、U脚の右側、V脚の両側、W脚の左側は他の箇所よりも温度が上昇しているが、これらの箇所は磁束波形のひずみ大きいことが前述の探針法測定で確認された。

この測定における局所鉄損を鉄心全体で合算して求めた鉄損値は1.17 W/kgであった。電力計で測定した鉄損は1.19 W/kgであったため、赤外線サーモグラフィによる測定が有効な精度を持つことがわかった。

この高分解能サーモグラフィによる局所鉄損測定技術は、巻鉄心における鉄損分布の解析にも活用している。

3. モデル変圧器の局所振動測定

3.1 目的

変圧器の鉄心は、磁化に伴って生じる鋼板の磁歪振動と、鋼板の接合部の電磁振動によって、騒音の発生源となることが知られている²⁾。したがって、変圧器の騒音に及ぼす鉄心材料の影響を解析するためには、鉄心の振動挙動を把握することが重要である。これまでも変圧器鉄心の振動測定に関する報告があるが、多くは脚やヨークの表面に対して垂直方向の測定のみであり、しかも、その最大振幅や振動の周波数成分を議論するものであった^{3,16)}。JFE スチールでは、さらにモデル変圧器の鉄心上の各所で、3軸方向の振動を測定する方法を開発し、構造としての振動挙動を解析できるようにした^{9,22)}。

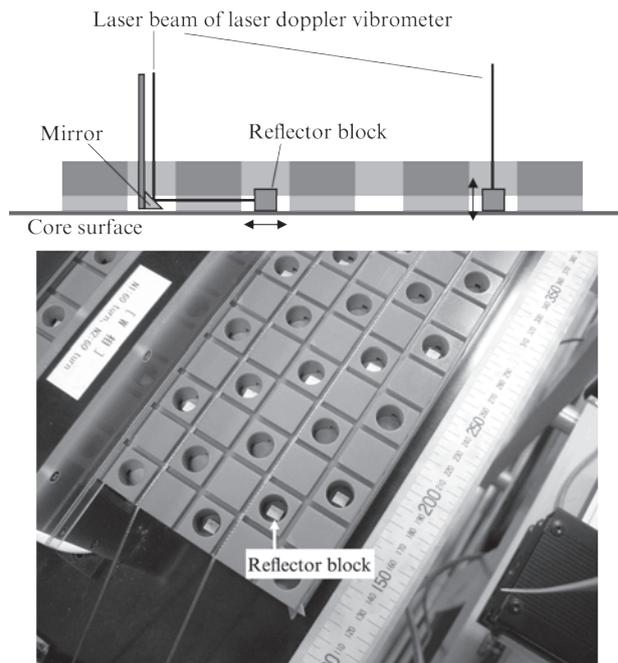


図 5 鉄心表面の局所振動測定方法
Fig. 5 Method to measure local vibration on model transformer core

3.2 測定方法

鉄心の振動測定には、レーザドップラ振動計を用いた。図5に振動測定方法を示す。表面に反射テープを貼り付けた5 mm角のブロックを鋼板表面に貼付し、3軸方向の振動を測定した。鋼板を締め付けるために、鉄心の上下をベークライト板で挟み、ばねで0.1 MPaの面圧をかけた。ベークライト板には、測定点ごとに穴を開け、鋼板表面にブロックを貼付できるようにした。鋼板面に水平な方向に振動を測定する場合は、隣接する穴との間に溝を形成しておき、隣接する穴にミラーを挿入し、上から入射するレーザー光を直角に曲げて測定した。測定は20 mm間隔で行なった。

モデル変圧器は2.1節と同じ構造とし、鉄心材料には0.30 mm厚の高配向性方向性電磁鋼板30JGS[®]を用いた。

3.3 結果と考察

磁歪振動の1周期（励磁の2分の1周期）における、鉄心半面の変位を図6に示す。鋼板面に垂直な方向の変位が最も大きく、その大きさは磁歪に鋼板の積層厚を掛けた値よりもはるかに大きかった。鉄心は積層した鋼板を締め付けた構造であり、本モデル変圧器では積層厚も小さいため、鋼板面に垂直な方向への曲げに対する剛性が、他の方向よりもはるかに低い。そのため、磁歪が起振力となり、鋼板に垂直方向への曲げ変形を生じさせ、大きな振動が発生するものと考えられる。

鉄心の振動を部位別に比較すると、ヨークと各脚の接合部において部分的に大きな振動が生じており、接合部に生

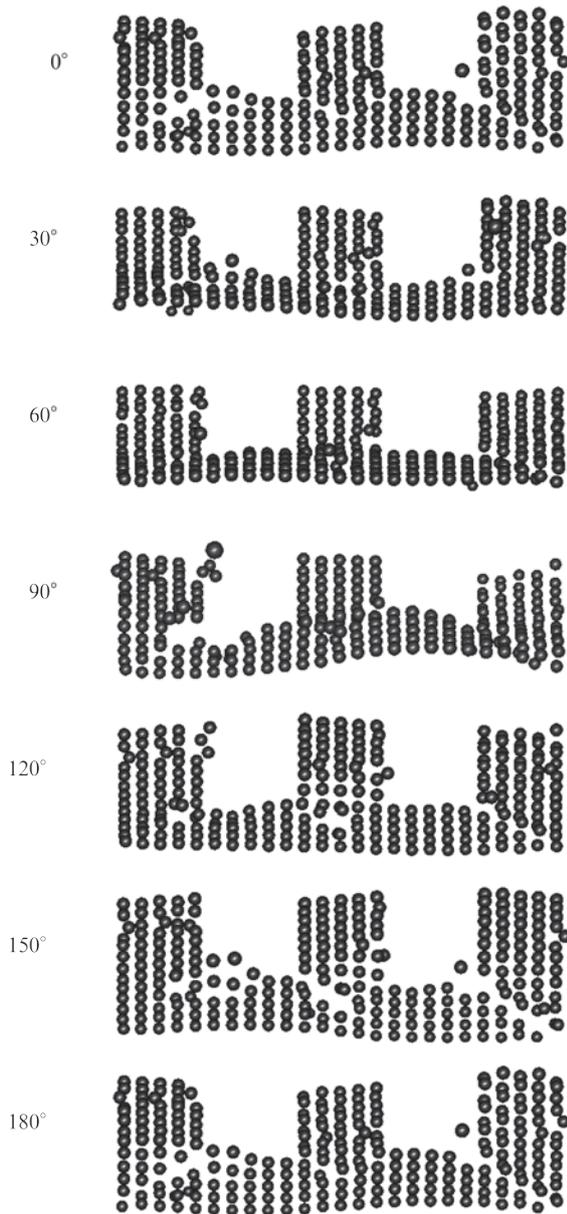


図6 鉄心表面の振動挙動

Fig. 6 Vibration behavior of model transformer core surface

じる電磁振動の影響と考えられる。次に大きい振動はヨークに生じており、曲げ変形が生じていることがわかる。図6の左側のU相と右側のW相は、振幅が最大になる位相が3分の1周期ずれており、相間の位相差を反映している。各脚には面の傾きが生じている。図2に示したとおり、脚の局所的な磁束密度も、幅方向に差があり、磁化の時間的なずれがこのような面の傾きを生じさせるものと考えられる。

これらの結果からわかるとおり、鉄心の振動は、鉄心の局所的な磁化の違いや、鉄心構造に起因する機械的な振動特性を反映して、複雑な挙動を示す。ここでは磁歪の基本周波数であり、振幅が最も大きい100 Hzの成分について述べたが、さらに高調波について解析を行なうことで、騒音への

影響を考察することができる。また、磁歪特性の異なる材料間の比較や、締め付け力の影響も調査している。

4. 直流偏磁条件におけるモデル変圧器特性の解析

4.1 目的

電磁鋼板の磁化特性は非線形であるため、交流磁化に直流が重畳した磁化条件（直流偏磁）では、鉄損や磁歪、変圧器の騒音が大幅に増加することが報告されている^{11,17,18)}。しかし、同じ測定装置で低磁束密度から高磁束密度まで偏磁量を変えながら調査された報告は少ない上、変圧器の騒音は鉄損と比べ測定例が非常に少ない。

そこで、本研究では、単相モデル変圧器を用いて、交流の磁束密度を0.5 Tから1.8 Tまで、直流重畳磁界を200 A/mまでの広い範囲で変えて、直流偏磁が変圧器の鉄損、騒音に及ぼす影響を調査した¹²⁾。

4.2 実験方法

4.2.1 モデル変圧器

図7に、モデル変圧器の測定システムを示す。モデル変圧器は、単相であり、交流励磁用の1次巻線、磁束密度測定用の2次巻線、直流磁界を印加するための3次巻線からなる。3次巻線の回路は、直流電源、電流計、交流重畳を防止するためのチョークコイルから構成される。

鉄心は単相2脚の積鉄心で、外形は一辺500 mmの正方形、積層厚は15 mm、重量約18 kgである。接合方式は2枚重ねの5段ステップラップとし、鉄心の上下をベークライト板で挟み、平均0.1 MPaの締め付け力をかけて固定した。

鉄心材料には0.30 mm厚の高配向性方向性電磁鋼板30JGH[®]を用いた。

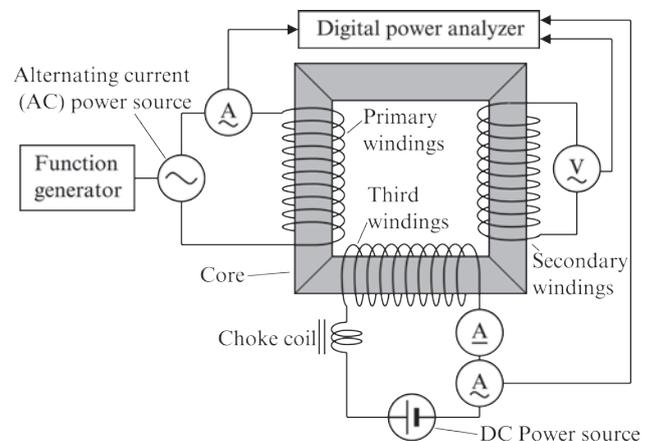


図7 直流偏磁させたモデル変圧器測定方法の概要

Fig. 7 Schematic of model transformer measurement under direct current (DC) biased magnetization

4.2.2 測定方法

鉄心を励磁する際の磁束密度の振幅値は、2次巻線の誘起電圧の平均値から求めた。直流偏磁量は、3次巻線の直流電流値から求めた。鉄心の実効磁路長は1.6mとした。励磁は以下の方法で制御した。まず、1次巻線により鉄心を周波数50 Hzで交流励磁し、一次電圧を調整して最大磁束密度を所定の値にした。次に、3次巻線の直流励磁電流を印加し、直流重畳磁界を重畳させた。その後、一次電圧を再度調整し、交流励磁の最大磁束密度が所定の値になるよう修正した。

本装置のように交流励磁用と直流重畳用の二つの励磁巻線を用いる場合、直流用の3次巻線に交流成分が重畳し、その影響により鉄損が増加するという問題がある。そこで、3次巻線に直列に3.2 Hのチョークコイルを配置して交流成分の重畳を抑制した。この場合でも3次巻線を開放した場合よりも鉄損が増加するため、励磁電流から直流励磁系の交流成分重畳分を差し引く補正を行なった¹⁹⁾。

騒音は、脚の中央2ヶ所とヨークの中央2ヶ所で、ベークライト板の上面から200 mm離れた位置で騒音レベルを測定し、平均値を求めた。

4.3 実験結果と考察

図8に直流偏磁がない場合とある場合を比較したヒステリシスカーブを示す。直流偏磁により磁化力が大きく偏り、ヒステリシスカーブが伸長して鉄損が増大することがわかる。

直流偏磁量と鉄損の関係を図9に示す。直流偏磁量の増加に従って鉄損が増加しており、特に50 A/m以下で増加率が大きい。

図10に直流偏磁量に対する騒音の変化を示す。鉄損と同様に、直流偏磁に伴って騒音が大幅に増加した。偏磁によって実質的に1.7 Tを超えた磁化により素材の磁歪が大きく増加したことに加え、図11に示すように励磁周波数の奇数次の高調波が増加したためと考えられる。直流偏磁がない場

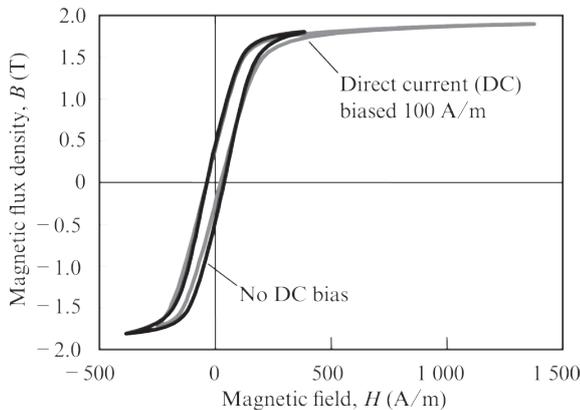


図8 ヒステリシスカーブの比較
Fig. 8 Comparison of hysteresis curves

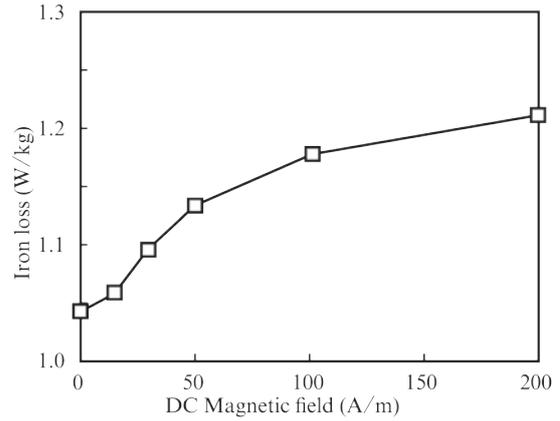


図9 直流偏磁量がモデル変圧器の鉄損に及ぼす影響
Fig. 9 Iron losses of model transformer under direct current (DC) biased magnetization

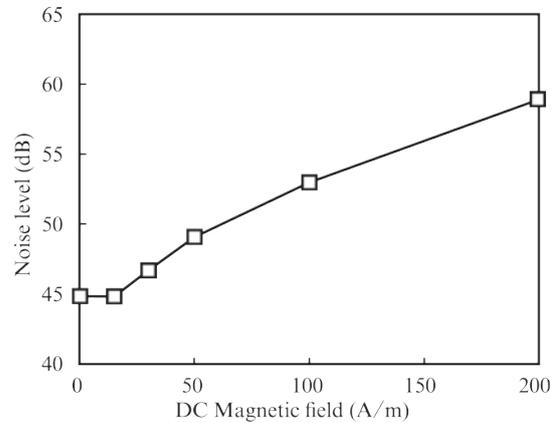


図10 直流偏磁量がモデル変圧器の騒音に及ぼす影響
Fig. 10 Acoustic noise of model transformer under direct current (DC) biased magnetization

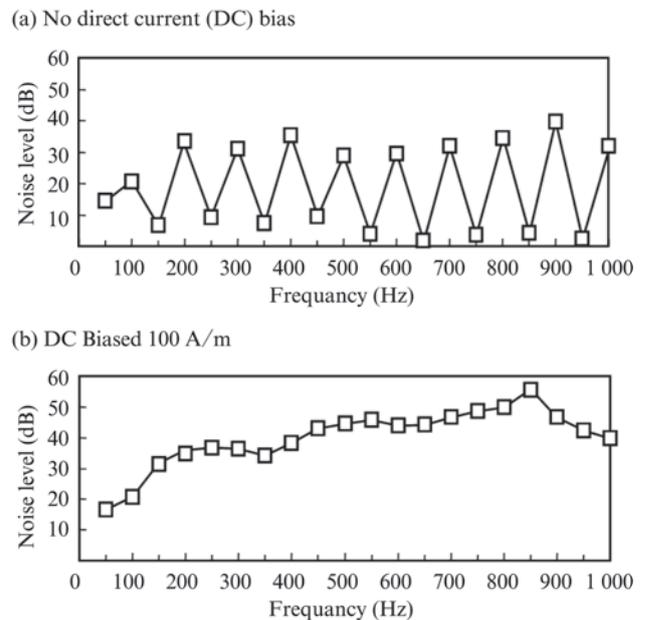


図11 騒音の高調波成分の比較
Fig. 11 Comparison of spectrum of acoustic noise harmonics

合は、磁化の正負によらずほぼ同じ磁歪が生じるため、磁歪振動の基本周波数は 100 Hz であるが、直流偏磁により磁化の正負での磁歪が異なり、50 Hz とその高調波の成分が大きく現れるためと考えられる²⁰⁾。

この直流偏磁が可能なモデル変圧器により、直流偏磁による鉄損、騒音の増大の鉄心材料による差も調査しており、より高配向性の材料の方が鉄損の増加が生じやすく、騒音では優れることなどが判明している²¹⁾。

5. おわりに

以上、方向性電磁鋼板が使用された変圧器の鉄損、騒音特性を解析するためのモデル変圧器における実験技術を紹介した。本論文では積鉄心への適用例を述べたが、巻鉄心に適用することも可能である。

これらの解析技術は、JFE スチールで製造する方向性電磁鋼板の有効な変圧器利用技術の調査に、また、新たに開発した方向性電磁鋼板の特性の解析などに活用されている。

参考文献

- 1) 変圧器の環境適合性向上技術調査専門委員会編。「変圧器の環境適合性向上技術の現状とその動向」。電気学会技術報告。2005, no. 1023.
- 2) 電気学会磁性材料常置専門委員会編。「けい素鋼板の進歩と使用上の諸問題」。電気学会技術報告。1979, II部, no. 85.
- 3) 石田昌義, 定廣健一, 岡部誠司, 川崎製鉄技報。2003, vol. 35, no. 1, p. 21.
- 4) Thomas, B. IEEE Trans. Magn. 1975, vol. 11, p. 65.
- 5) Fukuda, B.; Sato, K.; Shimizu, Y.; Ito, Y. J. Appl. Phys. 1984, vol. 55, p. 2130.
- 6) 高速大規模電磁界数値解析技術調査専門委員会編。「電磁界解析における高速大規模数値計算技術」。電気学会技術報告。2006, no. 1043.
- 7) 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 小松原道郎, 山口俊尚。電気学会論文誌 A. 1997, vol. 117, p. 942.
- 8) 山口広, 今西大輔, 石田昌義, 井上博貴。電気学会マグネティックス研究会資料。2011, MAG-11-129, p. 1.
- 9) 電気学会静止器騒音対策技術調査専門委員会編。「静止器の騒音対策技術の現状とその動向」。電気学会技術報告。1966, no. 575.
- 10) 山口広, 石田昌義。電気学会マグネティックス研究会資料。2010, MAG-10-93, p. 13.
- 11) 高須伸夫, 宮脇文彦, 斎藤達, 藤原康夫。電気学会論文誌 B. 1993, vol. 113, p. 435.
- 12) 井上博貴, 上山哲平, 山口広, 岡部誠司, 石田昌義。J. Mag. Soc. Japan. 2012, vol. 36, p. 135.
- 13) 山口俊尚, 今村正明, 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 本田厚人, 山本孝明。電気学会論文誌 A. 1995, vol. 115, p. 50.
- 14) 岡部誠司, 石田昌義, 黒沢光正。日本応用磁気学会誌。1998, vol. 22, p. 713.
- 15) 成田賢仁, 今村正明。「電気鉄板の熱電的部分鉄損測定法」。電気学会論文誌 A. 1974, vol. 94, p. 167.
- 16) 溝上雅人, 藪本政男, 岡崎靖雄。電気学会論文誌 A. 1996, vol. 116, p. 744.
- 17) 西水亮, 内山倫行, 斎藤達。電気学会マグネティックス研究会資料。1999, MAG-99-78, p. 11.
- 18) 鈴木崇之, 高坂正明, 松山亮, 壹岐浩幸。平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会概要集。1999, no. 561, p. 485.
- 19) 浅野剛良, 高田俊次, 佐々木堂, 岡崎靖雄。電気学会マグネティックス研究会資料。1997, MAG-97-175, p. 25.
- 20) 茂木尚, 藤倉昌浩, 溝上雅人, 藪本政男, 久保田猛。日本応用磁気学会誌。2001, vol. 25, p. 891.
- 21) Inoue, H.; Okabe, S. J. Appl. Phys. 2014, vol. 115, issue 17, p. 17A332.
- 22) 大村健, 山口広, 石垣雄亮, 岡部誠司, 戸田広朗。電気学会論文誌 A. 2015, vol. 135, p. 414.



岡部 誠司



大村 健



井上 博貴