

JFE スチールにおける変圧器特性の評価解析技術

Evaluation and Analysis Techniques of Transformer Performances in JFE Steel

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 (副部長)
井上 博貴 INOUE Hirotaka 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)
山口 広 YAMAGUCHI Hiroi JFE スチール スチール研究所 電磁鋼板研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)

要旨

局所解析技術を使用して変圧器の鉄損や騒音発生メカニズムを調査した。三相三脚型巻鉄心変圧器の鉄損には、鉄心間の磁束渡りが大きな影響を及ぼしていた。接合部を有するラップコアにおいては、内鉄心の接合部を迂回するように磁束が流れることから、磁束渡りが接合部を有しないノンカットコアより大きかった。また、三相三脚型積鉄心変圧器の三次元振動解析結果からは、最も振動が大きいのは面外振動で、磁歪から計算される数十倍の大きさであったことから、面外振動が騒音の主原因であると考えられた。

Abstract:

Local analysis techniques were used to investigate the iron loss and noise generation mechanism of the transformer. The interlaminar flux between the cores had a large effect on the iron loss of the three-legged wound transformer core. In the lap core having the joint part, the interlaminar flux was larger than that in the non-cut core having no joint part. The reason is that the flux flows to avoid the joint part of the inner core. From the results of 3D vibration analysis of the three-legged stacked transformer core, it was considered that the out-of-plane vibration was the main cause of the acoustic noise, because the largest vibration was the out-of-plane vibration, which was several tens of times as large as calculated from the magnetostriction.

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。この方向性電磁鋼板の特性向上により、変圧器鉄損は改善され、変圧器騒音も低減されてきた。しかし変圧器特性改善のニーズは高く、さらなる低鉄損化、および低騒音化が求められている。

変圧器鉄損を低減するためには、鉄心材料の低鉄損化のみならず、変圧器として組み上げた際の鉄損増加を防止することが重要である。一般的に、素材鋼板における鉄損に対する変圧器鉄損の増加率をビルディングファクタ (B.F.) とよび、B.F. が小さいことが望まれる。この B.F. の増大は、積鉄心変圧器では、鉄心内 T 接合部付近で生じる回転磁束¹⁾ や磁束の回り込み、磁束の部分的な集中、積層した鋼板間の磁束の渡り²⁾ などに起因すると言われている。また、巻鉄心変圧器においては、鋼板ラップ部における隣接鋼板への垂直方向への磁束の渡り^{3,4)} や、内側鉄心への磁束の集中⁵⁾ などに起因すると言われている。B.F. の低減方法を見出すためには、鉄心における局所的な磁化挙動測定を行い、上記

因子の影響を定量評価することが非常に有用である。

本稿では、二個の内鉄心を外鉄心で取り囲む構造である三相三脚型巻鉄心変圧器において発生すると考えられる鉄心間の渡りが B.F. に及ぼす影響について、探りコイル法を用いた局所磁化測定および山口らによって確立されたサーモグラフィ法⁶⁾ を用いた局所鉄損測定によって評価した結果について述べる⁷⁾。

一方、変圧器騒音は、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に起因し、変圧器を構成する要素の固有振動特性が影響するものと考えられており、磁歪振動と騒音の関係^{8,9)} や磁歪振動に影響を及ぼす磁束密度分布^{2,10)} などの報告がある。磁歪振動は、鉄心振動を介して騒音になると考えられるので、効果的な騒音低減方法を見出すためには、騒音と磁歪を直接関係づける前に、磁歪と鉄心振動および鉄心振動と騒音の関係を明確にすることが重要と考えられる。

本稿では、レーザドップラ振動計および歪ゲージを用いた三次元振動解析により、単板磁歪が騒音特性に変化する一連の挙動 (単板磁歪と積層磁歪、積層磁歪と鉄心振動、鉄心振動と騒音) について調査した結果についても述べる¹¹⁾。

2. 三相三脚型巻鉄心変圧器の鉄損に及ぼす鉄心間の磁束渡りの影響

2.1 実験方法

鉄心素材には 0.23 mm 厚の方向性電磁鋼板を使用し、**図 1** に示す外形寸法で成型、歪取り焼鈍を実施した。

ここでは、鋼板接合の影響を調べるために、ラップ接合により鋼板を接合させるラップコアと、同形状で鋼板カット部を設けないノンカットコアを作製した。ラップ接合方式は、鋼板同士の重なり長が 8 mm、1 枚重ねの 7 段ステップラップとした。

鉄心間の磁束の渡り評価には、探りコイルによる局所磁化測定法を用いた。鉄心各部の磁束量の差分から、鉄心間の磁束渡りを算出することを目的として、**図 2** に示す位置に探りコイルを配置し、探りコイルに生じる起電力により各位置の磁束を測定した。外鉄心から内鉄心へ渡った磁束は、外鉄心に配した探りコイル 1 と探りコイル 2 の差分、内鉄心から外鉄心へ渡った磁束は、内鉄心に配した探りコイル 3 と探りコイル 4 の差分から導出され、これらの平均値 $\Phi_{interlaminar}$ を鉄心間の渡り磁束とした。

次いで、鉄心内部の鉄損分布評価には、赤外線サーモグラフィカメラによる局所温度測定法を用いた。鉄心の局所鉄損は、式 (1) に示すような温度上昇率と比熱 C で示される。

$$P = C \times \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

図 3 に温度上昇率 dT/dt を求める際の励磁パターンを示す。**図 3** 中の各ステップにおいて、以下を実施した。

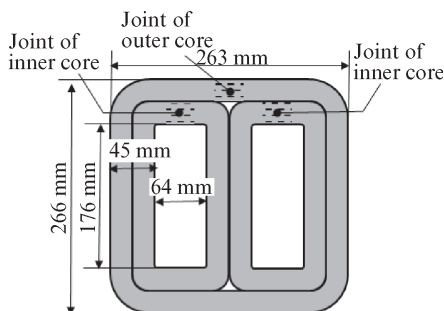


図 1 モデルトランスコアの外形寸法

Fig. 1 Dimensions of model transformer core

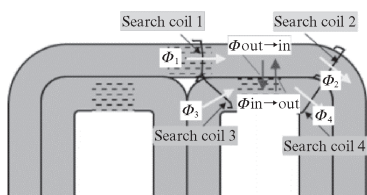


図 2 探りコイルの設置位置および磁束の模式図

Fig. 2 Position of search coils and schematic image of magnetic flux

- I) 励磁前に温度分布画像のバックグラウンドを取得
- II) 所定の磁束密度まで短時間で昇圧
- III) 所定の磁束密度で保持、温度上昇率の平均値を導出
- IV) 励磁電圧を瞬時にゼロにして回路を切断

2.2 実験結果および考察

図 4 に、最大磁束密度 1.7 T、周波数 50 Hz におけるノンカットコアとラップコアの鉄心間の渡り磁束 $\Phi_{interlaminar}$ の測定結果を示す。位相は左脚の磁束密度が最大となったタイミングをゼロとした。両コアともに、位相 120° において内鉄心から外鉄心への渡りが、位相 300° において、外鉄心から内鉄心への渡りが最も大きく、ラップコアの方が約 1.5 倍大きかった。

図 5 に最大磁束密度 1.7 T、周波数 50 Hz における鉄心内の局所鉄損分布を示す。ここでは、コア全体の鉄損平均値が、電力計で測定した鉄損となるように補正した。ノンカットコア、ラップコアともに内鉄心の鉄損が大きかった。両者を比較すると、ラップコアにおいては、ラップ接合部 (Part A) および中央脚側の内鉄心最外部 (Part B) で鉄損が大きくなっていた。鉄心全体の平均鉄損に対する Part A、Part B の鉄損増加率はそれぞれ 1.4 倍、1.8 倍となっており、

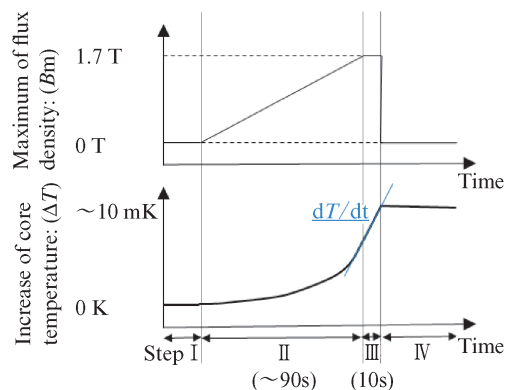


図 3 代表的な励磁パターン

Fig. 3 Schematic pattern of excitation and temperature rise in thermography measurement

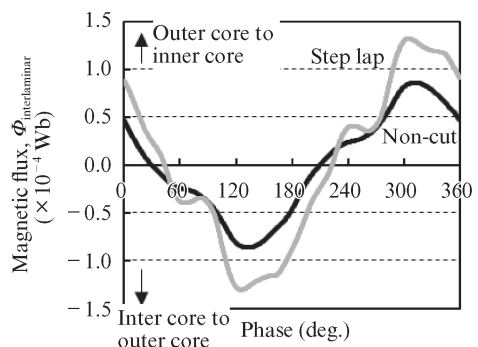


図 4 ノンカットコアとラップコアにおける内鉄心と外鉄心間の渡り磁束

Fig. 4 Interlaminar flux between inner and outer core in non-cut core and lap core

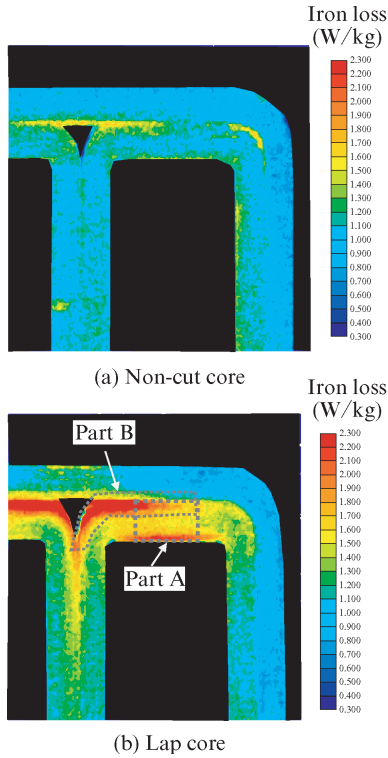


図5 温度上昇から導出したコア内の鉄損分布
Fig. 5 Distribution of iron loss in core derived from temperature rise

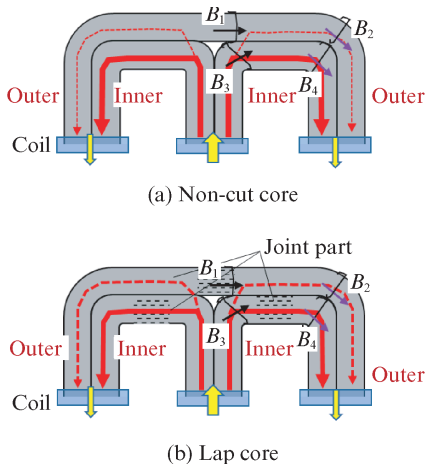


図6 ノンカットコアとラップコアの磁束流れ模式図
Fig. 6 Schematic image of magnetic fluxes in non-cut and lap cores

ラップコアにおいては、これらの部分における鉄損増大が B.F. 増大の主要因になっていることが分かる。

図6に位相差 120° における磁束流れの推定図を示す。位相差 120° では中央脚が磁束最大で、左右脚は中央脚と逆向きで、半分の磁束量になっていると思われる。図7に最大磁束密度 1.7 T、周波数 50 Hz における中央脚と右脚のヨーク部における内鉄心と外鉄心の磁束密度の時間変化を示す。ノンカットコアでは、中央脚から右脚の間で、内鉄心から外鉄心に渡る量は 0.03 T 程度と少なかった。一方、ラップコ

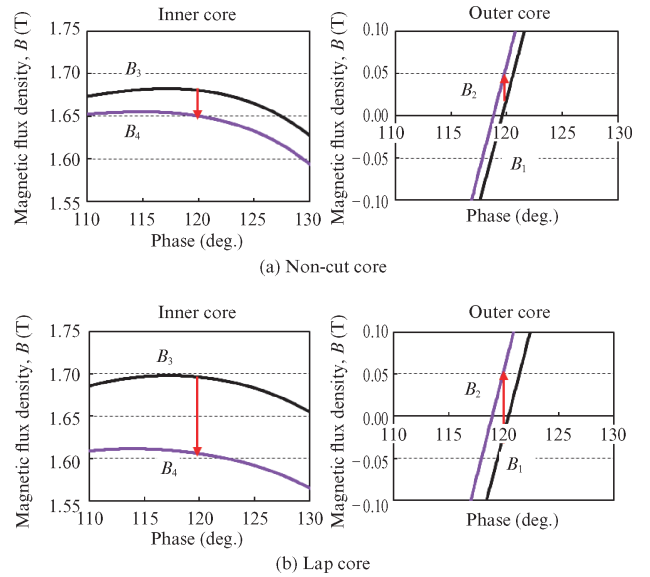


図7 中央脚と右脚間の磁束密度比較

Fig. 7 Comparison of magnetic flux densities between center limb and right limb

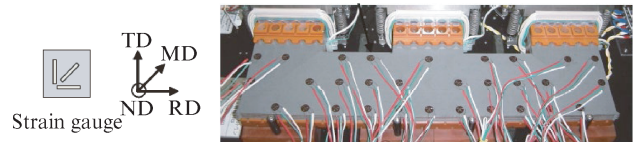


図8 モデルトランスコア上の歪ゲージ配置

Fig. 8 Arrangement of strain gauges on model transformer core

アでは、渡る磁束量は 0.08 T と大きかった。これは、内鉄心の磁気回路中には磁気抵抗が大きいラップ部が存在するため、ラップ部を迂回するように内鉄心から外鉄心に渡る磁束量が増加したためと考えられる。

ラップコアにおける中央脚の内鉄心の最外部（図5中の Part B）の鉄損の増加は、渡り磁束による面内渦電流損の発生やラップ部を迂回する際の局所的な磁束集中によるものと考えられる。よって、今後は鋼板間の渡り磁束とこれによる面内渦電流損の関係について、数値解析と実験的なアプローチ両面から検討を進める必要がある。

3. 三相三脚型積鉄心変圧器の三次元振動解析

3.1 実験方法

鉄心素材には 0.30 mm 厚の方向性電磁鋼板を使用し、鉄心構造は三相三脚、ヨーク部は V ノッチ、積層方法は 2 枚重ねの 5 段ステップラップとした。外形寸法は 500 mm、積層枚数は 50 枚、鉄心の重量は約 20 kg である。

積層状態の磁歪振動は、図8に示すようにゲージ長 5 mm、ロゼッタ配置 (0° 45° 90°) の三軸歪ゲージを鉄心全体に貼り付け、加圧積層後の三相励磁状態での磁歪を測定

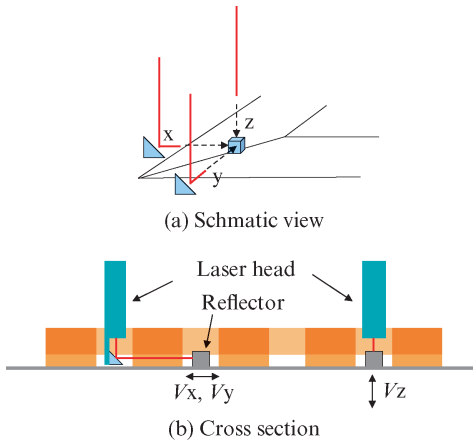


図9 反射板を使用した三次元振動測定システム

Fig. 9 3D vibration measurement system by using reflective block

した。鋼板垂直 (ND) 方向の磁歪振動 λ_{ND} は、圧延 (RD) 方向の磁歪振動 λ_{RD} 、圧延直角 (TD) 方向の磁歪振動 λ_{TD} との3方位の磁歪量の総和が、体積保存則によりゼロになることから λ_{RD} と λ_{TD} より算出した。

積層鉄心の振動測定には、レーザドップラ振動計を用いた。図9にレーザヘッドと鋼板表面の関係を示す。表面に反射テープを貼りつけた5mm角のブロックをベークライト板に形成させた測定穴から鋼板表面に添付し、Z方向の振動速度 V_z については真上にレーザヘッドを設置することで、X,Y方向の振動速度 V_x, V_y については、それぞれ隣接する非測定穴にレーザヘッドを挿入しミラーを使用することで、鋼板面に垂直な方向からレーザ光入射での計測を可能にした。

0.23 mm 厚の方向性電磁鋼板を鉄心素材とした容量 1 200 kVA の三相三脚積層鉄心変圧器を用いた検証では、作製途中に鉄心固定部材に加速度センサーを取り付けて、三次元鉄心振動を測定した。騒音測定は、防音壁に囲まれた場所に変圧器を設置し、周囲6か所で測定し、その平均値を評価に用いた。

3.2 実験結果および考察

図10に示す場所で積層状態の磁歪振動を測定した結果を図11に示す。単板のRD方向磁歪振幅と比較すると、脚部ではやや大きい程度であるのに対して、脚部以外では数倍以上の振幅になっていることが分かる。一般的な方向性電磁鋼板において、0.7 Tの円回転磁束下では磁歪振幅は、RDが 5×10^{-6} 、TD方向が 4×10^{-6} 、ND方向が 2×10^{-6} であることが報告されている¹²⁾。この磁歪振幅は、単板のRD方向磁歪振幅の数倍の大きさであり、本実験の脚部以外の振幅に類似している。また、接合部周辺のTD方向磁化成分として、0.7 Tに近い値が示されている¹³⁾ ことから、ヨーク部、コーナー部、T接合部の積層磁歪振幅が単板測定の数倍に

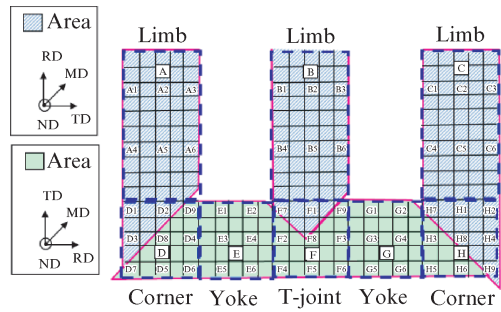
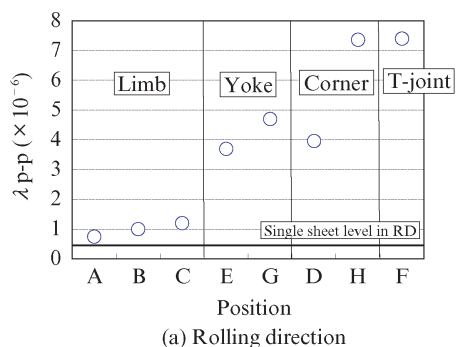


図10 モデル鉄心変圧器における磁歪測定点

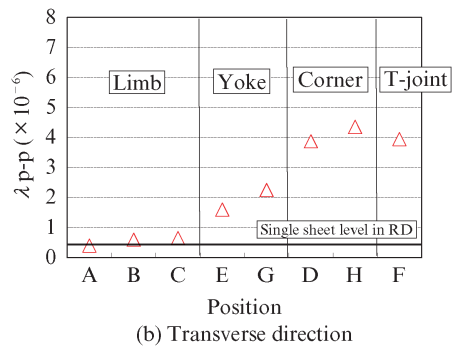
Fig. 10 Measurement point of magnetostriction on model transformer core

なったのは、回転磁化 (TD 方向) 成分に起因していると考えられる。

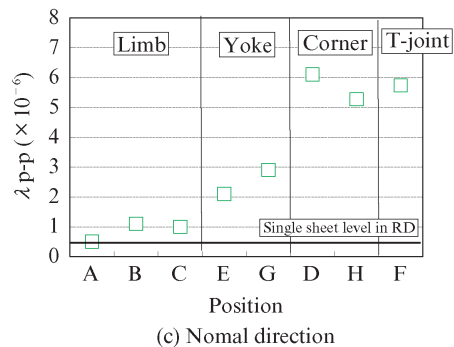
図12に示すように変圧器の各部位を分別し、加圧した状態での各部位における三方向の最大変位量を図13に示す。各部位の測定数は、脚部では40点、コーナー部、ヨーク部



(a) Rolling direction



(b) Transverse direction



(c) Nomal direction

図11 モデル鉄心変圧器における各方向に対する磁歪振幅
Fig. 11 Amplitude of magnetostriction in each direction on model transformer core

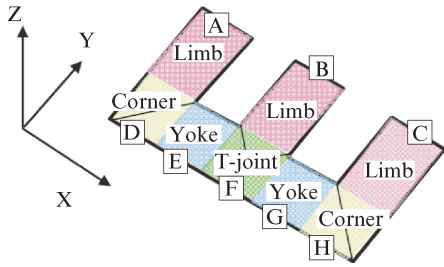


図 12 モデル鉄心変圧器の鉄心振動測定部位

Fig. 12 Measurement point of iron core vibration on model transformer core

と T 接合部では 25 点で、均等間隔に測定し、各測定点の最大変位量の平均値を各部位の最大変位量とした。面内方向の振動は小さく、面外方向の振動は面内方向に対して数倍大きくなっており、鉄心振動の主体は面外振動であると言える。磁歪振動が小さい脚部でも大きな面外振動が確認されたのは、加圧により脚部以外の磁歪振動が影響を及ぼしているのではないかと考えられる。図 14 に各位相角における三方向の振動変位を示す。球の大きさが面外方向の変位の大きさ、矢印の太さが磁束の多さ、矢印の方向が磁束の向きを示している。また、矢印が書かれていない白色の領域は励磁されていない領域を示す。面外振動は、U 脚では位相

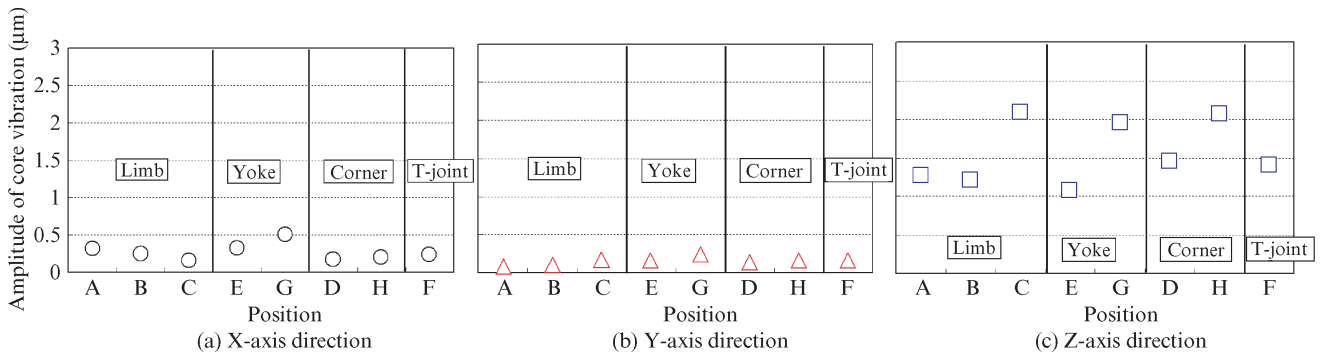


図 13 モデル鉄心変圧器における各方向に対する鉄心振動の振幅

Fig. 13 Amplitude of iron core vibration in each direction on model transformer core

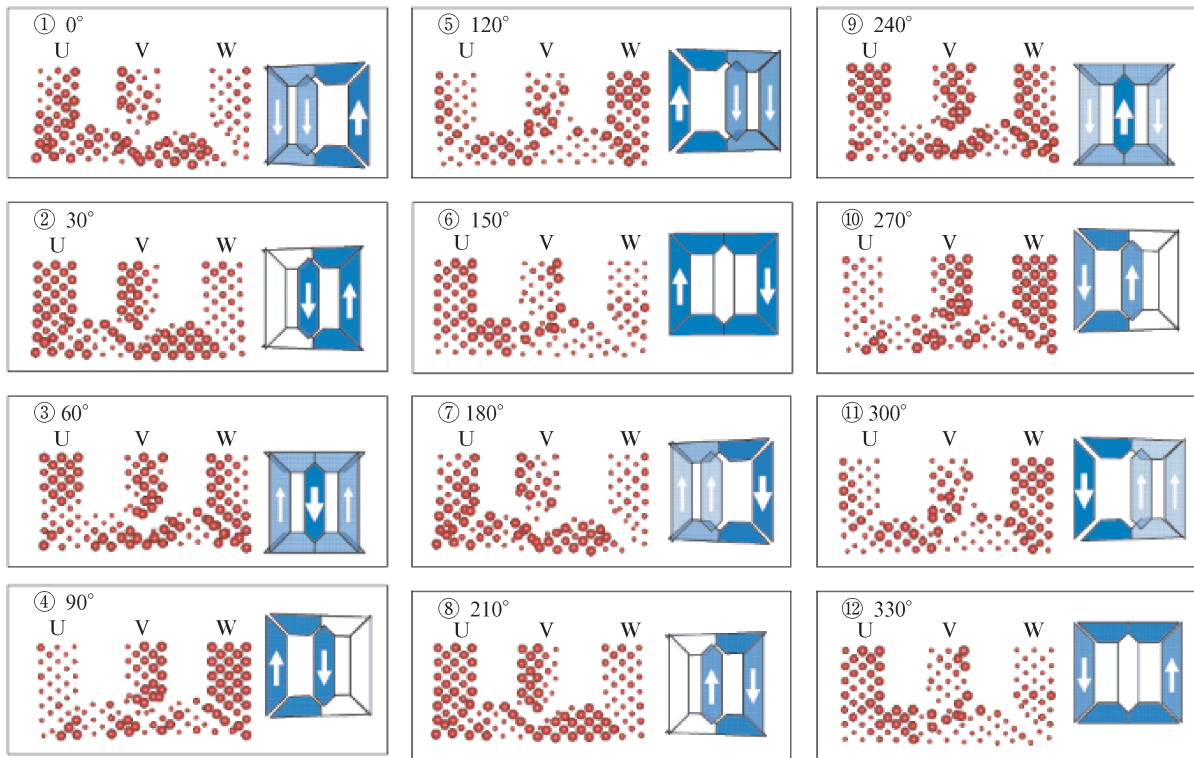


図 14 モデル鉄心変圧器の鉄心振動挙動

Fig. 14 Vibration behavior of model transformer core

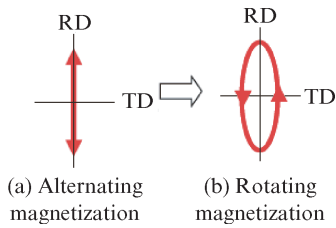


図 15 磁化挙動の模式図

Fig. 15 Schematic view of magnetic field

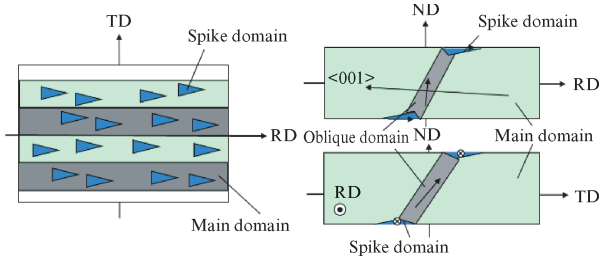


図 16 方向性電磁鋼板の磁区構造模式図

Fig. 16 Magnetic domain model of grain oriented electrical steel

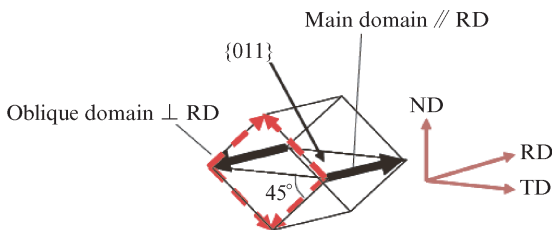


図 17 スパイク磁区を連結する形で板厚方向に貫通した磁区の磁化方向

Fig. 17 Magnetic direction of oblique domain vibration amplitude

角 30° と 210°, W 脚では 90° と 270°, V 脚では 150° と 330° で最大となっており, 各脚のゼロ励磁時に最大変位を示すことが分かる。

鉄心では, 局部でも単純な交番磁化ではなく, TD 成分を有する二次元磁化となると考えられる。図 15 に理想的な回転磁化の模式図を示す。RD 方向の磁化成分がゼロになるタイミングは TD 方向成分が最大になるときである。

方向性電磁鋼板の磁区構造は, 圧延方向に平行なストライプ状の主磁区とランセットと呼ばれる補助磁区から成り立っている。補助磁区は, 表裏面に現れる 2 つのスパイク磁区とそれらを連結する形で板厚方向に貫通した磁区 (Oblique domain) から成り立っている¹⁴⁾。模式図を図 16 に示す。この板厚方向に貫通した磁区は圧延方向と垂直面内にあり, 図 17 に示すようにその磁化方向は表面に対して斜め 45° を向いていることが知られている^{12, 15)}。磁化方向が斜め 45° の方向を向いているということは, TD 方向に磁化される場合は磁化方向が RD 方向である主磁区よりも, このスパイク磁区を連結する形で板厚方向に貫通した磁区が活発

に活動すると考えられ, 鋼板は ND 方向および TD 方向に伸張する。

今回測定した鉄心振動において, 面外振動が最も大きかったのは, TD 方向成分が最も大きくなると思われるタイミングであったことから, このスパイク磁区を連結する形で板厚方向に貫通した磁区の増加による ND 方向への磁歪振動が, 鉄心の面外振動の原因と考えられる。

鉄心振動の振幅 (Z 方向) あるいは伸縮量 (X, Y 方向) は変位量を示し, 磁歪振動の振幅 λ は歪量を表しており, サンプル長さを L とするとそれぞれの値は次式で示すことができる。

$$\lambda pp = \frac{L_{max} - L_{min}}{L} \dots\dots\dots (2)$$

$$A pp = L_{max} - L_{min} \dots\dots\dots (3)$$

$$A pp = \lambda pp \times L \dots\dots\dots (4)$$

ここでは, 鉄心振動源と考えられる接合部を含むコーナー部と T 接合部に, 図 11 で示した磁歪振動結果がそのまま鉄心振動となった場合の鉄心振動の変位量を計算し, 図 13 で示した鉄心振動測定結果と比較した。鉄心振動の計算結果と実測結果の比較を図 18 に示す。面内方向は計算値と実測値は比較的近い値であった。一方, 面外方向では両者に大きな違いがあり, 騒音の主要因と考えている面外方向の振動は, 磁歪振動より大幅に増大されていると言える。この原因として, 三相三脚型積鉄心変圧器の場合, 変圧器内の励磁は各脚部の幅方向に均一ではなく位相差を伴って磁化されることから, この位相差磁化による不均一な磁歪伸縮運動がねじれ運動となり振動を大幅に増幅させている可能性および積層鉄心の固有振動特性に起因している可能性などが考えられる。水野らが行った積層鉄心の振動特性解析でも, 珪素鋼板の縦弾性係数に対して, 面外方向の縦弾性係

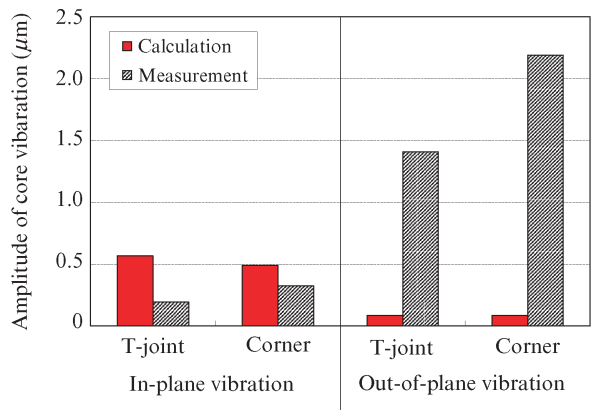


図 18 鉄心振動の計算値と実測値の比較

Fig. 18 Comparison of measured values and calculated values by using magnetostriction amplitude in core vibration

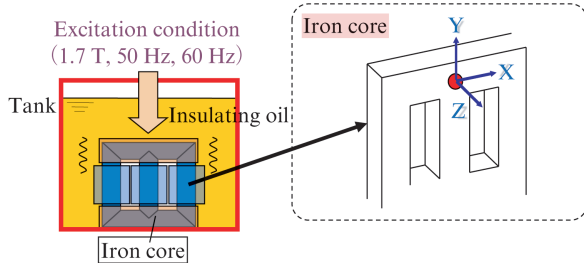


図 19 油入り実変圧器の鉄心振動測定ポイント

Fig. 19 Measurement point of iron core vibration of oil-filled practical transformer

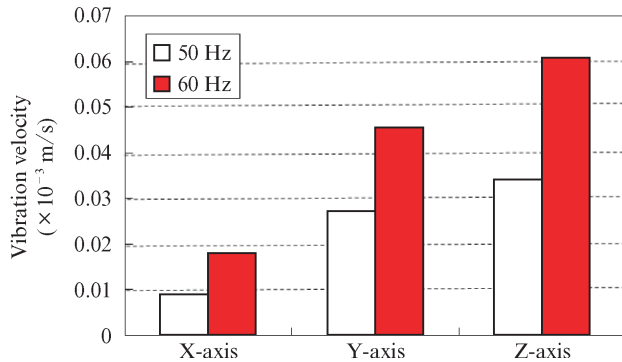


図 20 実変圧器鉄心における各方向に対する振動速度レベル測定結果

Fig. 20 Measurement result of vibration velocity in each direction on practical transformer core

数を 1/1 000 倍、面内方向の縦弾性係数を 1/10 倍にすれば FEM 解析結果が実測結果と一致すると述べており、積層鉄心は面外方向にたわみやすいことを示している¹⁶⁾。

モデル変圧器では、鉄心の面外 (Z 軸) 振動が、騒音に大きな影響を及ぼしているという結果が得られた。次に、実変圧器での鉄心振動を加速度センサーで測定した結果を示す。図 19 に示すとおり、加速度センサーは鉄心上部の T 接合部に設置した。図 20 に測定結果を示す。3 軸方向の振動レベルを比較すると、面外 (Z 軸) 方向の振動レベルが最も大きかった。

実変圧器の鉄心振動と騒音の関係を図 21 に示す。鉄心振動速度スペクトルは聴感補正を実施した。X 軸方向のスペクトルは、1 500 Hz 程度までは周波数成分はあまり変化しない。Y 軸方向のスペクトルも、励磁周波数 60 Hz では X 軸方向と同様な変化を示し、励磁周波数 50 Hz でも X 軸方向ほど明瞭でないが 700~1 400 Hz まではほとんど周波数成分が変化しないなど同様の傾向が認められる。一方、Z 軸方向のスペクトルは、周波数が高くなるにつれて周波数成分が減少する傾向を示した。騒音スペクトルを見ると周波数が高くなるにつれて周波数成分が減少する傾向が認められ、Z 軸方向のスペクトルと類似している。このことから垂直方向の鉄心振動が騒音への影響が最も大きいと考えられる。

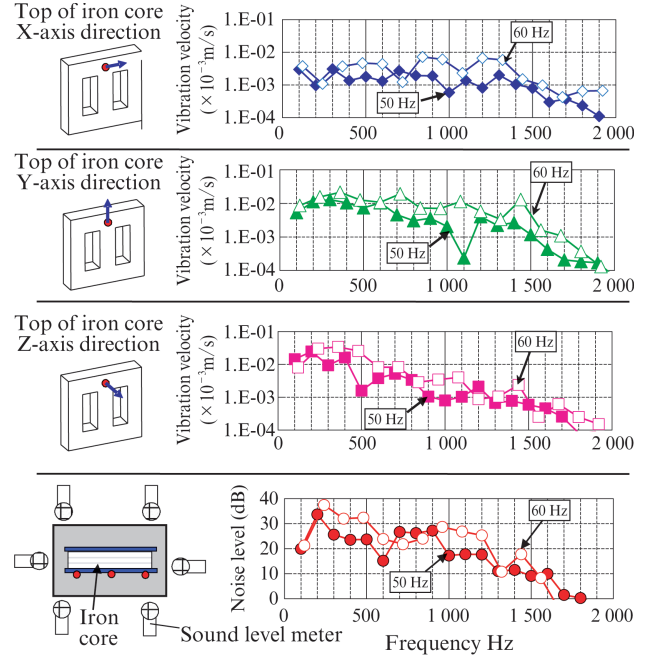


図 21 鉄心振動速度レベルと騒音の音圧スペクトル

Fig. 21 Power spectrum of core vibration velocity and acoustic noise

4. おわりに

変圧器の低鉄損化および低騒音化には、局所解析技術を使用して変圧器固有の損失増加や騒音発生メカニズムを把握することが非常に重要である。その観点で、以下の知見を得た。

- (1) 三相三脚型巻鉄心変圧器の鉄損には鉄心間の磁束渡りが影響しており、ラップコアにおいては、内鉄心のラップ接合部を迂回するように磁束が流れることから、磁束渡りがノンカットコアより大きい。
- (2) 三相三脚型積鉄心変圧器では、ヨーク部やコーナー部、T 接合部の振動振幅が、単板の磁歪に対して数十倍に増大する。鉄心振動において最も大きいのは面外振動であり、この面外振動が騒音の主原因と考えられた。面外方向については、磁歪振動から予測される変位量に対して、実測値の方が十数倍大きい。この原因としては、三相変圧器で起こる位相差を伴った磁化による不均一な磁歪伸縮運動が、ねじれ運動となり振動を大幅に増幅させた可能性や積層鉄心は面外にたわみやすいという鉄心の固有振動特性が影響している可能性などが考えられる。

参考文献

- 1) 石田昌義, 定廣健一, 岡部誠. 3 相積層変圧器モデル鉄心における局所磁気特性および騒音の解析. 川崎製鉄技報. 2003, vol. 35, no. 1, p. 21-27.
- 2) 山口広, Helmut Pfützner, 石田昌義. 方向性電磁鋼板積層コア接合部

- における三次元磁束計測. 電学論 D. 2010, vol. 130, no. 9, p. 1087-1093.
- 3) 高倉圭史, 高橋康人, 藤原耕三, 石原好之, 増田剛. 鉄心接合部を考慮した巻鉄心変圧器の鉄損解析. 電気学会静止器・回転機合同研究会資料. 2012, SA-12-113, RM-12-128.
 - 4) 井上幸, 原田和郎, 石原好之, 戸高敏之, 平川功一. ステップラップを考慮した巻鉄心型三相変圧器の磁界解析. 電気学会マグネティクス研究会資料. 1999, MAG-99-174.
 - 5) Cinar, M. A.; Alboyaci, B.; Sengul, M. Comparison of Power Loss and Magnetic Flux Distribution in Octagonal Wound Transformer Core Configuration. J. Electr. Eng. Technol. 2014, vol. 9, no. 4, p. 1290-1295.
 - 6) 山口広, 今西大輔, 石田昌義, 井上博貴. 赤外線サーモグラフィによるモデル鉄心の鉄損測定. マグネティクス研究会. 2011, MAG-11-129, p. 1-4.
 - 7) 井上博貴, 大村健, 山口広, 千田邦浩. 三相三脚巻鉄心変圧器の鉄損に及ぼす鉄心間の磁束渡りの影響. 電学論 A. 2021, vol. 141, no. 4, p. 226-232.
 - 8) 溝上雅人, 久保田猛. 積鉄心変圧器のステップラップ接合化による特性変化. 電気学会マグネティクス研究会資料. 1988, MAG-98-173.
 - 9) 溝上雅人, 黒崎洋介. 変圧器鉄心の接合形式による騒音と磁歪の変化. 電学論 A. 2014, vol. 134, no. 5, p. 334-339.
 - 10) Mechler, G. F.; Girgis, R. S. Magnetic Flux Distribution in Transformer Core Joints. IEEE Trans. Power Delivery. 2000, vol.15, no. 1, p. 198-203.
 - 11) 大村健, 山口広, 石垣雄亮, 岡部誠司, 戸田広朗. 三相変圧器鉄心の三次元振動解析. 電学論 A. 2015, vol. 135, no. 7, p. 414-423.
 - 12) 山口広, Helmut Pfützner, 本田厚人. 多軸磁歪測定に基づく方向性電磁鋼板の磁区モデリング. 電学論 A. 2010, vol. 130, no. 9, p. 831-836.
 - 13) 岡部誠司, 石田昌義, 黒沢光正. 三相積鉄心変圧器の T 接合部モデルの局所磁束測定. 磁気応用学会誌. 1998, vol. 22, no. 4-2, p. 713-716.
 - 14) Hubert, A.; Schafer, R. Magnetic Domains. 1998, Springer, Berlin.
 - 15) 新井 聡. 電磁鋼板の補助磁区構造と磁区制御技術について. 磁気応用学会誌. 2001, vol. 25, no. 12, p. 1612-1628.
 - 16) 水野末良, 野田伸一, 関子, 秋元清克, 阿部真一郎, 山田慎. 変圧器鉄心の固有振動特性. 機械学会. 2011, 【No. 11-2】 Dynamics and Design Conference 2011, 702-1-702-6.