

Analysis of Noise Emitted from Three-Phase Stacked Transformer Model Core



石田 昌義
Masayoshi Ishida
技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(課長)・理博



岡部 誠司
Seiji Okabe
技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(掛長)



佐藤 圭司
Keiji Sato
水島製鉄所 管理部技
術サービス室 主任
(課長)

要旨

三相積鉄心変圧器の騒音発生要因把握のため、高磁束密度方向性電磁鋼板を用いたモデルトランスにより、素材と鉄心構造の騒音に及ぼす影響を調査した。50 Hz、1.7 T での騒音値は素材の B_8 値と良い相関を示し、素材 B_8 の 0.01 T の増大に対し約 2 dB 減少する。鉄心接合方法間の比較では、ステップラップにおける騒音値は交互積みよりも小さい。無加圧状態の騒音値には磁歪高調波成分および励磁磁化力が強く相関する。ヨーク部の振動加速度は接合部が特に大きい。ヨーク部を加圧した場合、騒音値は 0.05 MPa 付近で最小値をとった後再び増大する。ステップラップでは加圧状態における低磁束密度での騒音値は比較的小さい。

Synopsis:

The influence of structure and material of core on the noise emitted from 3-phase stacked transformer core has been studied using model cores composed of high-flux-density grain-oriented magnetic steels. The noise level at 1.7 T, 50 Hz decreases by 2 dB with an increase of 0.01 T in B_8 of the core material and is smaller by 2-3 dB with step-lap joints than alternate-lap joints. The amount of higher harmonics in magnetostrictive oscillation and magnetizing force of the core material strongly correlate with the noise level. The vibration around the joints governs the noise level when the core is free of clamping pressure. The noise level decreases as clamping pressure increases until reaching a minimum at a stress of about 0.05 MPa and then turns upward with a further pressure increase. The increasing rate of noise level is more moderate with the step-lap joint than the alternate-lap joint.

1 緒 言

近年、環境保全への関心の高まりから、変圧器の騒音低減のためにその鉄心材料である方向性電磁鋼板に対しても低騒音化への対応が強く要請されている¹⁾。変圧器騒音は主として鉄心素材における磁歪振動および鉄心材接合部における電磁振動に起因するものと考えられているが、従来の研究においては特に磁歪による振動との関連において議論されてきた^{2,3)}。両者を分離することは困難であるが、比較的簡単な構造を用い、素材と構造を系統的に変化させることによって騒音に及ぼす主要な要因を把握することは可能であると考えられる⁴⁾。

本報においては、変圧器騒音への鉄心素材および鉄心構造が及ぼす影響の定量的把握を目的として、最近開発された、より高い磁束密度を有する方向性電磁鋼板 New RGH⁵⁾ および従来の RGH を積層して積鉄心とした三相モデル変圧器を構成し、鉄心から発生する騒音レベルと鉄心素材特性および積層方法との関係、さらには締め付け圧などの影響を調査した結果を述べる。

2 実験方法

鉄心素材として、板厚 0.23 mm の New RGH (製品規格記号 23RGH090N) および RGH (23RGH090)、板厚 0.30 mm の New RGH (30RGH105N) および RGH (30RGH110) を用い、150 mm 幅にスリット、斜角切断して鉄心積層に供した。用いた素材の磁気特性を Table 1 に示す。いずれの板厚においても、New RGH は RGH に比べて B_8 (磁化力 800 A/m、周波数 50 Hz における磁束密度) が約 0.03 T 高くなっている。

三相モデル変圧器鉄心の形状は、板幅一定・矩形断面の 3 脚構造とした。ヨーク部は 2 分割 V ノッチとした。積層方法としては、

Table 1 Magnetic properties of model core materials

Material	Thickness (mm)	B_8 (T) ¹⁾	$W_{17/50}$ ²⁾ (W/kg)	$W_{5/60}$ (W/lb)
23RGH090N	0.23	1.931	0.85	0.358
23RGH090		1.898	0.89	0.383
30RGH105N	0.30	1.930	1.02	0.446
30RGH110		1.896	1.06	0.462

¹⁾Magnetic flux density at $H = 800$ A/m, 50 Hz

²⁾Iron loss at $B = 1.7$ T, 50 Hz

* 平成 9 年 8 月 20 日原稿受付

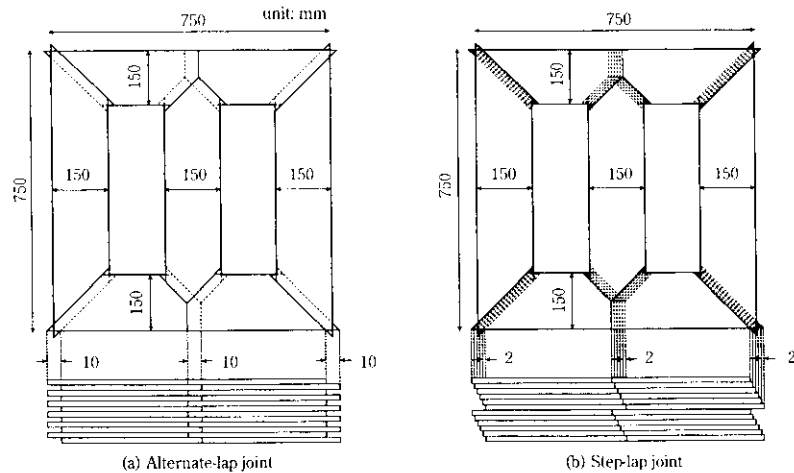


Fig. 1 Structure of three-phase stacked transformer model cores

Table 2 Specifications of model transformer core

Joint geometry	Alternate-lap	Step-lap (6 steps)
Shift length	10 mm	2 mm × 5
Number of lamination /unit lap	2	
Total number of lamination	144 (0.23 mm thick)	108 (0.30 mm thick)
Core weight	ca. 100 kg	

交互積みおよび6段ステップラップの2種の接合方式を用いた。鉄心の構造を Fig. 1 に、鉄心構造の諸元を Table 2 に示す。鉄心質量は約 100 kg であり、外形寸法は一辺 750 mm の正方形である。鉄心は水平の平面上に積層した。励磁および磁束検出には、一次および二次コイルをそれぞれの脚に各 60 ターン巻回したコイル棒を用いた。

鉄心に加えた締め付け圧の影響を明らかにするために、バネの伸縮によってヨーク部に一様な面圧を印加できる機構を設置し、最大 0.2 MPa の締め付け圧の下で変圧器特性を測定した。

騒音は、モデル鉄心の3本の脚の直上 300 mm の位置に設置したマイクロフォンを用いて JIS 規定の A スケール補正回路によって測定し⁶⁾、エネルギー平均をとった。測定時の暗騒音レベルは最大 31 dB であった。また、ヨーク表面上の各部分の振動強度は加速度振動計を用い、ヨーク表面の漏洩磁界はガウスメータを用いて検出した。鉄心素材の磁束密度および鉄損は JIS に規定されたエプスタイン試験法によって測定した⁷⁾。磁歪特性は、脚部に使用した鋼板から数枚を抽出して幅 100 × 長さ 400 mm に剪断した試験片を用いて励磁周波数 50 Hz で測定した。磁歪調波成分は磁歪信号出力をスペクトルアナライザにより周波数解析して求めた。

3 実験結果

3.1 モデル変圧器鉄心の騒音レベル

板厚 0.23 mm および 0.30 mm の New RGH および RGH を鉄心材料に用いたモデル変圧器鉄心から発生する騒音を測定した結果を以下に示す。

この2種の素材を積層したモデル変圧器鉄心の無加圧状態における騒音レベルを Fig. 2, 3 に示す。ここでは素材間の比較とともに、

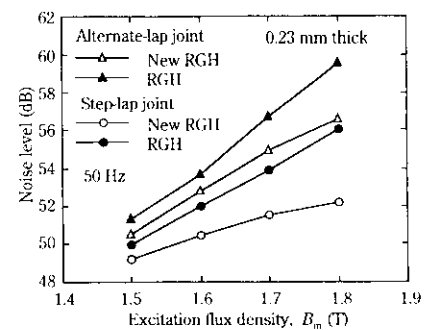


Fig. 2 Noise level of model transformer cores using 0.23 mm thick New RGH and RGH sheets

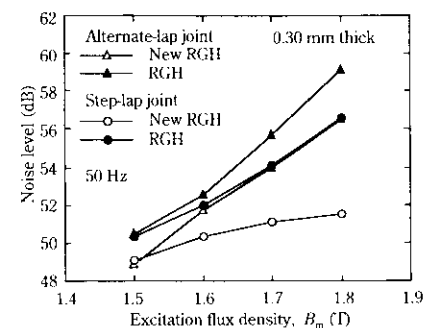


Fig. 3 Noise level of model transformer cores using 0.30 mm thick New RGH and RGH sheets

積層方法として交互積みおよびステップラップを比較する。

同図から明らかなように、いずれの板厚においても、 B_m が高い New RGH が RGH に比べて低い騒音レベルを示す。この差は 1.7 T、50 Hz では 2~3 dB 程度であり、励磁磁束密度が高いほど大きくなる傾向を示している。積層方法間で比較すると、1.7 T、50 Hz での騒音レベルはステップラップの場合には交互積みよりも 2~3 dB 小さく、その差は高励磁磁束密度ほど拡大する傾向となる。

Fig. 2 および 3 の結果から、騒音レベルは鉄心素材と積層構造の両者にほぼ独立に依存しているといえる。

3.2 騒音に及ぼす素材特性の影響

種々の B_m レベルを有する 0.23 mm 厚素材を用いて、モデル変圧

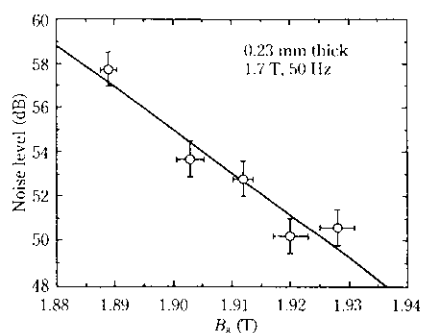


Fig. 4 Relation between noise level of step-lap model transformer core and B_g value of core material

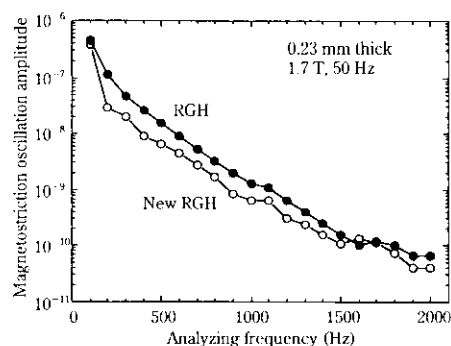


Fig. 5 Spectral analysis of magnetostriction oscillation amplitude in 0.23 mm thick New RGH and RGH sheets

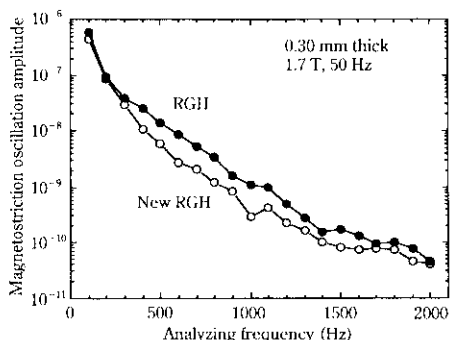


Fig. 6 Spectral analysis of magnetostriction oscillation amplitude in 0.30 mm thick New RGH and RGH sheets

器の騒音に及ぼす素材磁束密度の影響を調べた結果を Fig. 4 に示す。ここではステップラップ接合を採用した。騒音レベルは、素材 B_g に対して明確な負の相関を示し、0.23 mm 厚素材においては、 B_g が 0.01 T 増大すると騒音レベルは 2 dB 程度減少する。

次に、可聴周波域の騒音に強い影響を与えと考えられる磁歪調波成分について調査・解析した結果を示す。

前記の 0.23 mm および 0.30 mm 厚の鉄心素材から抽出した試料の磁歪調波成分強度を Fig. 5, 6 に示す。いずれの場合にも New RGH の調波成分強度は RGH に比べて 1/2 程度の値を示している。

鉄心の騒音は振動の加速度によく対応するという立場に基づき²⁾、次式によって振動加速度調波成分 p_n を計算した。

$$p_n = \lambda_n f_n^2 \gamma_n \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 λ_n は磁歪調波成分、 f_n は周波数、 γ_n は A スケール聴感補正係数である。

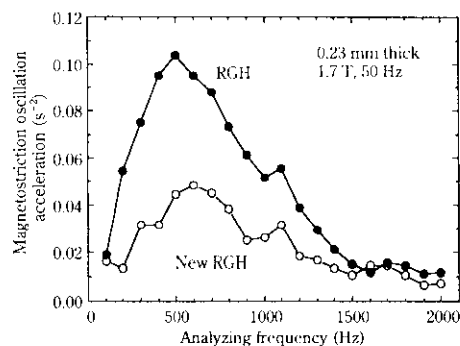


Fig. 7 Spectral intensity of magnetostriction oscillation acceleration in 0.23 mm thick New RGH and RGH sheets

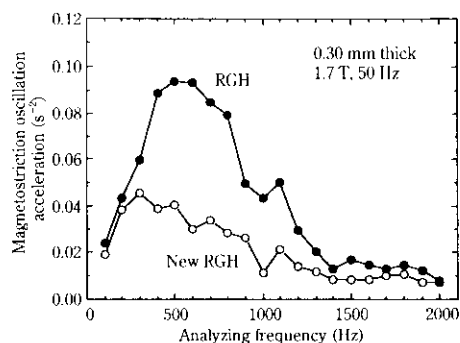


Fig. 8 Spectral intensity of magnetostriction oscillation acceleration in 0.30 mm thick New RGH and RGH sheets

1.7 T, 50 Hz 励磁における振動加速度調波成分の計算値を Fig. 7, 8 に示す。磁歪調波成分強度を反映して、New RGH の振動加速度スペクトルは、ほとんどすべての周波数において RGH よりも低減されているが、特に最大強度となる 500 Hz 付近での低減が著しい。

A スケール補正された振動加速度調波成分から、次式により定義される磁歪振動加速度レベル P を求めた。

$$P = 20 \log \left[\sqrt{\sum_n p_n^2 / p_0} \right], \quad p_0 = \lambda_0 f_0^2 \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式中、基準振動加速度レベル $p_0 = \lambda_0 f_0^2$ に対しては、 $\lambda_0 = 10^{-9}$ 、 $f_0 = 100$ Hz の値を用いた。

Fig. 4 に示したと同じ 0.23 mm 厚の素材における上記の磁歪振動加速度レベル P と素材 B_g の関係を Fig. 9 に示す。磁歪振動加速度レベル P と B_g の値は極めて良い相関を示す。また、モデル鉄心による騒音レベル実測値と、磁歪振動加速度レベルは、Fig. 10 に示すように良い相関を示す。

一方、電磁振動による騒音は素材の励磁特性に強く影響されると考えられる。実際、Fig. 11 に示すように音圧振幅は励磁磁束密度 $B_m = 1.7$ T における磁化力 H_{17} とほぼ比例関係にあるといえる。

3.3 鉄心表面における振動加速度および漏洩磁界の分布

ステップラップおよび交互積みにより 0.30 mm 厚素材を積層したモデル鉄心ヨーク部表面での振動加速度面垂直成分の 1.7 T, 50 Hz における分布を Fig. 12 に示す。この図から明らかに脚・ヨークの接合箇所での振動が大きいことが知られる。接合箇所から離れた部分では接合箇所よりも 10 dB 程度低い値を示している。接合方式間で比較すると、ステップラップよりも交互積みの方が全体の振動強度が強く、かつ接合箇所への集中度がより強い傾向が見られる。素材間で比較すると、New RGH の方が全体として低い振動加速度

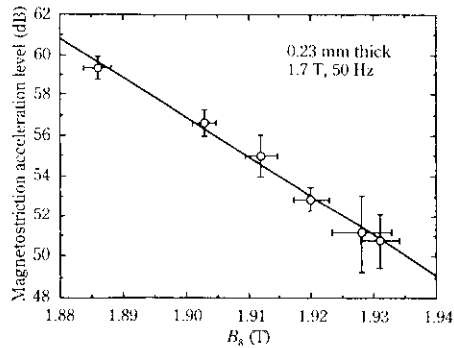


Fig. 9 Dependence of magnetostriction oscillation acceleration level on B_m value of 0.23 mm thick material

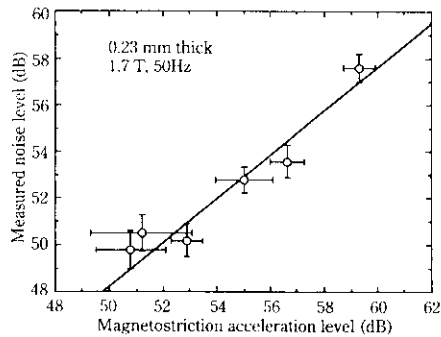


Fig. 10 Comparison of measured noise level with magnetostriction oscillation acceleration level

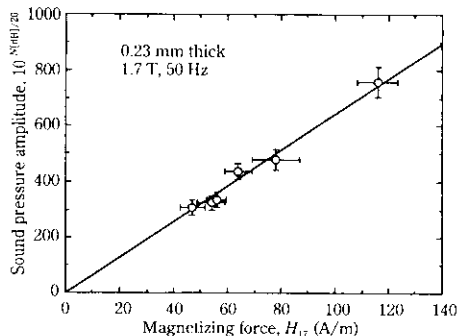


Fig. 11 Dependence of measured sound pressure amplitude on magnetizing force of core material

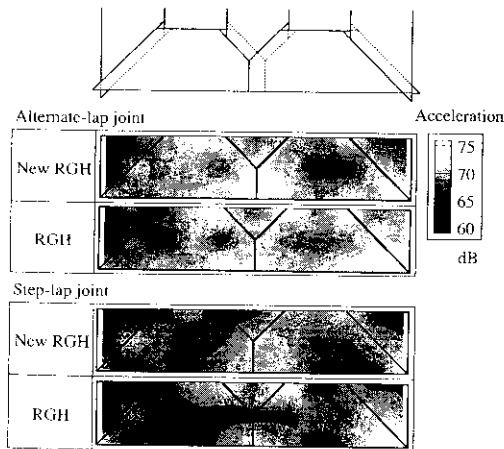


Fig. 12 Distribution of vibration acceleration level on yoke surfaces of model cores using 0.30 mm thick New RGH and RGH sheets

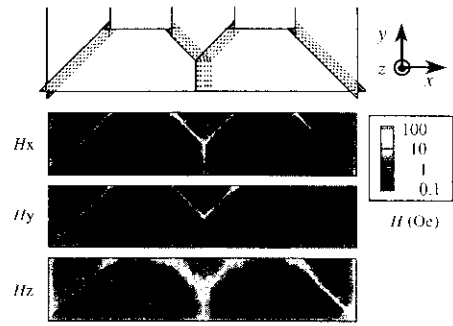


Fig. 13 Distribution of stray fields on yoke surface of step-lap model transformer core using 0.30 mm thick New RGH sheet

を示し、かつ接合箇所での集中度も弱い。以上の結果は、Fig. 3 の騒音レベル測定結果と一致する。

次に、0.30 mm 厚の New RGH 材をステップラップにより積層した鉄心ヨーク部の 1.7 T, 50 Hz 励磁における漏洩磁界分布を Fig. 13 に示す。漏洩磁界は脚・ヨークの接合部分に集中しており、特に最も強度の強い面垂直成分は、Fig. 12 に示した振動加速度とよく一致した分布を示す。これは、接合部に集中的に発生する漏洩磁界による電磁振動が騒音に強い影響を与えている可能性を示唆する。

3.4 騒音に及ぼす鉄心締め付け圧の影響

上述の結果はすべて鉄心に対する加圧のない状態で測定したものであるが、鉄心締め付け圧は騒音に強い影響を及ぼすと考えられる。この影響を把握するために、ヨーク部に一樣な面圧を印加して騒音を測定した。鉄心素材としては、3.1 で用いた素材と同一の 0.30 mm 厚の New RGH および RGH を用いた。Fig. 14 に交互積み、Fig. 15 にステップラップにより積層したモデル鉄心の騒音レベル測定結果を示す。

まず、交互積みの場合には、励磁磁束密度にかかわらず 0.05 MPa の面圧で騒音レベルは最小となり、さらに大きい面圧では再び増大する傾向となる。無加圧状態では New RGH は RGH よりも小さい騒音レベルを示すが、その差は 0.05 MPa で減少した後、再び増大して無加圧での差よりも増大する傾向を示す。

一方、ステップラップの場合、騒音レベルの最小値は励磁磁束密度 $B_m = 1.5$ T では 0.075~0.1 MPa で最小値をとるが、 B_m の増大とともに騒音レベルが最小となる面圧が減少し、1.8 T では 0.025 MPa となる。さらに大きい面圧での騒音レベルの増大幅は高 B_m の方が大きい。素材間の差はやはり面圧とともに増大する傾向にある。

この結果を B_m 依存性に関して整理し直すと Fig. 16 を得る。無加圧の場合には B_m 増大とともに素材間、積層方法間の差が拡大す

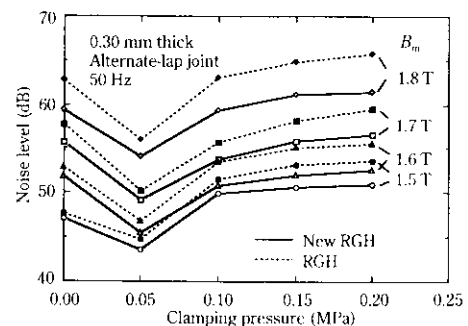


Fig. 14 Influence of clamping pressure on noise level of alternate-lap core

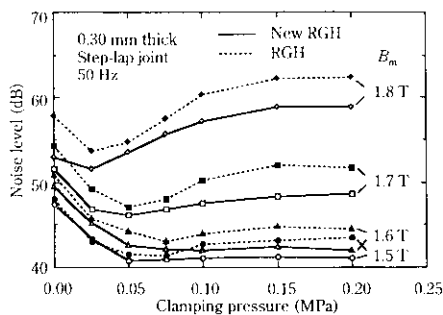


Fig. 15 Influence of clamping pressure on noise level of step-lap core

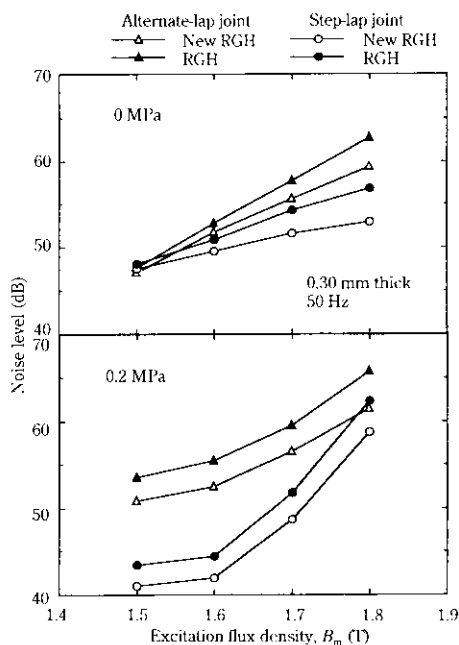


Fig. 16 Dependence of noise level on excitation flux density with and without clamping pressure applied

るのに対し、0.2 MPa の面圧を加えた場合には素材間の差の変化は小さく、積層方法による差はむしろ B_m とともに減少する傾向を示している。この結果は、締め付け力を加えた直立型のモデル鉄心を用いて行われた実験の結果とも一致しており、接合部に集中した磁束の飽和による現象と考えられる⁸⁾。

4 考 察

以下に、変圧器鉄心の騒音の発生機構と素材特性・鉄心構造の関係に関して、実験結果に基づいて考察する。

磁歪振動と素材特性の関係については、 B_8 の高い素材が小さい

磁歪高調波成分を示す傾向があり (Fig. 5, 6)、また素材 B_8 の増大とともに磁歪振動加速度レベルは減少する傾向を示す (Fig. 9) ことから、 B_8 が高い素材ほど磁歪振動が低減されるといえる。

一方、電磁振動は素材の励磁特性に影響を受けると考えられる。すなわち、鉄心素材が受ける電磁振動力は接合部などに生じる漏洩磁界の強度に依存すると考えられるが、漏洩磁界は磁気回路内の磁気抵抗に相当するため、磁気回路に関するオーム則より磁化力にほぼ比例することとなる。そのため、騒音の音圧振幅と磁化力 H_{17} が比例する結果となった (Fig. 11) と理解される。 H_{17} は B_8 と負の相関を示すため、 B_8 向上により電磁振動は低減する方向に働く。

ヨーク部を加圧した場合、騒音レベルが一旦低下した後再び増加に転じている (Fig. 14, 15)。これは、無加圧状態における板面垂直方向の振動 (電磁振動が主と考えられる) が抑制され、さらに加圧力増大とともに鉄心内部の板面内方向の振動 (磁歪振動が主と考えられる) が外部に伝播されやすくなることに対応していると考えられる。すなわちこの変化は、騒音発生の主要因が面圧力の増大とともに電磁振動から磁歪振動に移行したことによると考えられる。

以上から、モデル鉄心の騒音は、無加圧状態では励磁特性 H_{17} を通じて電磁振動に支配され、0.05 MPa 以上の加圧状態では磁歪高調波成分を通じて磁歪振動に支配されるというモデルが成立すると考えられる。いずれの場合にも素材磁束密度 B_8 の向上にともなって騒音レベルは低減される方向に変化する。

ヨーク締め付け時の騒音レベルが示す構造依存性については、ステップラップの方が交互積みよりも接合部での磁束集中の程度が緩和されるため、接合部漏洩磁界による電磁振動および接合部における局所磁歪とも減少したことによると考えられる⁸⁾。

5 結 言

三相積鉄心モデル変圧器により、素材磁束密度 B_8 を改善した方向性電磁鋼板 New RGH と従来の RGH を用いて騒音レベルに影響する要因の調査を行い、以下の知見を得た。

- (1) 騒音レベルは素材と積層方法の両者にほぼ独立に依存する。
1.7 T, 50 Hz 励磁時には、素材 B_8 が 0.01 T 増加すると約 2 dB 騒音レベルが減少する。また 1.7 T, 50 Hz ではステップラップは交互積み比べて 2~3 dB 低い騒音レベルを示す。
- (2) モデル変圧器鉄心の騒音レベルには、磁歪振動加速度調波成分強度および励磁磁化力の双方が強く相関する。
- (3) 無加圧状態でのモデル変圧器鉄心の騒音には、脚・ヨークの接合部での振動が主として寄与する。この振動分布はヨーク表面での漏洩磁界分布とほぼ一致する。
- (4) ヨーク部を加圧した場合、騒音レベルは 0.05 MPa 付近で最小となった後、再び増大する。低励磁磁束密度での騒音レベルの対加圧力増大率はステップラップの方が交互積みよりも緩やかである。無加圧および 0.2 MPa の場合とも、鉄心素材の B_8 が高い方が騒音レベルは低い。

参 考 文 献

- 1) 黒沢光正, 名村夏樹, 山田茂樹: 川崎製鉄技報, **29**(1997)3, 174-176
- 2) 電気学会磁性材料常置専門委員会: 「けい素鋼板の磁気ひずみと変圧器鉄心の騒音」, 電気学会技術報告 (I) 部第 101 号(1971), 1
- 3) 堀 康郎, 清野和之: 「変圧器鉄心の振動解析」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-79-20(1979)
- 4) 中田高義, 石原好之, 中野正典: 「磁気ひずみに含まれる高調波成分に及ぼす諸因子の検討」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-79-24(1979)
- 5) 石田昌義, 佐藤圭司: 「3 相積鉄心モデルトランス騒音の解析」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-93-187(1993)
- 6) 日本工業規格 JIS C 1505(1988)
- 7) 日本工業規格 JIS C 2550(1992)
- 8) 鍋嶋 晃, 長江洋典, 矢後克二: 「磁区制御電磁鋼帯を用いた三相変圧器鉄心の鉄損および騒音特性」, 電気学会静止器研究会資料, SA-93-36(1993)