

変圧器の低騒音化に関する実験的検討

An Experimental Study of Transformer Core Noise

鍋嶋 昇^{*1}
Akira Nabeshima
長江洋典^{*2}
Hirofumi Nagae

The causes of transformer core noise are magnetostrictive vibration of core materials and electromagnetic vibration generated at the core joint or between laminated sheets. However, it is fundamentally difficult to decrease the noise as the relationship between the vibration and the noise is not concretely known.

Therefore, noise level variations due to the difference of core materials or core joint methods were experimentally examined, with the object of understanding the phenomena of the noise generated by transformer core.

As a result, the following is confirmed:

- The noise generated from single-phase cores depends on the thickness of the core materials and with thinner materials, the lower the noise.
- The noise generated from three-phase, three-leg laminated cores depends on their jointing method and the V-notched step-lap jointing method generates the lowest noise.

1 まえがき

近年、産業及び経済の発展とともに、人口の都市部への集中なども進んでおり、電力需要はますます増加している。また、環境問題に対する関心は一段と高まっており、人口密集地近傍に設置される変電所も例外ではなく、そこで使用される変圧器も、低騒音化が強く要請されている。

変圧器本体の騒音発生的主要原因としては、①鉄心材料の磁気ひずみ振動、②鉄心の接合部や積層板間に生じる電磁振動、③巻線導体間またはコイルに働く電磁力、④構造体としての共振、などが挙げられる。しかし、騒音はこれら要因の複雑な相互作用によって発生しているため、その解明が難しく、十分な研究がなされていないのが現状である。

そこで、我々は、変圧器鉄心から発生する騒音の現象を少しでも把握するために、鉄心材料及び鉄心の接合方式の違いによって騒音レベルがどのように変化するかを実験的に調査した^{(1)~(3)}。

2 試験用鉄心

試験用として、単相二脚鉄心（以下、単相モデル鉄心と呼ぶ）と三相三脚鉄心（以下、三相モデル鉄心と呼ぶ）を製作した。

単相モデル鉄心は、表1に示す巻鉄心3台と積鉄心3

台で、鉄心材料には、従来の方向性電磁鋼帯（以下、プレーン材と呼ぶ）として、板厚0.27mmの27ZH100、及び板厚0.23mmの23ZH90を、磁区制御電磁鋼帯（以下、磁区制御材と呼ぶ）として、機械的けがきにより磁区制御された板厚0.23mmの23ZDMH85を使用した。図1にこれらの鉄心寸法を示す。

表1/単相モデル鉄心

Tab.1/ Single-phase model core

鉄心	接合方式	材 料	記 号	板厚 (mm)
巻鉄心	ステップラップ接合	方向性電磁鋼帯	27ZH100	0.27
			23ZH90	0.23
		磁区制御電磁鋼帯	23ZDMH85	0.23
積鉄心	45°ラップ接合	方向性電磁鋼帯	27ZH100	0.27
			23ZH90	0.23
		磁区制御電磁鋼帯	23ZDMH85	0.23

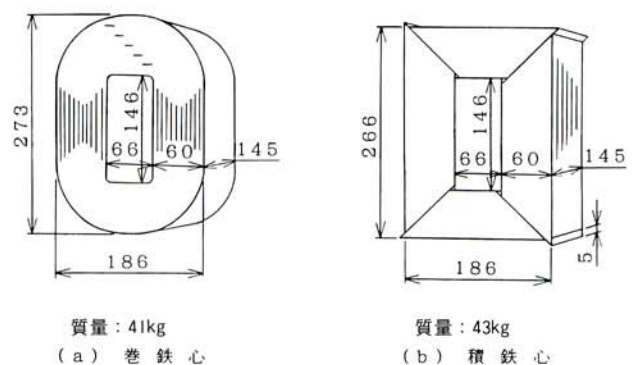


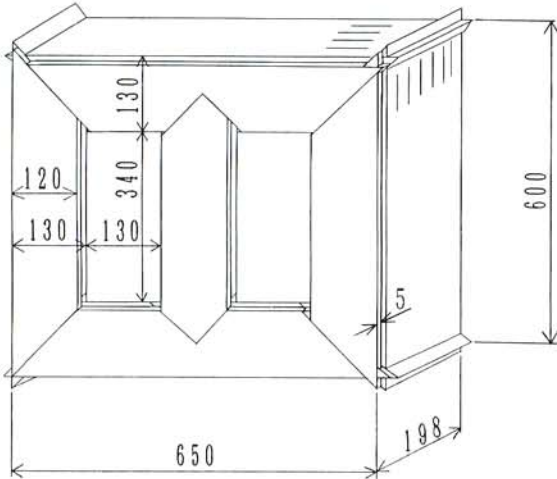
図1/単相モデル鉄心寸法 (単位: mm)

Fig.1/ Dimension of single-phase model core (unit: mm)

表2/三相モデル鉄心

Tab.2/ 3-phase model core

鉄心構造	素材	方向性電磁鋼帯		磁区制御電磁鋼帯	
		30ZH105 t 0.3mm	27ZH100 t 0.27mm	27ZDKH95 t 0.27mm	23ZDKH90 t 0.23mm
普通額縁接合	-	②	④	-	-
Vノッチステップ	6ステップ	①	③	⑤	⑧
ブラップ接合	4ステップ	-	-	⑥	⑨
	8ステップ	-	-	⑦	⑩



質量：445 kg

図2/三相モデル鉄心寸法 (単位：mm)

Fig.2/ Dimension of 3-phase model core (unit : mm)

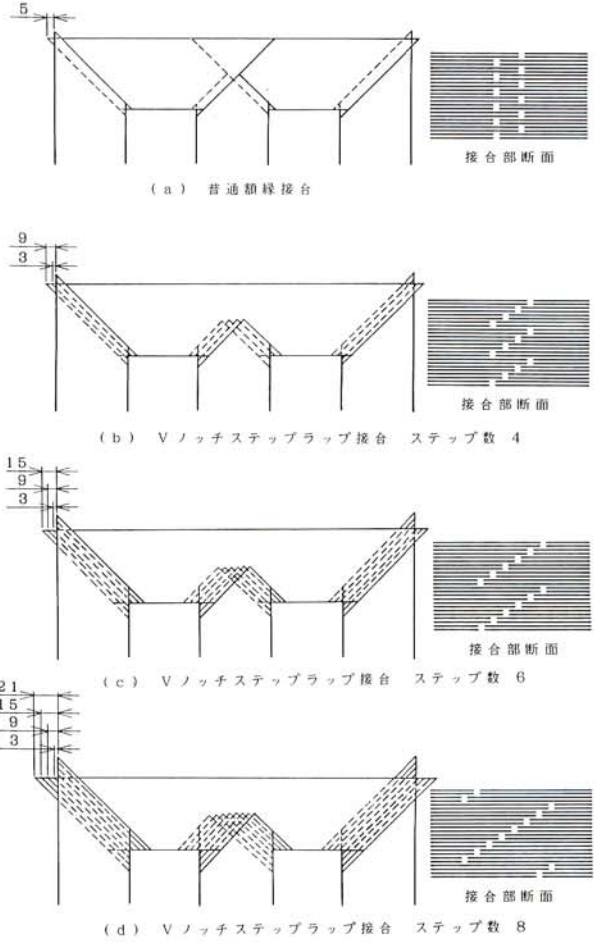


図4/三相モデル鉄心接合方式 (単位：mm)

Fig.4/ Joint structure of 3-phase model core (unit : mm)

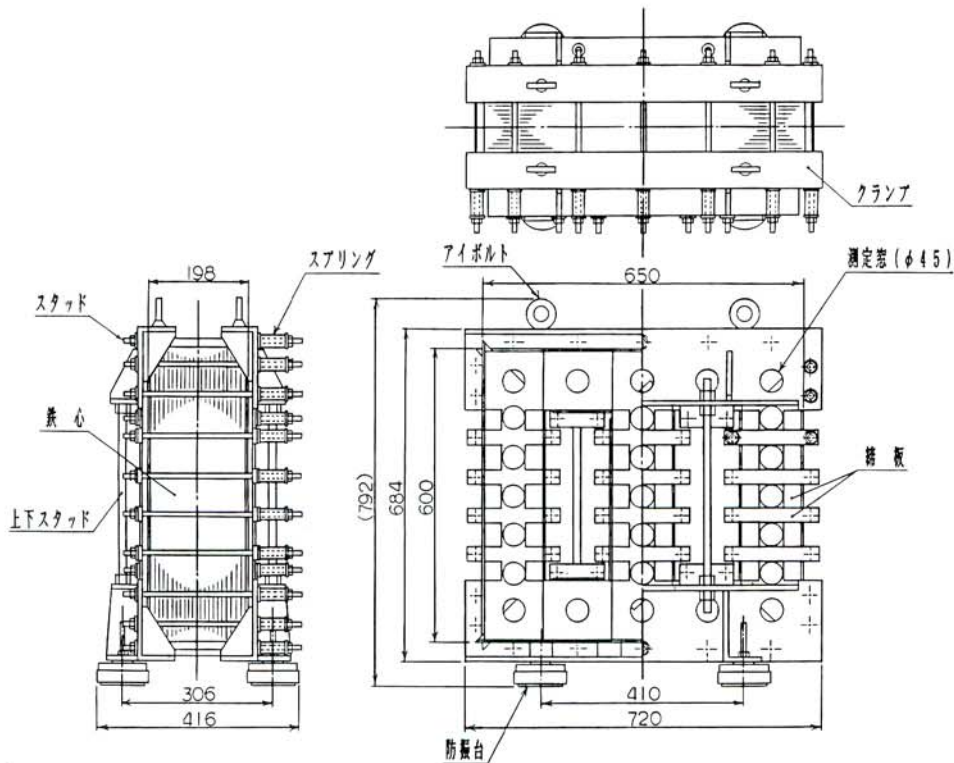


図3/三相モデル鉄心外形図 (単位：mm)

Fig.3/ Outline of 3-phase model core assembly (unit : mm)

なお、磁区制御材とは、方向性電磁鋼帯の表面に局部的に歪を加えることにより、磁区を細分化して鉄損を低減した鋼帯のことである。

三相モデル鉄心は、表2に示す10台で、鉄心材料には、プレーン材として、0.3mm厚の30ZH105、0.27mm厚の27ZH100を、磁区制御材として、レーザー照射により磁区制御された0.27mm厚の27ZDKH95、0.23mm厚の23ZDKH90を使用した。図2に鉄心寸法を示し、図3にクランプ等を取り付けた外形図を示す。また、鉄心の接合方式については図4に示す。

図3に示すように三相モデル鉄心には、締付圧力の影響を調べるために50本のスタッドと偏平線コイルばね(スプリング)を取り付けた。

3 騒音測定方法

騒音測定はJISC 1505に準拠する精密騒音計を用い、騒音試験室(暗騒音20dB(A))で行った。

測定点は、鉄心の全周にわたり、単相モデル鉄心では、図5に示す14点で、三相モデル鉄心では、図6に示す鉄心高さ1/2の位置で12点である。マイクロホンは鉄心表面

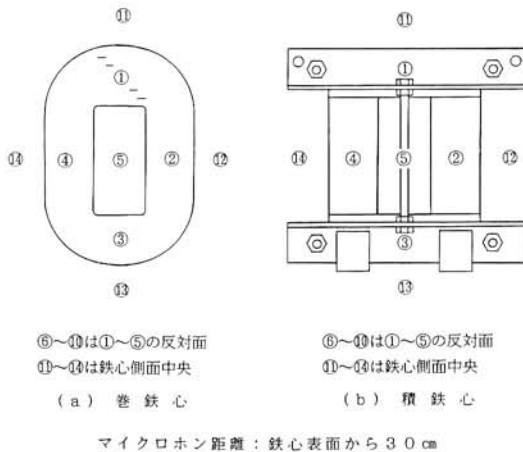


図5/単相モデル鉄心騒音測定点
Fig.5/ Noise level measuring points for single-phase model core

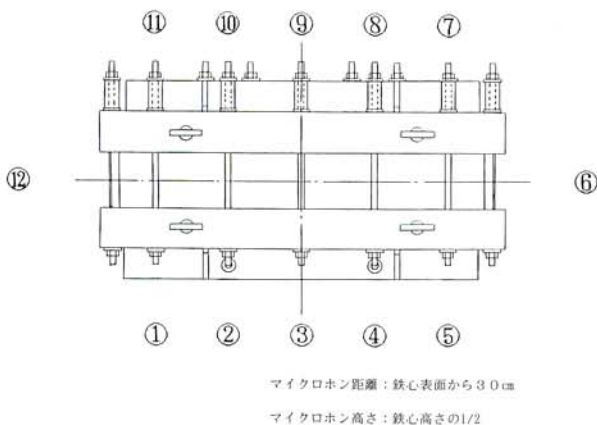


図6/三相モデル鉄心騒音測定点
Fig.6/ Noise level measuring points for 3-phase model core

から30cm離し、騒音計の周波数補正回路はA特性とした。また、測定値はJIS Z 8732による暗騒音の補正を行い、騒音の平均値計算にはエネルギー平均を用いた。

三相モデル鉄心では、鉄心の締付圧力を調節できるようにしてあるが、その圧力はスプリングのたわみ量より換算した。

4 測定結果

4.1 単相モデル鉄心の騒音特性

図7に単相モデル鉄心に使用した鉄心素材の圧延方向磁歪特性を示す。この磁歪特性は、外部応力を与えない状態で、正弦波電圧($f=60\text{Hz}$)印加時の磁歪の振幅(peak-peak)を差動トランス法で測定したものである。各素材の磁歪特性は磁束密度が1.5T以下ではほぼ同じ特性を示しているが、1.5T以上では多少差が生じている。

また、この結果より、磁区制御材23ZDMH85においては、鋼帯表面に加えられた機械的けがきによる歪の影響は磁歪特性に現れないことが分る。

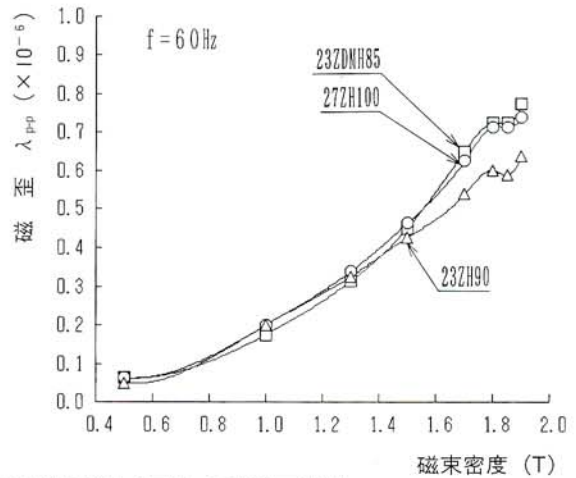


図7/鉄心素材圧延方向磁歪特性
Fig.7/ Magnetostriction of magnetic steel sheet

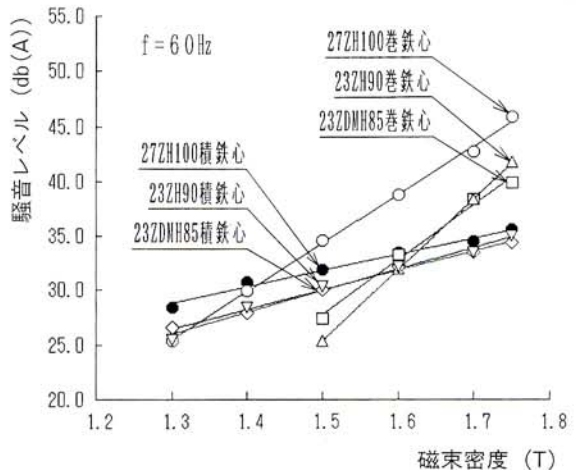


図8/単相モデル鉄心騒音特性
Fig.8/ Noise level of single-phase model core

図8に鉄心材料別騒音特性を示す。巻鉄心では、23ZH90の鉄心と23ZDMH85の鉄心においてその特性はほとんど変わらないが、27ZH100の鉄心は図7における鉄心素材の磁歪特性に大きな差がないにも関わらず23ZH90及び23ZDMH85の鉄心よりもかなり高い値を示している。積鉄心でも、同様のことが言えるが、27ZH100の鉄心と23ZH90、23ZDMH85の鉄心との差はそれほど大きくない。これは、巻鉄心の場合、板厚の薄い方が鉄心成形時の曲げに対するなじみが良くなり、加工歪の影響が少なくなるためと考えられる。

このように、単相変圧器鉄心では、巻鉄心、積鉄心ともに騒音は板厚に依存する傾向が認められ、薄板ほど騒音低減効果がある。特に、巻鉄心では加工性の影響も加味されるため薄板化による騒音低減効果が大きいと考えられる。

一方、巻鉄心と積鉄心とは、騒音特性の傾きが異なり、磁束密度が高くなると騒音は巻鉄心の方が積鉄心よりも高くなる。この騒音特性が異なる要因は、巻鉄心と積鉄心の構造的な相違から生じる鉄心内磁束波形のひずみ(高調波成分含有量)の違いによるものと考えられる。

4.2 三相モデル鉄心騒音特性

図9に三相モデル鉄心に使用した鉄心素材の圧延方向磁歪特性を示す。この磁歪特性も4.1節と同様、磁歪の振幅を測定したものである。

どの材料においても磁歪特性に大きな差はないが、30ZH105の磁歪は他の材料に比べやや高めである。

また、この結果よりレーザー照射による磁区制御材においても、鋼帯表面に加えられたレーザー歪の影響は磁歪特性に現れないことが分る。

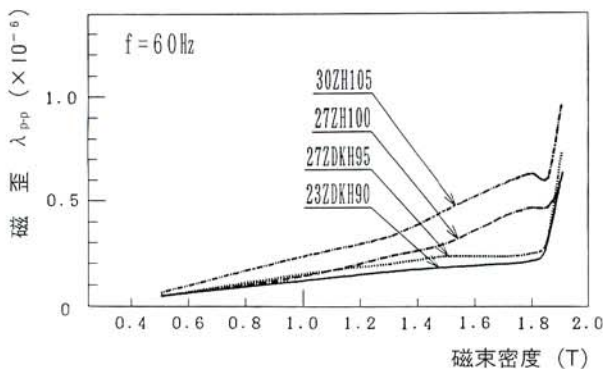


図9/鉄心素材圧延方向磁歪特性
Fig.9/ Magnetostriction of magnetic steel sheet

図10にVノッチステップラップ接合形鉄心(ステップ数6)で鉄心積厚方向の締付圧力を3 kgf/cm²とした場合の鉄心材料別騒音特性を示す。同図より、磁束密度が1.5 T以上では、鉄心材料の違いによる有意差はほとんどないが、磁区制御材を使用した鉄心では1.5 T以下の低磁束密度域でプレーン材のものより騒音が高くなる傾向が見られる。これは鉄心材料の影響によるものであると考えられるが、図9の磁歪特性ではこのような傾向は見られない。従って、プレーン材と磁区制御材のひずみ波励磁時における磁歪の違い、また、磁区制御材のレーザー照射によって生じる90°磁壁の影響などが考えられるが、このことについては今後調査を行うつもりである。

図11(a)~(d)に鉄心の締付圧力を変化させた場合の鉄心材料別ごとのVノッチステップラップ接合形鉄心(ステップ数6)の騒音特性を示す。これらの図より、騒音は、板厚が薄くなるほど締付圧力に依存する傾向があり、特に、低磁束密度域でその影響が大きいことが分る。平均的に見て、鉄心の積層方向締付圧力の最適値は、3~4 kgf/cm²に存在している。

図12(a)~(c)の鉄心接合方式別騒音特性において、Vノッチステップラップ接合は、普通額縁接合よりも低磁束密度域で騒音がかなり下がり有利であるが、ステップ数別に比較するとステップ数を増しても騒音に大きな差はないことが分る。これは、鉄心接合部での磁束の渡り及び図4に示す鉄心ヨークとV脚のT接合部におけるヨークのカット方式の違いが大きく影響しているものと考えられる。

鉄心の接合部においては、低磁束密度域では積層板間で磁束が渡るが、高磁束密度域になると磁束の一部がギャップ中を通過するようになると報告されている^{(4), (5)}。このことより、ステップラップにすることで、低磁束密

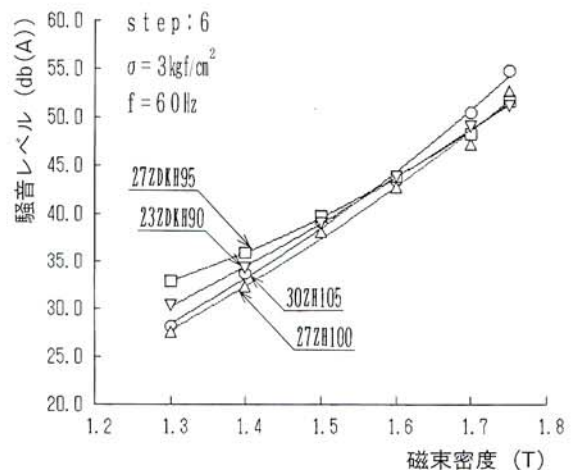


図10/鉄心材料別騒音特性
Fig.10/ Noise level of 3-phase model core

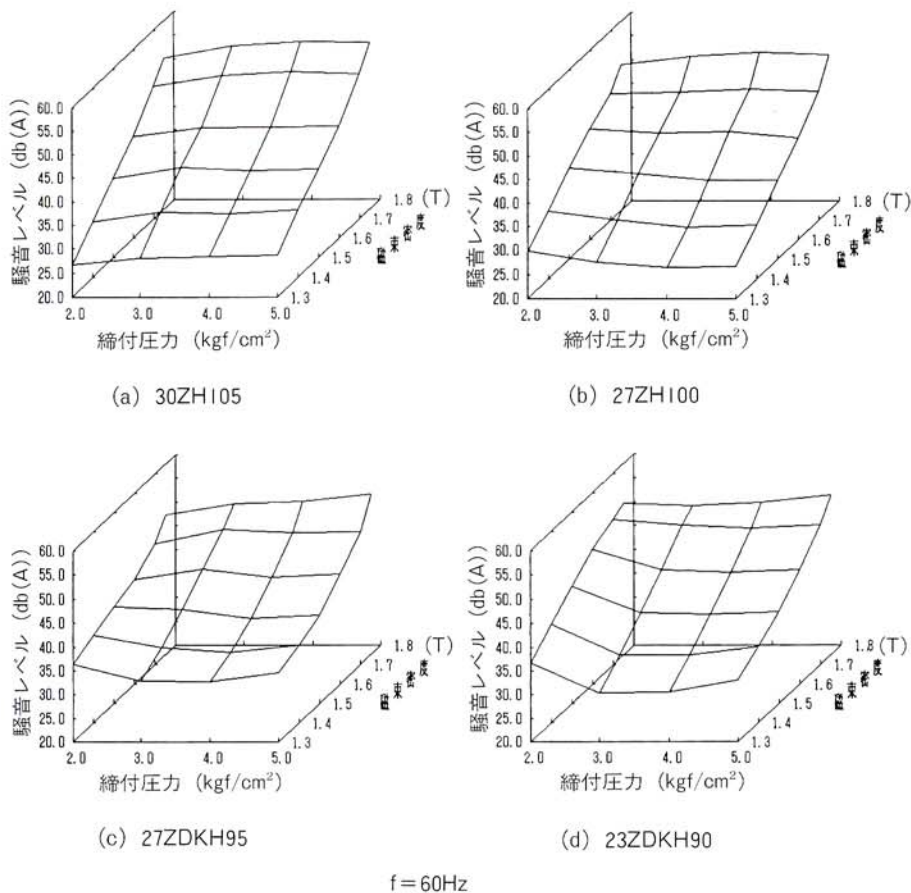


図11/鉄心締付圧力に対する騒音特性

Fig.11/ Relation between noise level and clamping pressure of 3-phase model core

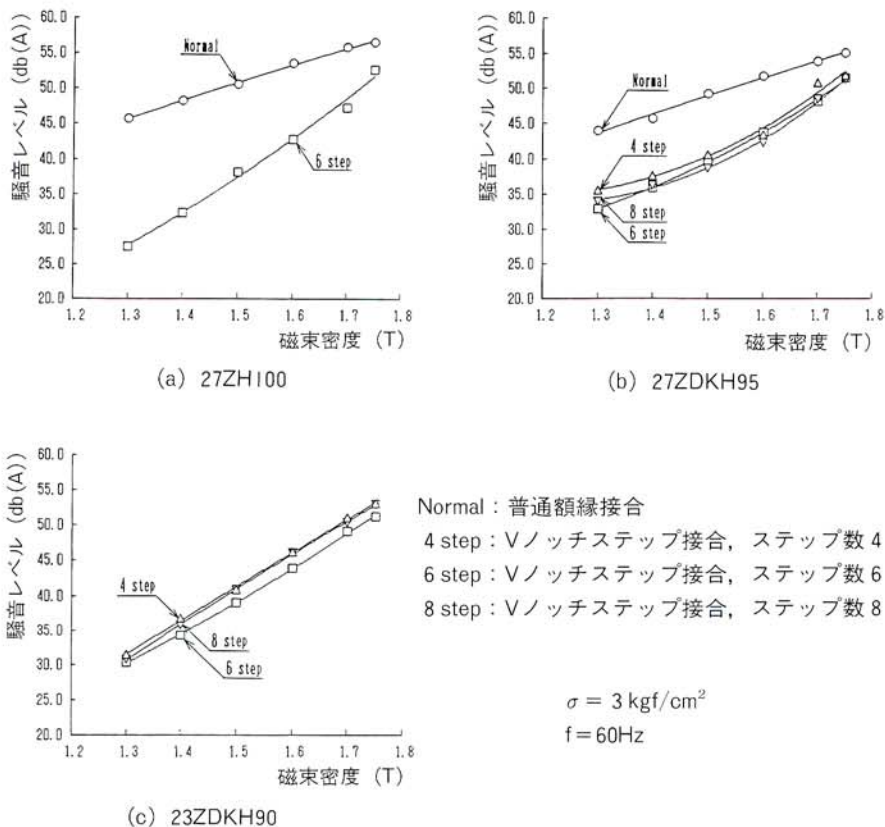


図12/接合方式別騒音特性

Fig.12/Relation between noise level and joint structure of 3-phase model core

度域では接合部での磁束の集中が緩和され、その流れが滑らかになるため騒音の低減効果もたらされるが、高磁束密度域では磁束がギャップ中を通過するようになるため低減効果が減少するものと考えられる。また、ステップラップ接合のステップ数については、今回の結果から推測すると、ステップ数が4で接合部の磁束の流れが十分滑らかになるため、ステップ数をこれ以上増しても騒音の低減効果にはほとんど差はないものと考えられる。

図13に鉄心素材圧延方向磁歪特性とVノッチステップラップ接合形（ステップ数6）鉄心の騒音特性を比較した結果を示す。同図より、磁歪が大きい30ZH105については騒音も高くなっているが、他の材料に関しては、磁歪と騒音との相関性は明かでない。磁歪について考えれば、鉄心中央V脚のT接合部では回転磁束が生じるため、この部分については素材の圧延方向の磁歪だけでなく回転磁束が与えられた時の磁歪をも考慮しなくてはならない。さらに、騒音は、この磁歪振動と電磁振動に構造体としての共振現象が複雑に絡み合ってくるため、その相関関係は容易には把握できない。

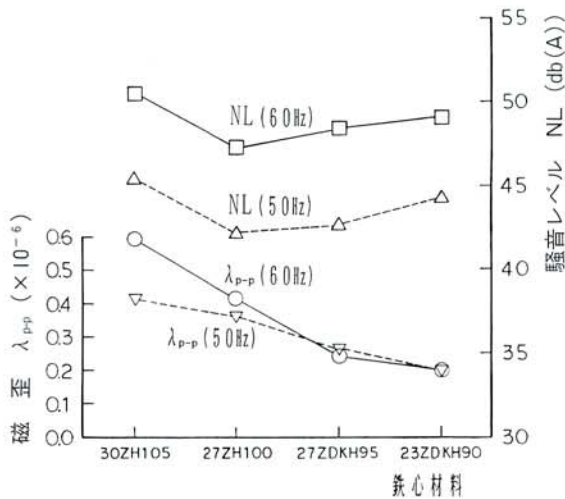


図13/磁歪と騒音の特性比較

Fig.13/ Relation between noise level and magnetostriction

5 あとがき

本稿では、単相モデル鉄心及び三相モデル鉄心の材料別、構造別の騒音特性を比較した結果について報告した。

この結果、単相変圧器鉄心では、巻鉄心、積鉄心ともに薄板化による騒音低減効果があり、この効果は、積鉄心では僅かであるが、巻鉄心では鉄心加工時の影響も含まれるために大きいことが分った。

また、三相変圧器鉄心では、鉄心素材の違いよりも接合方式によって大きく変わり、Vノッチステップラップ接合は、普通額縁接合よりも、低磁束密度領域ほど騒音が低減することが分った。

騒音を低減させるためには、この発生原因を十分把握しておく必要がある。鉄心素材から見れば騒音の発生原因は磁歪にあるが、現実の変圧器鉄心が持つ、ひずみ波励磁あるいは回転磁束下における磁歪特性については、測定方法、測定条件などが確立されていないため、今はまだ騒音と関連づけた研究がされていない。

今後は、騒音に対する磁歪振動と電磁振動の影響度を調査するとともに鉄心のモード解析を行い、構造的共振の面からも騒音の発生機構の究明に努力し、変圧器騒音の低減を図っていきたい。

最後に、鉄心材料の素材特性測定などにご協力頂いた新日本製鐵株式会社の関係諸氏に深く感謝する。

参考文献

- (1) 鍋嶋, 長江, 矢後: 「巻鉄心および積鉄心の鉄損, 騒音特性の比較」, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-93-188
- (2) 鍋嶋, 長江, 矢後: 「鉄心材料別および接合方式別三相変圧器モデル鉄心の騒音特性比較」, 平成5年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, No.146
- (3) 鍋嶋, 長江, 矢後: 「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
- (4) 中田, 河瀬: 「積層鉄心接合部の磁気特性の解析」, 電気学会論文誌B, 102, 57 (昭57-2)
- (5) 中田, 藤原, 坂口: 「変圧器鉄心コーナ部の非線形三次元磁界解析」, 電気学会回転機・静止器合同研究会資料, RM-87-33, SA-87-70