

# 三相三脚変圧器鉄心の音響インテンシティ解析

Sound Intensity Analysis of Three-phase Three-legged Transformer Cores

渡辺 弘行<sup>※1</sup>  
Hiroyuki Watanabe  
戸田 恒雄<sup>※2</sup>  
Tsuneo Toda  
長江 洋典<sup>※3</sup>  
Hirofumi Nagae  
浅井 政一<sup>※3</sup>  
Masaichi Asai

The sound(acoustic) intensity analysis enables us to grasp the sound energy as a vector quantity and achieves a superior effect in the location of the source of noise or the like. In this paper, sound intensity analysis is applied to the three-legged model core of three-phase transformer to study the generation of noise.

As the jointing design of model core, a step-lap joint reduces noise when compared with a conventional joint. The comparison of noise distribution in the model core for these two jointing designs can help to study the cause of noise generation.

For the above consideration, sound intensity analyses of two types of model core were made and the obtained noise distribution is discussed in this paper.

## 1 まえがき

近年、環境問題に大きな関心を持たれるようになり、電気施設においても低騒音化は、大きな課題となっている。中でも主要機器である変圧器について採り上げれば、その本体から発生する騒音は、鉄心の磁歪振動、電磁振動、機械的共振及び巻線に働く電磁力などが主な要因である。最近では、鉄心材料の磁歪特性の改善、さらには、鉄心の接合方式を従来の交互積接合からステップラップ接合にすることで低騒音化に対して効果を上げてきている。

ステップラップ接合では交互積接合に比べ、鉄心の接合部における磁束の集中が緩和されることで磁歪振動及び電磁振動が減少し、騒音が低減すると考えられている。この両接合方式における騒音レベル特性の違いについては既に報告されている<sup>(1)(2)</sup>。

このように、鉄心接合方式の違いが騒音に影響するとすれば、両接合方式の鉄心外周面における騒音分布にも差が現れるはずである。

一方、騒音分布の測定法としては、最近の信号処理技術や装置の発達に伴い、ここ数年の間に、音のエネルギーをベクトル量でとらえることのできる音響インテンシティ解析が急速に普及してきた。騒音対策を行うためには、騒音の発生状況を十分把握しておく必要があり、音響インテンシティ解析はこれに対し有効な手段である。すでにこの解析法を変圧器鉄心の騒音に対して適用した例についても報告されている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、鉄心の接合方式が異なる複数の鉄心で比較した例は見当たらない。

そこで本稿では、三相三脚変圧器モデル鉄心において、従来の交互積接合形とVノッチステップラップ接合形の接合方式が異なる2種類の鉄心の騒音レベル特性を比較するとともに、音響インテンシティ解析を行い、騒音の発生状況及び騒音分布を比較したので報告する<sup>(5)</sup>。

## 2 音響インテンシティの測定原理

音響インテンシティとは単位面積を単位時間に通過する音のパワーのことである。音響インテンシティ法を用いれば、音源を囲む面の外側からくる音のインテンシティはその面で積分すると打ち消し合うため、無響室などを使用しなくても外部ノイズの影響を受けずに精度良く音響パワーを測定することができる。また、音圧はスカラー量であるが、インテンシティはベクトル量であるので音源の方向を探索することができる。

音響インテンシティについて定義する<sup>(6)</sup>と、ある測定点におけるインテンシティ  $I$  は、時間  $t$  におけるその点の音圧を  $p(t)$ 、粒子速度を  $u(t)$  とし、周期を  $T$  とすれば、

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) u(t) dt \quad \dots\dots\dots(1)$$

で表される。

図1に示すように音波が伝播している空間に設置した2個のマイクロホンをつなぐ方向を  $r$  軸、軸上のマイクロホンの中点を計測点  $M$ 、マイクロホンの間隔を  $\Delta r$  とする。2個のマイクロホン  $A$ 、 $B$  の音圧をそれぞれ  $p_a(t)$ 、 $p_b(t)$  とすると、計測点  $M$  の音圧  $p_m(t)$  及び粒子速度  $u_m(t)$  はそれぞれ次式で近似できる。

$$p_m(t) = \frac{p_a(t) + p_b(t)}{2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$u_m(t) = \frac{1}{\rho_0 \Delta r} \int_{-\infty}^t \{p_a(\tau) - p_b(\tau)\} d\tau \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 $\rho_0$  は、空気密度であり、 $\tau$  は時間である。音響インテンシティの  $r$  方向成分  $I_r$  は、(2)式、(3)式より

※1 中部電力株式会社 小牧電力センター ※3 電力事業本部 変圧器事業部 技術部  
※2 中部電力株式会社 電力技術研究所

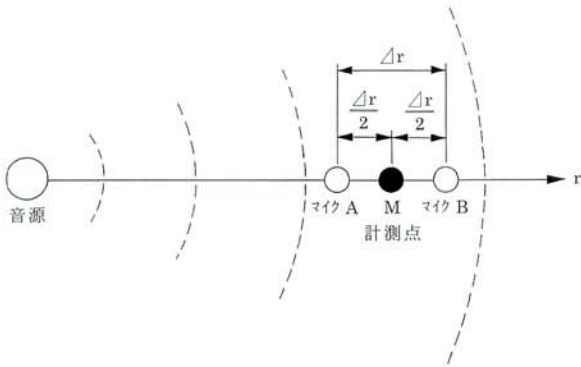


図1 / マイクロホンの配置  
Fig.1/Arrangement of microphones

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \frac{p_a(t) + p_b(t)}{2} \times \int_{-\infty}^t \frac{p_a(\tau) - p_b(\tau)}{\rho_0 \Delta r} d\tau \right\} dt \quad \dots\dots(4)$$

で与えられる。

音響インテンシティを計測する方法には、直接法とクロススペクトル法の2種類の方法がある。直接法は(4)式を用いて、音響インテンシティを測定する方法であり、これには、アナログ処理とデジタル処理の2通りの方法がある。直接法では、音響インテンシティ計測用の専用装置が必要である。

現在一般的に用いられている方法は専用の計測装置が不要なクロススペクトル法で、これは、周波数分析器 (FFTアナライザ) によりクロスパワースペクトルを求める方法である。本研究で使用した音響インテンシティ解析装置でもこの方法が用いられている。

(4)式を周波数変換すると、周波数を  $f$  とすれば次式のように表される。ただし、 $j = \sqrt{-1}$  である。

$$I_r = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\{p_a(f) + p_b(f)\} \{p_a^*(f) - p_b^*(f)\}}{-4j\pi\rho_0\Delta r f} df \quad \dots(5)$$

上式において\*は複素共役を表す。 $p_a(f) \cdot p_b(f)$  のクロスパワースペクトルの虚数部を  $\text{Im}\{p_a(f) p_b^*(f)\}$  で表せば、(5)式は次式ようになる。

$$I_r = \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}\{p_a(f) p_b^*(f)\}}{\pi\rho_0\Delta r f} df \quad \dots\dots\dots(6)$$

周波数が  $f_1 \leq f \leq f_2$  で与えられた音響インテンシティ  $I_r$  は、

$$I_r = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\text{Im}\{p_a(f) p_b^*(f)\}}{\pi\rho_0\Delta r f} df \quad \dots\dots\dots(7)$$

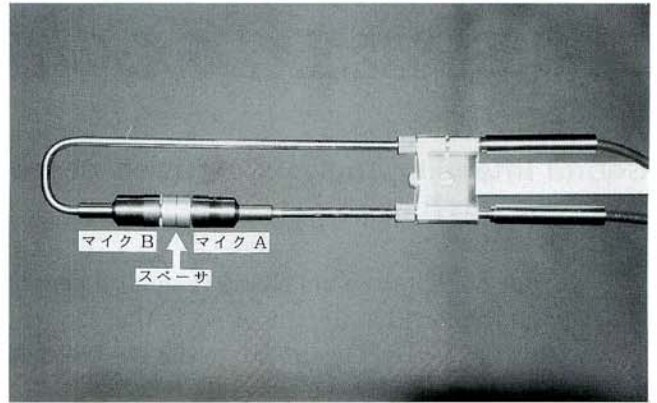


図2 / 音響インテンシティプローブ (リオン SI-31)  
Fig.2/Sound intensity probe (RION SI-31)

で与えられる。

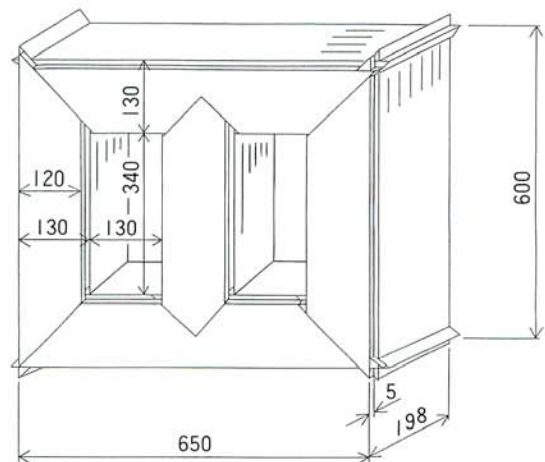
(7)式の演算はコンピュータで行われるがこの演算機能を備えたFFTアナライザも市販されている。

音響インテンシティの測定で使用されるマイクロホンは音響インテンシティプローブと呼ばれ、図2に示すように2個のマイクロホンをスペーサを挟んで同一軸上で向かい合わせに配置したタイプのものが多く使用されている。

### 3 モデル鉄心

モデル鉄心は図3に示すサイズのもので、鉄心材料には高配向性電磁鋼帯の27P100を使用した。鉄心接合方式は図4に示すように、交互積接合とステップ数が6のVノッチステップラップ接合 (以下、ステップラップ接合と呼ぶ。) で、それぞれの同時積枚数は2である。

また、鉄心は図5に示すように、上下クランプのほか、脚鉄部にも一脚あたり4箇所、に締付板を取り付け、さらに50本のスタッドと偏平線コイルばね (スプリング) により



単位: mm  
質量: 4 4 5 kg

図3 / モデル鉄心の寸法  
Fig.3/Dimension of model core

鉄心全体の締付圧力を均一にできるようにした。今回、鉄心の締付圧力は0.294MPa (3 kgf/cm<sup>2</sup>) とした。

## 4 測定方法

### 4.1 騒音レベル特性の測定

騒音レベルの測定はJIS C 1505に準拠する精密騒音計を用いて騒音試験室(暗騒音20dB)で行った。測定点は図6に示す12点で、マイクロホンを鉄心表面から30cm離し鉄心の高さの1/2の位置に設置した。

騒音計の周波数補正回路はAとし、12点の測定値における平均値計算にはエネルギー平均を用いた。

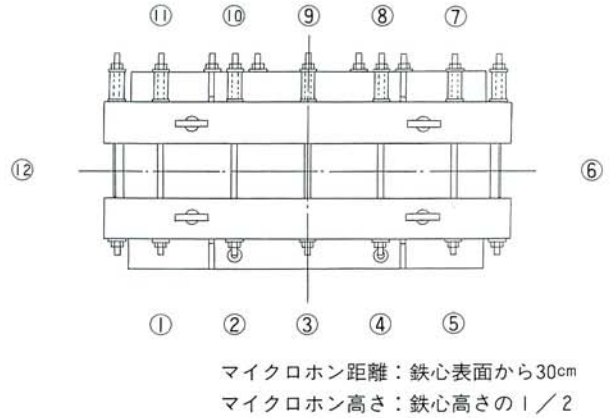
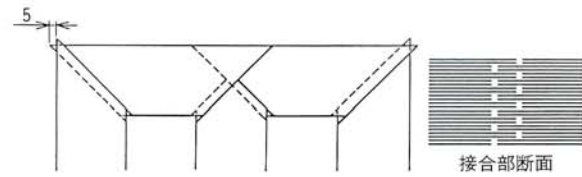
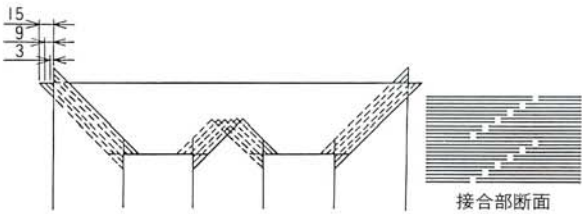


図6/騒音測定点  
Fig.6/Measuring points of noise level



(a) 交互積接合



(b) Vノッチステップラップ接合(ステップ数6)

単位：mm, 同時積枚数：2

図4/鉄心接合方式

Fig.4/Joint structure of model cores

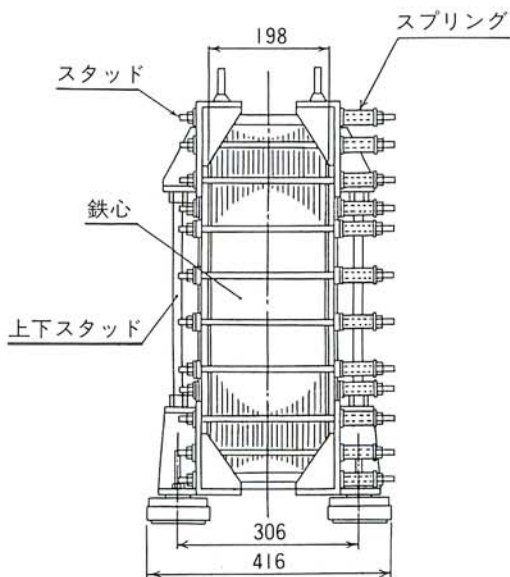
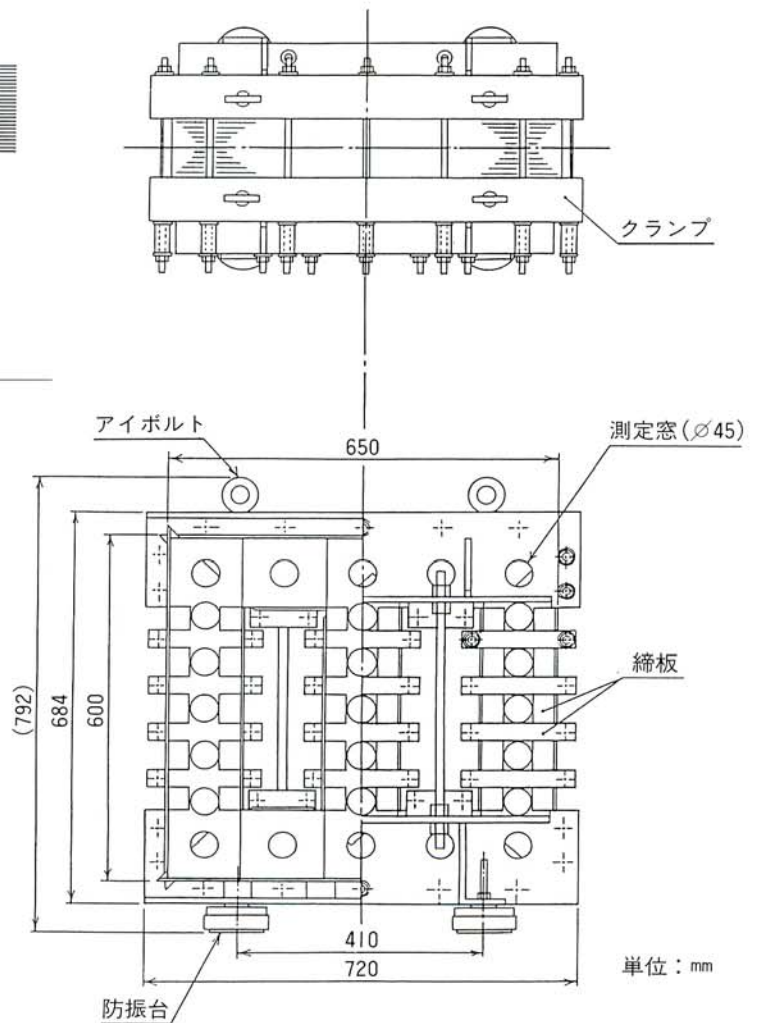


図5/モデル鉄心外形図

Fig.5/Outline of model core assembly



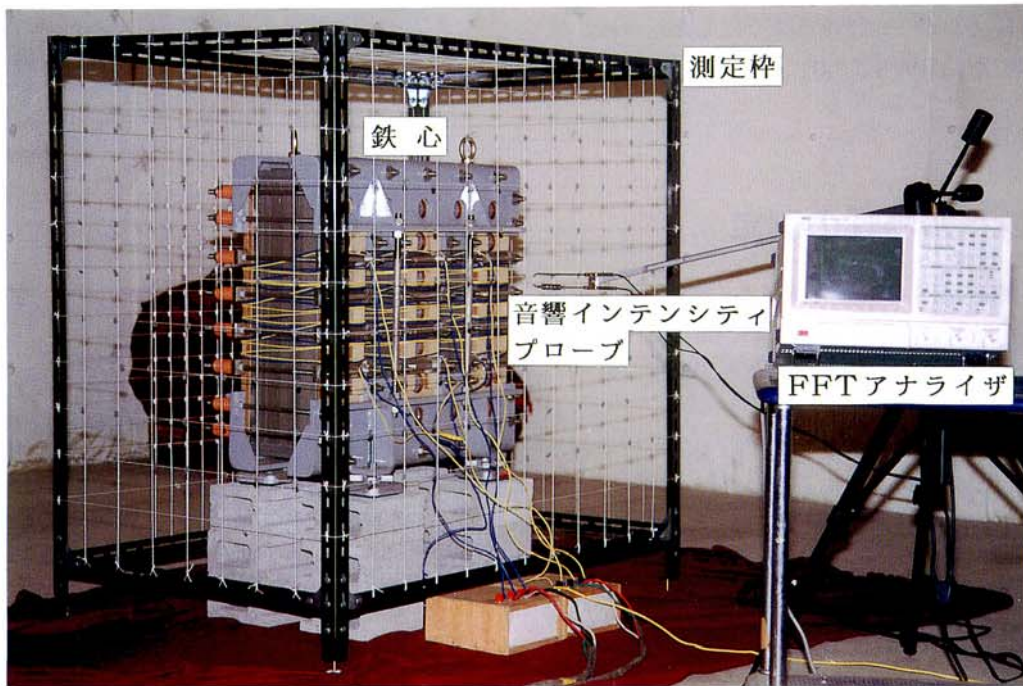


図7 / 騒音分布測定状況  
Fig.7/Measuring scene of noise distribution

## 4.2 音響インテンシティ法による騒音分布の測定

音響インテンシティ法による鉄心の騒音分布の測定は図7に示すように騒音測定枠を鉄心表面から30cm離れた所に設置して行った。この測定枠の分割は図8に示すように、x方向13分割、y方向9分割、z方向10分割（鉄心正面130点、側面側90点）で、各点を図2に示す2個の1/2インチ・エレクトレットマイクロホンからなる音響インテンシティプローブとFFTアナライザを用いて、x、y、zの3方向の音響インテンシティ（アクティブ・インテンシティ）をそれぞれ測定した。

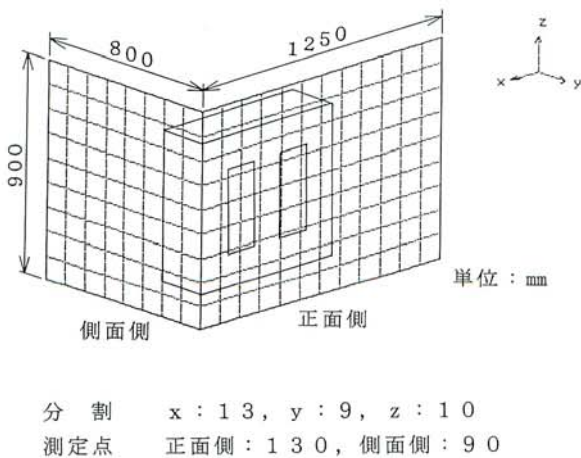


図8 / 測定点分割図  
Fig.8/Detail of measuring points

このアクティブ・インテンシティの測定周波数範囲は50～5000 (Hz) であり、測定ではノイズ成分を除去するために1測定点あたり300回のアベレージングを行った。

## 5 測定結果および考察

### 5.1 騒音レベル特性

図9に周波数  $f = 60 \text{ Hz}$  での交互積接合とVノッチステップラップ接合の騒音レベル特性を示す。同図より、低磁束密度になるほどステップラップ接合は交互積接合よりも騒音が下がるが、高磁束密度域ではステップラップ接合と交

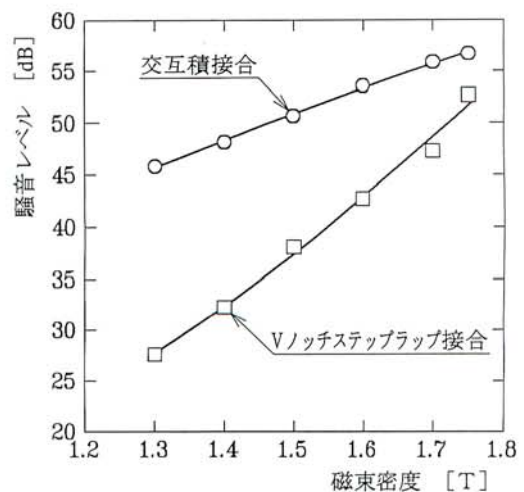


図9 / 騒音レベル特性  
Fig.9/Noise level of model cores

互積接合との差は小さくなる事が分かる。これは、主に鉄心接合部での渡り磁束が影響していると考えられる。つまり、ステップラップ接合では、低磁束密度域では交互積接合に比べて鉄心接合部における磁束の集中が緩和されることにより騒音が低減されるが、高磁束密度域では接合部で磁束がギャップ中を通過するようになり<sup>7)</sup>、交互積接合との磁束の集中における有意差が減少するため、騒音レベルの差が小さくなるものと推測される。

## 5.2 音響インテンシティ法による騒音分布

図10(a)~(c)に磁束密度  $B_m = 1.4\text{T}$ ,  $1.7\text{T}$  ( $f = 60\text{Hz}$ ) における交互積接合と  $B_m = 1.7\text{T}$  ( $f = 60\text{Hz}$ ) におけるステップラップ接合のベクトルで表した騒音分布をそれぞれ示し、図11(a)~(c)に等高線で表した騒音分布をそれぞれ示す。これらの図は、騒音の発生状況を分かり易くするた

めに鉄心面を測定面に投影してある(破線部)。

図10のベクトルで表した騒音分布からは、鉄心から空間に発せられる騒音の状況がよく分かる。交互積接合において、 $B_m = 1.4\text{T}$ と $1.7\text{T}$ の場合を比較すると、ベクトルの大きさは異なるが、方向はほとんど変わらない。これらとステップラップ接合とを比較すると、鉄心側面側のベクトルの方向はほとんど変わらないが正面側のベクトルの方向は少々異なっている。正面側において、ステップラップ接合は交互積接合に比べ上部継鉄部分の騒音ベクトルの方向がやや下向きになっており、下部継鉄部分の騒音ベクトルの方向はやや上向きになっている。この理由としては、鉄心接合方式の違いが電磁振動の周波数成分に違いを与え、これが鉄心の振動モードに影響を与えるためであると考えられる。

図11の等高線で表した騒音分布において、交互積接合の、 $B_m = 1.4\text{T}$ と $1.7\text{T}$ の場合を比較すると、鉄心側面側では両者とも鉄心脚中央部がピークとなっているが、正面側で

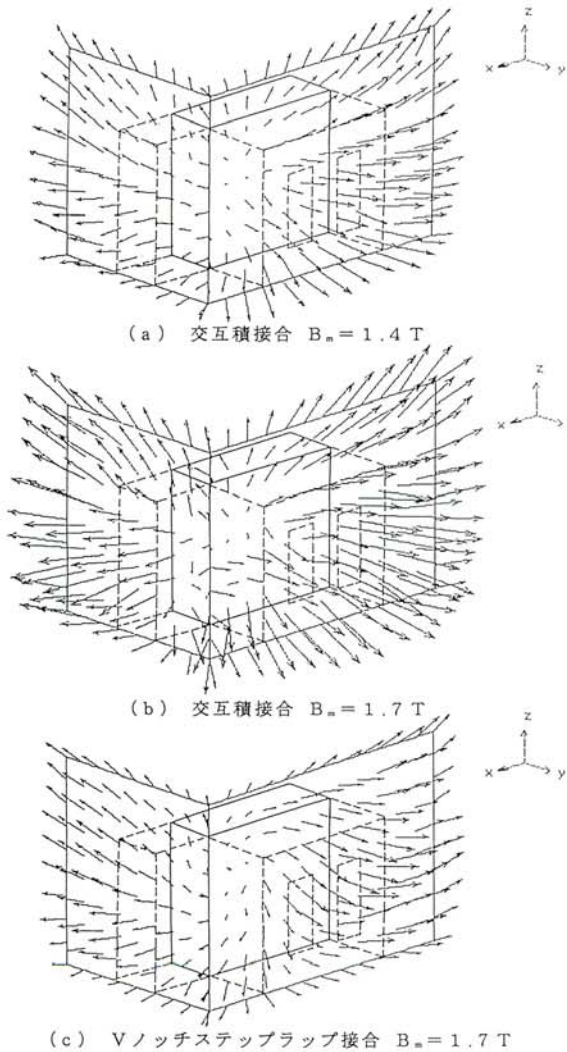


図10/ベクトルで表した騒音分布  
Fig.10/Noise vectors

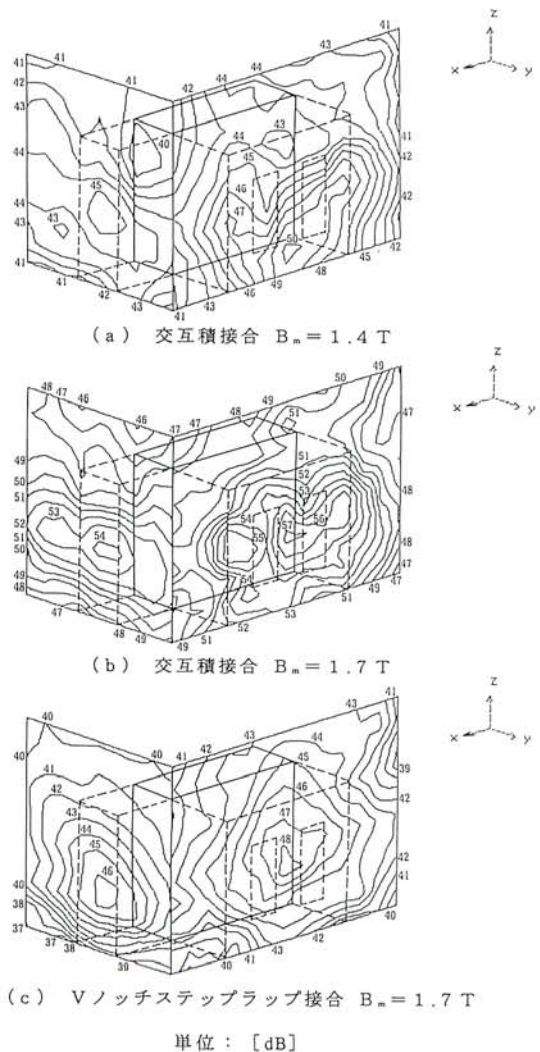


図11/等高線で表した騒音分布  
Fig.11/Noise distributions

は、1.4Tの場合、騒音のピーク値が鉄心下部中央にあり、1.7Tの場合、ピーク値が各鉄心脚中央にある。この騒音分布の違いについては、鉄心の自重が磁歪に影響を及ぼし、特に低磁束密度域でそれが顕著に現れたのではないかと考えられる。

また、交互積接合の分布とステップラップ接合の分布を比較すると、交互積接合の場合は各鉄心脚を中心に騒音が発生しており、ステップラップ接合では中央脚（V脚）を中心に騒音が発生している。

図9における騒音レベル特性と図11における騒音分布を対比してみると、交互積接合の場合、鉄心接合部での磁束の集中により、この部分での磁歪振動及び電磁振動が支配的となって各脚に同レベルの騒音が現れ、全体の騒音レベルが高くなると考えられる。一方、ステップラップ接合では、接合部における磁束の集中が緩和されるため全体の騒音レベルが低くなるが、V脚では、図12に示す継鉄と脚鉄におけるT接合部での回転磁束の影響により、左右の脚（U、W脚）に比べ騒音レベルが高くなると考えられる。

方向性電磁鋼帯では、圧延方向の磁歪は小さいが、圧延方向からの角度が離れるほど、それは大きくなる。このためT接合部のように回転磁束が発生する部分では、圧延方向以外の方向における磁歪の影響が支配的となる。また、この部分では、接合部における渡り磁束の影響も含まれるため、総合的な振動としては他の部分に比べかなり大きいものと推測される。

振動や騒音の発生形態としては一般的に、渡り磁束の影響による磁歪振動や電磁振動のため鉄心の接合部に騒音のピーク値が現れると思われるが、今回製作したモデル鉄心では、接合部がクランプにより十分拘束されているので接合部の振動エネルギーは主に鉄心脚方向に発散すること、さらには固有振動モードの影響により鉄心中央部にピーク値が現れるため、接合部の振動が目立たなくなるものと推定される。特に固有振動モードは振動及び騒音の発生形態を決定する重要な要素である。

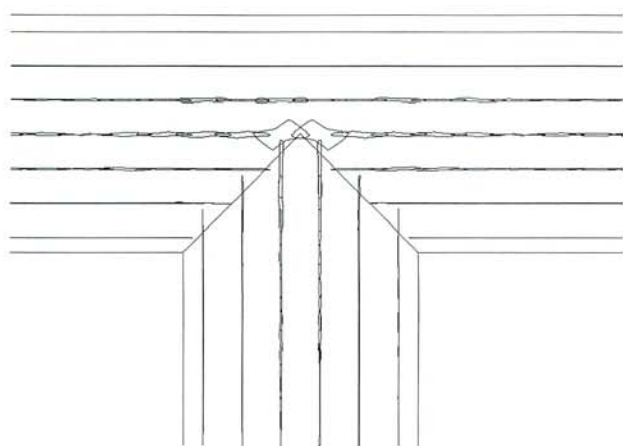


図12/回転磁束分布  
Fig.12/Rotating flux density distribution

## 6 あとがき

本稿では、交互積接合形とVノッチステップラップ接合形の2種類の三相三脚変圧器モデル鉄心の騒音レベル特性並びに騒音分布を比較した結果について報告した。

今回の結果より、鉄心接合方式の違いは、騒音レベル特性に大きな差を与えるだけでなく、騒音分布にも違いを生じさせることが分かった。また、鉄心接合部で発生する電磁振動は騒音発生の大きな要因の一つとなっているが、騒音分布を見る限り、接合部近傍には極端に大きな騒音は見られず、むしろ、その影響は鉄心全体に及ぼされることが判明した。このように本研究により、従来知られていなかった鉄心騒音の詳細な発生状況を把握することができた。

本稿で示したように、音響インテンシティ解析は、変圧器鉄心における騒音発生の特徴を明らかにして、騒音低減の方策を探るための手段の一つとして活用することができる。

今後は、鉄心の振動解析についても行い、音響インテンシティ解析で得られた結果との相関関係を調査することで、鉄心における騒音発生のメカニズムを明らかにするとともに、変圧器の低騒音化に努力したいと考える。

## 参考文献

- (1) 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」，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
- (2) 鍋嶋，長江，矢後：「磁区制御電磁鋼帯を用いた三相変圧器の鉄心の鉄損および騒音特性」電気学会静止器研究会資料，S A-93-36 (1993-11)
- (3) 溝上，岩崎，野沢，佐久間：「変圧器騒音のモデル鉄心を用いる評価法の検討および測定結果の解析」平成4年度電気学会全国大会講演論文集，No.886
- (4) 鍋嶋，長江，小松：「音響インテンシティ法による三相三脚鉄心の騒音分布測定」平成6年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，No.147
- (5) 鍋嶋，長江，小松：「接合方式三相三脚鉄心の騒音分布比較」電気学会静止器研究会資料，SA-94-28 (1994-12)
- (6) 白木：「騒音防止設計とシミュレーション」応用技術出版，pp280-282 (1987)
- (7) 中田，河瀬：「ステップラップ接合鉄心を用いた変圧器の磁気特性の数値解析」電気学会論文誌 B,103,3,167 (昭58)