

博士論文

変圧器鉄心の騒音への影響因子に関する研究

平成 27 年 3 月

溝上 雅人

岡山大学大学院
自然科学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的と意義	2
1.3 論文の構成	4
参考文献	6
第2章 鉄心の騒音・振動とその関連特性の測定・評価方法	8
2.1 緒言	8
2.2 モデル鉄心に関する実験方法・装置と騒音レベル計算法	9
2.3 モデル鉄心の仕様と設置方法の決定	11
2.4 騒音測定位置に関する検討	16
2.4.1 鉄心騒音測定における検討課題	16
2.4.2 測定位置間の騒音差	17
2.4.3 平均値の誤差を考慮した測定位置数の検討	19
2.4.4 測定距離の増加による誤差の低減	24
2.4.5 測定位置に関する検討のまとめ	31
2.5 モデル鉄心による評価の有効性	33
2.6 振動測定システムの開発	34
2.7 磁歪測定法	36
2.8 振動の騒音レベルへの換算方法	37
2.9 結言	39
参考文献	40
第3章 圧縮応力による電磁鋼板の磁歪変化と鉄心の騒音変化	43
3.1 緒言	43

3.2	実験方法	43
3.2.1	磁歪評価方法	43
3.2.2	モデル鉄心の構造と実験手順	44
3.2.3	騒音測定法と測定環境の検討	46
3.3	実験結果と考察	47
3.3.1	圧延方向への圧縮応力による磁歪変化	47
3.3.2	鉄心への圧縮応力による騒音変化	49
3.3.3	圧縮応力による変化の観点での磁歪と騒音の関係	52
3.3.4	鉄心変形の騒音への影響	56
3.4	結言	60
	参考文献	60
第4章	鉄心締め付け圧力の変更による共振振動の発生と騒音への影響	63
4.1	緒言	63
4.2	実験手法	63
4.2.1	モデル鉄心の仕様と構造	63
4.2.2	振動・騒音の測定手法と実験条件	65
4.3	実験結果と考察	65
4.3.1	締め付け圧力の変更による振動の変化	65
4.3.2	共振による振動増加の騒音への影響	72
4.3.3	振動の騒音への換算法の検討	74
4.4	結言	77
	参考文献	78
第5章	鉄心接合部の構造変更による騒音と磁歪の変化	79
5.1	緒言	79
5.2	実験方法	79

5.2.1	モデル鉄心の仕様と構造	79
5.2.2	騒音測定	80
5.2.3	ひずみゲージによる鉄心の磁歪測定法	81
5.3	騒音に対する接合部構造の影響	84
5.3.1	測定結果	84
5.3.2	考察	85
5.4	鉄心磁歪に対する接合部構造の影響	88
5.4.1	磁歪の評価方法と測定結果	88
5.4.2	磁歪と騒音の相関性に関する検討	91
5.5	結言	94
	参考文献	94
第6章	鉄心接合部の構造異常による騒音増加	96
6.1	緒言	96
6.2	モデル鉄心の特異な騒音特性挙動	96
6.2.1	実験方法	96
6.2.2	騒音測定結果	97
6.2.3	特異挙動の原因に関する検討	98
6.3	異常接合による騒音増加の実測と検討	102
6.3.1	鉄心の接合状態を変更可能とする実験方法	102
6.3.2	異常接合状態での騒音測定結果	104
6.3.3	音圧波形の実測結果と検討	105
6.4	結言	108
	参考文献	109
第7章	結論	111

謝辭 ····· 116

第1章 序論

1.1 本研究の背景

変圧器は大規模集中型発電が主流である現在の電力システムが継続する限り、効率的な送配電を行うために必須の電磁機器である。この変圧器に対して要求される性能には多様な項目があるが、その一つとして低損失性^[1.1]があげられる。現状よりも更に効率的なエネルギー伝送を実現するため、変圧器の低損失化を目的とした技術開発が続けられている。しかし場合によっては、変圧器がその周囲に拡散させる騒音がより一層重視される。この騒音は変圧器の運転中に常に発生し、人にとっては不快なものであるため、変電所の周辺住民の住環境を劣化させる。

騒音の問題化には以下の具体的ケースが考えられる。送配電効率を追求すると変電所の設置場所はできるだけ電力消費地域に近い方が望ましいが、それが住宅地に近い場合には騒音が問題化する。また、既存変電所でも都市化によって付近まで住宅地が拡大してくる場合があり、それまで稼働していた変圧器でも新たに騒音が問題となる可能性がある。あるいは既存変電所の変圧器更新時に負荷の増加に対応するために変圧器の容量増加を行う場合、一般的に高容量ほど騒音が増加するため、新たに騒音が問題化する場合もある。

この騒音問題に対処するために法的規制が設けられており、住宅地域や工業専用地域などの地域の種別ごとに騒音規制値が設定されている^[1.2]。また、電力会社独自の規制によって更に厳しい上限値が設定されている例^[1.3]もある。この規制を満たすために、変圧器発注時の仕様として設置地域で問題とならない騒音レベルが提示され、納入される変圧器がその条件を満たすことが要求される。もしこの要求が満たせなかった場合は、変電所での防音壁の設置など追加の騒音対策が必要となるばかりでなく、最悪の場合には現場での稼働の可否が問われる可能性もある。このことから、変圧器の基本機能とは何ら関係のない騒音が、実は変圧器にとって極めて重要な問題であり、技

術課題であることが認識できる。

変圧器騒音に関する技術開発目標の一つは、当然のことながら騒音低減である。騒音規制は年を追うごとに厳しくなっており、実際に厳しい規制が課せられる変圧器の台数が増加している。このため、現状レベルよりも低騒音化が可能な技術開発が求められ続けている。その他の目標として、要求仕様に基づいた設計騒音値を製品で精度良く実現できる技術の確立も挙げられる。これは、例えば完成品の騒音レベルが要求値を不必要に大きく下回った場合、騒音対策が過剰と見なされてコスト面で問題化する可能性が生じるためである。要求レベルを考慮して適切な騒音対策を選択できる技術が低コストでの製造のために必須である。以上の目標は、設計と製造の双方の技術力向上で初めて実現できるもので、それら両者を検討の対象とする必要がある。

変圧器が発する騒音を大別すると励磁騒音と通電騒音に分けられる^[1.1]。励磁騒音は負荷の有無にかかわらず通電されると発生するもので、その原因は鉄心材料である方向性電磁鋼板の磁歪現象^[1.4]や鉄心内に設けられる接合部での鋼板の振動現象^[1.5]である。また、それらの振動を加振力とした鉄心の機械的共振は励磁騒音を増加させる要因である^[1.6]。一方、通電騒音は鉄心の漏れ磁束中で巻線に負荷電流が流れることによって巻線に電磁力が働き、振動が発生することが原因となる^[1.7]。

1.2 本研究の目的と意義

本研究の目的は、変圧器の励磁騒音すなわち鉄心が発する騒音の低減と予測が可能な技術の確立に向けて、騒音に影響を与える因子を定量的に評価すると共に、振動の騒音への換算方法を検討することにある。また、その検討を行うための実験方法を確立することも目的とする。

騒音影響因子として、まず磁歪を取り上げる。磁歪は電磁鋼板に外部から応力を与えると変化することが古くから知られており^[1.8]、その磁歪変化に

よる鉄心の騒音レベルの変化を実測によって示す。また、鉄心に機械的共振が発生すると一般の構造体と同様に振動の振幅が増し、騒音増加に繋がる[1.9]。実験で鉄心の締め付け圧力を変更して行ったところ、特定の圧力で鉄心振動が極大となる現象が見られた。これが共振現象と推定されたため、その詳細調査を行う。また、鉄心接合部はその構造にいくつかの種類があり、その変更が騒音に影響を与えることがわかっている[1.2]。そこで、構造の差異による騒音の相違を明らかにする。更に接合部については鉄心の製造工程で不正な構造となってしまうことがあり、その騒音への影響を明らかにする。以上の検討によって、取り上げた各因子の変化による騒音の増減を定量的に知ることができる。この知見は鉄心の低騒音化に役立つと共に、鉄心設計時点で各因子の騒音への影響を考慮する際にも有効である。

次に、磁歪などの振動を騒音に換算する方法を検討する。この計算法は既に提案されているが、それが実際にどの程度、騒音に一致するかはこれまで検討されていない。そこで本研究ではその計算法を取り上げ、騒音の実測結果と対応させることでその有用性を検証する。この検討によって磁歪を始めとする振動の騒音への換算法の精度を向上させることが可能となり、鉄心設計時に目標とする騒音レベルを完成品で正確に実現できる技術の確立に繋がっていく。

以上の諸検討は実験を主な手段としてなされたため、正しい結果の導出には実験手法にも検討を加えて確立することが必須である。本研究では実機鉄心を小型化したモデル鉄心を製作し、その騒音や振動の測定によって検討を行う。そこでまず、モデル鉄心の設置方法を検討し、正確な結果を得るための構造を決定する。また、騒音測定方法についても検討し、高精度の評価が可能な具体的指標を導き出す。更に振動測定方法については、測定対象の広範囲を効率的にかつ高精度で測定できるシステムを構築する。以上の検討は本研究での評価の高精度化に役立つのみでなく、今後と同様の実験的検討を

行う際の指針として参照することができる。

1.3 論文の構成

第2章では騒音、振動、磁歪に関する実験方法について検討すると共に、磁歪などの振動を鉄心の騒音レベルに換算する方法を説明する。本研究では鉄心に対する騒音や振動の実測を中心にして検討を行うが、まずそのために使用するモデル鉄心の構造と支持方法、具体的には鉄心を横置きとするか縦置きとするかについて評価精度の点から検討し、縦置きとする場合の支持構造を決定する。また騒音測定方法について、その精度を確保するための検討も行う。具体的には、鉄心周囲での騒音測定位置数の下限を実測による検討で導き出すと共に、鉄心と測定位置の間の距離増加の精度向上効果とそのため生じる距離減衰も検討する。モデル鉄心に対しては振動測定も行うが、そのために鉄心上の多数の位置での測定を効率良く高精度で行うためのレーザー振動計を使用する測定システムを開発した。その詳細についても説明する。また、電磁鋼板の素材特性としての磁歪測定法についても説明する。最後に、測定された磁歪や振動を単純にその変位の振幅で評価するのではなく、より騒音レベルに近い値に換算して評価する方法について述べる。

第3章では圧縮応力による磁歪と騒音の変化を検討する。電磁鋼板は応力によって磁歪が変化し、特に圧延方向に圧縮力を加えた場合の磁歪増加が主に調査されている。しかしその調査はこれまで単板サンプルで測定される素材の磁歪特性について行われており、鉄心で同様の検討が行われた例はなかった。本研究でモデル鉄心に圧縮力を与える機構を開発し、圧縮力による騒音変化を実測によって調査して騒音レベルへの影響を定量的に示す。更にはその騒音変化を圧縮による素材磁歪の変化と対応させて検討し、磁歪を騒音に換算する方法の検証を行う。この他に鉄心圧縮時に発生した鉄心変形が騒音に与える影響についても検討する。

第 4 章では鉄心の締め付け圧力を変化させ、騒音と振動への影響を調査する。積鉄心は形状を保って自立できる様に、締め付けによって外部から鋼板に面圧を与えて鋼板間の摩擦力で強度を発生させている。締め付け力を変更すると摩擦力の変化によって鉄心全体の剛性が変化するため、鉄心の固有振動数が増える。本研究でモデル鉄心の締め付け圧力を変更しながら鉄心前面の振動測定を行ったところ、特定の締め付け圧力で振動変位が極大となる現象が確認された。測定された振動分布から、変位が極大となる条件では鉄心前面に特有の振動パターンが生じていることがわかった。また振動変位波形から特定のモードで振動していることがわかり、共振振動が発生していると推定された。一方、騒音には共振の影響は明確に見られなかったため、騒音の周波数分析を行ってその原因を明らかにする。更に鉄心の振動測定結果に騒音への換算法を適用し、騒音の実測結果への対応を調査する。

第 5 章では鉄心の接合部構造を変更した時の騒音変化を検討する。積鉄心では方向性電磁鋼板が良好な磁気特性を持つ圧延方向を鉄心の磁化方向に一致させるために複数の接合部が設けられるが、そこでは鋼板の切断端部の突合せ位置をずらしてラップさせながら組み合わせる構造が用いられる。この組み合わせ構造として従来ラップとステップラップの 2 種類が用いられており、ステップラップ接合の方が低騒音であることが知られている。その差をモデル鉄心による騒音測定によって定量的に示す。また、鉄心で発生する磁歪をモデル鉄心にひずみゲージを設置することで測定し、接合方式の変更によって生じる鉄心上の磁歪変化を測定する。この磁歪と素材磁歪に騒音への換算法を適用し、実測騒音と比較することで換算法の問題点を明示する。

第 6 章では鉄心接合部が発生する騒音について検討する。接合部は鋼板の切断端部の突合せ位置をずらしてラップさせることで形成される。このラップによって鋼板同士の接触面積が大きくなり磁気抵抗が低下する効果が

あるが、一方で鋼板間の渡り磁束のために、交流励磁に従って変化する磁気吸引力が鋼板の間に発生する。この力で鋼板が振動して騒音の原因となる。多数のモデル鉄心を製作して騒音測定実験を繰り返す過程で異常な騒音特性を示す鉄心が見つかったが、その原因は偶然発生した接合部の異常構造によって磁気吸引力による振動が特に増したためと推定された。そこでこの異常構造を、より簡易化したモデル鉄心で再現して発生する騒音を詳細に検討する。

第 7 章では第 2 章から第 6 章の検討から得られた成果をまとめる。

参考文献

- [1.1] 「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, 第 1023 号 (2005)
- [1.2] 「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, 第 616 号 (1996)
- [1.3] R.S. Girgis, M.S. Bernesjö, S. Thomas, J. Anger, D. Chu, and H.R. Moore, “Development of ultra-low-noise transformer technology”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.26, No.1, pp.228-234 (2011).
- [1.4] A.J. Moses, P.I. Anderson, T. Phophongviwat, and S. Tabrizi, “Contribution of magnetostriction to transformer noise”, 45th International Universities’ Power Engineering Conference (UPEC), pp.1-5 (2010).
- [1.5] A. Ilo, B. Weiser, T. Booth, and H. Pfützner, ”Influence of geometric parameters on the magnetic properties of model transformer cores”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.160, pp.38-40 (1996).
- [1.6] 溝上:「変圧器鉄心の電磁振動と騒音」, 平成 11 年電気学会全国大会,

S.12-4 (1999)

- [1.7] E. Reiplinger, "Study of noise emitted by power transformers based on today's viewpoint", International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 12-08 (1988).
- [1.8] C.M. Brownsey and G.C. Maples, "Magnetostriction characteristics of 3.1% grain-oriented silicon-iron transformer steel", Proceedings of IEE, Vol.113, No.11, pp.1859-1862 (1966).
- [1.9] H. Fahnoe, "A study of sound levels of transformers", AIEE Transactions, Vol.60, pp.277-283 (1941).

第2章 鉄心の騒音・振動とその関連特性の測定・評価方法

2.1 緒言

変圧器の騒音は古くから問題と見なされており、これまでに多様な検討がなされてきている。しかし実機を用いる検討では、規模が大きいことや高電圧を扱う必要があること、製品として出荷する必要があることなどから適用可能な試験項目が限られ、構造変更などの検討は容易ではない。そこで励磁騒音の検討には、比較的小型で実験専用で製作されたモデル鉄心が多用されており[2.1]~[2.8]、本研究でもモデル鉄心を用いることで検討を行った。

本章では最初にモデル鉄心を使用する実験手法に関する検討について説明する。モデル鉄心は簡略化のために実機とは異なる構造とする場合が多いが、そのために評価の正当性に問題が生じる可能性がある。この点について騒音の実測によって検討を加えた。次に、騒音測定方法に対して詳細検討を行う。実機ではその性能としての騒音レベルを決定するため、測定法に関する詳細な規格[2.9][2.10]がある。しかし、騒音測定位置については実機の大きさが様々であるため、厳密には規定されていない。モデル鉄心でも規格に則った方法を採用するが、測定位置については評価の正確さの観点から検討を行って決定した。

励磁騒音は鉄心表面の振動が音波に変換されたものであるため、騒音現象を深く理解するためには鉄心の振動状態についても知る必要がある。そこで鉄心の振動を測定する手法が必要となるため、本研究でそのための振動測定システム開発を行った。その概要についても本章で説明する。

励磁騒音の主原因は方向性電磁鋼板の磁歪現象である。この磁歪は電磁鋼板の結晶組織の状態などによって変化するため、素材特性として評価する必要がある。本章ではその測定方法についても説明する。

振動評価のための値としては一般的に変位振幅が用いられることが多く、磁歪や鉄心振動でも使用されている。しかし騒音評価の観点に立つと、変位

よりも更に望ましい評価方法がある。本研究では振動を騒音に換算する方法を採用したので、その考え方と計算方法についても説明する。

2.2 モデル鉄心に関する実験方法・装置と騒音レベル計算法

本研究で騒音と振動の測定に用いるモデル鉄心の形式は騒音が問題となる大型変圧器で多用される内鉄型 3 相 3 脚積鉄心とした。鉄心の励磁には正弦波発振器の出力をパワーアンプで増幅して 1 次巻線に電力供給する方法を用い、周波数と電圧を安定化させると共に波形精度を確保した。鉄心の磁束密度は 2 次巻線の誘起電圧で設定する。これらの巻線にはビニル被覆銅線を用い、各脚に 20 ターンずつ設置した。磁束密度の調整はコンピュータで自動化されており、2 次電圧の誤差に基づいて発振器の出力電圧が調整され、目的の磁束密度に設定される。3 相の結線方式は星型とした。

騒音測定には IEC651 規格に準拠した精密騒音計を用いる。騒音評価では人の聴感特性を考慮する必要があるが、これは A 特性と言う名称で規格化 [2.11]されている。その曲線は図 2.1 で示すもので、騒音計にはそのためのフ

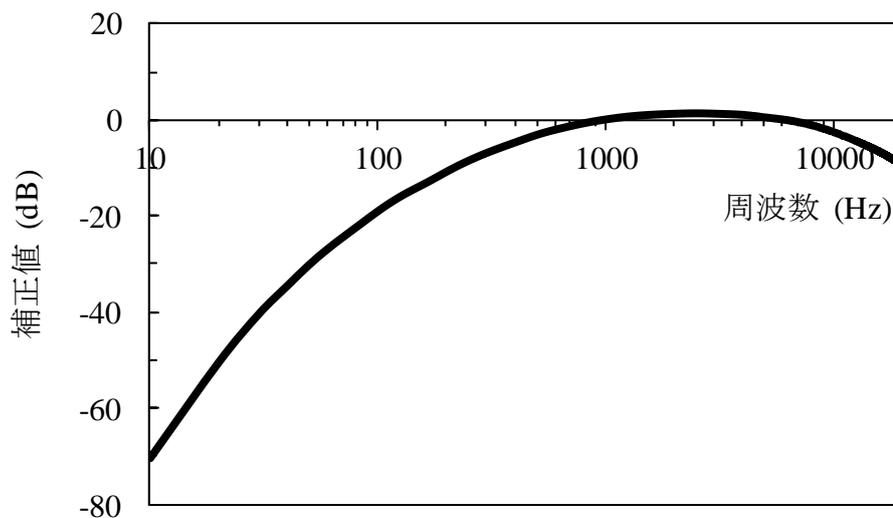


図 2.1 聴感補正のための A 特性曲線

フィルタが内蔵されている。変圧器の騒音測定は複数の位置で行うため、実験では鉄心の周囲に複数のマイクロホンを設置し、その出力をコンピュータ制御のマルチプレクサで切り替えながら精密騒音計に順に入力し、各測定位置の騒音（音圧）レベルを求める。加えて、騒音計から出力される音圧波形をFFTアナライザーに入力し、騒音の周波数分析も行う。この周波数分析された騒音レベルに対してもA特性補正が適用される。収集されたこれらのデータはコンピュータに転送されて解析される。

発音物体の騒音レベルを正確に知るには、物体を囲む閉曲面を十分な細かさで分割してその各領域で音を測定し、平均計算する必要がある。しかし変圧器の騒音測定規格^{[2.9][2.10]}では測定作業に要する時間も考慮した方法が規定されている。すなわち比較的小型の変圧器では本体の1/2高さのみを測定高とし、更にモデル鉄心が該当するタンクなし乾式変圧器では、本体から0.3m離れて本体を囲む線上で、間隔1m未満のほぼ等間隔とした6個以上の位置で測定すれば良いと定められている。これら複数の位置で測定された騒音レベルから全測定位置の平均値 L_{pA} を求めて評価に用いるが、そのためにはまず(2.1)式で求められるエネルギー平均 L_{pA0} を算出する。

$$L_{pA0} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{0.1L_{pA0n}} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

ここで、 L_{pA0} は暗騒音が補正されていないA特性補正平均音圧レベル(dBA)、 N は測定位置数、 n は測定位置番号、 L_{pA0n} は測定位置 n でのA特性補正音圧レベル(dBA)である。

無励磁状態で測定される暗騒音と励磁騒音の差が過小の場合には L_{pA0} に誤差が含まれるため、その補正として次の方法が規定されている。暗騒音も実測して平均値を(2.1)式で求め、(2.2)式で補正值を求める。

$$L_{pA} = 10 \log_{10}(10^{0.1L_{pA0}} - 10^{0.1L_{bgA}}) \dots\dots\dots (2.2)$$

ここで、 L_{pA} は暗騒音が補正された A 特性補正平均音圧レベル (dBA)、 L_{bgA} は暗騒音の A 特性補正音圧レベル (dBA) である。なお、 L_{pA0} と L_{bgA} の差が 3dBA 未満の場合は (2.2) 式を適用してもなお誤差の影響が無視できないため、その測定結果は無効とする。

モデル鉄心は小型であるため発生する騒音レベルが低く、周囲の機器による暗騒音が特に問題となる。そのため騒音測定は遮音と除振対策が施された暗騒音 16~17dBA の無響室で行った。無響室には室内の壁面にグラスウールの吸音材が設置されているため、壁の反射による誤差も回避できる。

2.3 モデル鉄心の仕様と設置方法の決定

本研究で用いるモデル鉄心のサイズは以下の検討から決定した。発生する騒音レベルは鉄心サイズと相関するため、サイズが過小だと発生する騒音が検知可能レベル以下となってしまう可能性がある。一方、サイズを大きくすると製作やハンドリングが難しくなる。これらを考慮し、実験に用いるモデル鉄心は図 2.2 に示す様に、脚とヨークの幅を 150mm、外形の高さと幅を共に 750mm とした。また、鉄心の積層厚は 41mm を基本とした。鉄心接合部の構造は 6 段ステップラップ、同時積枚数は 1 を基本とした。

ここでモデル鉄心の設置方法について、図 2.3 に示す a) 横置きと b) 縦置きを比較検討した^[2.12]。横置き法では、鉄心は固定されている巻線に電磁鋼板を差し込んで積層することで製作され、そのまま測定できるので実験準備が簡単である。縦置き法は実機の内鉄型積鉄心の設置状態により近いが、自立させるための鉄心の締め付けと起立や巻線の設置作業が必要となる。なお縦置き法では、鉄心の形状を保ち、起立状態での安定性を増した

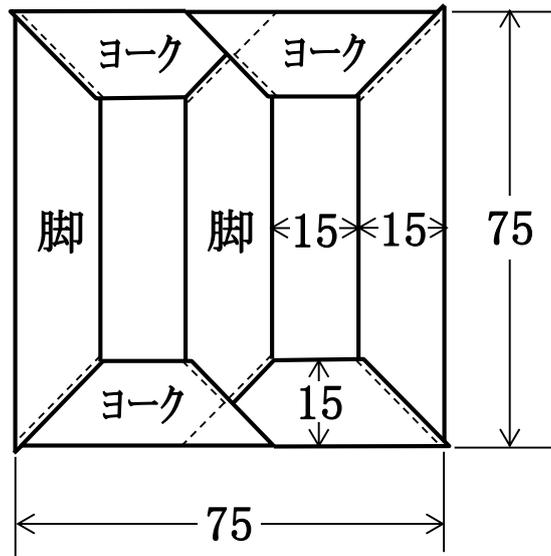


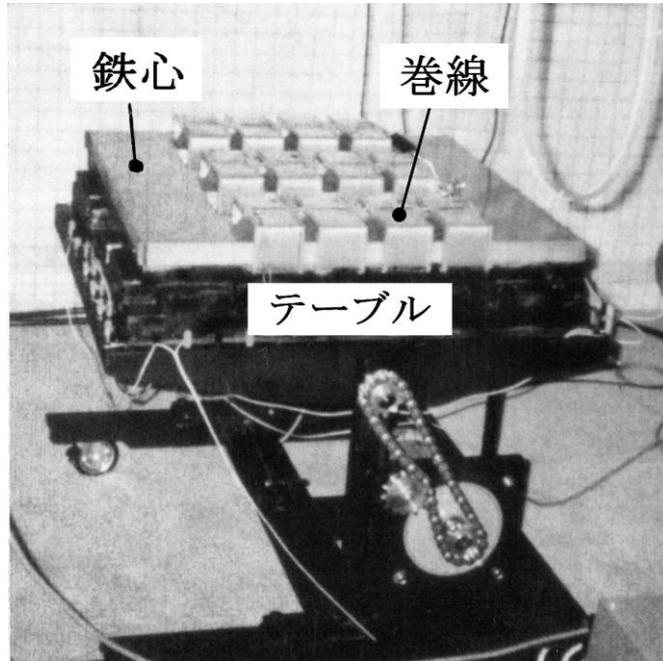
図 2.2 モデル鉄心のサイズ (単位 cm)

め、鉄心の表面に木板を当てて締め付ける構造とした。

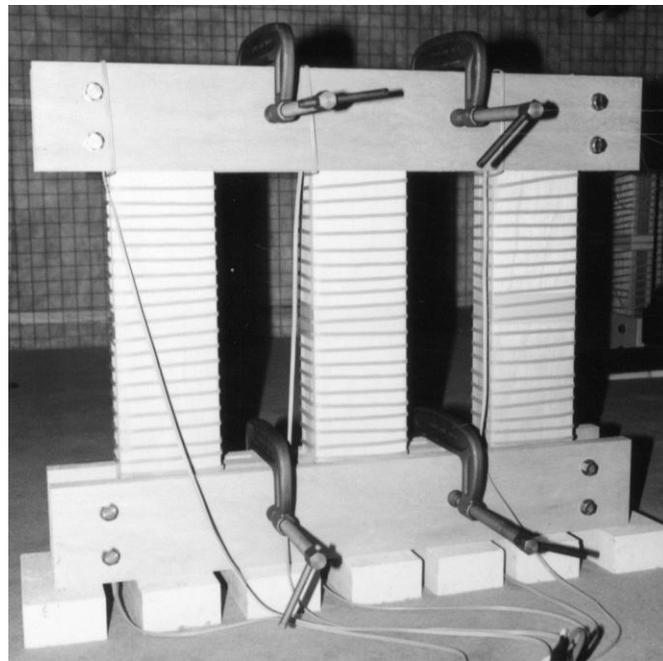
騒音測定は鉄心の 3 本の脚を取り囲む図 2.4 の 8 箇所で行い、その結果を表 2.1 に示す。平均値は横置き法の方が 7.8dBA 高い。また、横置き法で、鉄心上方に位置する測定点①～③の平均値は 50.2dBA であるのに対し、テーブル裏面側となる測定点⑤～⑦の平均値は 50.8dBA であった。テーブルで遮音されているはずの裏面のほうが高い音圧レベルとなるのは、鉄心振動を加振力としたテーブルの共振振動が発生しているためと推測される。

表 2.1 騒音測定結果 (各測定位置と平均, 単位 dBA)

設置法	測定点								平均
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	
横置き法	48.0	51.9	49.8	43.7	48.7	52.2	50.8	43.2	49.5
縦置き法	39.5	43.2	42.6	40.9	41.6	41.4	40.6	42.6	41.7



a) 横置き法



b) 縦置き法

図 2.3 モデル鉄心の設置方法

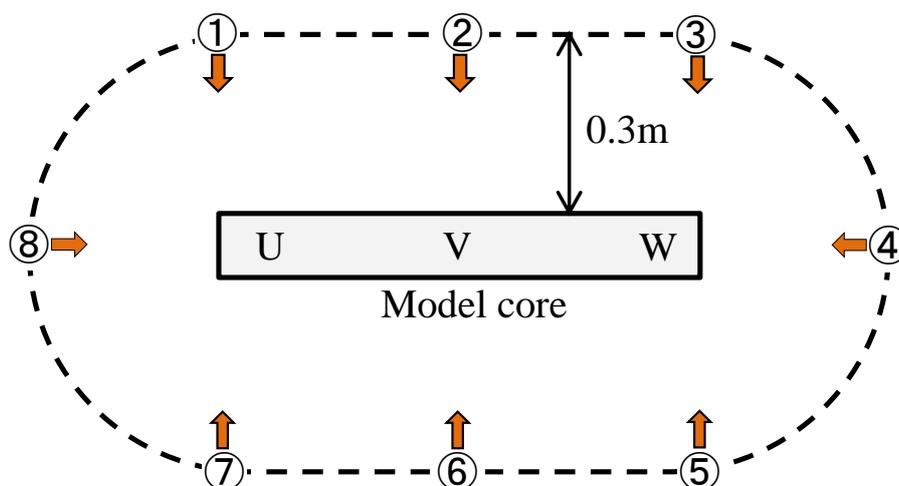
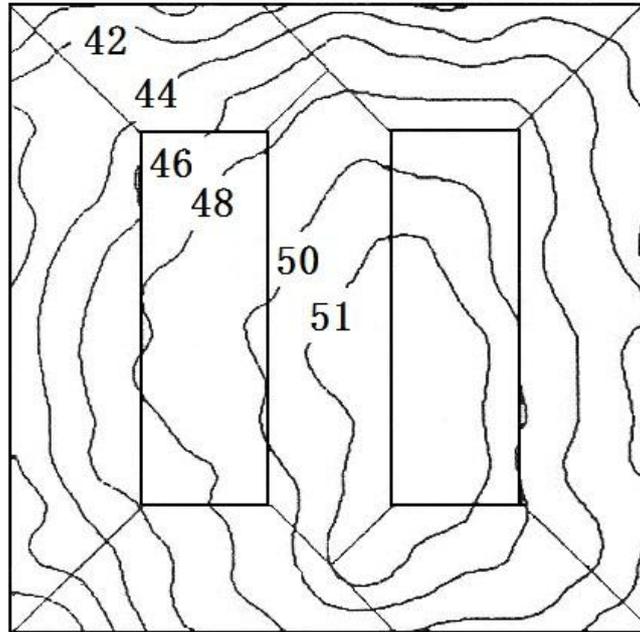


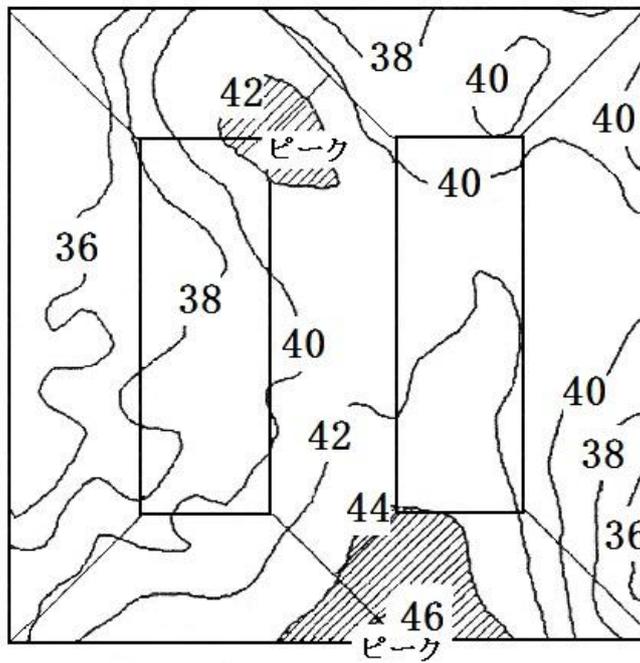
図 2.4 騒音測定位置（矢印はマイクロホンの方向）

次に、騒音分布を鉄心の上面あるいは前面で音響インテンシティ法^[2.13]によって測定した結果を図 2.5 に示す。横置き法では等高線図が同心楕円パターンを示しており、この原因もテーブル中心部が腹となる共振振動にあると推察される。テーブルは実験のために用いており実機鉄心には存在しないため、その共振は鉄心の騒音評価にとっては誤差要因である。共振はテーブルの剛性と質量の変更や、鉄心とテーブルの間への防振ゴムの挿入などで低減が可能と考えられるが、より確実なのは縦置き法の使用である。よって、これ以降の検討では縦置き法を用いることとした。

縦置きとするためには前述の様に鉄心の締め付けが必要である。その方法は最終的に図 2.6 に示すものとした。まず電磁鋼板の表面部分すべてを覆う様に鉄心と同幅の木の板を当て、その上から C 型クランプで挟んで加圧する。加圧位置は各脚 3 箇所、各ヨーク 3 箇所計 15 箇所とした。また、ヨーク部分については、当て板を長めにしてその両端に穴を設けてボルトでも締め付けた。締め付け圧力は、クランプとボルトそれぞれについてトルクと加圧力の関係を事前に荷重計で求めておき、その関係を使って設定する。



a) 横置き法



b) 縦置き法

図 2.5 音響インテンシティ分布 (単位 dBA)

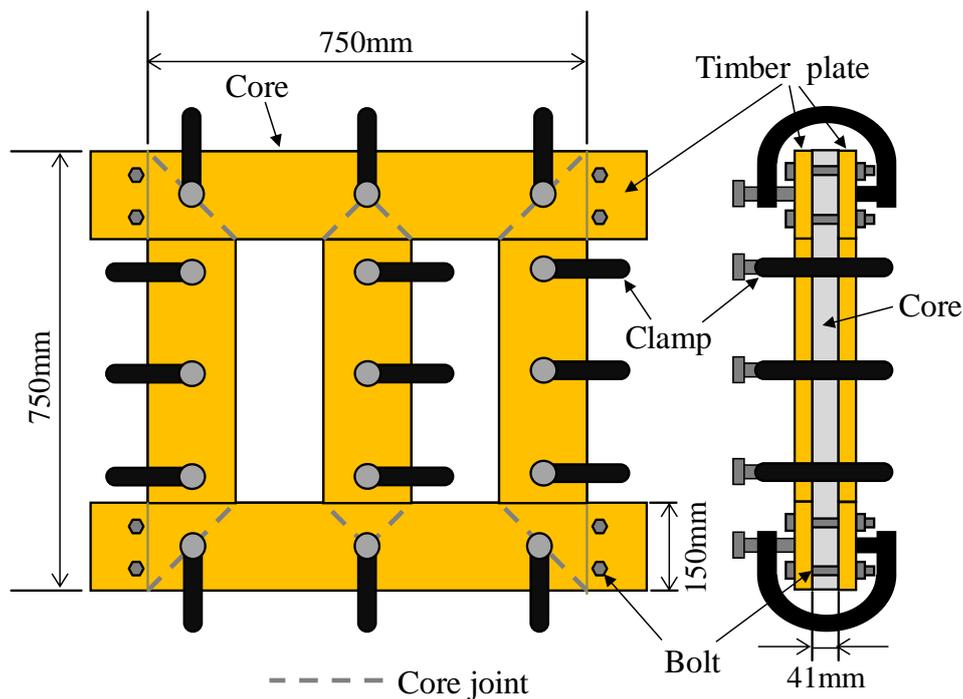


図 2.6 騒音測定のためのモデル鉄心の構造

2.4 騒音測定位置に関する検討

2.4.1 鉄心騒音測定における検討課題

変圧器の騒音測定規格^{[2.9][2.10]}では測定位置の具体的な間隔（点数）の決定は測定者に任されているため、次の検討が必要となる。すなわち、3相鉄心では各脚が位相の異なる振動をする場合があり^[2.14]、音場が複雑になっていると考えられるため、測定位置を短距離動かすことで騒音レベルが変化する可能性がある。よって正確な評価のためには騒音レベルの平均値が測定位置に左右されない十分な位置数とすることが必要である。そこで次節において、測定点数を始めとする測定位置の検討をモデル鉄心騒音の実測によって行う。なお、検討のための測定位置は図 2.7 に示す 8 点とする。この測定位置は図に示す破線上で等間隔としている。

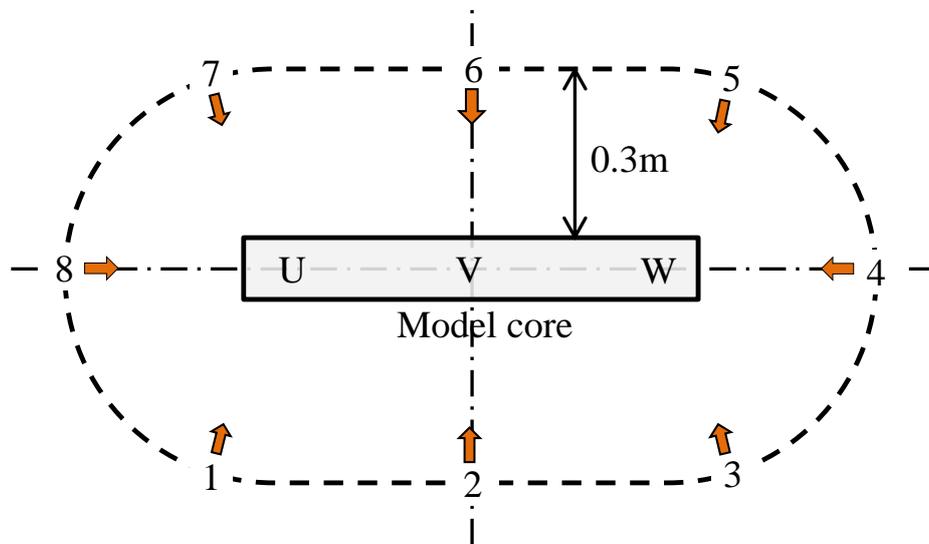
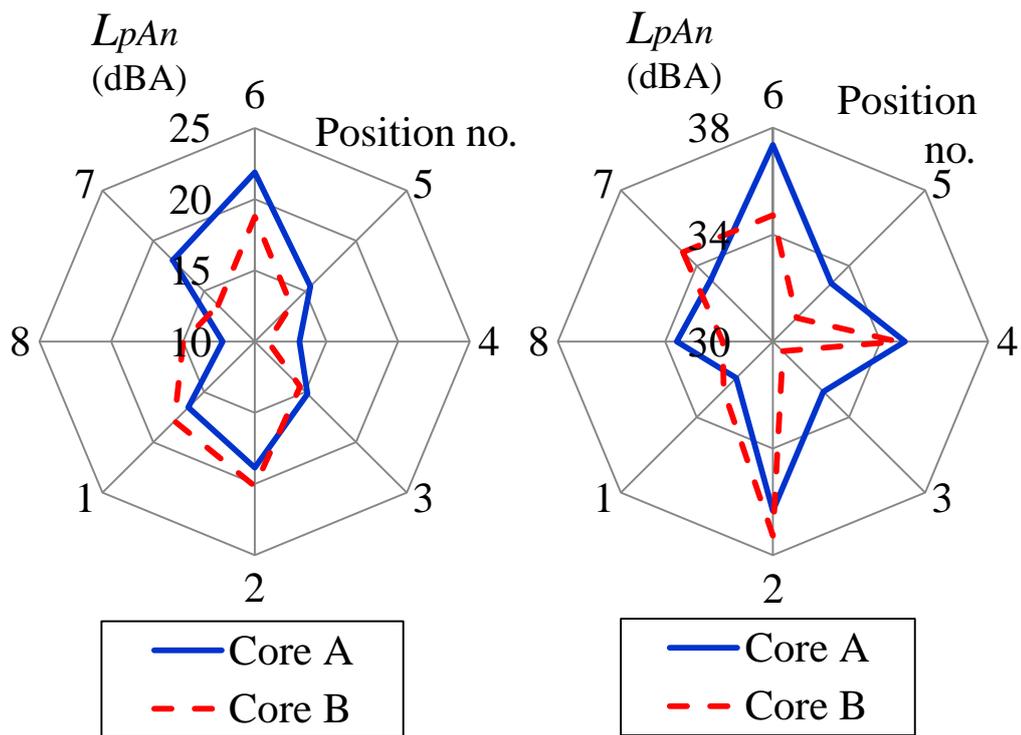


図 2.7 騒音測定位置 (俯瞰図)

2.4.2 測定位置間の騒音差^[2.15]

まず、図 2.7 の測定位置の間でどの程度の騒音差が生じるかを実測によって示す。鉄心形状を考慮すると、騒音値には図 2.7 の一点鎖線を中心とする対称性が生じると考えられる。すなわち測定位置 2 と 6、4 と 8、1 と 7、3 と 5 に同等の値が出ると予想される。また 2 と 6 は鉄心前面の中心であるため、正対する振動面積が最も大きく、鉄心全体に対する平均距離が最短であるため高騒音レベルになると予想される。

種類が異なる方向性電磁鋼板を用いてモデル鉄心 A と B を作製し、磁束密度 1.3T と 1.7T で測定された各位置の騒音レベル L_{pAn} を図 2.8 に示す。位置番号 1 から 8 は図 2.7 の位置に対応する。鉄心 A では前記の予想に近い対称性が見られ、また位置 2 と 6 が高い。しかし鉄心 B ではその対称性が見られない位置もある。図 2.9 は騒音の主要周波数成分であった 300Hz と 900Hz の騒音レベル L_{pAnf} を図 2.8 と同様に表したものであるが、これにも前記と同様の傾向が見られる。



(a) 磁束密度 1.3T

(b) 磁束密度 1.7T

図 2.8 測定位置毎の騒音レベル

表 2.2 モデル鉄心 A, B の平均騒音レベル L_{pA} とその差

磁束密度	Core A	Core B	A と B の差
1.3T	17.5	16.5	1.0
1.7T	34.5	34.0	0.5

(dBA)

このように測定位置と騒音の関係は複雑であるため、測定位置を図 2.7 の破線上でずらすと測定値が変化する可能性がある。すなわち、表 2.2 で示す全測定位置の平均騒音レベル L_{pA} が変化すると共に、鉄心 A と B の差も変

化し、最悪の場合は大小関係が逆転することもあり得ると考えられる。よって、それらを回避するための検討を行う必要がある。

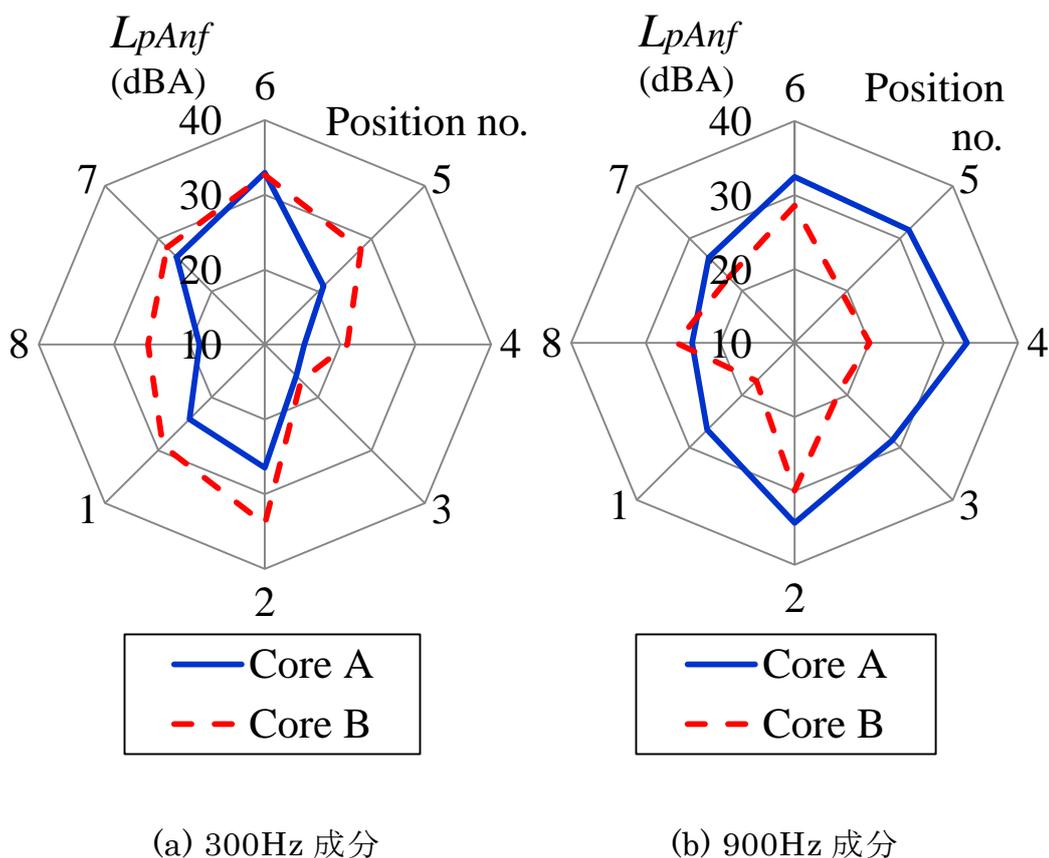


図 2.9 測定位置毎の騒音周波数成分 (磁束密度 1.7T)

2.4.3 平均値の誤差を考慮した測定位置数の検討^[2.15]

測定位置間隔をより小さくすることで細かな位置変化による騒音変化を調べると共に、平均騒音レベル L_{pA} への測定位置数の影響も明らかにする。位置数を増すため、図 2.7 の位置 8-1-2 の間に 2 点ずつ追加した図 2.10 の 7 点 a~g で実測を行った。

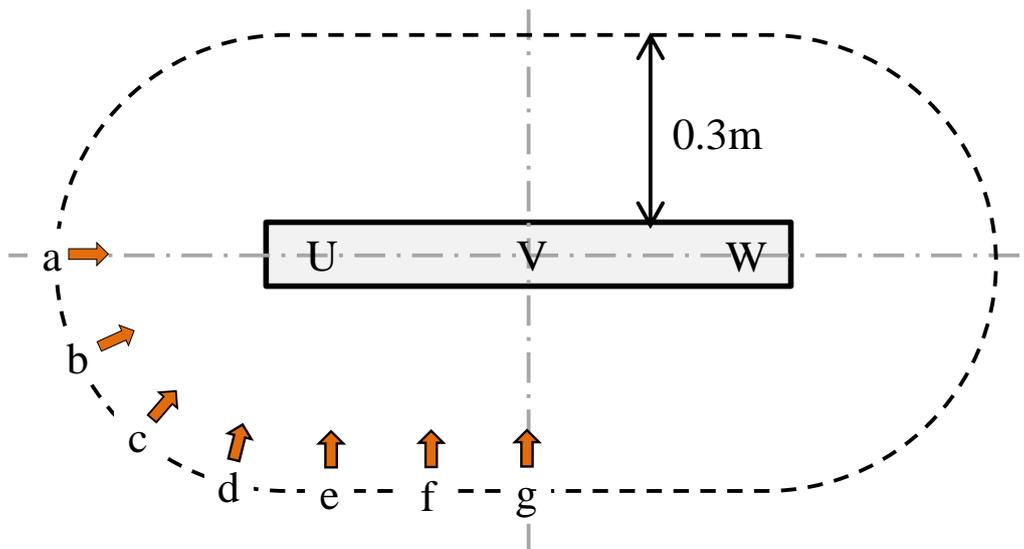


図 2.10 細分化条件での騒音測定位置

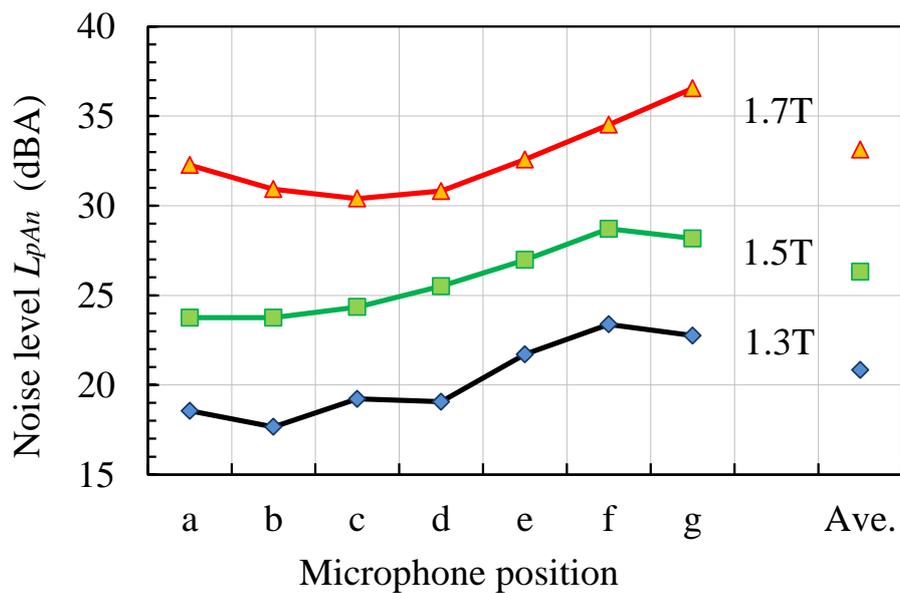
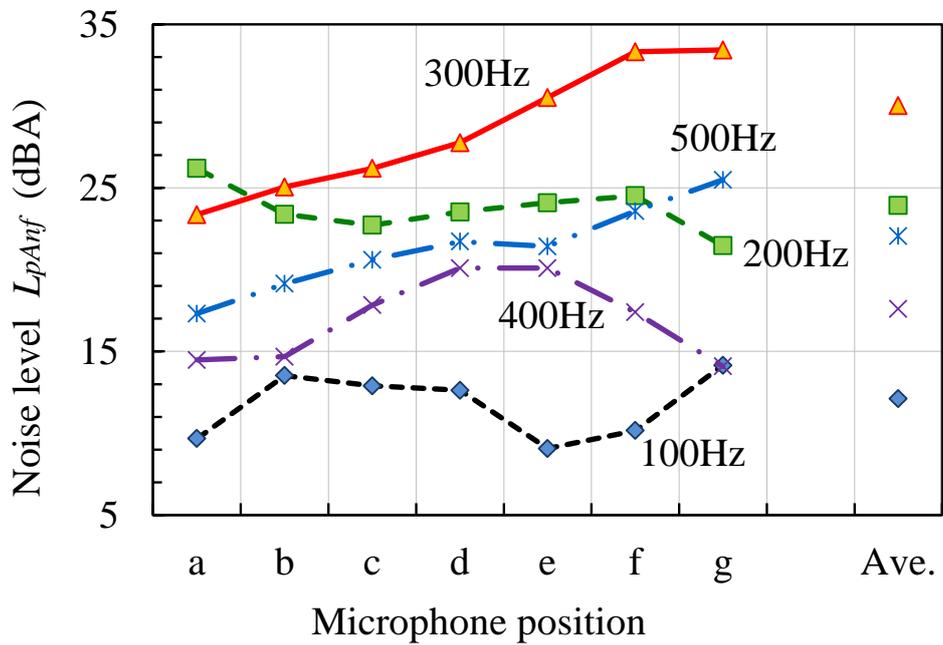
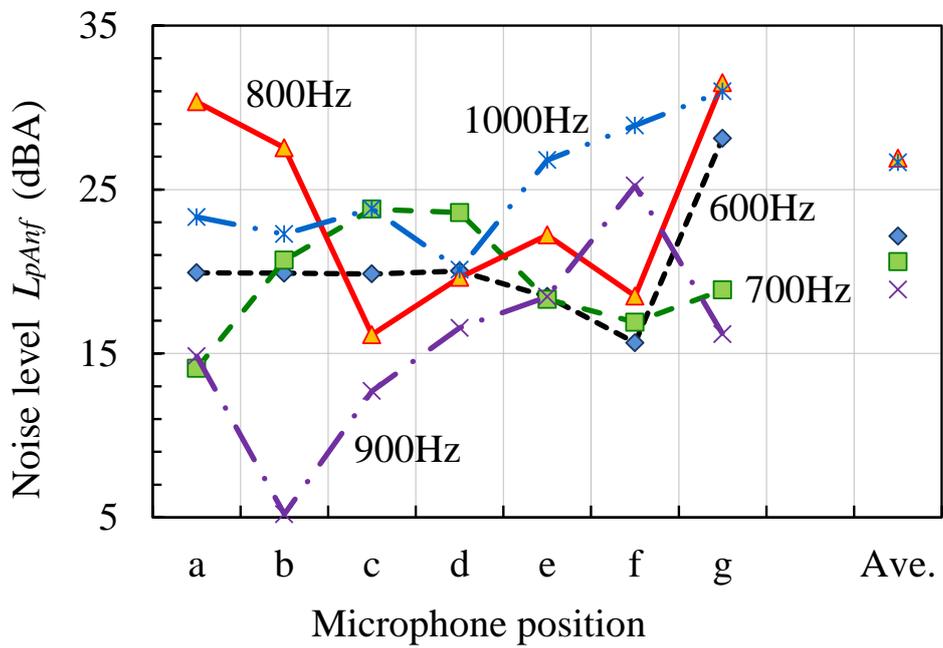


図 2.11 測定位置毎の騒音レベル

図 2.11 に各測定位置の騒音レベルを示す。1.5T と 1.7T では、測定位置の移動による騒音レベル変化はほぼ滑らかで、1.3T も多少の上下はあるが滑らかである。この 1.7T の結果を周波数成分別に見た結果を図 2.12 に示す。



(a) 100Hz ~ 500Hz 成分



(b) 600Hz ~ 1000Hz 成分

図 2.12 測定位置毎の騒音周波数成分 (磁束密度 1.7T)

最主要成分は 300Hz であるが、位置 a,b では 800Hz が最も高く、図 2.11 の 1.7T の曲線はこの 2 つの周波数成分に支配されていると考えられる。

騒音分布の単純予測から、鉄心前面の中心である g が正対する振動面積が最も大きく平均距離が最短であるため最高騒音となり、そこから離れるに従って騒音は低下していくと考えられる。しかしそれに従うのは 300Hz と 500Hz のみである。鉄心全面が均一に振動すれば前記の傾向が現れるが、実際には鉄心の位置毎に振動が異なるため、図 2.12 の各曲線は様々な傾向になると考えられる。またこれらの曲線は周波数が高い程、急峻に変化する傾向がある。これは、音は高周波になる程、指向性が強くなるため粗密が得意やすいと考えられる。また、複数位置からの音波の相互干渉が、音の短波長化によって短距離の測定位置移動で変化する事も理由と考えられる。

精度の高い測定を行うために位置数を何点以上にすべきかを、位置 a から g の中で平均計算に使用する点数を変えることで検討した。すなわち、a, g の 2 点、a, d, g の 3 点、a, c, e, g の 4 点、a~g の 7 点による平均値を比較した。この時、図 2.7 の 1 点鎖線で示す対称性を考慮した加重平均をすることで全周の平均騒音レベルを推定した。図 2.13 にその結果を示す。また、位置 a~g の 7 点の値に基づいて推定した全周 24 点の騒音レベル平均値を真値と見なし、より少ない位置数で求めた平均値の誤差を算出した結果を図 2.14 に示す。位置 a と g の値に基づく全周 4 点の騒音レベルには、1.7T で 2dBA 以上の大きな誤差が発生している。一方、位置 a, d, g の値に基づく全周 8 点での誤差は 0.6dBA 以下、更に位置 a, c, e, g の値に基づく全周 12 点での誤差は 0.3dBA 以下となっている。騒音レベルは数 dBA の差から議論されることが多いため、全周 4 点による平均値の誤差は過大で、測定位置数が過少と言える。一方、全周 8 点以上では誤差はほぼ無視可能と考えられるため、測定位置数は 8 以上にすべきと結論できる。

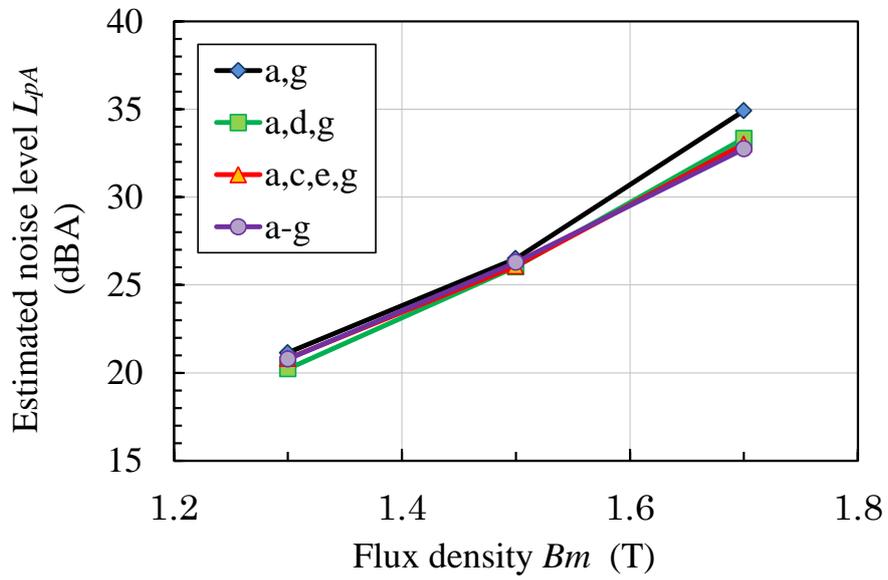


図 2.13 異なる測定位置数で平均した騒音レベル

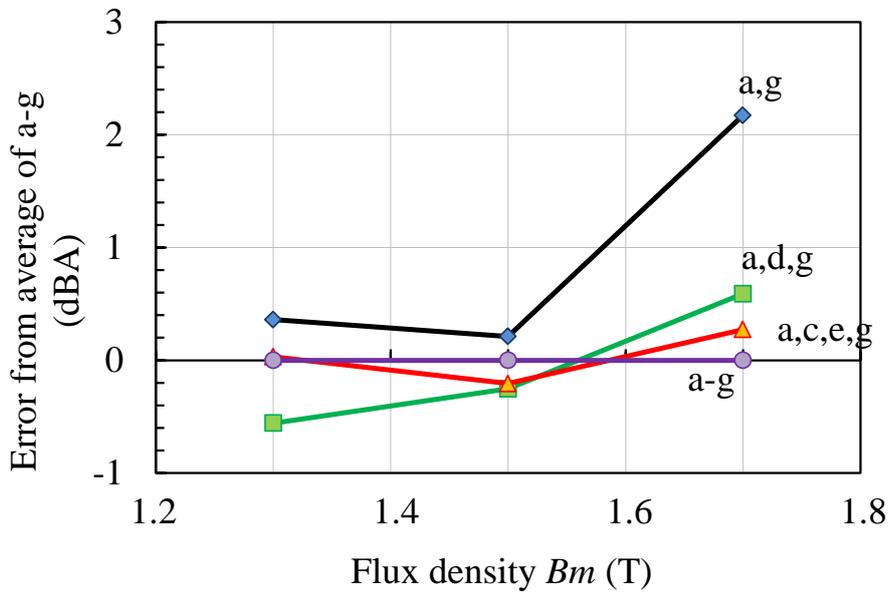


図 2.14 測定位置数を減じて平均した騒音レベルの誤差

図 2.15 には 1.7T での周波数成分別の誤差を示すが、その誤差は高周波数ほど大きくなる傾向がある。この理由は、図 2.12 で高周波数の成分ほど急峻に変化することにあると考えられる。よって、高周波数の成分について議論する場合には、測定位置数はできるだけ多い方が望ましいことがわかる。

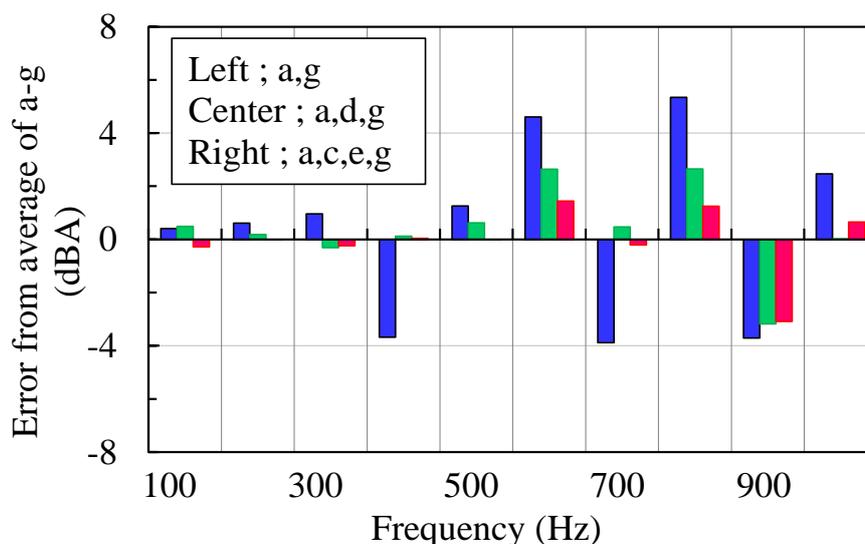


図 2.15 測定位置数を減じて平均した騒音周波数成分の誤差
(磁束密度 1.7T)

2.4.4 測定距離の増加による誤差の低減^[2.15]

測定精度を向上させるため、前節では測定位置数を検討した。他の精度向上法として、鉄心から測定位置までの距離を増す方法がある。音の指向性が強く、かつ複数の発音点がある場合には、距離を増す程、全発音点からの音を捕えやすくなる。これにより測定位置間の騒音レベル差が減少し、測定位置数を増さなくても精度を向上させることが可能と考えられる。そこで図 2.7 において、鉄心と測定位置間の距離を 0.3m から 0.6m に伸ばして実測し、測定値の変化を調査した。

各測定位置での騒音レベルを図 2.16 に示す。測定位置間の差の減少は 1.7T で顕著で、0.3m で大きな差が見られた測定位置 3 と 4 は、0.6m ではほとんど同値となっている。次に、測定位置間のバラツキを全体的に評価するため、全位置の騒音レベルを母集団とする標準偏差を求めた。その結果を図 2.17 に示す。0.3m に対して 0.6m は全磁束密度で標準偏差が低下している。また、磁束密度の上昇に伴ってその差は拡大しており、1.7T では 1.5dBA となっている。これらの結果から、鉄心とマイクロホン間の距離を伸ばすことによって測定位置間の騒音レベル差は低下し、その結果、測定精度を向上させることができると考えられる。

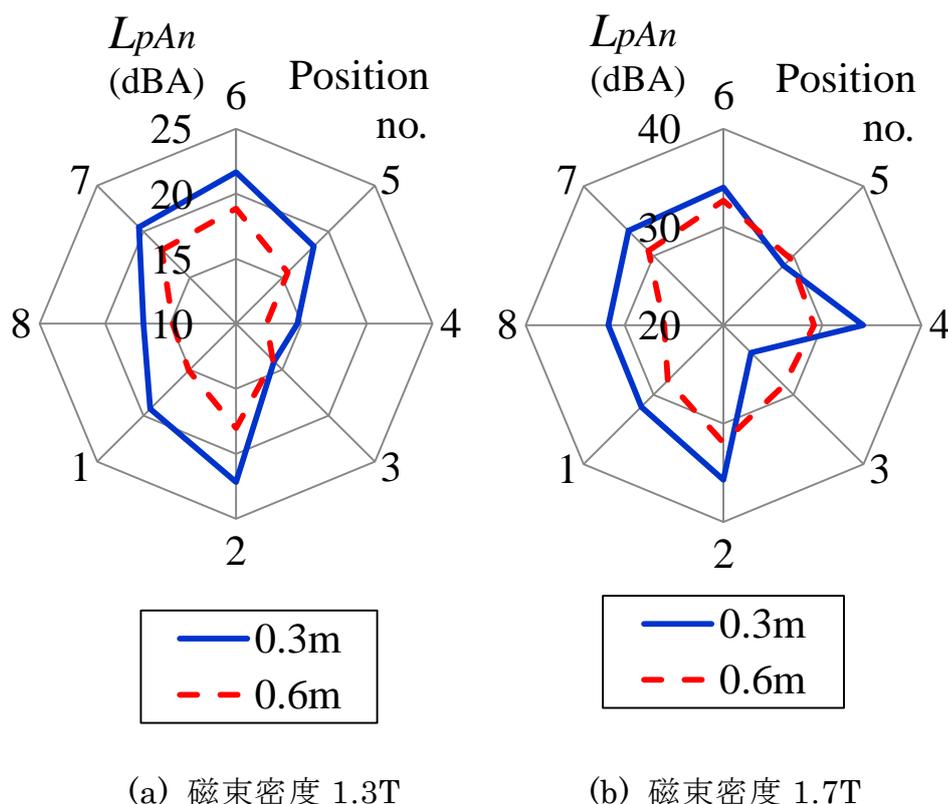


図 2.16 2 種類の測定距離での騒音レベル

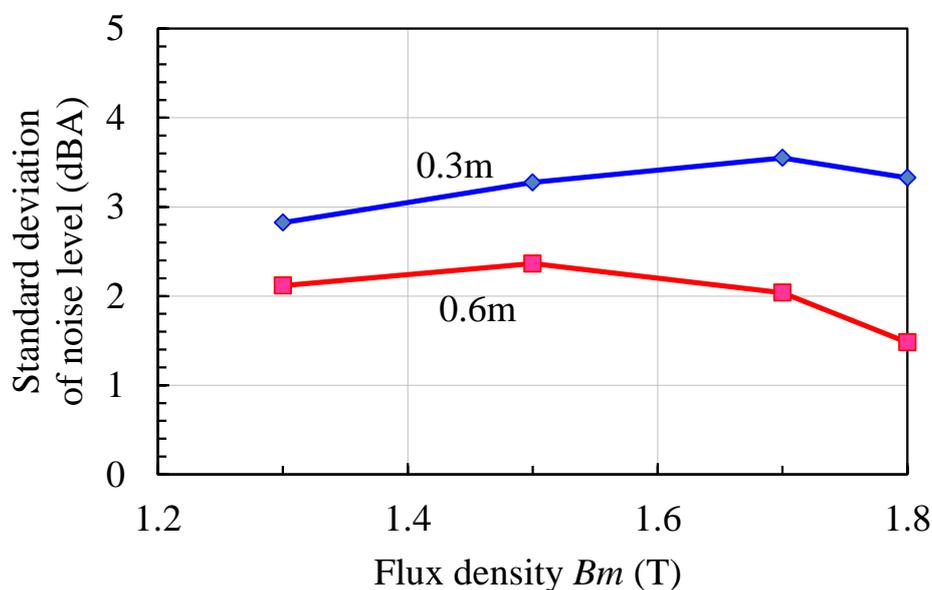


図 2.17 全測定位置の騒音レベルから算出した標準偏差

なお距離を伸長すると、距離減衰のために測定される騒音レベル値が低下する。図 2.18 には 0.3m と 0.6m での騒音レベルとそれらの間の差を示す。距離の伸長による騒音レベルの低下量はほぼ 3dBA である。また、1.3T から 1.7T にかけては差はわずかに低下する傾向であるが、1.8T になると逆に増加している。次に騒音周波数成分を図 2.19 に示す。周波数毎の 0.3m と 0.6m の差は一部を除いてほぼ同程度の値となっている。特異点として 800Hz と 900Hz があり、距離伸長によって逆に騒音レベルがわずかに上昇している。また、1000Hz は距離伸長による低下量が他の周波数の 2 倍以上となっている。これらの原因として、複数の発音位置からの音の干渉が距離変化によって変化することが推定される。また、指向性が高い音の場合に、測定位置が変わることで高音圧領域から逸脱して騒音レベルが大きく低下した可能性もある。

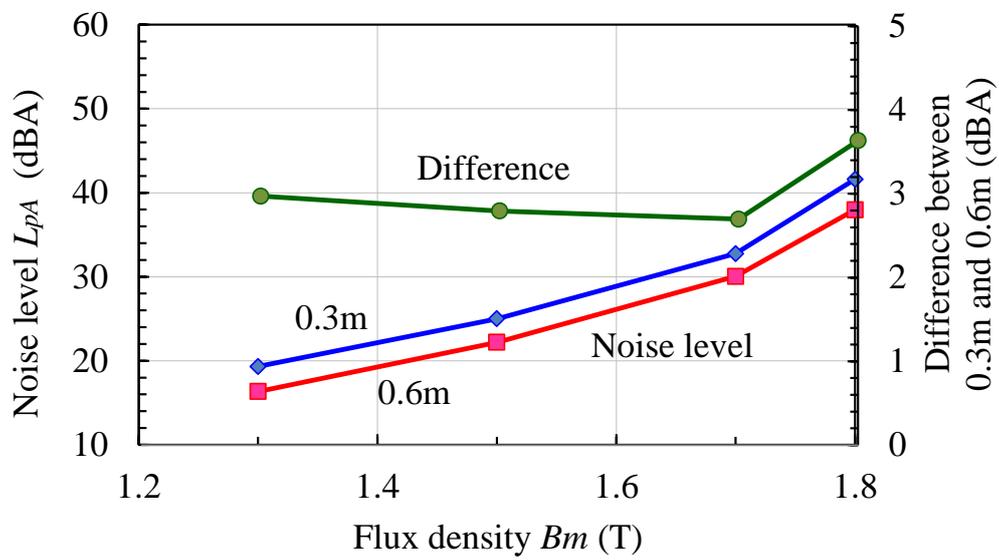


図 2.18 2 種類の測定距離での騒音レベルとその差

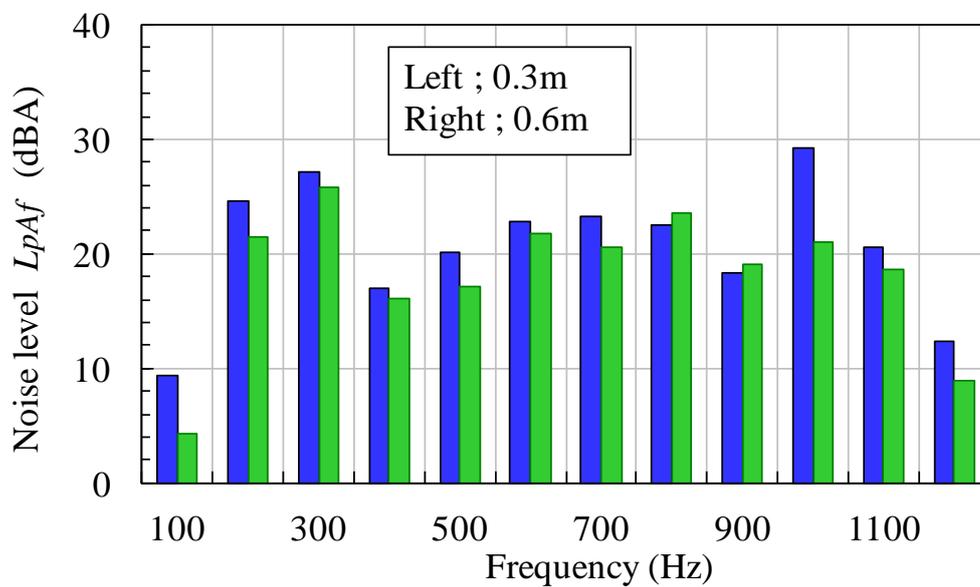


図 2.19 2 種類の測定距離での騒音周波数成分

(磁束密度 1.7T)

前述の様に鉄心から測定位置までの距離を伸ばすと距離減衰によって騒音レベルが低下する。この時に暗騒音や測定器のノイズが問題となることがあり得る。すなわち測定環境に元々存在する暗騒音や測定器のノイズが、測定すべき音圧レベルに近い場合には測定誤差が発生する。この補正は(2.2)式で行うが、測定された値と、暗騒音や測定器ノイズとの差が3dBA以下になると測定値の有効性が損なわれる。そこで、モデル鉄心の騒音での距離減衰を知っておくことが必要となる。

無限の自由空間に置かれた点音源による音圧には逆2乗則が成り立つ。同様に音源が平面や線の場合には以下に示す法則がある^[2.16]。図2.20には全体が同振幅と同位相で振動する有限サイズの音源と音圧測定位置を示す。平面音源は1辺が l (m)の正方形，線音源は長さ l (m)とする。これらの中心位置を通る垂線上に音源からの距離が d_1 、 d_2 である位置1、2を設定し、それらの位置の音圧レベル L_{p1} 、 L_{p2} の間の差を考える。なお、 $d_1 < d_2$ とする。

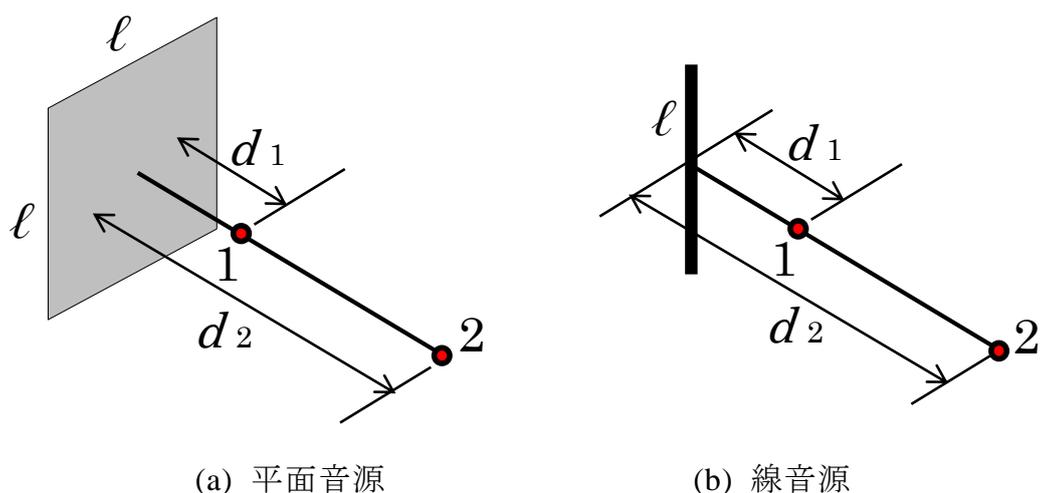


図 2.20 音源と騒音測定位置

平面音源の場合、 $d_2 < \ell / \pi$ であると $L_{p1} = L_{p2}$ となり、距離減衰は発生しない。 $d_1 > \ell / \pi$ では (2.3) 式の k を 20 とする距離減衰が発生する。

$$L_{p2} - L_{p1} = -k \cdot \log_{10} \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \cdots \cdots \cdots (2.3)$$

ここで、 L_{p1} 、 L_{p2} はそれぞれ位置 1、2 での音圧レベル (dB)、 d_1 、 d_2 は位置 1、2 の音源からの距離(m)、 k は定数である。線音源の場合は、 $d_2 < \ell / \pi$ であると (2.3) 式の k を 10 とする距離減衰が、 $d_1 > \ell / \pi$ であると k を 20 とする距離減衰が発生する。なお、 $k=10$ では 2 倍の距離(double distance = d.d.) で 3dB の、 $k=20$ では 6dB の減衰が生じる。 k はいずれの音源でも距離 ℓ / π で変化するが、それは不連続変化ではなく、その前後から緩やかに変化する。

変圧器鉄心については、振動の振幅と位相が鉄心の位置毎に変化し、更に鉄心前面には窓がある。従って前述の法則は完全には成り立たないと予想される。そこでモデル鉄心での実測結果と法則の対比を行った。測定位置は図 2.7 の 2、4、6、8 とし、鉄心前面の 2 と 6 では平面音源、鉄心側面の 4 と 8 では線音源の法則を比較対象とした。実測での鉄心中心と測定位置の距離は位置 2、6 では 0.1m から 1.5m まで、位置 4、8 では 0.1m から 0.8m までとした。各測定位置は鉄心前面あるいは側面の中心を通る垂線上に配置した。

図 2.21 に鉄心前面の位置 2 と 6 の距離変化による騒音レベル変化を示す。法則では ℓ / π までは減衰しないはずであるが、実測ではわずかな減衰が見られる。また、 ℓ / π よりも離れると法則では 6dB/d.d. の減衰が生じるが、位置 6 はそれにほぼ一致している。一方、位置 2 では数 dB のずれが見られる。また、無減衰から -6dB/d.d. に移行する距離は、法則では ℓ / π であるが、実測はより離れた所で移行しているように見える。

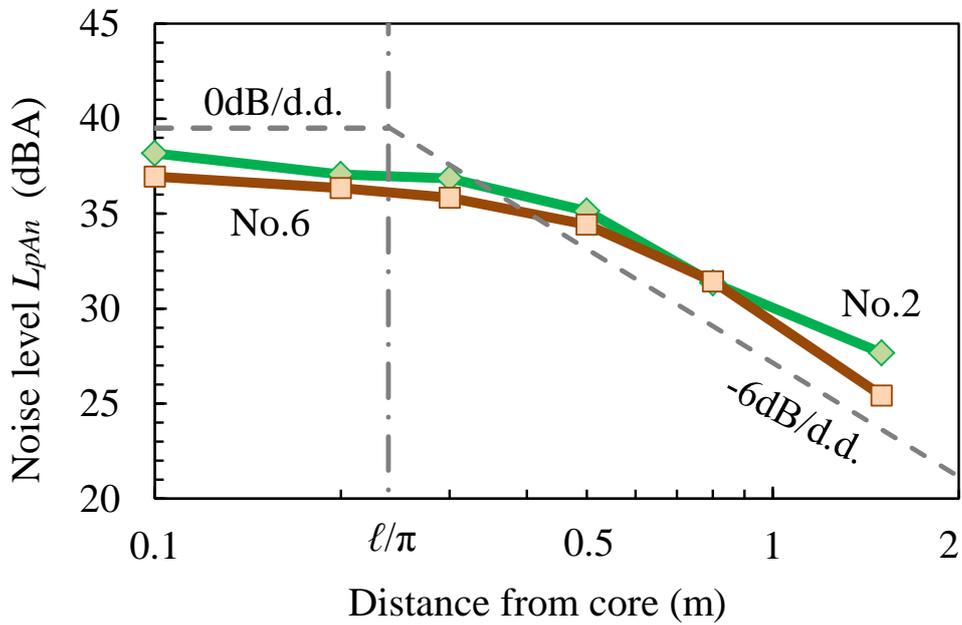


図 2.21 鉄心前面での騒音の距離減衰 (破線は面音源での理論値)

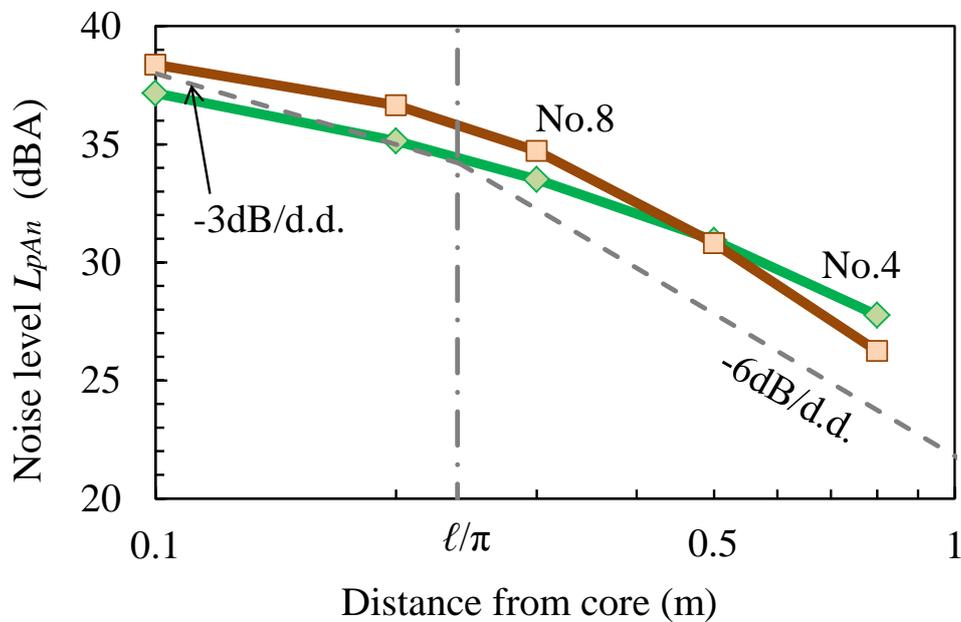


図 2.22 鉄心側面での騒音の距離減衰 (破線は線音源での理論値)

図 2.22 には鉄心側面の位置 4 と 8 の距離による騒音レベル変化を示す。法則では l/π までは 3dB/d.d. の減衰が生じるが、実測の減衰率は若干低い。また、 l/π よりも離れると法則では 6dB/d.d. の減衰が生じるが、位置 8 はそれにかなり一致している。一方、位置 4 では減衰率が低めで数 dB のずれが見られる。また、-3dB/d.d. から -6dB/d.d. に移行する距離は、法則では l/π であるが、実測はより離れた所で移行しているように見える。

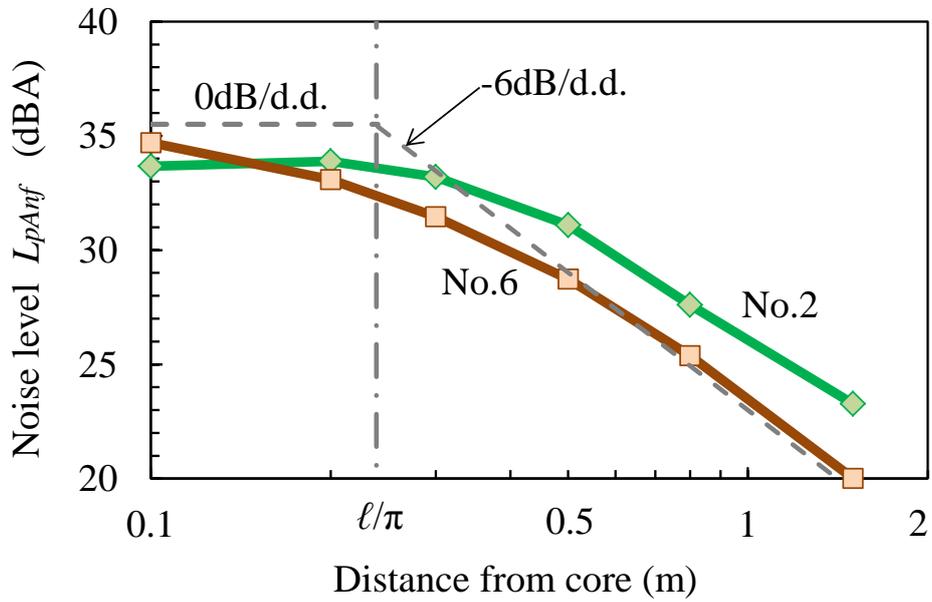
図 2.23 には鉄心前面の位置 2 と 6 の距離変化による騒音周波数成分の変化を示す。周波数は主要成分であった 300Hz と 800Hz を選んだ。これらも前述と同様の傾向を持つが、800Hz では鉄心に近い位置で距離の増加に伴って騒音が逆に増加する傾向が見られる。

以上の結果から、モデル鉄心と法則の間に距離減衰の減衰率とその移行距離の厳密な対応はないと言える。この原因として、鉄心振動の振幅と位相が鉄心上の位置毎に異なる、鉄心前面には窓が存在する、鉄心側面は鉄心前面からの音の回り込みがあることなどが考えられる。しかし、実測と法則に極端な乖離はないため、距離減衰の法則は粗見積りには使用可能と判断できる。

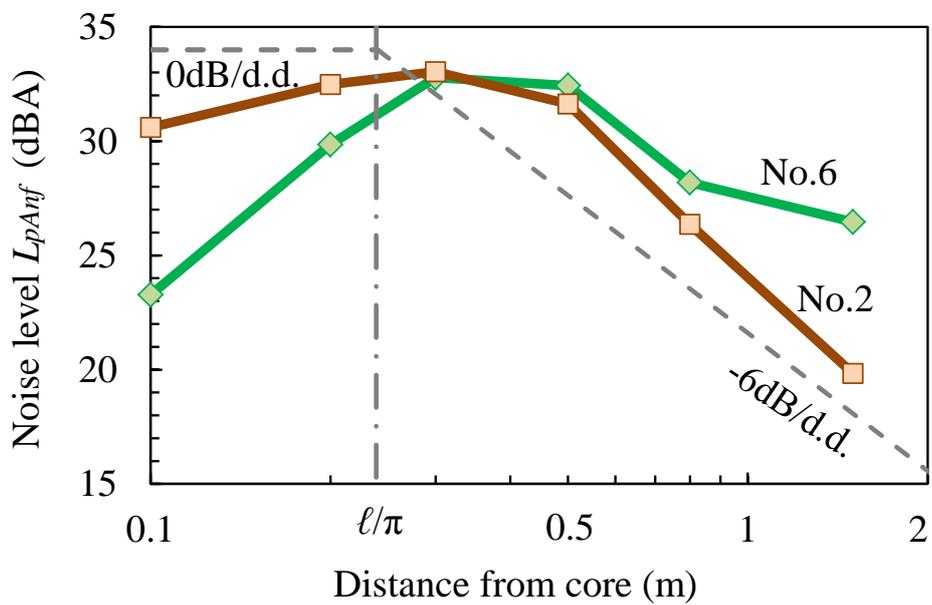
2.4.5 測定位置に関する検討のまとめ

モデル鉄心を用いて騒音評価を行う場合の騒音測定位置について検討を行った結果、下記の点が明らかになった。

まず、モデル鉄心で使用した電磁鋼板などが変わると騒音分布が変化するため、騒音測定位置の決め方が評価に影響を及ぼす可能性がある。精度の高い評価を実施するためには騒音測定位置数は 8 点以上とする必要がある。また、鉄心と測定位置の距離を増すことも精度向上に有効であるが、距離減衰による測定値の低下で暗騒音による誤差が問題化する可能性がある。この時、面音源や線音源での距離減衰の法則がモデル鉄心でもおおよそ成り立つため、減衰量の粗い見積もりに使用できる。



(a) 300Hz 成分



(b) 800Hz 成分

図 2.23 鉄心前面での騒音周波数成分の距離減衰
(破線は面音源での理論値)

2.5 モデル鉄心による評価の有効性

本研究で騒音評価に用いるモデル鉄心は 2.3 節で述べた様に正面の高さと幅を共に 750mm とした。一方、大容量の実機変圧器の鉄心はサイズが大きく、一辺が 3m を超すような場合も珍しくない。そのような大型鉄心での騒音の諸現象を小型のモデル鉄心による実験で評価できるかどうかを検討しておく必要がある。また、騒音評価の際の鉄心から測定位置までの距離は、モデル鉄心の場合には 2.4 節で述べた様に 0.3m とした。しかし実機測定では規格でのもう一つの値である 2m とすることも多い。この測定距離の相違についても考察しておく必要がある。

ここで、発音体として球を考え、それが膨張と収縮の振動を繰り返すことで音波が発生している状態を想定する。この球の振動はそのまま音圧に変換され、その音波が無反射の空間に拡散していくと仮定する。その時の球から十分離れた位置での音圧レベルは次式で表すことができる。

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{(Mk)^2 \alpha}{r^2} \right) = 20 \log_{10} M + 10 \log_{10} \frac{k^2 \alpha}{r^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで、 L_p は音圧レベル(dB)、 M は球の半径 1m 当たりの振動速度(m/s)、 k は球の半径(m)、 α は振動の音波への変換効率と伝搬する音波のエネルギー損失、 r は球から音圧レベル測定位置までの距離(m)である。

前記の鉄心サイズと測定距離の問題は変数 k と r の変化となって考慮されるが、この 2 変数は (2.4) 式から最終的に M の項への加算項となることがわかる。ところで本研究が検討対象とする鉄心での騒音因子の影響は M の変化として表現される。これらの点から、鉄心の騒音影響因子の変化による音圧レベルの変化量は、鉄心サイズや測定距離には影響されないことが説明できる。つまり騒音影響因子による騒音変化は、小型のモデル鉄心を用いて

定量評価しても大型鉄心にそのまま適用可能であり、同時に、騒音測定距離が異なっても影響を受けないことがわかる。

2.6 振動測定システムの開発^[2.17]

振動測定手法としては、加速度ピックアップとチャージアンプを用いるものが普及している。これは測定点にピックアップを密着させて振動を測定する方法である。そのピックアップの移動は自動化が難しいため、測定点が多数となる場合には多大な労力が必要となる。これが鉄心の詳細な振動測定が行われなかった原因の一つと考えられる。また、変圧器の鉄心材料には板厚0.35mm以下の薄鋼板が用いられるが、これにピックアップの質量を付加すると鋼板本来の振動が変化して誤差が発生するという問題もある。

そこで、本研究ではレーザードップラ方式による振動センサを用いることにした。この方法は、レーザ光を振動測定点に照射し、ドップラ効果で周波数変調を受けた反射光と基準光を合成した時に発生するビートの周波数から被測定点の振動速度を測定するものである。この方法では測定は非接触で行われるため、前述の誤差の発生は避けられる。また、今回用いた振動センサは2枚の可動反射鏡を内蔵しており、外部からの制御でレーザ光を水平と垂直それぞれの方向に移動させることが可能となっている。この機能をコンピュータで制御することで多点測定の全自動化が可能となった。

測定システムの構成を図2.24に示す。振動センサの出力をハイパスフィルタ経由とし、床面から伝搬される低周波振動を除去する。その出力は増幅された後、デジタル波形記憶装置に記録される。一方、鉄心には1ターンのサーチコイルを設けてあり、その出力も前述の波形記憶装置に入力される。波形記録のトリガをこのサーチコイルの信号を用いてかけることで、振動波形を鉄心の磁束密度波形と対応させて観察できる機能を実現した^[2.18]。

デジタル波形記憶装置のサンプリングは、コンピュータからのクロック信

号で行われる。今回の測定では振動波形の 1 周期あたり 256 点のサンプリングが行われるように設定した。また、波形記憶時には 60 回のアベレージングが行なわれ、ランダムノイズが低減される。記録された波形データはコンピュータへ転送されて、様々な処理が実施される。たとえば振動変位波形を得るときには、測定された振動速度波形の台形積分演算が行われる。

測定位置制御のためのレーザー光の方向の制御は、コンピュータで制御される 2 チャンネル D/A 変換器の出力を振動センサへ入力して行われる。各チャンネルは垂直方向と水平方向の制御を行うためのもので、一定領域内の任意の点にレーザー光を照射して振動を測定することができる。この機能を応用したプログラムによって、任意の面内に設定された複数の点の振動を順に自動測定していくことができる。これにより測定の大幅な省力化が可能となったため、測定点数を飛躍的に増加させることができ、面内の振動強度分布などが容易に得られるようになった。

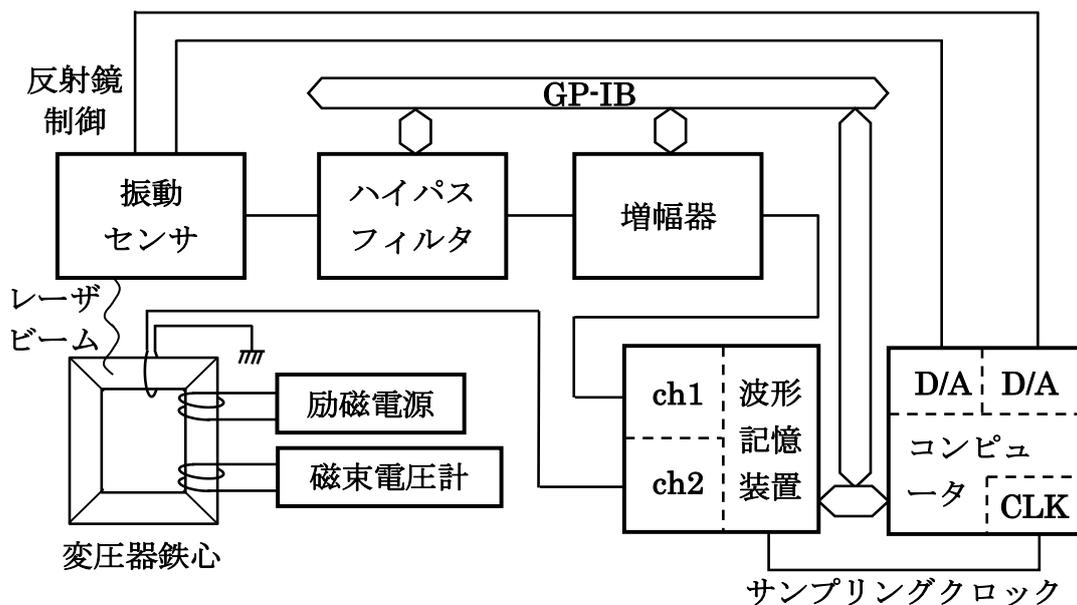


図 2.24 振動測定システムの構成

2.7 磁歪測定法

磁歪は励磁騒音の根本原因で、電磁鋼板の素材特性として評価される。従って測定では単板サンプルを交流励磁し、発生する伸縮を振動として計測する方法が多く用いられる^[2.19]。本研究で用いる磁歪測定装置では 100mm×500mm サイズの単板サンプルを使用し、片側を固定して反対側に現れる振動を、レーザー光のドップラ効果を利用する振動計で測定する^[2.20]。振動計の出力は速度信号であるため、積分器によって変位信号に変換され、デジタルオシロスコープに記録される。このデータはコンピュータに転送され、振動変位のピーク値を始めとする様々な特性値が得られる。励磁騒音は高調波を多く含むため、磁歪でも高調波成分の振幅を知ることが重要である。そのため、コンピュータ内で波形データに対して FFT が行われる。

電磁鋼板の磁歪はその圧延方向への圧縮応力で変化することが知られている。用いた磁歪測定装置には単板サンプルの長手方向に対して圧縮応力を加える機構が備わっており、圧縮応力による磁歪変化を実測によって調査することができる。

磁歪の評価指標には、図 2.25 に示す変位の振幅(peak-to-peak 値)に加えて 0-to-peak 値も用いられる。これは、サンプルの磁化が 0 である時点を経験した時点として、磁化最大の時点での変位を求めるものである^[2.21]。方向性電磁鋼板の圧延方向の 0-to-peak 値は一般的に、磁化の増加に伴ってまず負値をとる。すなわち板が収縮する歪が発生する。更に磁化が増加して飽和磁化に近づいていくと負方向への増加が止まって逆に再び 0 に接近していき、その後は正に転じる。この挙動の理由は磁区構造の変化によって説明されている^[2.22]。なお、磁歪変位は磁化の絶対値で決まるため、図 2.25 で示す様に磁歪の基本周波数は磁化の周波数の 2 倍となり、例えば 50Hz 励磁の場合には 100Hz となる。これは騒音についても同様である。前記以外の磁歪評価指標として磁歪速度レベルがあるが、これは次節で詳述する。

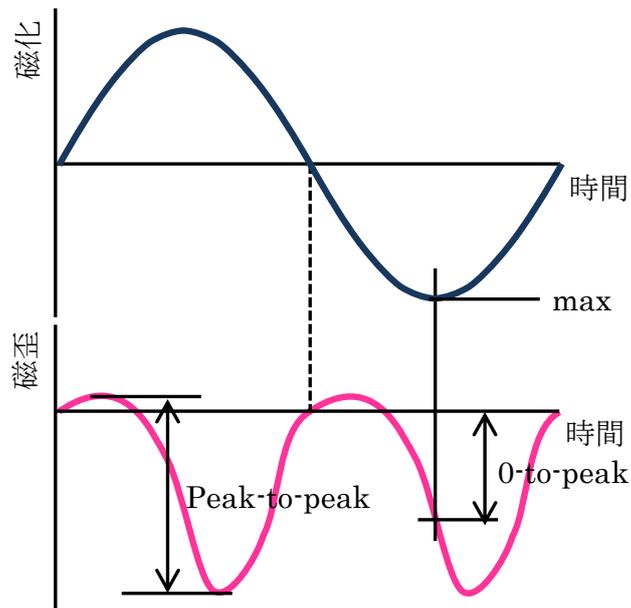


図 2.25 磁歪の評価指標

2.8 振動の騒音レベルへの換算方法

ここでは音響理論に基づいて振動を音としてどのように数学的に表すべきか、あるいは振動をどのように騒音レベルに換算するか、その考え方を示す。3次元の音の波動方程式は(2.5)式で表される^[2.11]。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

ここで、 p は音圧(Pa)、 t は時間(sec)、 K は空気の体積弾性率(Pa)、 ρ は空気の密度(kg/m³)である。

音が x 方向に進行する平面音波の場合は、(2.5)式に基づいて(2.6)式が得られる^[2.11]。

$$p(t) = \rho c \cdot v(t) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 c は音速(m/sec)、 v は空気の粒子速度(m/sec)である。

音の大小はパワーの大きさを表される。このパワーは音圧の実効値^[2.11]であり、(2.6)式の音圧と粒子速度の関数をフーリエ級数で表すことによつて、(2.7)式で求められる。

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} = \rho c \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} V_i^2} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

ここで、 P_e は音圧の実効値(Pa)、 T は音圧波形の基本周期(sec)、 V_i は空気の粒子速度の*i*次高調波の実効値(m/sec)である。

次に(2.7)式にA特性の聴感補正を導入し、更に空気の粒子速度を変位に変換すると(2.8)式が得られる。

$$P_{eA} = \rho c \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} (\sqrt{2}\pi f_i A_i \alpha_i)^2} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

ここで、 P_{eA} はA特性で補正された音圧の実効値(Pa)、 f_i は*i*次高調波の周波数(Hz)、 A_i は空気の粒子変位の*i*次高調波の波高値(m)、 α_i は*i*次の周波数でのA特性補正值である。

人が刺激の強さの変化を感じる時、強い刺激ほど変化に対して鈍感となる。よつて、刺激の対数関数をとることで刺激の大小感覚に近づけることができる。(2.8)式にこれを適用したのが(2.9)式で示す音圧レベルである。

$$L_{pA} = 20 \log_{10} \frac{P_{eA}}{P_0} = 20 \log_{10} \frac{\rho c \sqrt{\sum (\sqrt{2} \pi f_i A_i \alpha_i)^2}}{P_0} \dots\dots\dots (2.9)$$

ここで、 L_{pA} は A 特性で補正された音圧レベル(dBA)、 P_0 は基準音圧(Pa)である。 P_0 は 1kHz で人が聞き取ることのできる最小音圧を元に決められており、 2×10^{-5} Pa が使用される。

(2.9) 式で A_i は空気粒子の変位であるが、音源である固体の表面振動が無損失で空気に伝達されると仮定すると、固体の極めて近傍の空気の音圧レベルは (2.9) 式の A_i に固体表面の振動変位を入力することで求められる。よって、例えば A_i に磁歪の振幅^{[2.23]~[2.25]}や鉄心の表面振動の振幅を入力すると、それらを騒音レベルに換算することができる。現実的には騒音は固体表面からある程度離れた位置で聴かれるため、正確を期すためには場における音の拡散や干渉を考慮する必要があるが、例えば 2 種類の電磁鋼板が磁歪で発生させる音を単純に比較するような場合には、その差を見積もる方法として有効である可能性がある。

なお、前述の振動が固体から空気に無損失で伝達される点については、今後の検討が必要である。

2.9 結言

本章では変圧器騒音に関連する測定と評価の方法及び技術について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 騒音評価に用いるモデル鉄心の設置方法を検討し、横置きでは鉄心を設置するテーブルの振動が影響するため、縦置きが望ましいことを見出した。
- (2) モデル鉄心の騒音測定位置について検討を行った結果、位置数は 8 点以上とする必要があることが判明した。

- (3) モデル鉄心の騒音評価の精度を上げるためには、鉄心と測定位置の距離の増加も有効である。その時の距離減衰には、面音源や線音源での理論的法則がおおよそ成り立つことを確認した。
- (4) モデル鉄心の振動測定法としてレーザー振動計を用いたシステムを開発した。自動測定化によって測定的大幅な省力化が可能となり、測定点数を飛躍的に増加させることができた。
- (5) 磁歪や鉄心の振動を音響理論に基づいて音圧レベルに換算する方法を明示した。

参考文献

- [2.1] 「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, 第 101 号 (1971)
- [2.2] A.J. Moses and S.M. Pegler, "The effects of flexible bonding of laminations in a transformer core", Journal of Sound and Vibration, Vol.29, No.1, pp.103-112 (1973)
- [2.3] 石田, 佐藤 : 「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, MAG-93-187 (1993)
- [2.4] 鍋嶋, 長江, 小松 : 「単相変圧器モデル鉄心を用いた鉄心騒音に関する実験的検討」, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-95-21 (1995)
- [2.5] Z. Valkovic, "Investigations of core noise levels using a dry-type transformer model", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.160, pp.205-206 (1996).
- [2.6] B. Weiser, A. Hasenzagl, T. Booth, and H. Pfützner, "Mechanism of noise generation of model transformer cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.160, pp.207-209 (1996).

- [2.7] M. Mizokami, M. Yabumoto, H. Mogi, and T. Kubota, "Magnetostriction of grain-oriented electrical steel and noise of transformers", Proceedings of twenty fourth annual conference on properties and applications of magnetic materials, Session 2, Paper 4 (2005).
- [2.8] D. Snell, "Measurement of noise associated with model transformer cores", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.320, pp.535-538 (2008).
- [2.9] 電気学会電気規格調査会：「変圧器」, JEC-2200 (1995)
- [2.10] International Electrotechnical Commission, "Power transformers - Part 10: Determination of sound levels", International standard, IEC 60076-10 Edition 1.0 (2001).
- [2.11] 小橋：音と音波, 裳華房 (1987)
- [2.12] 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 年電気学会全国大会, 886 (1992)
- [2.13] F.J. Fahy, Sound Intensity, Elsevier science publishers (1989).
- [2.14] 溝上, 藪本, 岡崎：「3 相モデル変圧器鉄心の振動解析」, 電気学会論文誌 A, Vol.116-A, No.8, pp.744-749 (1996)
- [2.15] 溝上：「変圧器モデル鉄心のための騒音評価方法の検討」, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-13-154 (2013)
- [2.16] 一宮：機械系の音響工学, コロナ社 (1992)
- [2.17] 溝上, 茂木, 野沢：「変圧器鉄心振動測定システムの開発」, 平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 589 (1993)
- [2.18] 特許公報：「変圧器鉄芯振動測定方法」, 2863430 号 (1998)
- [2.19] 藪本, 溝上, 茂木, 新井：「任意波形励磁による磁歪測定技術の開発」

- 電気学会マグネティックス研究会, MAG-96-113 (1996)
- [2.20] 茂木, 溝上, 藪本, 岡崎:「レーザ非接触式磁歪測定法とその適用」,
電気学会計測・マグネティックス合同研究会, IM-94-44, MAG-94-65,
(1994)
- [2.21] 溝上:「電磁鋼板に発生する磁歪現象の概要」, 月刊 EMC, No.252,
2009年4月号, ミマツコーポレーション (2009)
- [2.22] 新井:「電磁鋼板の補助磁区構造と磁区制御技術について」, 日本応
用磁気学会誌, Vol.25, No.12, pp.1612-1618 (2001)
- [2.23] 木村:変圧器の設計工作法, 電気書院 (1960)
- [2.24] E. Reiplinger, "Assessment of grain-oriented transformer sheets
with respect to transformer noise", Journal of Magnetism and
Magnetic Materials, Vol.21, pp.257-261 (1980)
- [2.25] IEC Technical Report, "Electrical steel - Methods of measure-
ment of the magnetostriction characteristics by means of single
sheet and Epstein test specimens", IEC/TR62581 (2010)

第3章 圧縮応力による電磁鋼板の磁歪変化と鉄心の騒音変化

3.1 緒言

変圧器の鉄心騒音の一因には鉄心材料である方向性電磁鋼板の磁歪が挙げられる。磁歪はほとんどの強磁性体に見られ、磁化の変化に伴って寸法が変化する現象である。変圧器に用いられる電磁鋼板の場合は交流磁化に伴う伸縮として現れ、鉄心の振動となって騒音を生じさせる。電磁鋼板の磁歪は結晶組織など内部の要因で変化するが、同様に外部からの要因にも大きく影響を受ける。応力はその一つで、特に電磁鋼板の圧延方向に加えられた時に重要な要因となる。また、直角方向の引張応力や鋼板の曲げも要因となる。それらは磁歪振幅を増す場合があるため、騒音増加の重大な懸念が生じる。

これまでの研究では単板サンプルに応力を与えて磁歪変化を実測した例は多数見られ^[3.1] ^[3.2]、また鉄心で発生する応力も測定されているが^[3.3]、鉄心への圧縮応力が直接、騒音と関連づけられた調査はない。本章ではまず、圧延方向の圧縮応力による磁歪変化を測定する^[3.4]。これに加え、モデル鉄心で圧延方向に圧縮応力を加えて騒音レベルを測定し、騒音の増加率を求めると共に、圧縮応力が引き起こす変化の観点で騒音と磁歪の相関性を議論する^[3.4]。更に、圧縮をかける過程で偶発的に生じた鉄心変形の騒音への影響も調査する^[3.4]。

3.2 実験方法

3.2.1 磁歪評価方法

磁歪測定には2.7節で述べた測定装置を用いた。磁歪測定は単板サンプルの圧延方向に対して行われ、圧縮応力も圧延方向にかけられた。励磁条件は50Hzで、1.3Tと1.7Tとし、圧縮応力は0から3MPaまで0.5MPa単位で変化させた。サンプルは10枚用意し、それらで測定された値を平均化して検討に供した。

3.2.2 モデル鉄心の構造と実験手順

モデル鉄心として 2.3 節で述べた縦置き法の 3 相 3 脚積鉄心を使用した。C 型クランプによる締め付けは図 3.1 で示す位置とし、それらが加える平均締め付け圧力は 0.3MPa とした。素材として板厚 0.30mm の方向性電磁鋼板を用いた。

モデル鉄心への圧縮応力は、鉄心の外側から各脚の長手方向、すなわち圧延方向に加えた。図 3.2 と図 3.3 はその機構を示す。圧縮応力は、脚の断面をヨークの積層端面上に投影して定められる領域に対して与えた。最初に、150 mm×41mm×5mm のゴムシートを鉄心の前述の領域に当て、その上

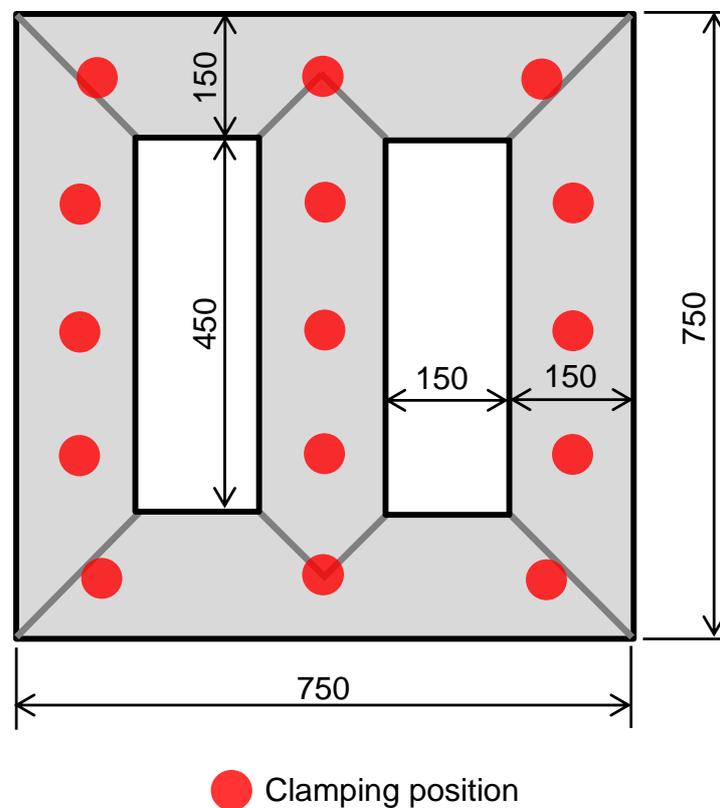


図 3.1 モデル鉄心の寸法と締め付け位置（単位 mm）

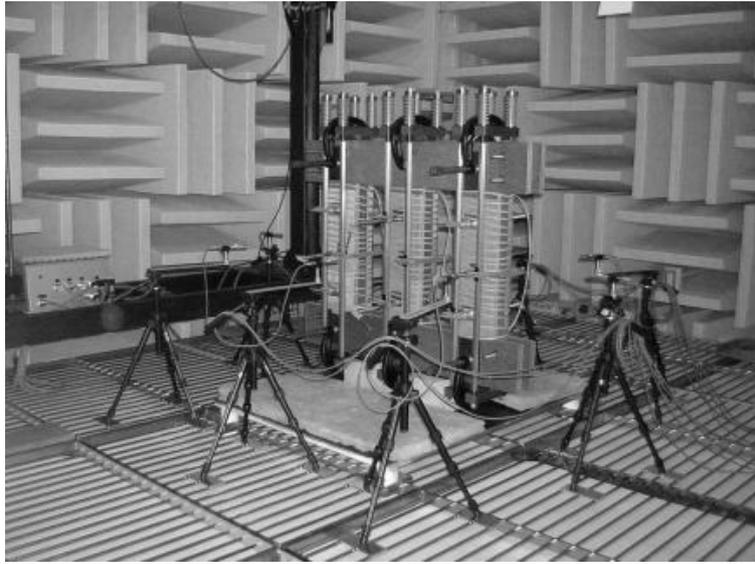


図 3.2 無響室でのモデル鉄心とマイクロホン設置状況

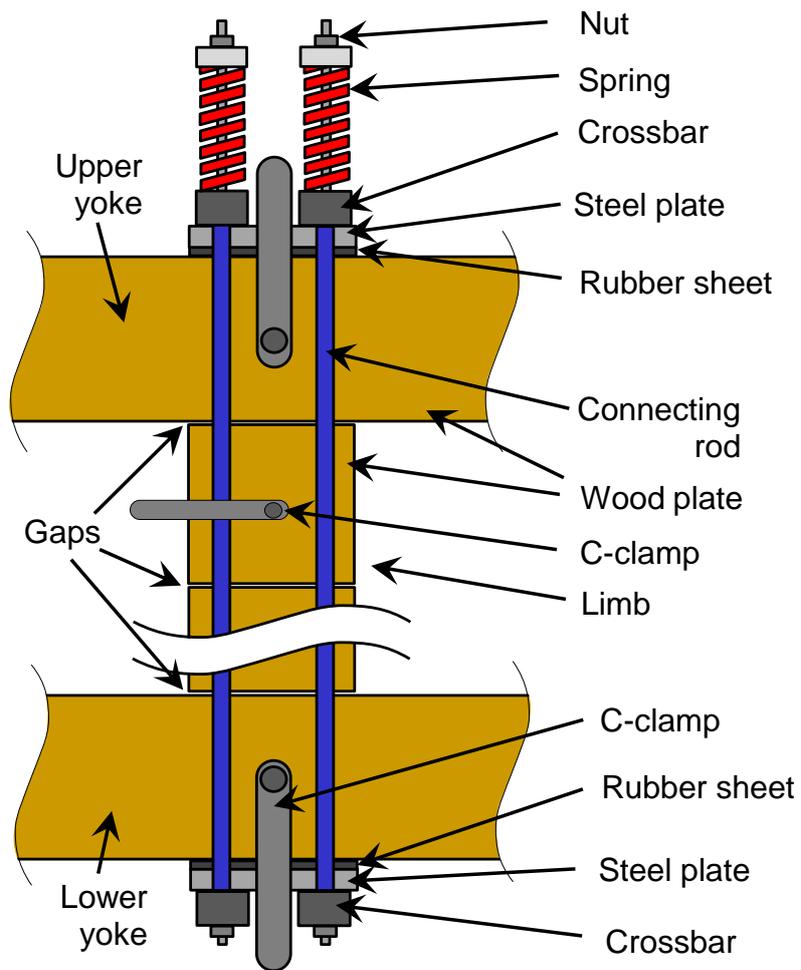


図 3.3 鉄心脚に圧縮応力を与える機構

にゴムシートと同サイズの鉄プレートを当てる。その後、それらにクロスバーを当てる。上下のクロスバーはロッドで連結され、スプリングを介してナットの締め付け力が与えられる。

圧縮応力の値はバネ定数とスプリングの変位から求めた。ナットは、脚に曲りが発生しない様に、注意深く締めた。騒音測定は圧縮応力なしの段階から始め、0.3MPa まで 0.05MPa 間隔で行った。最終測定は、ナットが緩められた状態、すなわち 0MPa で行った。

鉄心への締め付け圧力は木板を介して加えられるため、木板は鉄心に固定されることになる。そのため木板が圧縮応力の一定の部分を負担してしまう可能性があり、鉄心に実際にかかっている圧縮応力がスプリングで与える応力よりも小さくなる可能性があった。この誤差を避けるため、図 3.3 に示す様に小ギャップを締め付け位置の間の木板に設け、木板が圧縮応力を受けない様に工夫した。

3.2.3 騒音測定法と測定環境の検討

騒音測定法は 2.4 節での検討結果に基づいたものとした。すなわち図 2.7 で示す通り、8 本のマイクロホンを等間隔でモデル鉄心を囲む様に配置し、鉄心表面から 30cm 離れた、鉄心高の 1/2 の位置にセットした。図 3.2 に測定状況を示す。測定システムには 2.2 節で述べたものを用いた。自動化された測定手順においては、最初に暗騒音が測定され、それから消磁が行われ、その後、騒音が励磁周波数 50Hz、磁束密度 1.3, 1.5, 1.7T の条件で測定される。一連の騒音測定の後、圧縮応力を次の値に調整する。

測定は無響室で行われた。各々の圧縮応力の時に測定された平均 A 特性補正暗騒音の音圧レベル L_{bgA} の範囲は 15.8~16.0dBA で最大変動は 0.2dBA と小さく、安定した環境が得られている。鉄心励磁状態で測定された暗騒音無補正での平均 A 特性補正騒音音圧レベル L_{pA0} の最小値は

21.3dBA で、3dBA 以上を求められる L_{bgA} と L_{pA0} の差は 5.3dBA 以上となり、暗騒音補正を適用した A 特性補正音圧レベル L_{pA} が有効であることが証明された。しかし、暗騒音補正は i 次の高調波成分 L_{pAi} には適用しなかった。その理由は、図 3.4 に例示される様に暗騒音レベル L_{bgAi} と測定値 L_{pAi} の差が 12dB 以上と十分に大きかったためである。

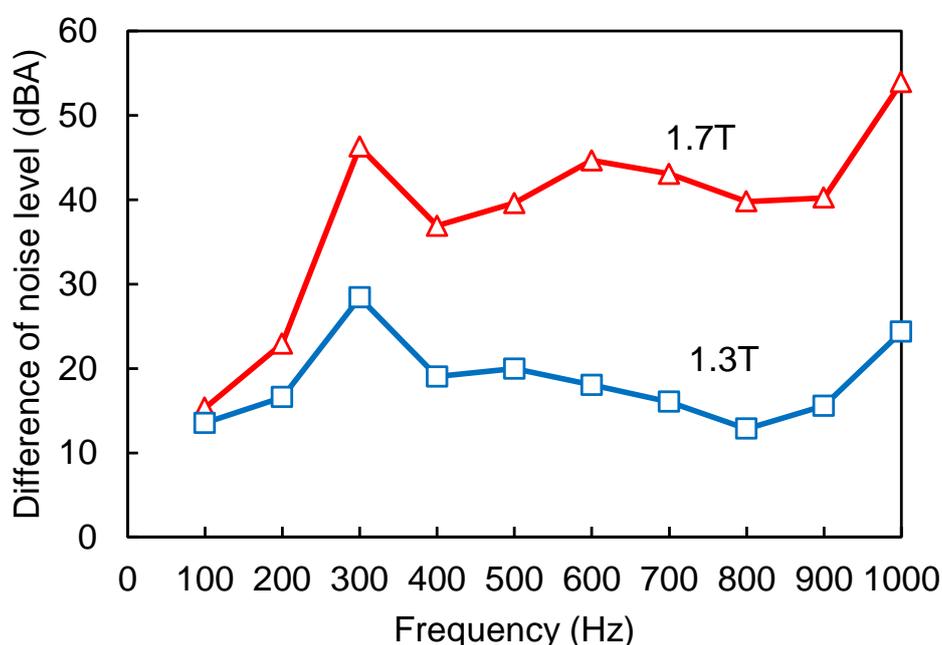


図 3.4 暗騒音に対する鉄心騒音の差（磁束密度 1.3T, 1.7T）

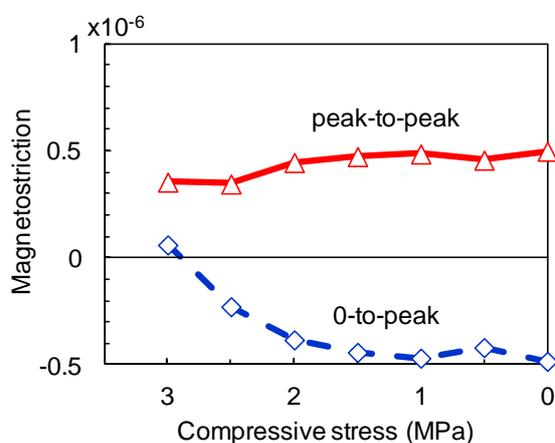
3.3 実験結果と考察

3.3.1 圧延方向への圧縮応力による磁歪変化

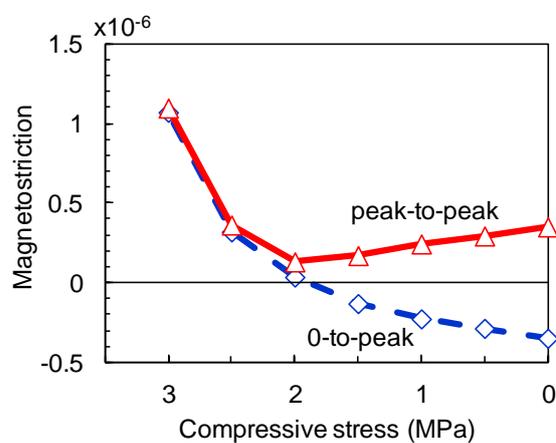
磁歪評価には 2 種類の鋼板グレードを用いた。その一つは 0.30mm 厚の HGO で、これは結晶方位集積度が高度化されており、高い透磁率を持つ。もう一方は 0.30mm 厚の CGO で、方位集積度が高くない従来品である。

CGO は変圧器鉄心に用いられた時に HGO よりも高い騒音を発生することが知られている [3.5]。磁歪評価では 2.7 節で説明した 0-to-peak 値と peak-to-peak 値を求めた。

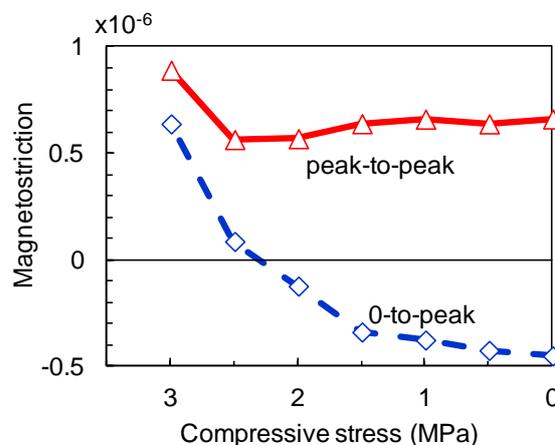
図 3.5 は圧縮応力を 0 から 3MPa まで変化させた時に測定された 0-to-peak 値と peak-to-peak 値である。0-to-peak 磁歪は HGO と CGO 共に低い応力では負値となるが、圧縮応力の増加と共に正方向に動き、高応力の領域では正值となる。peak-to-peak 磁歪については、HGO は 2.5MPa ま



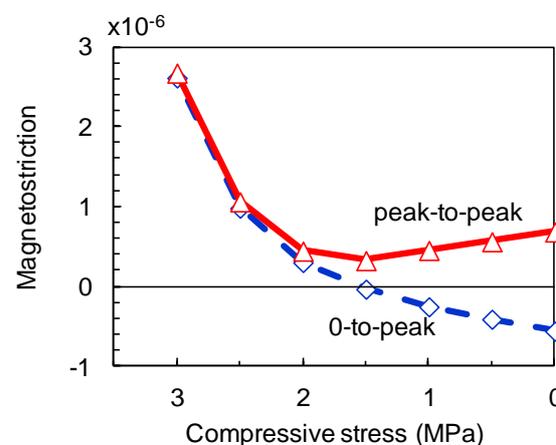
(a) サンプル HGO, 磁束密度 1.3T



(b) サンプル CGO, 磁束密度 1.3T



(c) サンプル HGO, 磁束密度 1.7T



(d) サンプル CGO, 磁束密度 1.7T

図 3.5 単板サンプルで測定された圧縮応力下での磁歪

で無変化かわずかに低下し、1.7Tのみ3MPaで増加する。CGOの磁歪は2または1.5MPaまで低下し、その後、上昇する。これらの図から、CGOの磁歪の応力感受性はHGOよりも高いことがわかる。HGOの1.7Tのpeak-to-peak磁歪曲線は2.5と3MPaの間を除いてほとんど平坦である。次節ではこの傾向をモデル鉄心騒音と比較する。

3.3.2 鉄心への圧縮応力による騒音変化

モデル鉄心の材料にはHGOを用い、磁歪サンプルを採取した同じ母材から準備された。図3.6は圧縮応力と騒音レベル L_{pA} の関係を示す。この図は、圧縮応力の増加が常に騒音レベルの上昇を引き起こすことを示す。更に、その関係は2.5MPaまでほぼ線形であるが、2.5MPaを越すと急上昇する。0～2.5MPaまでの範囲での線形回帰線から騒音増加率を計算し、表3.1に示す。増加率は約2dBA/MPaであった。なお、この増加率は本実験で用いられた圧縮方法のみで有効と考えられる。これは実際の鉄心での応力範囲は未

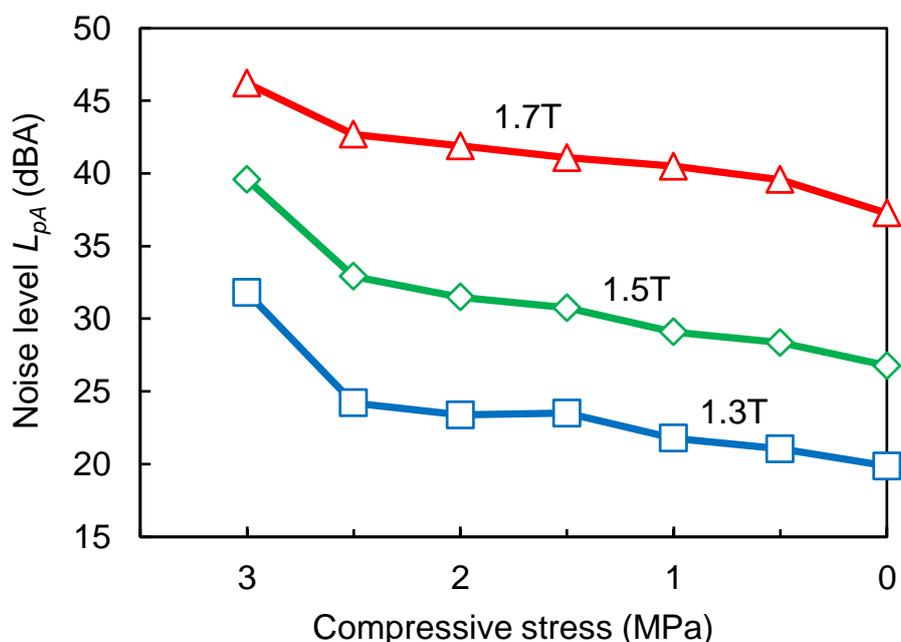


図 3.6 圧縮応力によるモデル鉄心の騒音レベルの変化

表 3.1 圧縮応力の増加による騒音レベル上昇率

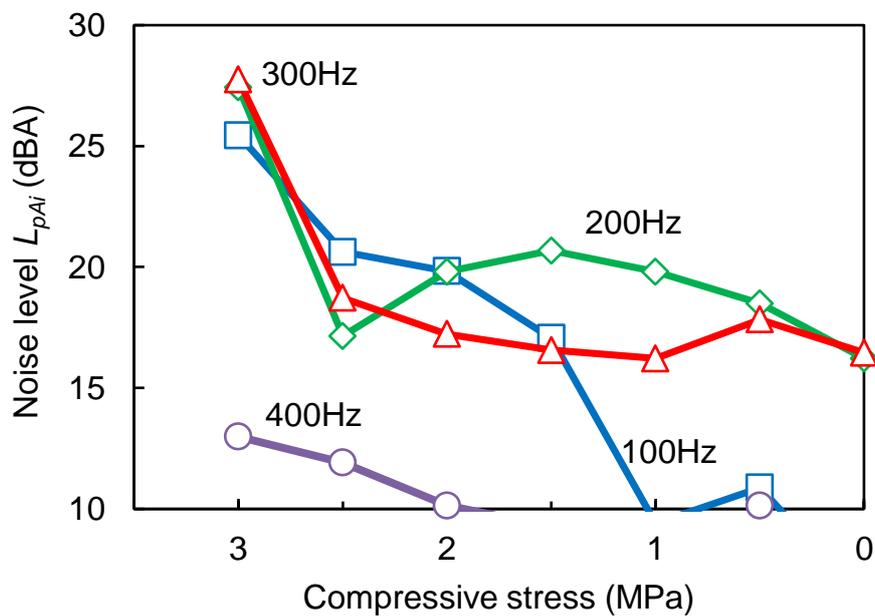
磁束密度 (T)	1.3	1.5	1.7
上昇率 (dBA/MPa)	1.74	2.39	1.98

知で、更に応力分布は複雑であると予想されるためである。実際の鉄心での応力を知るためには系統的で包括的な調査が必要で、そのような調査のみから騒音増加率の挙動を知ることができる。更に、磁歪の応力感受性は図 3.5 で示された様に材料の種類によって変わるので、その点でも一層の調査が必要である。

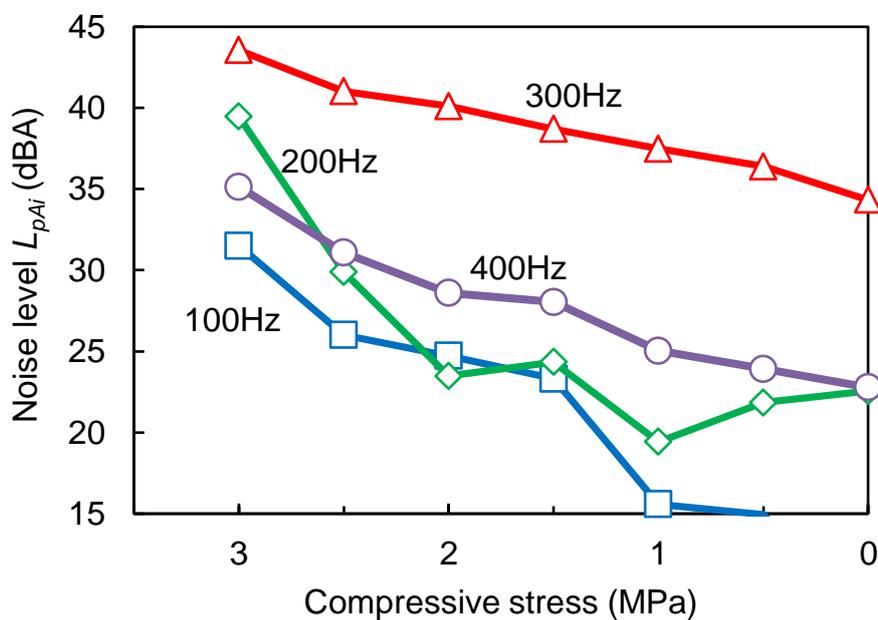
1.3 と 1.7T での騒音の周波数成分を図 3.7 に示す。主要高調波成分は 100～400Hz の範囲に現れたので、その範囲での成分を図示している。1.3T では、圧縮応力は基本的に高調波成分のレベルを増すが、しかしいくつかの例外がある。例えば、200Hz 成分は 2 と 2.5MPa で低下した。100Hz 成分の増加率は 2MPa 以下で顕著であった。また 100Hz 成分は 0MPa では他の成分に比べてほぼ無視可能であったが、2MPa 以上では重要成分の一つになる。図 3.6 で見られる 2.5 から 3MPa の間の L_{pA} の早い上昇は、100, 200, 300Hz の成分の上昇のためであることがわかる。

1.7T では、圧縮応力は基本的に高調波成分のレベルを増加させる。300Hz 成分はいずれの圧縮応力でも最も重要な成分で、その結果、 L_{pA} は 300Hz 成分に支配されていることがわかる。増加率の点では、200Hz 成分が 2MPa 以上で顕著であった。

3MPa 測定後、鉄心に力を加えていたナットが緩められ、圧縮応力なしで騒音測定が行われた。圧縮応力を加え始める前の段階と騒音比較すると差は 1dBA 未満で、圧縮応力の非可逆な影響はなかったと見なせる。



(a) 磁束密度 1.3T



(b) 磁束密度 1.7T

図 3.7 圧縮応力による騒音周波数成分の変化

3.3.3 圧縮応力による変化の観点での磁歪と騒音の関係

圧延方向の圧縮応力は磁歪と騒音の双方に影響を持つので、磁歪と騒音の相関性を応力による変化を利用して調査した。検討はまず図 3.5a と c の peak-to-peak 磁歪と図 3.6 の騒音レベルとの関係から実施した。HGO の磁歪は 1.7T で 3MPa の条件を除いて圧縮応力の増加に伴ってわずかに減少する。その挙動と比較すると、騒音は 1.3T と 1.7T 共に 0MPa から上昇する。すなわち、騒音の挙動は磁歪と対応しないことがわかるが、これは次の理由による。図 3.8 はいくつかの圧縮応力で測定された磁歪の周波数成分である。すべての条件において 100Hz 成分が最も高く、peak-to-peak 磁歪が 100Hz 成分に支配されていることが示されている。原理的に、ある周波数の振動は同じ周波数の騒音に変換される。そこで図 3.7 での騒音の 100Hz 成分を見ると、その成分は支配因子ではないことがわかる。言い換えると、図 3.6 の

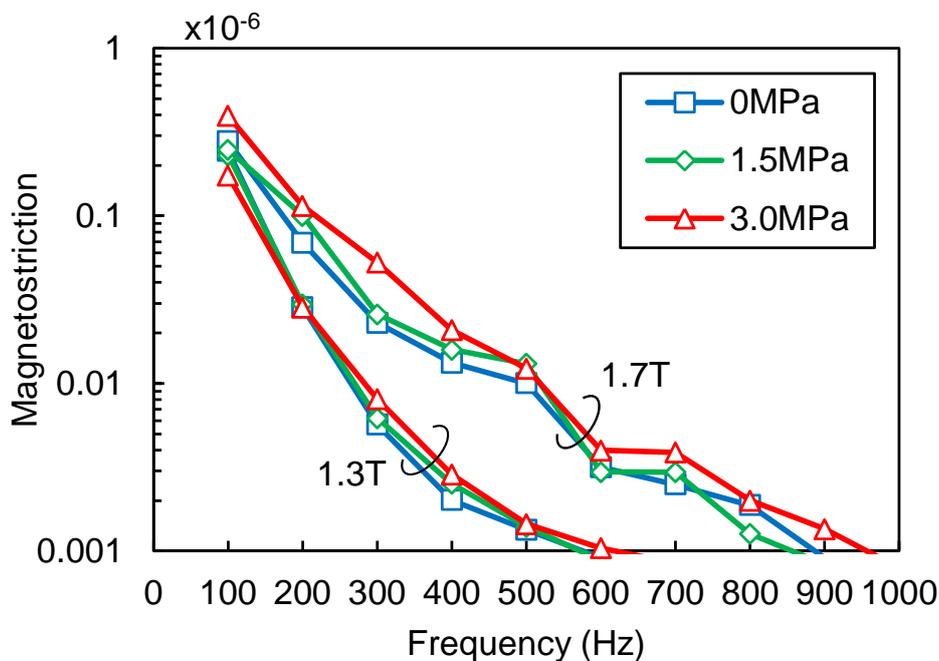


図 3.8 単板サンプルで測定された磁歪の周波数成分

騒音レベルのオーバーオール値は 100Hz 以外の成分が支配している。すなわち、磁歪と騒音それぞれでの支配成分の相違が peak-to-peak 磁歪と騒音との乖離を引き起こしていることがわかる。

磁歪と騒音との関係については、他の高調波成分も含めて更に詳細に検討する。そのために、磁歪を騒音に換算する方法について検討する。その方法として (2.9) 式の A_i に磁歪変位の i 次高調波の振幅を代入して得られる A 特性補正磁歪速度レベル L_{vA} を用いる^[2.25]。

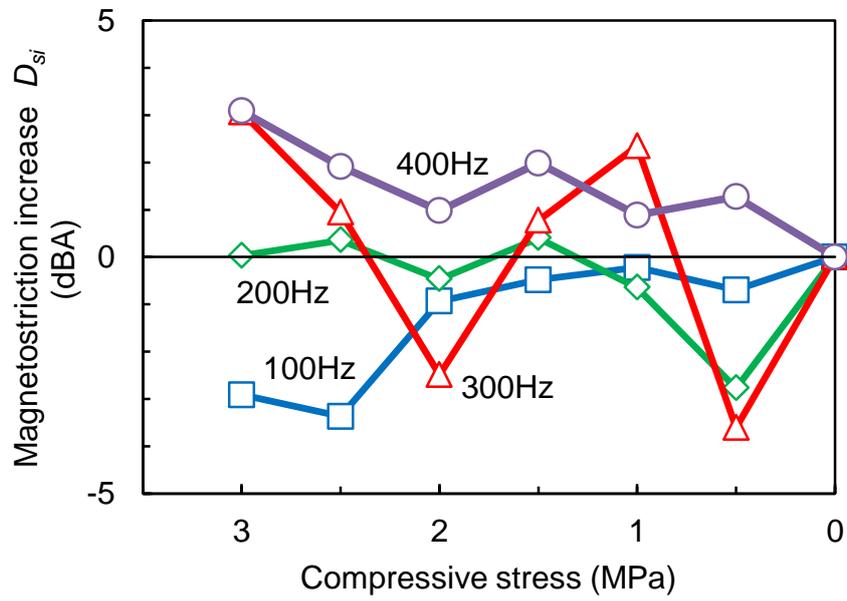
この検討では圧縮応力によって発生する磁歪の変化を議論するために、基準としての応力なしと、ある応力との間での L_{vA} の差を (2.9) 式に基づいて計算した。議論に際しては、図 3.8 に見られる様に、各々の高調波成分は独自の挙動を示すことに注意する必要がある。従って、磁歪と騒音の対応の調査は各々の高調波成分で行う必要がある。この考え方から次式を使用することとした。

$$D_{Si} = 20\log\lambda_{Si} - 20\log\lambda_{0i} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

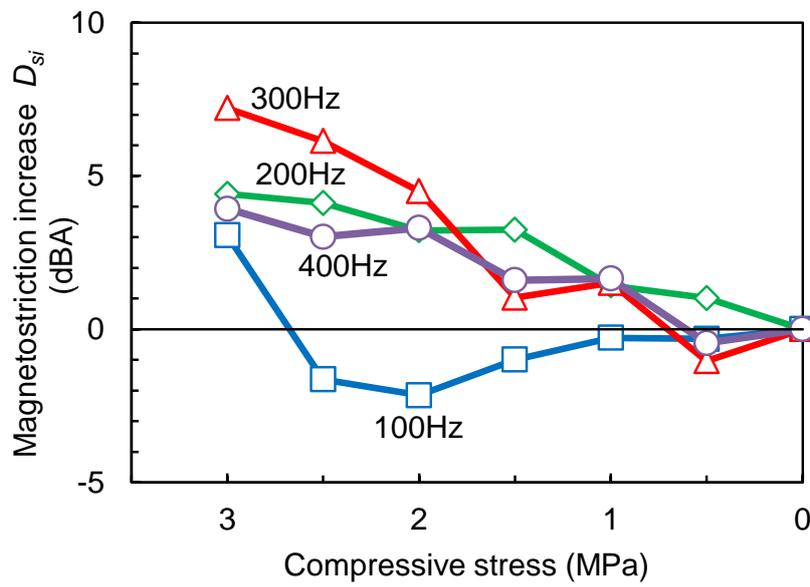
ここで、 D_{Si} は i 次高調波における 0MPa に対する S MPa の磁歪速度レベル L_{vA} の増加量(dBA)、 λ_{Si} は S MPa での i 次高調波の磁歪振幅、 λ_{0i} は 0MPa での i 次高調波の磁歪振幅である。

(3.1) 式での対数値に対する差分計算は、(2.9) 式の中の定数 ρ , c , P_0 と既知変数 f_i , a_i を消去する。また (2.9) 式を実用する際には音の拡散や鉄心から空気への音の伝搬効率係数などが考慮されなければならないが、それらも差分計算で消去される。

磁歪測定値を (3.1) 式に代入し、図 3.9 を 1.3, 1.7T で得た。検討は騒音の主要高調波であった 400Hz までの成分で行った。磁歪と騒音の対応性の調査として、圧縮応力の増加による磁歪の変化である図 3.9 を図 3.7 の騒



(a) 磁束密度 1.3T



(b) 磁束密度 1.7T

図 3.9 圧縮応力による単板サンプルの磁歪周波数成分の増加
(0MPa での値を基準とする)

音の変化と比較した。最初に 100Hz 成分について検討する。磁歪は圧縮応力の増加に伴って 2MPa または 2.5MPa まで減少するが、それらの応力以上では増加に転じる。この傾向は図 3.5a と c に示す HGO の peak-to-peak 磁歪と同様であるため、先に行った検討と同様に peak-to-peak 磁歪は磁歪 100Hz 成分に強く支配されていることが確認できる。一方、騒音の 100Hz 成分については 1.3T と 1.7T 共に 0MPa から上昇している。すなわち 100Hz 成分については騒音変化の傾向は磁歪に対応しないことがわかる。磁歪と騒音の間の同様の不一致は他の高調波成分でも見られ、それらの成分は 1.3T の 200Hz と 300Hz, 1.7T の 200Hz である。一方、1.3T の 400Hz 成分と 1.7T の 300Hz と 400Hz 成分については磁歪と騒音はいずれも圧縮応力の増加に伴ってほぼ単調増加しており、この点では磁歪と騒音は一致している。この磁歪と騒音の対応をより詳しく調査するため、単位が dB/MPa となる上昇率をそれらの成分について計算し、結果を表 3.2 に示す。この値は図 3.7 の磁歪と図 3.9 の騒音に対して線形回帰を適用して算出した。この結果から、1.7T での 300Hz 成分の上昇率のみ磁歪と騒音でほぼ等しいが、他の周波数成分では乖離していることがわかる。

以上で検討した磁歪と騒音の相関性は下記の様にまとめられる。いくつか

表 3.2 圧縮応力の増加による騒音と磁歪の高調波成分の上昇率

磁束密度 (T)	1.3	1.7	
高調波成分の周波数 (Hz)	400	300	400
騒音上昇率 (dBA/MPa)	2.32	2.82	3.92
磁歪上昇率 (dBA/MPa)	0.76	2.78	1.45
騒音上昇率と磁歪上昇率の差異 (dBA/MPa)	1.56	0.04	2.47

の高調波成分については、圧縮応力の増加による変化の傾向が磁歪と騒音で不一致となる。その他の成分については、単調増加傾向であることは一致するが、応力増加による増加率には磁歪と騒音の間で差があり、その上、その差は周波数成分毎にまちまちである。これらの事実から、圧縮応力の変化による磁歪の変化は騒音の変化とほとんど一致しないと結論付けられる。

これまでの知見からは磁歪と騒音は基本的には対応すると考えられるが、ここでは不一致となった。その原因は以下の様に考えられる。磁歪測定ではサンプルは圧延方向のみに、正弦波で励磁されるが、3相鉄心では回転磁束や磁束密度波形の歪、鉄心内での磁束分布が発生する。その磁化条件の相違が、おそらく磁歪と騒音特性の間の乖離を引き起こしていると考えられる [3.6]~[3.10]。加えて、実験では鉄心のヨークのいくつかの部分にも圧縮応力が加えられることになったが、それはヨークでは応力が直角方向に加えられたことを意味する。これも磁歪と騒音の実験に関する相違点である。また鉄心形状の面では、鉄心膨張の効果を考える必要がある。圧縮応力は鉄心の鋼板をわずかに曲げる可能性があるが、これは鉄心を膨張させて鋼板間に隙間を生じさせることとなる。隙間は鋼板間の電磁吸引力による振動を発生させるが、その振動は磁歪には関連性のない騒音を発生させることとなる。以上で述べた様に今回見られた磁歪と騒音の乖離には様々な理由が考えられるため、磁歪と騒音の関係を説明するためには、更に調査していくことが必要である。

3.3.4 鉄心変形の騒音への影響

圧縮応力によるモデル鉄心の大きな変形は3.3.2節で述べた実験では発生しなかった。しかし別の実験で圧縮応力を増していき、1.5MPaに到達した時に、図3.10に示す様な変形が脚に突然発生した。図からわかる様に、脚は鉄心に当てられた木板のギャップ位置で曲げられている。この変形が騒音

にどのように影響するかを知るために、圧縮応力の適用前、1.5MPaの応力で変形が発生した後、応力の解放後の3つの段階での騒音を測定して比較する。1.7Tでの測定結果を図3.11に示すが、その中には1.5MPaで変形のない状態での騒音レベルも加えている。

鉄心変形の発生によって10dBA以上の騒音レベル上昇が発生している。これは変形なしでの1.5MPaの圧縮応力による騒音上昇と比べても極めて高かった。測定後、圧縮応力は解放されたが変形はなお残っていた。そこでこの状態でも騒音を測定し、変形なしの0MPaの結果と比較した。その結果、たとえ圧縮応力を無くしても鉄心の変形していると騒音レベルが高いこ



図 3.10 圧縮応力によって変形した鉄心脚（側面から撮影）

とがわかった。1.5MPa と 0MPa それぞれの圧縮応力における、変形による高調波成分の増加を図 3.12 に示す。これらの図からわかる様に、騒音増加はほとんどの成分で発生している。

騒音レベルの極端な増加は、脚の曲りだけでなく鉄心全体で起きた変形によっても引き起こされたと推定される。曲りはおそらく鉄心全体の形状歪を引き起こし、その結果、鉄心接合部に隙間が生じた可能性がある。隙間は鋼板間の電磁吸引力による鋼板振動を発生させる。この振動で隣接する鋼板同士の衝突が発生し、衝撃音が発生する。この衝撃音は多量の高調波を含むため、図 3.12 で示される様に、より高い周波数の高調波成分も増加したと考えられる。これに加え、変形による応力が鉄心内に伝搬して広い領域に発生した可能性があり、それで磁歪が増加して騒音も増加したとも考えられる。なお実験の後、鉄心は解体され再積層された。その結果、騒音レベルは元の値に回復したので塑性歪は鋼板に導入されていなかったことが証明された。

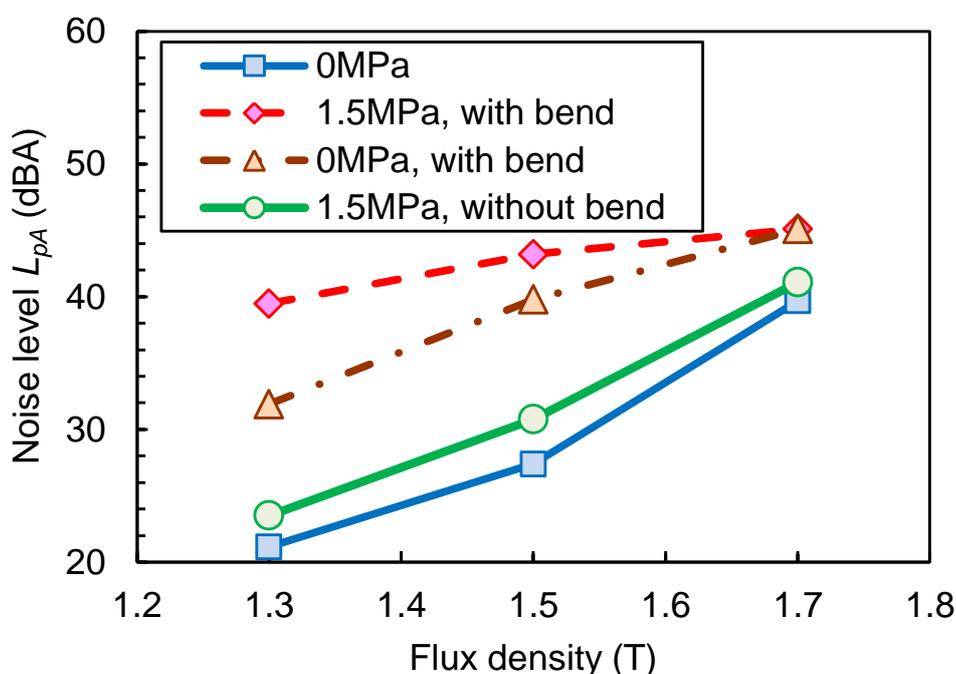
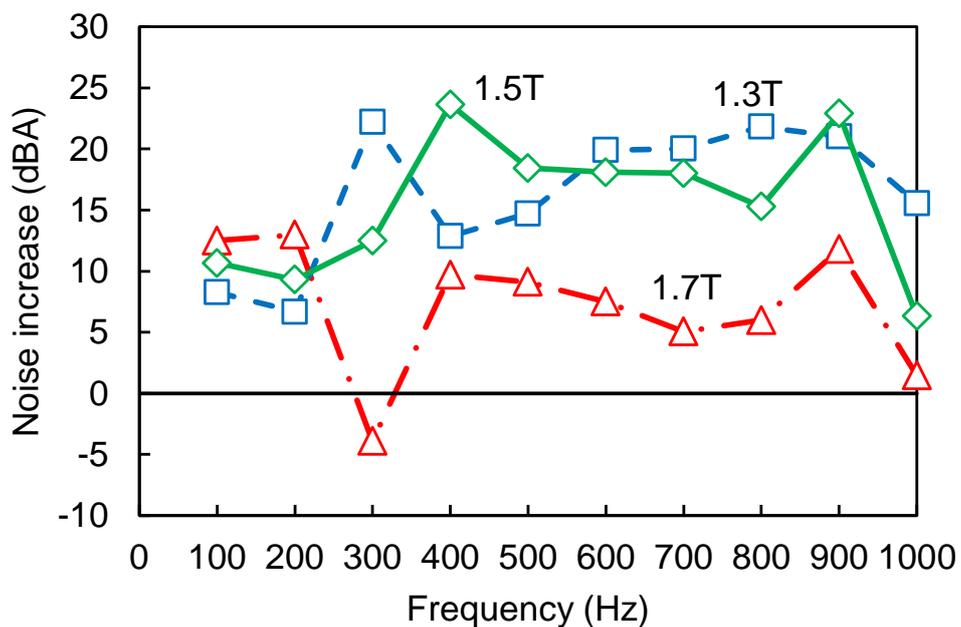
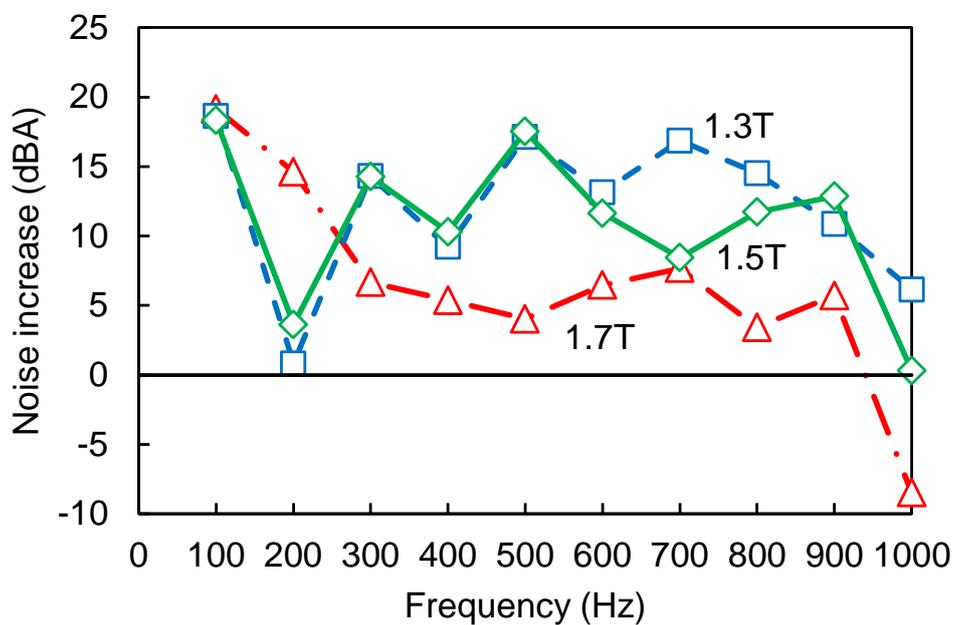


図 3.11 鉄心変形による騒音変化（圧縮応力有と無で測定）



(a) 圧縮応力 1.5MPa



(b) 圧縮応力解放後

図 3.12 鉄心変形による騒音周波数成分の増加
(変形がない状態での値を基準とする)

3.4 結言

3相3脚モデル鉄心の騒音レベルを電磁鋼板の圧延方向への圧縮応力を加えた状態で測定した。またその結果を、同様に圧延方向に圧縮応力を加えて測定した磁歪と対応させて検討した。以下がその結論である。

- (1) 応力は常に騒音レベルを上昇させる。本検討で用いたモデル鉄心での騒音増加率は約 2dBA/MPa であった。
- (2) 騒音周波数成分の応力への依存性を調査した。1.3T では、ほとんどの成分が応力増加に伴って上昇し、1.7T では全ての成分が増加した。
- (3) 磁歪と騒音の関係を応力によって引き起こされる変化の観点から議論した。Peak-to-peak 磁歪の変化は騒音変化と対応しないが、これは磁歪では支配的である 100Hz 成分が騒音では重要ではないためである。更に 100Hz 成分の応力への依存性についても、磁歪と騒音の間に傾向の相違がある。他の高調波成分については、応力に対する挙動が磁歪と騒音で相似する成分もあるが、dB/MPa で表される増加率の関係は一定とまらない。このことから、応力による磁歪変化は騒音変化にほとんど対応しないと結論付けられる。
- (4) 応力によって引き起こされた鉄心の変形は 10dBA 以上の騒音増加を生させた。この増加はほとんどの周波数成分に現れた。

参考文献

- [3.1] W.R. George, C. Holt, and J.E. Thompson, "Magnetostriction in grain-oriented silicon-iron", Proceedings of IEE – Part A, Vol.109, pp.101-108 (1962).
- [3.2] P.I. Anderson, A.J. Moses, and H.J. Stanbury, "Assessment of the stress sensitivity of magnetostriction in grain-oriented silicon steel", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.43, No.8, pp.3467-3476

(2007).

- [3.3] A.A. Abdul Qader and A. Basak, “Building factor of a 100KVA 3 phase distribution transformer core”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.18, No.6, pp. 1487-1489 (1982).
- [3.4] M. Mizokami and Y. Kurosaki, “Noise variation by compressive stress on the model core of power transformers”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.381, pp.208-214, In press (2015).
- [3.5] M. Mizokami, K. Nishiwaki, S. Arai, and Y. Kurosaki, “Nippon Steel’s high-performance grain-oriented electrical steel improving properties of transformer core”, Proceedings of eighth international conference on transformers, TRAFOTECH-2010, Session 3, Paper 4 (2010).
- [3.6] C. Krell, N. Baumgartinger, G. Krismanic, E. Leiss, and H. Pfützner, “Relevance of multidirectional magnetostriction for the noise generation of transformer cores”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.215-216, pp. 634-636 (2000).
- [3.7] H. Mogi, M. Yabumoto, M. Mizokami, and Y. Okazaki, “Harmonic analysis of ac magnetostriction measurements under non-sinusoidal excitation”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.32, No. 5, pp.4911-4913 (1996).
- [3.8] 新谷, 斉藤:「磁束波形が磁歪特性および変圧器鉄心の騒音に与える影響」, 電気学会論文誌 D, Vol.126, No.12, pp.1623-1628 (2006)
- [3.9] P. Anderson, “Measurement of the stress sensitivity of magnetostriction in electrical steels under distorted waveform conditions”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials,

Vol.320, pp.583-588 (2008).

- [3.10] S.G. Ghalamestani, L. Vandeveldel, J.J.J. Dirckx, and J.A.A. Melkebeek, “Magnetostriction and the influence of higher harmonics in the magnetic field”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.48, No.11, pp.3981-3984 (2012).

第4章 鉄心締め付け圧力の変更による共振振動の発生と騒音への影響

4.1 緒言

変圧器の鉄心は電磁鋼板が積層された構造をとり、これを自立状態で使用するため、鉄心に形状保持が可能な機械的強度を持たせる必要がある。そのために鉄心外部から鋼板に面圧を与えて鋼板間の摩擦力で剛性を得ている。この面圧は鉄心の締め付けで発生させるが、一般的に積鉄心では脚部はテープによるバインド、ヨーク部はプレートのボルト締めによる加圧で与えられる。この締め付け圧力を変更すると騒音が変化することが知られている[4.1][4.2]。その原因として様々な現象が考えられるが、一因として鉄心全体の剛性変化による共振周波数の変化が挙げられる。面圧の変化は摩擦力の変化を引き起こすが、これは鋼板の積層体では曲げ変形時の弾性係数の変化となって現れるため、共振周波数が変化すると予想される。ある締め付け圧力の時に共振周波数が励磁周波数の2倍あるいはその整数倍に接近した場合、磁歪などが加振力となって大振幅の振動が発生し、騒音が増加することが考えられる。変圧器鉄心の共振現象についてはこれまでに様々な検討がなされている[1.9][4.3]~[4.5]。

本章の検討[4.6]においてはまず、モデル鉄心の締め付け圧力を変更しながら鉄心前面の振動測定を行った。その結果、共振周波数の変化によると見られる振動増加現象が発生したため、騒音測定結果も合わせて検討を行った。また、鉄心の振動測定結果を騒音に換算して実測騒音との対応を調査した。

4.2 実験手法

4.2.1 モデル鉄心の仕様と構造

鉄心は2.3節で述べた縦置き法の3相3脚積鉄心としたが、積層厚は鋼板の幅と同じ150mmとし、脚とヨークともに正方形断面とした。写真を図4.1に示す。同時積み枚数は2とし、T接合部はマイター型で、ステップラ

ップ法は用いていない。素材としては、0.23mm 厚の方向性電磁鋼板 (HI-B) を用いた。

鉄心の締め付け方法については 2.3 節の方法と異なり、ヨークについてはステンレス板 (SUS304, 10mm 厚) を全面に当て、板長手方向の 3 箇所を C 型クランプで締め付けている。このクランプとステンレス板との間には直読式の荷重計を入れ、締め付け圧力を任意に設定できるようにしている。また、ステンレス板両端部にはボルトを設置し、コイルスプリングを介して締め付け圧力を与える様にしている。締め付け圧力はそのスプリングのたわみ量で設定する。脚についてはステンレス板 (SUS304, 30mm 幅×200mm 長×10mm 厚) の両端にボルトを通したもので 1 脚あたり 5 箇所締め付けた。締め付け圧力の設定にはヨークと同様にスプリングのたわみ量を用いた。巻線は、励磁用と磁束密度測定用を各相にそれぞれ 14 ターンずつ設置した。

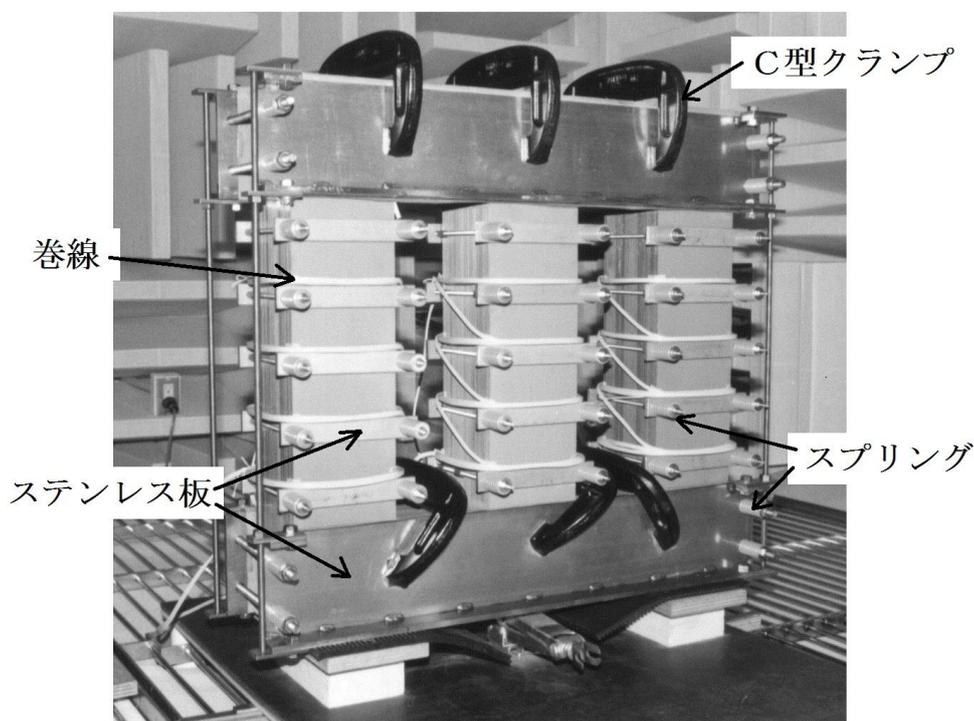


図 4.1 モデル鉄心の外観図

4.2.2 振動・騒音の測定手法と実験方法

振動測定には、2.6 節で述べたレーザー振動計を利用するシステムを用いた^[2.17]。今回の振動測定は鉄心の正面とその裏面上で実施し、1 面あたり 732 個の測定点を設定した。

騒音測定法は 2.4 節での検討結果に基づいたものとした。すなわち図 2.7 で示す通り、8 本のマイクロホンを等間隔でモデル鉄心を囲む様に配置し、鉄心表面から 30cm 離れた、鉄心高の 1/2 の位置にセットした。測定システムは 2.2 節で述べたものを用いた。

鉄心締め付け圧力は、0.05MPa から 0.3MPa まで 0.05MPa おきに変化させた。励磁条件については、磁束密度は 1.3, 1.5, 1.7, 1.8T, 周波数は 50Hz とした。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 締め付け圧力の変更による振動の変化

鉄心正面と裏面の全測定点の振動変位（peak-to-peak 値）の平均値を算出して、鉄心締め付け圧力との関係をグラフ化したものを図 4.2 に示す。この図から、平均振動変位は 0.2MPa 付近でピークを持ち、他の圧力の 2 倍以上に達することがわかる。

次に、磁束密度 1.7T での鉄心前面上の各測定点の振動変位（peak-to-peak 値）を図 4.3 に示す。締め付け圧力 0.05MPa と 0.1MPa では、明瞭な振動パターンは見られない。0.15MPa では、鉄心脚部がヨーク部に比べて高くなる傾向が現れる。0.2MPa では明瞭な振動パターンが現れ、左脚の下部、中央脚の中央部、右脚の上部に強い振動（腹）が現れる。一方、上ヨークの右側と下ヨークの左側には振動の弱い部分（節）が現れる。節は、左脚の上部、右脚の下部にも現れる。0.25MPa では 0.2MPa ほど明瞭ではないが、一定の傾向が現れ、左脚の上部、中央脚の中央部、右脚の下部に腹が現れる。

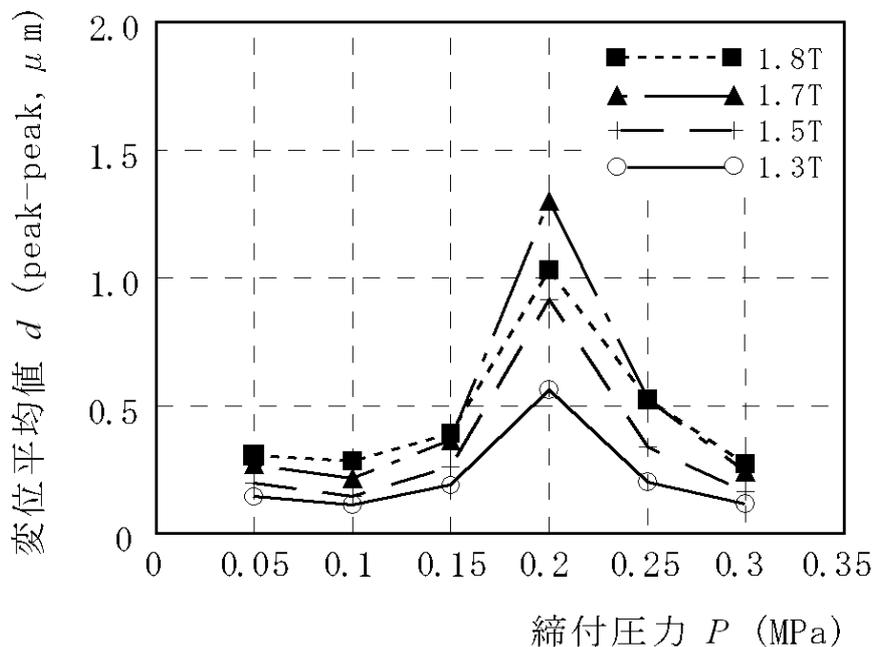


図 4.2 鉄心締め付け圧力と平均振動変位の関係

この左右の脚の腹の位置関係は、0.2MPa に対して逆転している。0.3MPa では、更に傾向は弱まるが、脚部がヨーク部よりも高くなっている。

以上の振動変位強度分布を参考にして、鉄心の局所の振動変位波形を調査した。まず、0.05 と 0.1MPa では各脚の中央の波形を調査し、その結果を図 4.4 に示す。両条件共に波形は大きく歪んでいる。また、両条件で波形①②③の間に特定の関係は見られない。すなわち、各脚はそれぞれ独自の振動をしていることがわかる。

次に 0.2MPa 条件での振動変位波形を図 4.5 に示す。調査位置は各脚の振動の腹の部分と上ヨークの左、下ヨークの右とした。これらの波形は正弦波に近く、その周波数は励磁周波数の 2 倍の 100Hz となっている。また、左右の脚の振動位相はほぼ同相となっており、中央脚がそれに対してほぼ逆相となっていることがわかる。一方、ヨーク上の 2 箇所調査位置の波形は

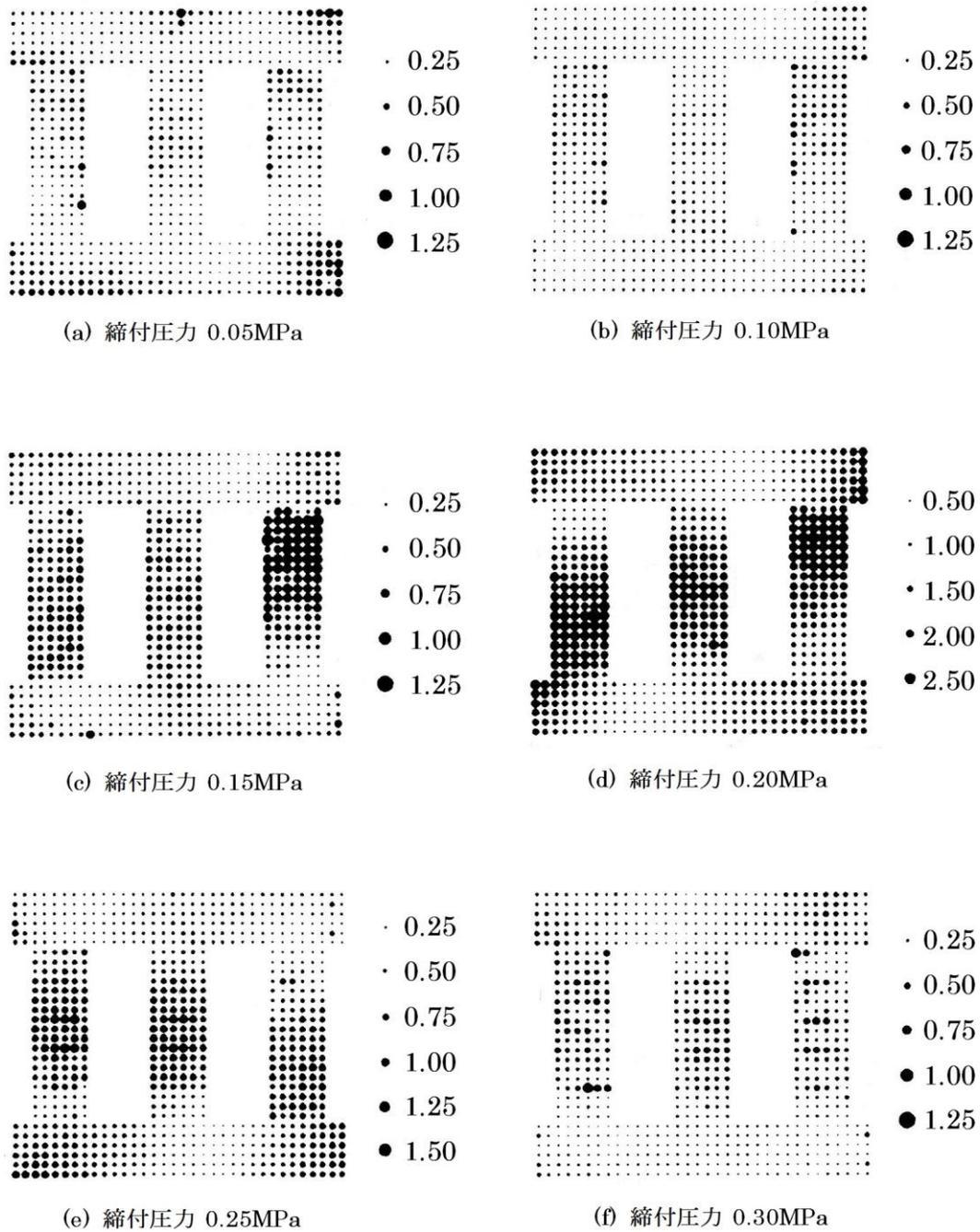
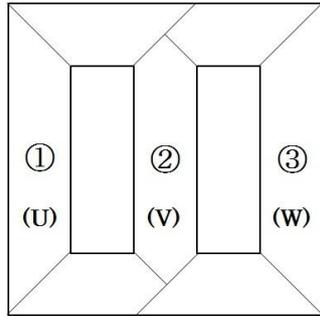
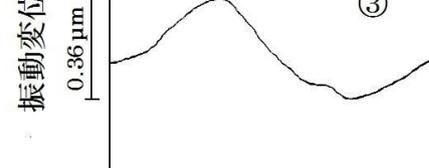
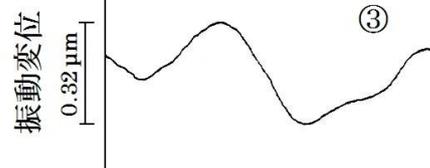
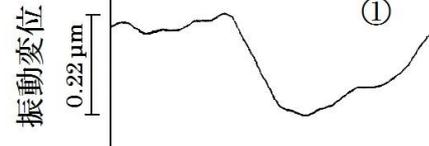
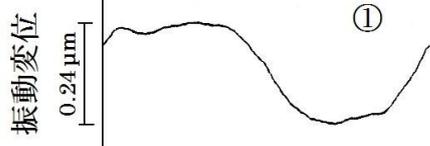
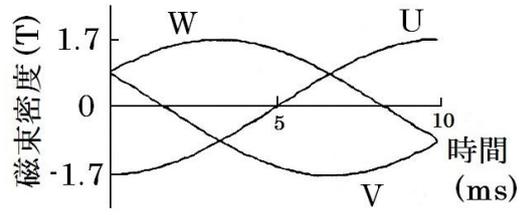
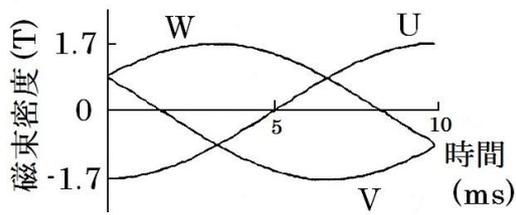


図 4.3 振動変位強度分布 (磁束密度 1.7T, peak-to-peak 値, 単位 μm)

[円の直径がその位置の振動変位に比例]



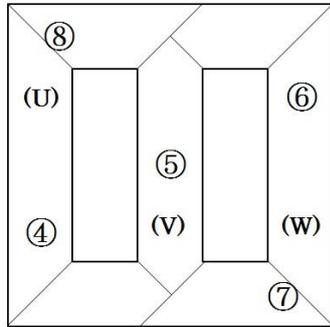
①～③ 振動波形観測点



(a) 締付圧力 0.05MPa

(b) 締付圧力 0.10MPa

図 4.4 振動変位波形



④～⑧ 振動波形観測点

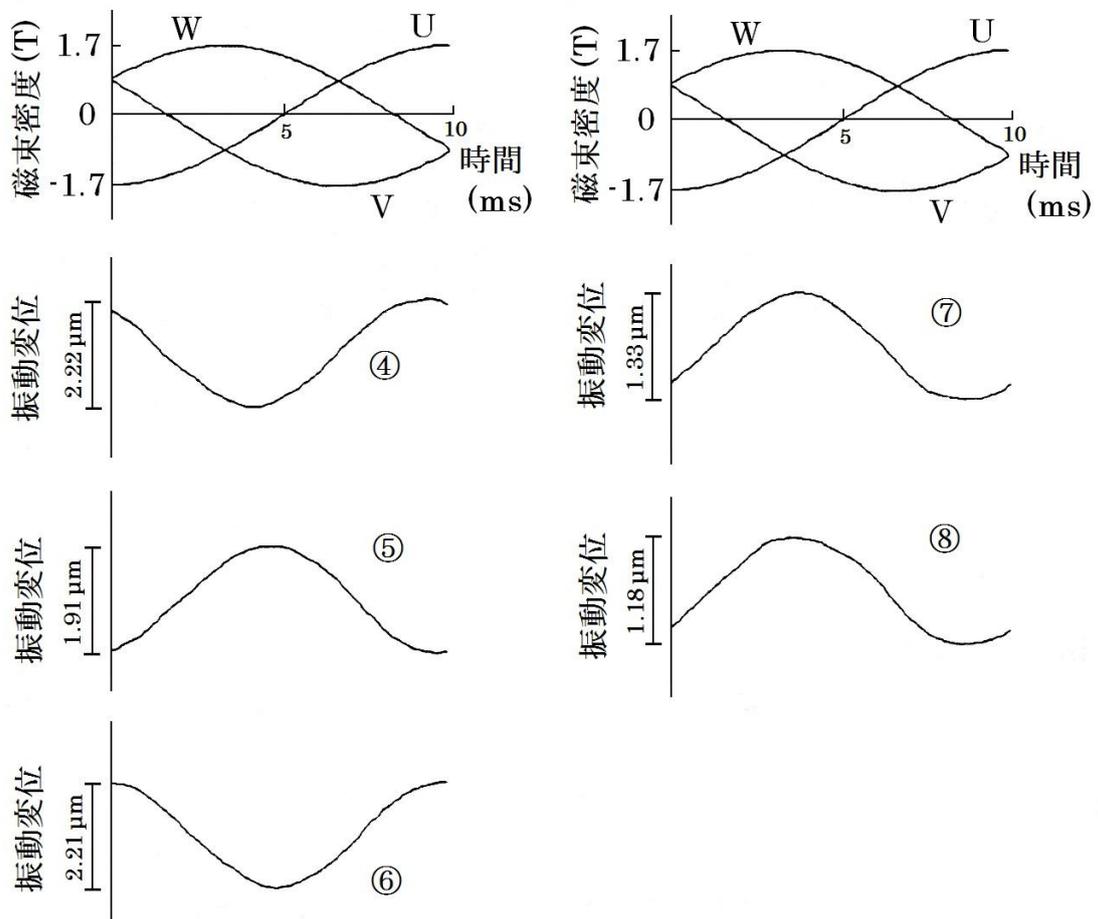


図 4.5 振動変位波形 (締め付け圧力 0.2MPa)

ほとんど同位相で、中央脚の波形の位相に近いことがわかる。更に、鉄心の裏面でそれぞれ対応する位置の波形も調査したが、すべて表面の逆相となっており、鉄心の振動は体積変化ではなく一体となって前後に振動していることがわかった。

以上の結果から、0.2MPa 条件では鉄心全体で 100Hz の明確な共振振動が発生していることがわかる。この共振振動の節は左脚の上部と右脚の下部、および上ヨークの右部分と下ヨークの左部分に位置しており、これらの位置を中心として振動の位相が反転している。また、両側の脚の振動振幅に対して中央脚の振動振幅は若干低くなっているが、これは、中央脚と同位相で振動する部分の体積の方が逆相で振動する部分よりも大きいためと考えられる。

次に 0.3MPa での波形を図 4.6 に示す。調査位置は図 4.4 と同様に各脚の中央とした。これらの波形の位相関係は、0.2MPa での波形と同様に中央脚に対して両側の脚で逆相となっていることがわかり、この振動も共振振動と考えられる。0.3MPa の締め付け条件は、以前の報告^[4.7]で用いた条件と同じであるが、結果も同等となっている。

全測定点の振動変位波形を周波数分析して平均を求めた結果を図 4.7 に示す。ここには、共振の発生していない 0.05MPa と最大の共振が発生している 0.2MPa の 2 つの条件の結果を示した。0.2MPa の締め付け条件では、100Hz 成分が他の成分や 0.05MPa の各成分と比べて圧倒的に大きく、共振振動が鉄心の振動を支配していることがわかる。

以上の結果から下記の現象が推測される。鉄心は締め付け圧力の増加と共に剛性が高まり、共振周波数が変化していくと共に共振を起こしやすくなる。今回用いた鉄心では 0.2MPa で共振周波数が 100Hz 付近となり、強い共振振動を起こしたと考えられる。

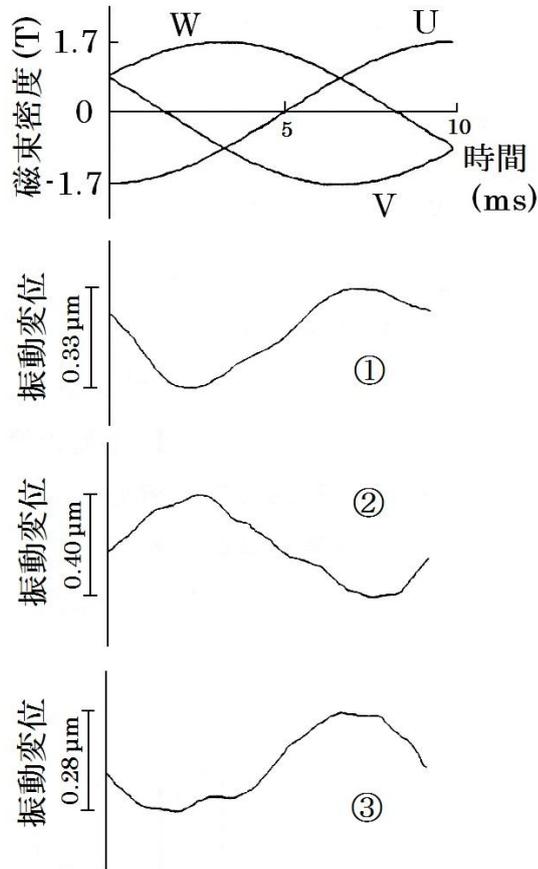


図 4.6 振動変位波形 (締め付け圧力 0.3MPa)

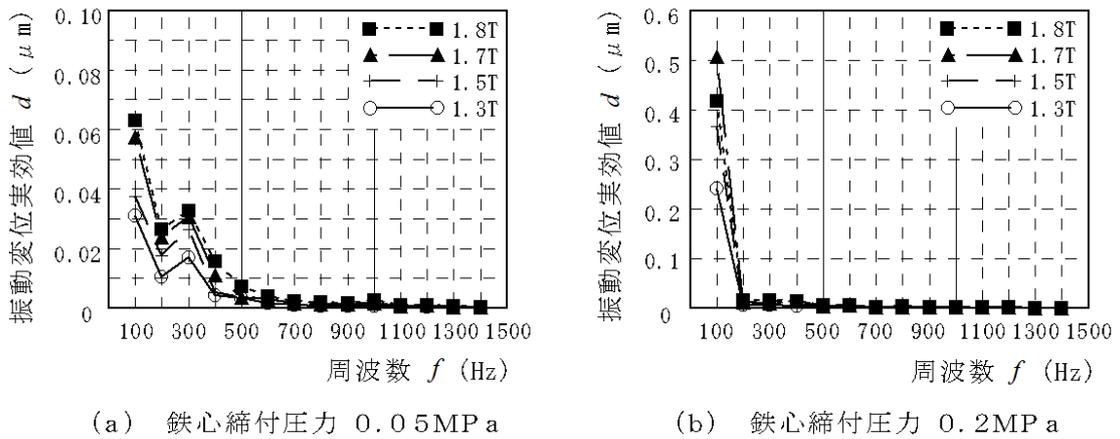


図 4.7 平均振動変位の周波数分析結果

4.3.2 共振による振動増加の騒音への影響

騒音レベルの締め付け圧力変化に伴う変化を図 4.8 に示す。ここでは、振動変位の時に見られた 0.2MPa でのピークは見られない。また、騒音の締め付け圧力に対する依存性はほとんど見られない。この騒音を周波数分析した結果を図 4.9 に示す。主要な周波数成分は 300-1200Hz の範囲内にあり、100Hz 成分はそれらよりも 10dB 以上低い。これは、騒音測定には A 特性を用いた聴感補正がなされており、低周波は低感度になっているためである。従って、今回の様に 100Hz で共振が生じ、強い振動が発生していてもそれは音としてはあまり感じられない結果となる。

100Hz の周波数成分の締め付け圧力依存性を図 4.10(a)に示す。このグラフには 0.2MPa にピークが現れており、振動変位で見られた特徴がそのまま現れている。従って、特定の周波数で見れば、騒音と振動は対応していることがわかる。

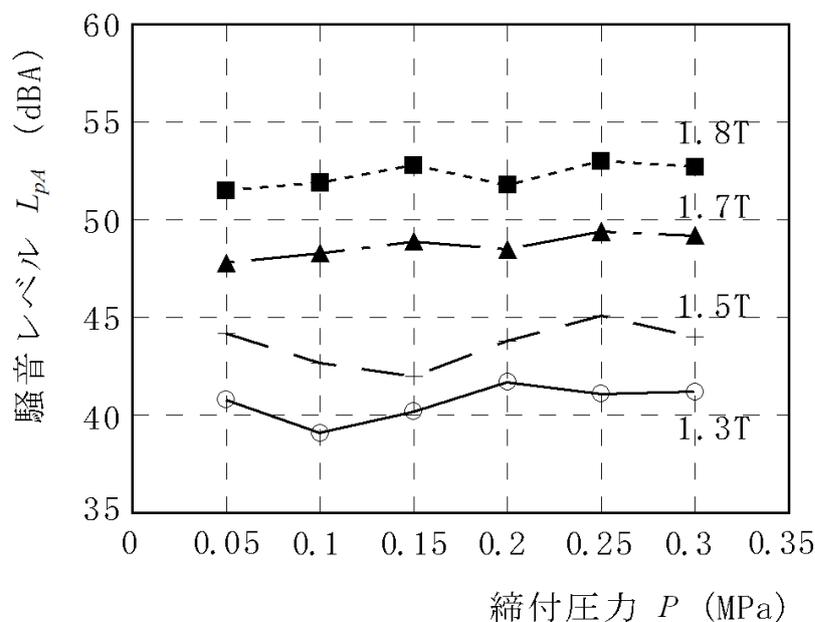
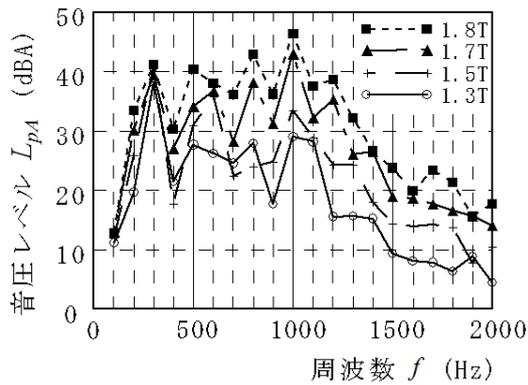
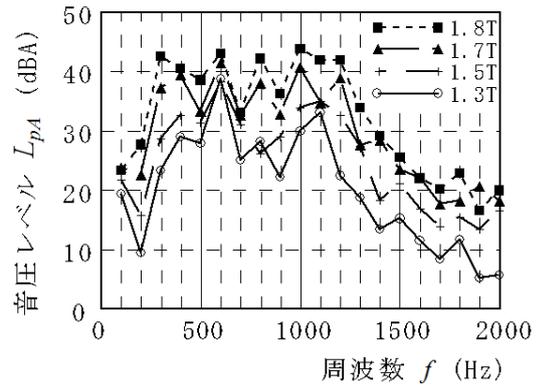


図 4.8 鉄心締め付け圧力と騒音レベルの関係

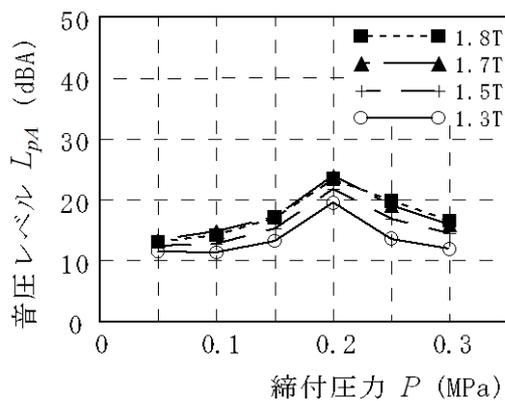


(a) 鉄心締め付け圧力 0.05MPa

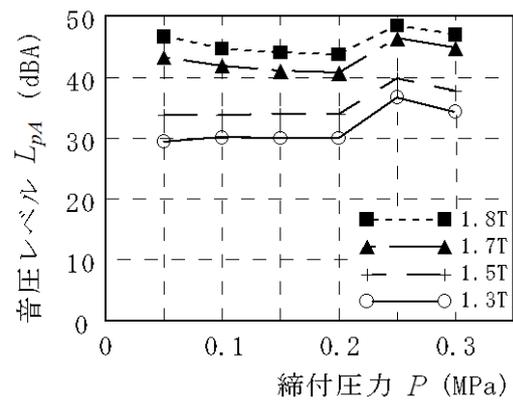


(b) 鉄心締め付け圧力 0.2MPa

図 4.9 騒音の周波数分析結果



(a) 100 Hz 成分



(b) 1000 Hz 成分

図 4.10 騒音の周波数成分と締め付け圧力との関係

一方、その他の周波数成分にはこのようなピークは見られない。例として図 4.10(b)に 1000Hz 成分のグラフを示すが、締め付け圧力に対する明確な傾向は見られない。従って、図 4.8 に示した騒音レベルが締め付け圧力によって変化しないのは、騒音が 200Hz 以上の周波数成分によって支配されているためと確認できる。

4.3.3 振動の騒音への換算法の検討

騒音は発音源の振動に直接対応すると考えられるので、鉄心の振動測定結果を騒音に換算する方法を検討した。すなわち、(2.9) 式の A_i に今回測定した振動の周波数成分の振幅を代入して騒音に換算する。この方法を用いて各締め付け圧力条件で振動を騒音に換算した結果を図 4.11 に示す。実測データである図 4.8 と比較すると、推定値の方が 10dBA 程度高くなっている。この原因は、次のように考えられる。騒音の実測は鉄心から 30cm 離れた位置で行っており、しかも鉄心には開口部（窓）があるため、音の発散によってエネルギー密度が減少する。しかし、今回用いた計算式は鉄心のごく近傍の音圧を計算するもので、発散は考慮されていない。換算法をより高精度化するためには音場解析まで行う必要があると考えられる。

実測データと換算値との相違点として、図 4.11 で 0.2MPa に弱いピークが見られることも挙げられる。これは 100Hz 成分の影響と思われるが、検証のために換算騒音レベルの周波数分析を行い、その結果を図 4.12 に示す。

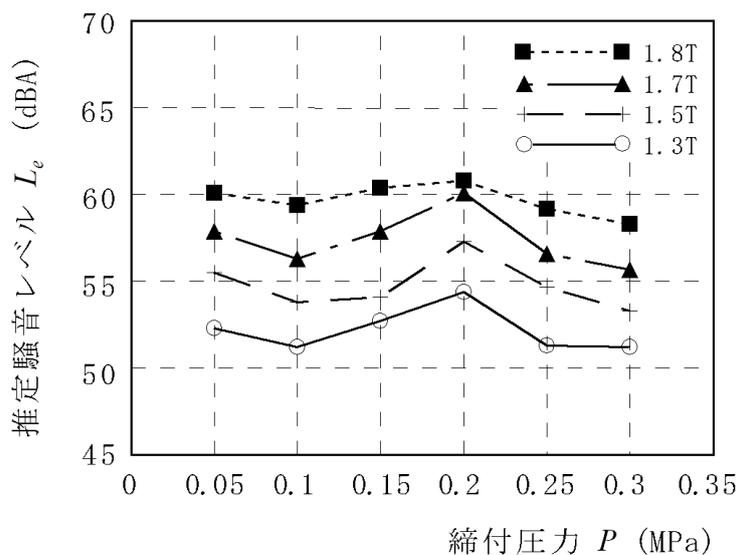


図 4.11 鉄心締め付け圧力と推定騒音レベルの関係

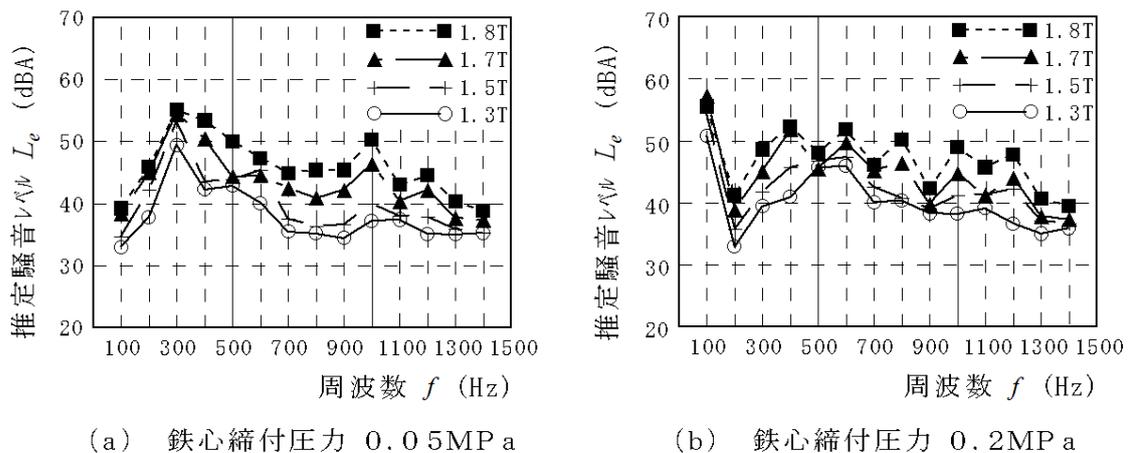


図 4.12 推定騒音レベルの周波数分析結果

これを実測データの図 4.9 と比較すると、300Hz 以上の成分に対して 100Hz 成分を高く見積りすぎていることが認められる。特に 0.2MPa でこの傾向が強い。この原因として、低周波音の回折と干渉が考えられる。鉄心の振動測定結果から、0.2MPa での 100Hz の振動は中央脚と両側脚が互いに逆位相となる振動であることが判明している。また、鉄心の表面と裏面とは同方向に振動し、逆位相の音を発生させていることもわかっている。一般的に音波は周波数が低下するほど指向性が弱まり回折が発生しやすくなる。このため鉄心表面で発生した 100Hz の音は隣接する脚や鉄心裏面にまで伝搬する。100Hz 音波は波長が約 3.4m と長いため、逆位相となる 2 つの音波は干渉現象によって互いに打ち消しあう結果となる。換算法はこの干渉現象を考慮していないため、100Hz 成分は実測値よりも高くなると推測される。この場合も、より高確度の推定を行うためには鉄心周辺の音場解析が必要と考えられる。

次に、振動データから騒音を評価する方法としてしばしば用いられる加速度レベルについて検討する。ここでは、鉄心表裏の全測定点の振動加速度平均値を算出し、基準加速度 10^{-3}m/sec^2 を用いて dB 化して加速度レベルを得

た。この加速度レベルの鉄心締め付け圧力依存性を図 4.13 に示す。この結果の傾向は図 4.11 の音圧への換算結果とほとんど同じで、0.2MPa で弱いピークが見られ、実測騒音レベルとの相違が見られる。

加速度レベルの周波数分析結果は図 4.14 に示す。この結果は先の音圧へ

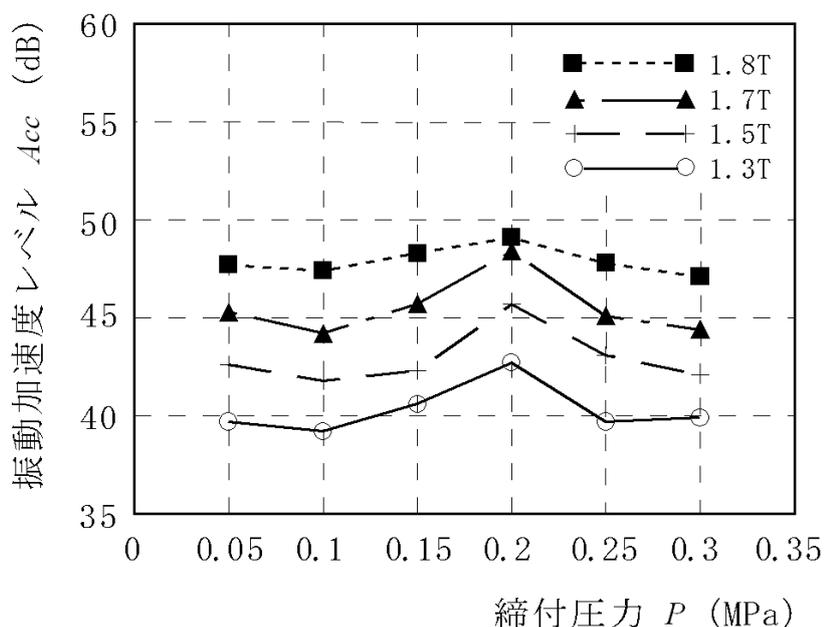


図 4.13 鉄心締め付け圧力と振動加速度レベルの関係

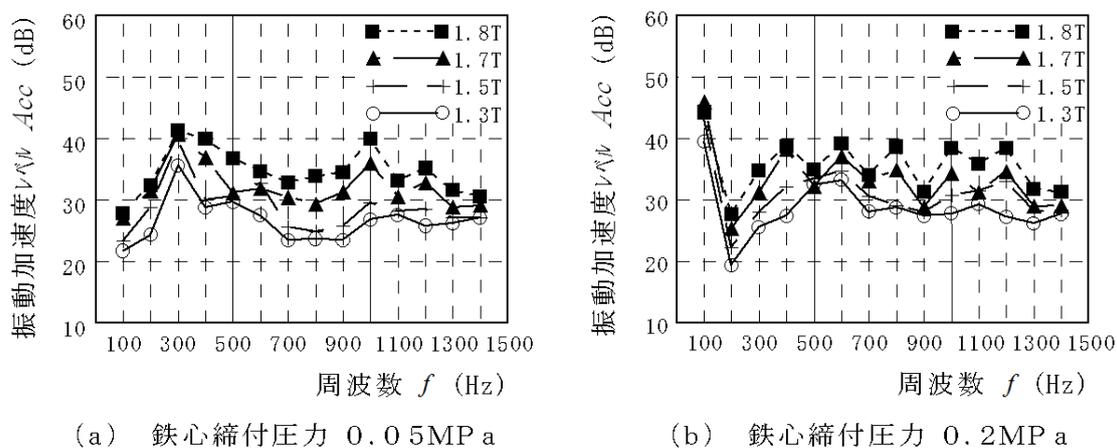


図 4.14 振動加速度レベルの周波数分析結果

の換算法と同様で、100Hz 成分が 300Hz 以上の成分に対して過大であり、加速度レベルを用いる騒音評価法も同様の問題を持つことがわかる。

4.4 結言

今回の実験では、3相モデル鉄心の締め付け圧力を 0.05MPa から 0.3MPa まで変化させて、その振動と騒音を測定した。その結果、下記の知見を得た。

- (1) 鉄心は締め付け圧力の増加と共に剛性が高まり、共振周波数が変化していくとともに共振を起こしやすくなると考えられる。今回用いた鉄心では 0.2MPa で共振周波数が 100Hz 付近となり、強い共振振動を起こしたと考えられる。
- (2) 上記の共振の影響は騒音には現れない。但し、騒音の 100Hz には、共振振動の影響が明確に現れている。これは振動周波数が 100Hz と低かったため、聴感補正によって騒音レベルへの影響が無視できるまで下がったためである。

次に、上記の振動測定結果を騒音レベルに換算する方法について検討した。得られた結果を下記に記す。

- (1) 鉄心表面の振動速度を音圧に換算する方法では、低周波音（100Hz）とそれよりも高周波数の音（300Hz 以上）との相対関係が実測騒音レベルと異なり、低周波音が強調されすぎる傾向となった。その原因は低周波音の回折と干渉による鉄心の各脚間および表裏面間での音の打ち消しと推測される。
 - (2) 振動の加速度レベルも算出し、実測騒音と比較した。その結果は上記の音圧換算法と同様で、低周波音とそれよりも高周波数の音との相対関係が実測騒音レベルと異なり、低周波音が強調されすぎる傾向となった。
- 今回の結果から、鉄心の振動測定結果を用いて騒音を精度よく推定するためには、鉄心近傍での音場解析が必要であることがわかった。

参考文献

- [4.1] 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，SA-93-36 (1993)
- [4.2] 石田，佐藤，小松原：「3相積鉄心モデルトランス騒音に及ぼす素材・鉄心構造および鉄心締め付け圧の影響」，電気学会マグネティックス研究会，MAG-95-20 (1995)
- [4.3] H. Jordan, “Über den magnetischen Lärm von Drehstrom-Kerntransformatoren”, ETZ-A, Vol.81, No.3, pp.97-101 (1960)
- [4.4] R.D. Henshell, P.J. Bennett, H. McCallion, and M. Milner, “Natural frequencies and mode shapes of vibration of transformer cores”, Proceedings of IEE, Vol.112, No.11, pp.2133 – 2139 (1965)
- [4.5] 堀，藤澤：「変圧器鉄心の振動低減に関する研究」，日本機械学会論文集 (C編)，59巻，568号，pp.90-97 (1993)
- [4.6] 溝上，藪本，岡崎：「3相モデル変圧器における鉄心の振動解析(2)」，電気学会マグネティックス研究会，MAG-95-107 (1995)
- [4.7] 溝上，藪本，岡崎：「3相モデル変圧器における鉄心の振動解析」，電気学会マグネティックス研究会，MAG-94-190 (1994)

第5章 鉄心接合部の構造変更による騒音と磁歪の変化

5.1 緒言

変圧器の鉄心は閉磁路とする必要があるが、そのため切断した電磁鋼板を平板として使用する積鉄心では最低でも4箇所の接合部が形成される。接合部では磁気抵抗を下げ、機械的な結合を得るために、鋼板を1枚か数枚毎に長手方向にずらして積層し、隣接する鉄心辺の鋼板と重なり合う部分が形成される様にする。これはラップ構造と呼ばれ、鋼板の突合せ部分を階段状に移動させていくステップラップと、1接合部内で鋼板長手方向に2箇所のみとする従来ラップ（交互積み）が用いられている。この接合部構造やラップ部分の長さは騒音などの鉄心特性に影響を及ぼすため、これまでに様々な調査が行われている^{[5.1]~[5.6]}。本章でもモデル鉄心を使用して接合部構造が騒音に及ぼす影響について検討し、加えて鋼板の同時積枚数が騒音に与える影響も明らかにする^[5.7]。

また調査の一環として、鉄心上で磁歪を実測して検討する。電磁鋼板の磁歪については、以前から単板サンプルを主に正弦波で励磁した検討がなされている。しかし3相積鉄心では鉄心内の磁化に磁束波形歪^[5.8]、回転磁束^[3.6]などが不均一に発生するため、鉄心上の磁歪は単板サンプルの磁歪とは異なっていると予想される。従って、鉄心で磁歪を調査することが騒音の理解に不可欠となる。この鉄心での磁歪は既に部分的に検討されているが^[5.9]、本章ではモデル鉄心で接合部構造を変えて鋼板層別の磁歪を測定し、加えて騒音への換算法を適用して実測騒音との関連性を調査する^[5.7]。

5.2 実験方法

5.2.1 モデル鉄心の仕様と構造

鉄心形式は3相3脚積鉄心とし、寸法は、図2.2に示す様に脚とヨークの幅を150mm、外形の高さと幅を共に750mmとした。材料には板厚0.30mm

の方向性電磁鋼板を用いた。接合部には図 5.1(a)に示す 6 段ステップラップと(b)に示す従来ラップの 2 種類の形式を用いた。接合部では鋼板突合せ位置が移動するが，その移動方式を毎層，2 層に 1 回，3 層に 1 回の 3 種類とした。この 1 から 3 を同時積枚数と呼ぶ。すなわち図 5.1(a)は同時積枚数 1 の，図 5.1(b)は 2 の例となる。よって試験した接合部は 6 種類となる。

励磁と磁束密度の設定には 2.2 節の方法を用いた。励磁周波数は全測定で 50Hz とした。実験地域は電源周波数が 50Hz で誘導ノイズを拾う懸念があったが，騒音と磁歪は基本周波数 100Hz とその高調波から成ることから検討対象をそれらのみとし，ノイズである 50Hz と奇数次高調波の影響を回避した。

5.2.2 騒音測定

騒音測定には 2.3 節で述べた縦置きで C 型クランプで締め付けるモデル鉄心を使用した。クランプによる平均締め付け圧力は 0.3MPa とした。

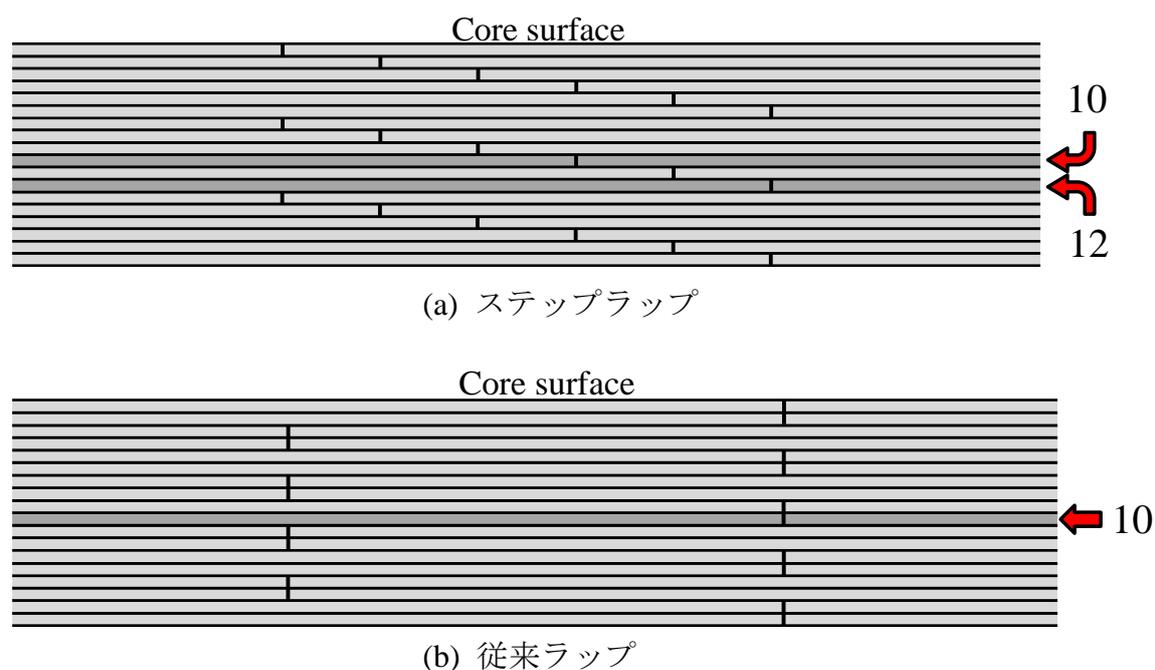


図 5.1 鉄心接合部の断面（矢印：ひずみゲージ設置層）

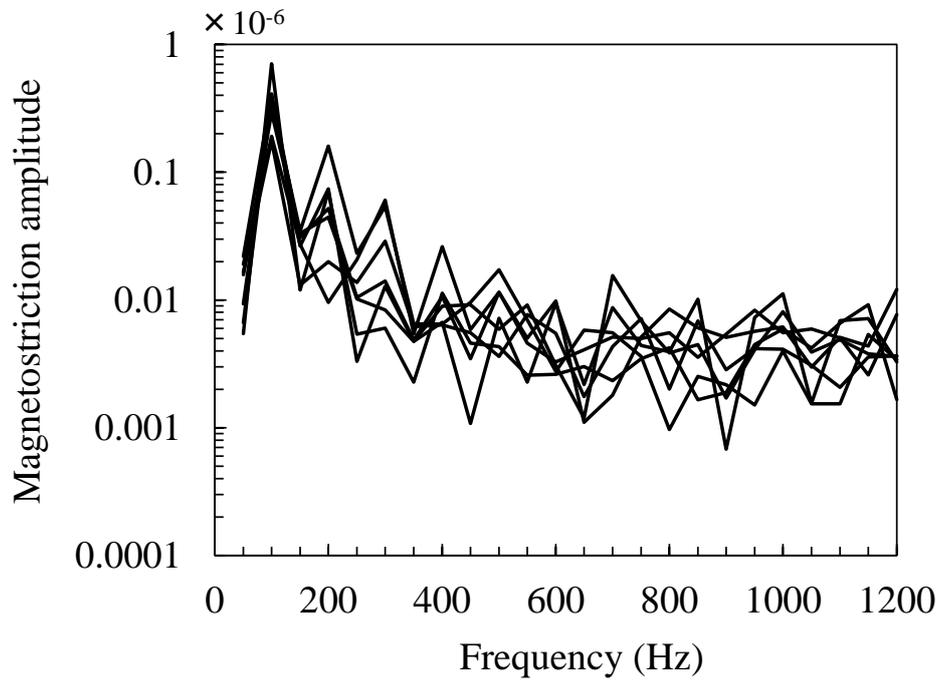
測定法は 2.4 節での検討結果に基づいたものとした。すなわち図 2.7 で示す通り、8 本のマイクロホンを等間隔でモデル鉄心を囲む様に配置し、鉄心表面から 30cm 離れた、鉄心高の 1/2 の位置にセットした。評価に用いる騒音レベル値は 8 箇所での測定値のエネルギー平均とした。測定は、暗騒音が 16 から 17dBA の無響室で行った。測定システムとして 2.2 節で述べた自動化された手法を用いた。

5.2.3 ひずみゲージによる鉄心の磁歪測定法

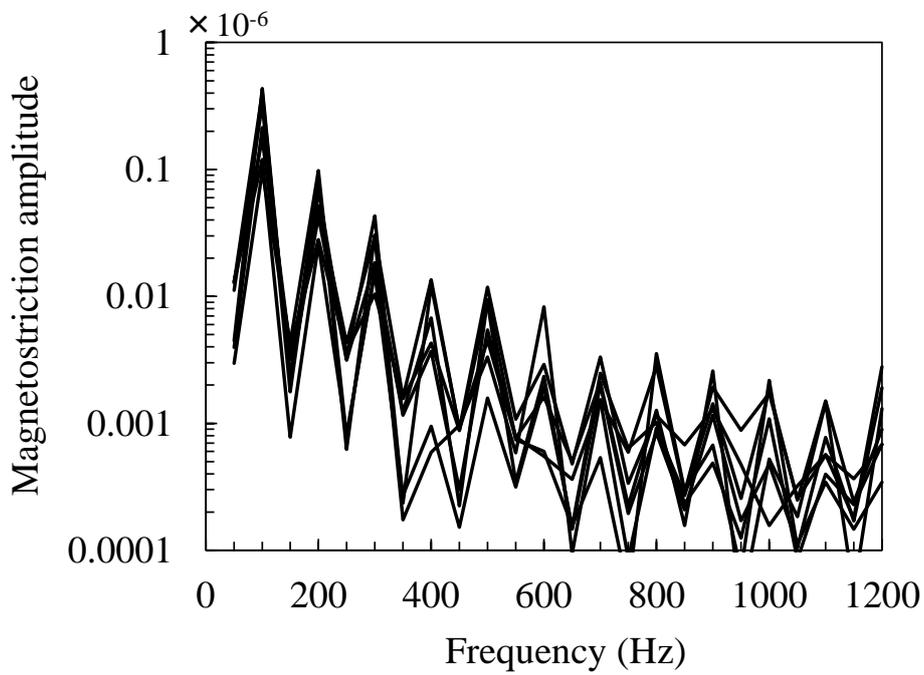
鉄心の磁歪測定にはひずみゲージを用いた。これまでは金属ゲージを用いて磁歪測定を行っていたが^[5.4]、測定する歪が小さいため結果がノイズの影響を受けていると思われた。そこで今回はゲージ率が約 40 倍の半導体ゲージを使用した。

鉄心上の 6 箇所にひずみゲージを設置して測定した磁歪波形の周波数分析結果を図 5.2 に示す。金属ゲージの結果は 500Hz 以上ではほぼフラットになるが、半導体ゲージの結果は周波数と共に低下し続ける。また 500Hz 以上では半導体ゲージの結果のみ 50Hz の偶数次と奇数次の高調波成分に明確な差が見られる。一般的に磁歪波形は励磁周波数の偶数次成分のみで構成されるが、これが明確に現れているのは半導体ゲージのみである。以上の結果から、金属ゲージでは 0.005×10^{-6} 付近以下はノイズで正確な測定ができず、半導体ゲージのみ 0.001×10^{-6} 以下まで十分な S/N 比が確保されていると考えられる。

半導体ゲージの問題点は、ゲージ率の非線形性が大きく、また温度によって変動することである。前記の対策として、超直線性ゲージ（共和電業 KSPL-7-60-E4、ゲージ率 90、検出長 7mm）を使用した。また後者の対策として、温度変化の大きい鉄心 T 接合部付近に熱電対を設置して測温し、15～35℃の範囲内で測定を行う対策をとった。ゲージ率の温度係数は



(a) 金属ゲージ



(b) 半導体ゲージ

図 5.2 異なる種類の歪ゲージで測定された磁歪波形の周波数分析結果

-0.19%/°Cであるため、前記の温度制限によってゲージ率の変化を±2%以内に制限することができる。その他の測定精度上の問題としてゲージ率のバラツキがあるが、今回使用したゲージについては $90 \pm 3\%$ で問題ないと考えられる。また、このゲージは無誘導タイプではなく電磁鋼板からの漏れ磁束を50Hzとその奇数次高調波の信号として測定してしまう可能性があるため、磁歪の周波数成分である100Hzとその高調波のみを検討の対象とした。

ひずみゲージを接続したブリッジの出力は、動ひずみアンプを經由してデジタルオシロスコープに入力される。この記録トリガが3相鉄心の1脚に設置されたサーチコイルの電圧出力で発生する様に回路構成することで、全測定位置の磁歪波形測定を同期させた。

ひずみゲージは鉄心表面から10層以上内側に設置したが、強い圧力を与えると破損の恐れがあるため、磁歪測定用の鉄心は騒音測定用と異なる横置きとしてクランプは施さなかった。図5.1に具体的な設置層を示すが、ステップラップは最上層から10と12層目、従来ラップは10層目とした。1層内でのひずみゲージの設置位置を図5.3に示す。1層当たり34位置とした。

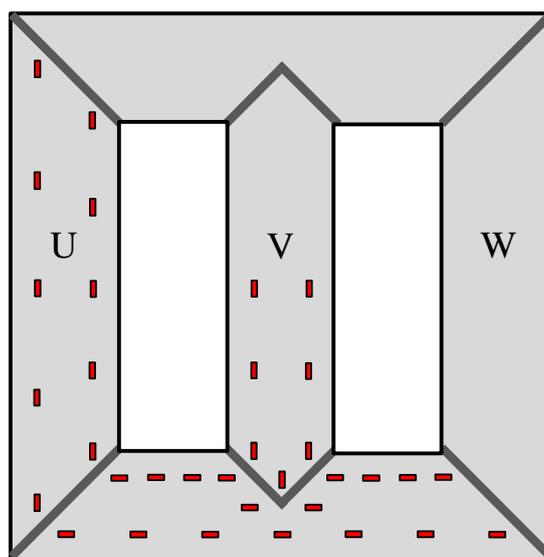


図 5.3 モデル鉄心内の歪ゲージ設置位置

測定方向は全て電磁鋼板の圧延方向とした。鉄心の全体の積層厚は約 22mm とした。

用いた電磁鋼板の素材磁歪特性も測定した。2.7 節で説明した測定システムを使用し、モデル鉄心に使用した同材料から採取した 100mm×500mm の単板サンプルを用いた。

5.3 騒音に対する接合部構造の影響

5.3.1 測定結果

図 5.4 に接合部形式と同時積枚数が異なる鉄心での騒音測定結果を示す。いずれの同時積枚数でもステップラップが従来ラップよりも低騒音となっているが、高磁束密度では差が縮小する。ステップラップでの結果を比較すると、同時積枚数 1 に対して 2 は 1.6T を中心として 1dBA 程度、低騒音と

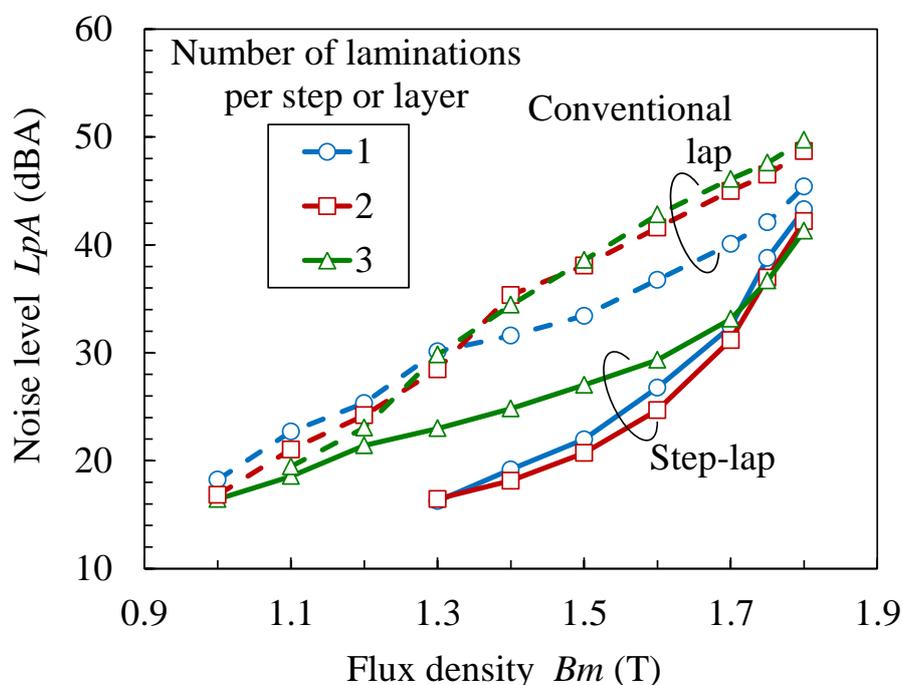


図 5.4 異なる接合部条件でのモデル鉄心の騒音レベル

なっている。一方、同時積枚数 3 は 1 に対して 1.6T 以下で高騒音となっており、低磁束密度ほど差が拡大している。一方、従来ラップでは 1.4T 以上で同時積枚数 1 が他よりも低騒音となっている。1.2T 以下では同時積枚数が多い程、低騒音となっているが、差は 1dBA 程度である。

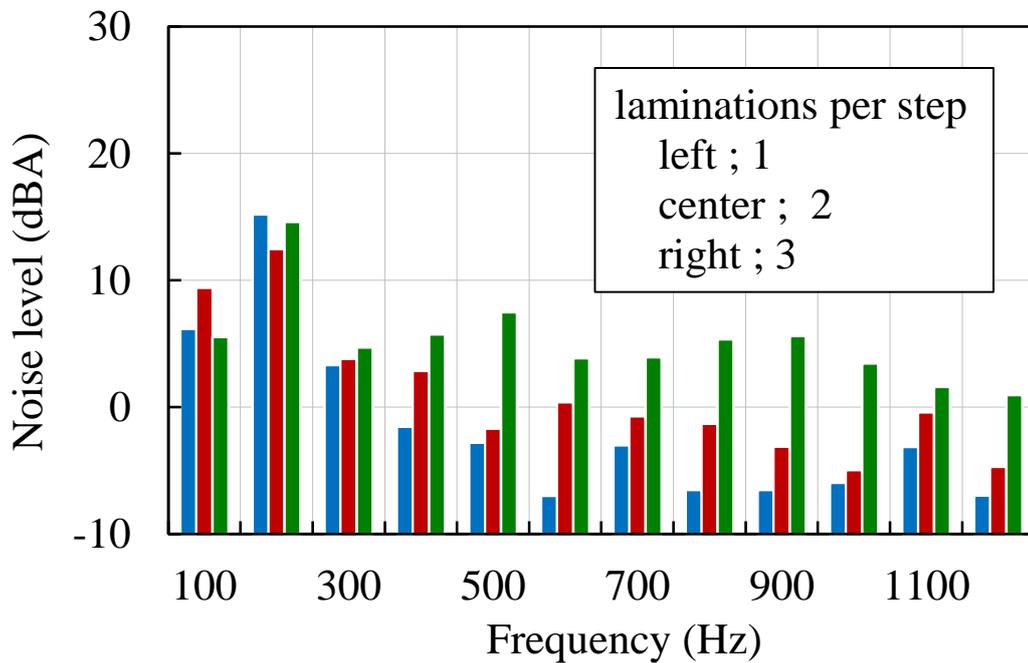
次に、図 5.5 に 1.3T での騒音の周波数分析結果を示す。グラフは各周波数で左側から同時積枚数 1, 2, 3 としている。ステップラップと従来ラップの比較では、200Hz 以上でステップラップが低騒音となっており、周波数が高くなるほど差が拡大する。図 5.4 でのステップラップ内では同時積枚数 3 のみが高騒音であったが、その差は 400Hz 以上で見られ、その範囲では同時積枚数が多い程、騒音が大きくなる。

1.7T の周波数分析結果を図 5.6 に示す。ステップラップと従来ラップの比較では、400Hz 以上でステップラップが低騒音となっている。また従来ラップ内では同時積枚数 1 のみが低騒音であったが、その差は 1000, 1100Hz で見られる。

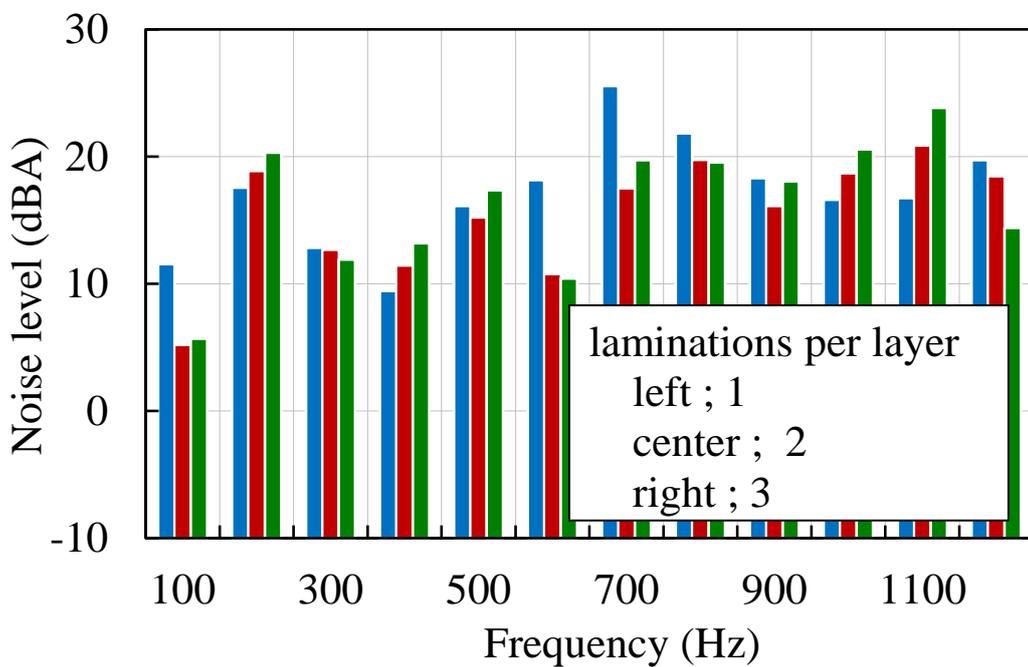
5.3.2 考察

ステップラップと従来ラップの比較において、騒音レベルの差は従来知見と同様である^{[5.1]~[5.5]}。また、両ラップ法ともに同時積枚数の間で差が見られたが、これは層毎の磁束分布が変化するためと推定され、今後、検討する必要がある。

ラップ法や同時積枚数の間で現れた差は基本周波数の 100Hz ではなく、それよりも高周波数で現れており、接合部に関して検討を行う際には高い周波数成分に着目することが重要であることがわかる。なお同時積枚数の間で見られた 1dBA 以下の差については、接合部変更のための鉄心組み直しに起因する誤差の可能性があり、有意差とは断定できない。

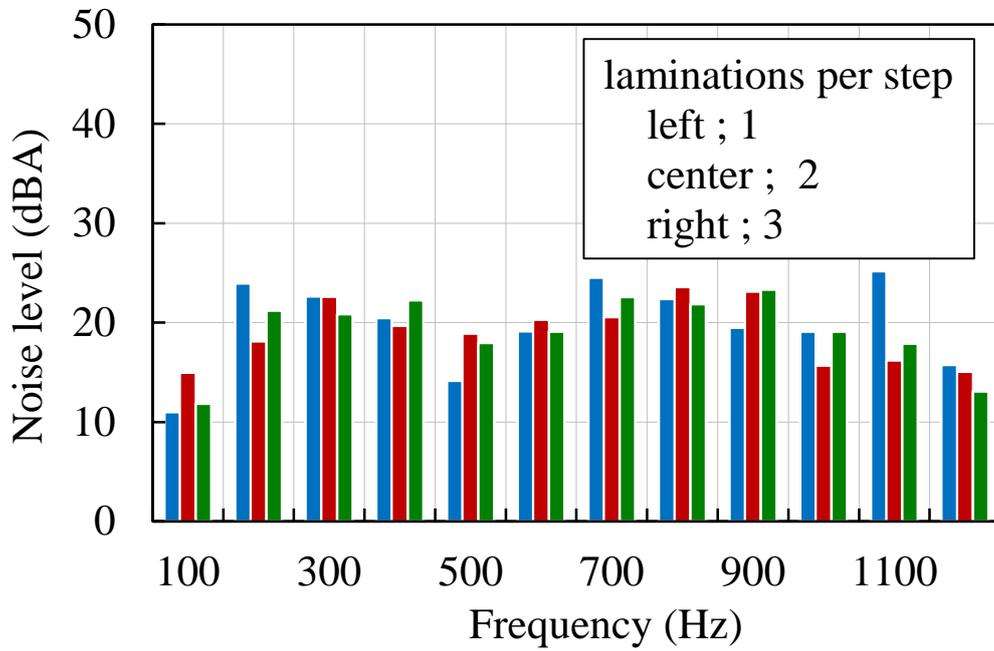


(a) ステップラップ

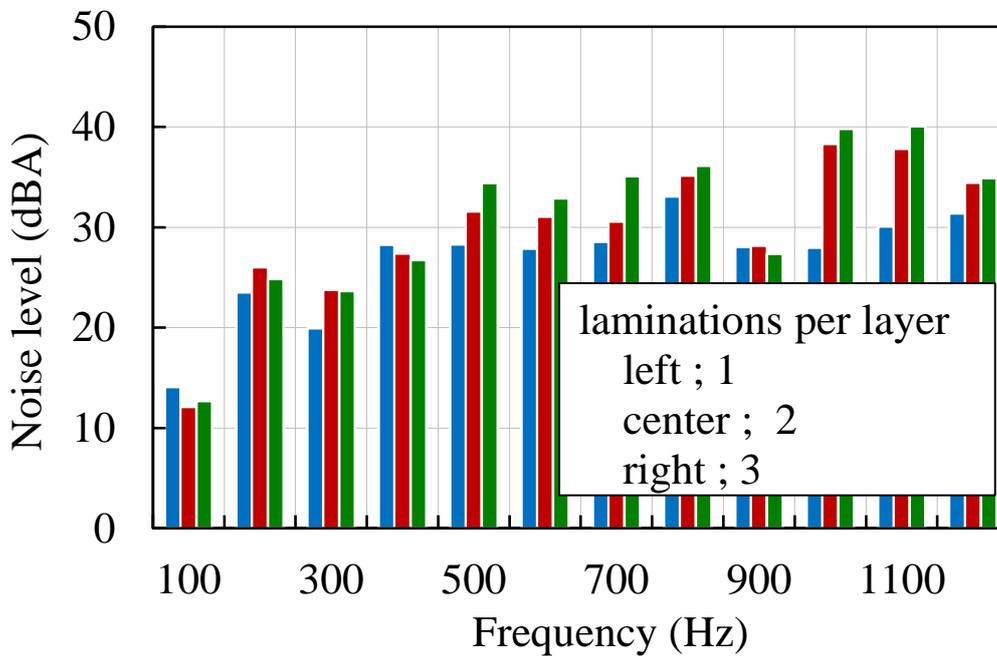


(b) 従来ラップ

図 5.5 騒音の周波数分析結果 (磁束密度 1.3T)



(a) ステップラップ



(b) 従来ラップ

図 5.6 騒音の周波数分析結果 (磁束密度 1.7T)

5.4 鉄心磁歪に対する接合部構造の影響

5.4.1 磁歪の評価方法と測定結果

モデル鉄心の同時積枚数は図 5.1 と同じ, すなわちステップラップでは 1, 従来ラップでは 2 とした。ステップラップでのひずみゲージ設置層の一つである 10 層目は 6 ステップを 1 セットと見た時の 4 段目で, 図 5.1 で示す様に鋼板突合せ位置は中央付近となる。一方, 12 層目は 6 段目で, 鋼板突合せ位置は最も端となる。従来ラップについては構造の対称性からどの層でも同条件となるが, ステップラップに合わせて 10 層目とした。

磁歪は変位の振幅で評価されることが多いが, 今回は騒音に換算できる下記の計算方法を適用した。これらは (2.9) 式を簡素化したものである。

$$L_{HAi} = 20 \log_{10}(2\pi f_i \lambda_i \alpha_i) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここに, L_{HAi} : 換算高調波成分(Calculated harmonic component), i : 高調波次数, f_i : i 次の高調波周波数(Hz), λ_i : i 次の磁歪高調波の振幅, α_i : f_i での A 特性補正係数。

$$L_{NA} = 20 \log_{10} \sqrt{\sum_i (2\pi f_i \lambda_i \alpha_i)^2} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

ここに, L_{NA} : 換算騒音レベル(Calculated noise level)。

(5.1) 式は特定の周波数成分を計算し, (5.2) 式は騒音レベルに対応する値を計算するものである。この計算は 100~1200Hz の 100Hz 間隔の周波数成分を用いて行った。なお今回の検討は各層の 34 個のひずみゲージの測定結果を平均して行ったが, その平均計算は騒音への対応を考慮した以下の方法とした。今回測定された磁歪は最終的に圧延方向の鋼板端面で振動とし

て現れ、騒音になる。その面での振動を適正に算出するために、ひずみゲージの配置を考慮した平均計算を行った。まず圧延方向でのひずみゲージ間隔を使って荷重平均し、更に圧延方向に並ぶひずみゲージ列の延長線上での鋼板両端面間の距離でも荷重平均した。脚 V については上下の対称性を考慮して荷重平均した。また、脚とヨークのひずみゲージ列の本数比でも荷重平均した。ひずみゲージ間での比較については、ゲージの検出長が 7mm で電磁鋼板の結晶サイズよりも小さく、結晶粒間の特性バラツキの影響が含まれてしまうため行わなかった。但し、ひずみゲージを設置した鋼板はステップラップと従来ラップで同一のものを使用したため、ラップ法の間での比較には支障はないと考えられる。

図 5.7 にモデル鉄心で測定された換算騒音レベルを、素材特性として単板サンプルで測定された値と共に示す。実際の騒音レベルと同様にステップラップが従来ラップよりも低い。ステップラップ内では 10 層目よりも 12 層目が低い。単板サンプルでの値はモデル鉄心よりも 10dBA 以上低い。

図 5.8 にはモデル鉄心で測定された換算高調波成分を示す。各周波数で左

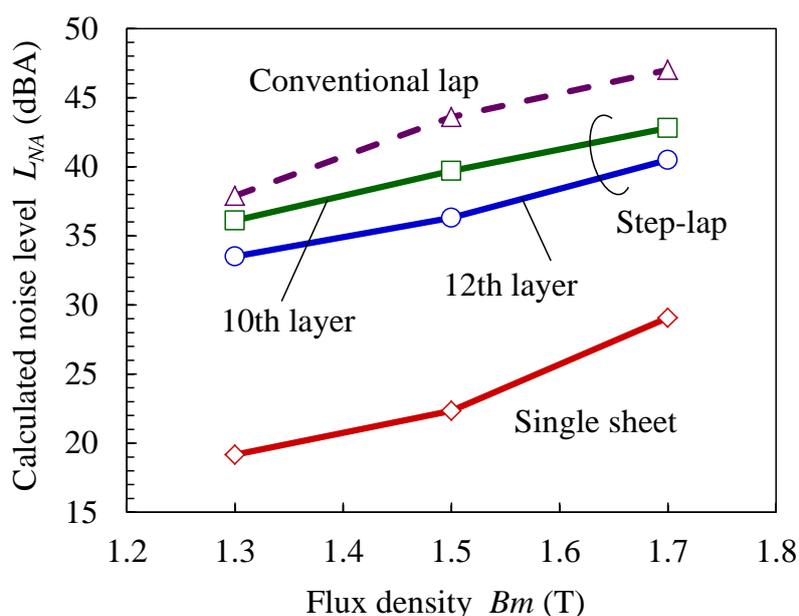
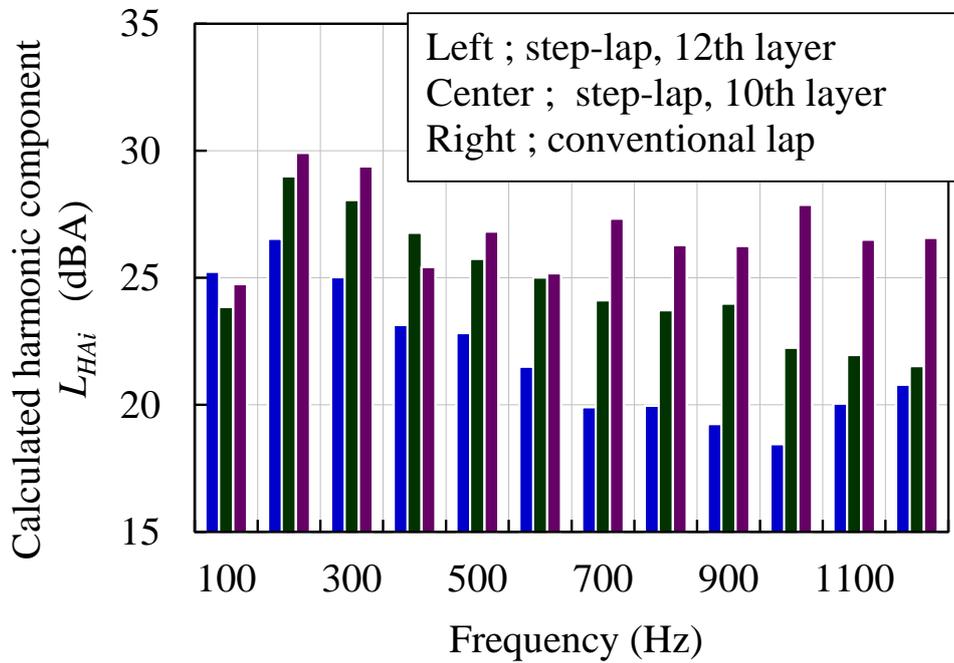
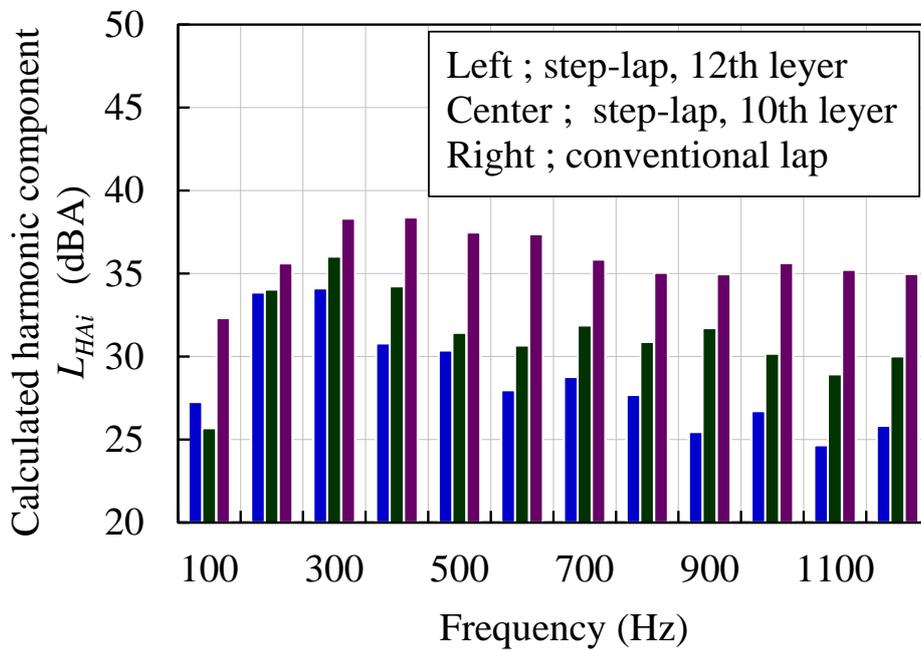


図 5.7 モデル鉄心で測定された磁歪の換算騒音レベル



(a) 磁束密度 1.3T



(b) 磁束密度 1.7T

図 5.8 モデル鉄心で測定された磁歪の換算高調波成分

側からステップラップ 12 層目, 同じく 10 層目, 従来ラップとしている。
 1.3T では, ステップラップの 12 層目は 200Hz 以上で他よりも低く, 10 層目は従来ラップに比べて 700Hz 以上で低くなっている。1.7T では, ステップラップは全ての周波数で従来ラップよりも低い, その差は 100Hz および 400Hz 以上で顕著である。12 層目は 10 層目よりも 300Hz 以上で低い。

図 5.9 には単板サンプルで測定された換算高調波成分を示す。100Hz 成分が最も高い値となっている。

5.4.2 磁歪と騒音の相関性に関する検討

図 5.7 で見られる換算騒音レベルでのステップラップと従来ラップの差は, 実際の騒音レベルと同様の傾向であるが, その差を定量的に見ると換算騒音レベルの方が少ないことがわかる。また図 5.7 から, 10 層目よりも 12 層目が低いこともわかるが, その理由については, 12 層目は図 5.1 に示す様に鋼板突合せ部が接合部領域内の最も端に位置する特異層で, この層では接合部領域から離れると磁束密度が低下する点にあると考えられる^[5.10]。

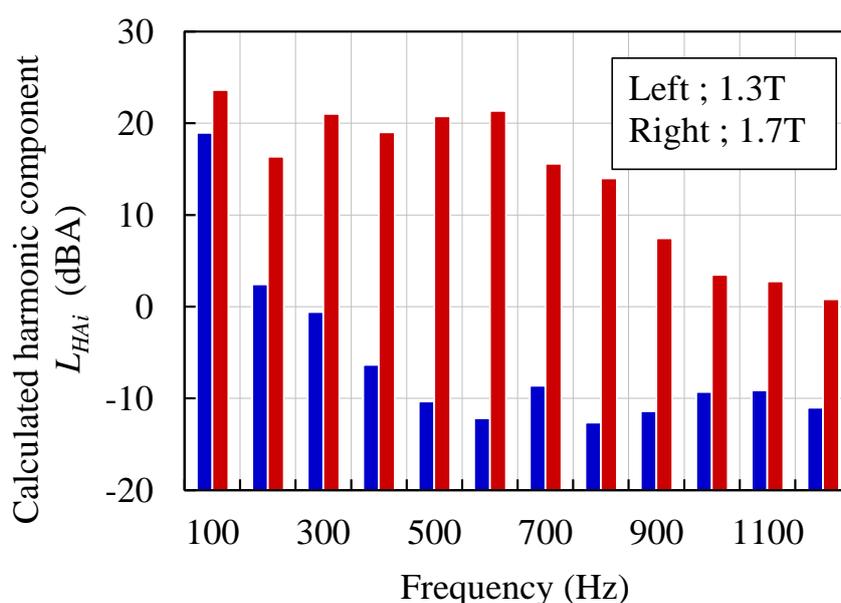
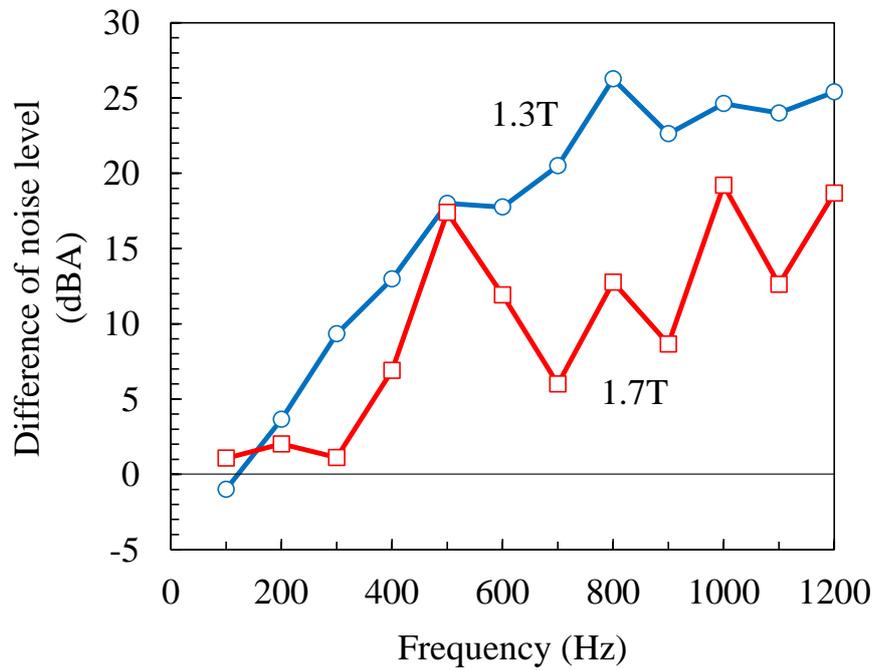


図 5.9 単板サンプルで測定された磁歪の換算高調波成分

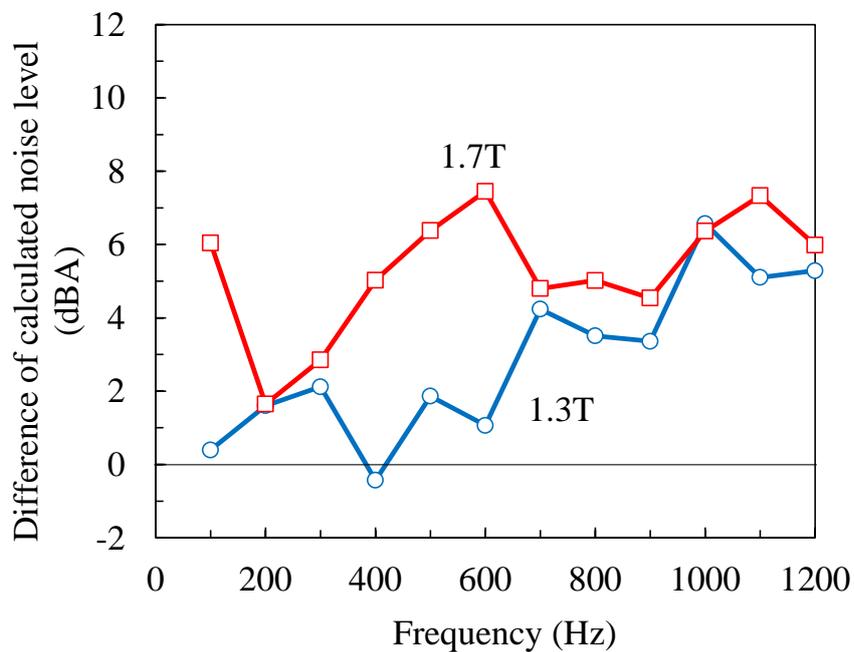
図 5.8 の磁歪の換算高調波成分については、騒音の高調波成分との対応を以下の方法で検討した。すなわち各周波数において、ステップラップを基準とした従来ラップの値の差を磁歪の図 5.8 と騒音の図 5.5 および図 5.6 の値から算出した。その結果を図 5.10 に示す。なお、ステップラップでの磁歪の換算高調波成分は 10, 12 層目で求めており平均化が必要なため、12 層目が特異層であることを考慮して^[5.10]、荷重平均を求めた。まず図 5.10(a) の騒音については、100Hz 付近でのステップラップと従来ラップの差はほとんど無いが、高周波数になるほど差が広がる基本傾向が見られる。一方、図 5.10(b) の磁歪については、騒音ほど明確ではないがやはり高周波数になるほど差が広がる傾向が見られ、騒音に対する一定の対応が見られる。しかし差の値は騒音と磁歪の間に相違があり、特に 1.3T では 400Hz 以上で 10dBA 以上の乖離がある。

次に図 5.9 の単板サンプルでの磁歪の換算高調波成分を図 5.8 のモデル鉄心で測定された結果と比較すると、単板サンプル測定では 100Hz 成分が最も高く、この点がモデル鉄心での結果と大きく異なっている。

以上の検討から以下のことが言える。まずステップラップと従来ラップの間の差については、モデル鉄心の磁歪と騒音いずれでも同傾向の挙動が見られ、それらに関連があることが確認できた。しかし、差の値には乖離がある。その理由としては、(5.1) 式および (5.2) 式、すなわち (2.9) 式に磁歪を代入する騒音への換算法が精度面で不十分であること、更に今回測定していない圧延方向以外の磁歪や接合部の電磁吸引力による騒音においても、ラップ法の相違に起因する差があると推測されることが挙げられる。また、単板サンプルとモデル鉄心の間で磁歪に大きな差異がある点については、単板サンプル測定が磁束均一性や磁束波形の点で理想化された励磁状態になっているのに対し、3 相積鉄心ではそれらが鉄心内の位置毎で異なり、複雑な状態となっていることが原因と考えられる。



(a) 騒音での差



(b) モデル鉄心の磁歪 (換算騒音レベル)での差

図 5.10 騒音と鉄心磁歪での従来ラップとステップラップの間の差の周波数依存性 (ステップラップを基準とする)

5.5 結言

今回の検討では 3 相 3 脚変圧器のモデル鉄心を用いて接合部形式と同時積枚数の変化で生じる騒音差を検討した。また、鉄心磁歪をひずみゲージで測定し、接合部形式によって生じる差も検討した。以下がそのまとめである。

- (1) 騒音レベルはステップラップが従来ラップよりも低い。また同時積枚数の増加時は、同等あるいは増加する。
- (2) 鉄心磁歪を騒音対応値に換算して検討を行った。その結果、ステップラップが従来ラップよりも低い結果となり、更に高調波成分についてもラップ法によって生じる差が騒音レベルと同傾向であるため、鉄心磁歪は騒音と一定の関連を示すことが判明した。
- (3) 騒音や鉄心磁歪での接合部形式や同時積枚数による差は基本周波数(100Hz)ではなく高調波成分で発生しており、高調波の評価が重要であることがわかった。
- (4) 正弦波励磁した単板サンプルによる磁歪は鉄心磁歪の値を大きく下回り、基本周波数成分と高調波成分の間の大小関係も一致しない。この不一致は、鉄心で発生する複雑な磁化条件が原因と考えられる。

参考文献

- [5.1] 石田, 佐藤:「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, MAG-93-187 (1993)
- [5.2] 鍋嶋, 長江, 小松:「接合方式別三相三脚鉄心の騒音分布比較」, 電気学会静止器研究会, SA-94-28 (1994)
- [5.3] Z. Valkovic, “Effect of electrical steel grade on transformer core audible noise”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol.133, pp.607-609 (1994).
- [5.4] 溝上, 久保田:「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ックス研究会, MAG-98-173 (1998)
- [5.5] B. Weiser and H. Pfützner, “Relevance of magnetostatic forces for transformer core vibrations”, *Journal de Physique IV*, Vol.8, pp.591-594 (1998).
- [5.6] D. Snell, “Noise generated by model step lap core configurations of grain oriented electrical steel”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.320, pp.887-890 (2008).
- [5.7] 溝上, 黒崎 : 「変圧器鉄心の接合部形式による騒音と磁歪の変化」, 電気学会論文誌 A, Vol.134, No.5, pp.334-339 (2014)
- [5.8] A. Basak, “The spatial distribution of flux waveform across the limbs in a three-phase transformer core” , *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.16, No.3, pp.540-544 (1980).
- [5.9] G. Shilyashki, H. Pfützner, F. Hofbauer, D. Sabic, and V. Galabov, “Magnetostriction distribution in a model transformer core”, *Journal of Electrical Engineering*, Vol.61, No.7/s, pp.130-132 (2010).
- [5.10] G. F. Mechler and R. S. Girgis, “Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.15, No.1, pp.198-203 (2000).

第6章 鉄心接合部の構造異常による騒音増加

6.1 緒言

騒音に関する様々な検討を行うため、これまでモデル鉄心を多数製作して騒音の測定を行ってきた。この中で、騒音特性に特異な挙動を示す鉄心が見つかったが、その原因は鉄心接合部にあると推測された^[6.1]。第5章で詳述したように鉄心接合部には電磁鋼板のラップ部分があり、ここで磁束が隣接する鋼板に渡っていく。そこで鋼板間に空隙があると電磁吸引力で鋼板が振動し、騒音原因となることが知られている^[6.2]。しかし騒音特性の特異な挙動はこれまで報告されていないため、今回調査を行った。また、その特異現象を更に詳細に検討するため、簡易化された鉄心を作製して騒音測定を行い、検討を行った^[6.3]。

6.2 モデル鉄心の特異な騒音特性挙動

6.2.1 実験方法

モデル鉄心として2.3節で述べた縦置き法の3相3脚積鉄心を使用した。接合部は図6.1に示す6段ステップラップとした。材料には板厚0.30mmの方向性電磁鋼板を用いた。

鉄心締め付け圧力の適正範囲については、上限は木製の当て板がクランプ締め付けによって大きな変形を起こさない値、下限は鋼板間の摩擦力で形状を維持している鉄心が自重による変形を起こさない値によって決まる。締め付け圧力は騒音に影響を及ぼす可能性があるため、今回の実験では鉄心全体



図 6.1 モデル鉄心の接合部断面

での平均値が前記の範囲内となる 0.30MPa と 0.15MPa の 2 水準とした。なお、クランプによる締め付けが圧力を及ぼす範囲は限られているため、実際には鉄心内で圧力分布が生じていると考えられる。

励磁と磁束密度の設定には 2.2 節の方法を用いた。励磁周波数は 50Hz と 60Hz とした。騒音測定法は 2.4 節での検討結果に基づいたものとした。すなわち図 2.7 で示す通り、8 本のマイクロホンを等間隔でモデル鉄心を囲む様に配置し、鉄心表面から 30cm 離れた、鉄心高の 1/2 の位置にセットした。評価に用いる騒音レベル値は 8 箇所での測定値のエネルギー平均とした。測定は、暗騒音が 16 から 17dBA の無響室で行った。測定システムとして 2.2 節で述べた自動化された手法を用いた。

6.2.2 騒音測定結果

騒音測定は磁束密度 B_m が 1T の条件から開始したが、騒音レベルと暗騒音との差が 3dBA 未満となる場合、暗騒音による誤差が過大であると見なされるため、その測定値は無効とし、差がそれ以上の場合は (2.2) 式による暗騒音補正を適用して有効測定値とした。

測定された騒音レベルと磁束密度 B_m との関係を図 6.2 に示す。鉄心締め付け圧力が 0.30MPa の場合には、 B_m の上昇に伴って騒音レベルはほぼ滑らかに上昇している。一方、0.15MPa の場合には 1.4T と 1.5T の間の騒音レベル上昇率が異常に高く、1.5T と 1.6T の騒音レベルのみ 0.30MPa の値よりも特に高くなっている。この現象は励磁周波数 50Hz、60Hz に共通して見られる。過去の実験で得られている磁束密度と騒音レベルの関係は、図 6.2 の 0.30MPa の様な滑らかな増加で、0.15MPa では何らかの特異な現象によって 1.5T と 1.6T のみで騒音の異常上昇が発生したと思われる。以下でその発生原因を検討する。

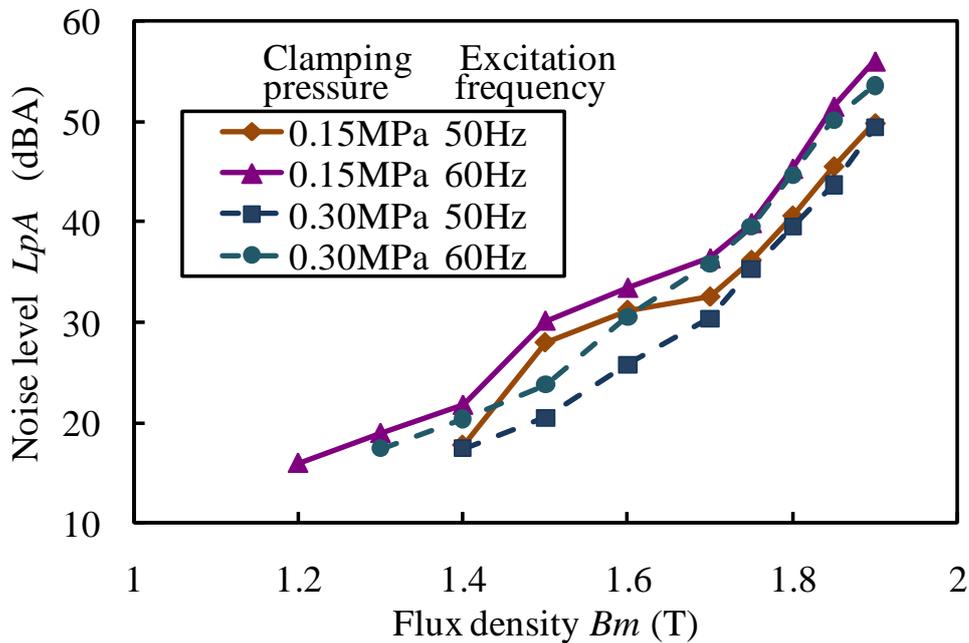


図 6.2 モデル鉄心の騒音レベル

6.2.3 特異挙動の原因に関する検討

鉄心騒音の発生原因の一つに磁歪があるため、この鉄心で使用された電磁鋼板の磁歪特性を 2.7 節で説明した方法によって 50Hz 励磁で測定し、その結果を図 6.3 に示す。1.5T 付近での特異な挙動は見られず、0.15MPa の騒音レベルの挙動は磁歪とは無関係と断定できる。

次に鉄心の共振振動について検討する。第 4 章で示した様に鉄心の締め付け圧力を変えると積層した鋼板間の摩擦力が変化し、鉄心の機械的な固有振動数が増える。それが励磁周波数の偶数倍に一致する場合に、磁歪が加振力となって共振振動が発生し^[6.4]、騒音が増加することが考えられる。この場合、固有振動数付近での騒音レベルの増加が顕著に現れるため、今回測定された音圧波形の周波数分析を行って共振の有無を検証した。周波数分析は、励磁周波数の 1/2 すなわち 50Hz 励磁の場合は 25Hz、60Hz 励磁の場合は 30Hz を最低周波数として行った。締め付け圧力 0.15MPa と 0.30MPa

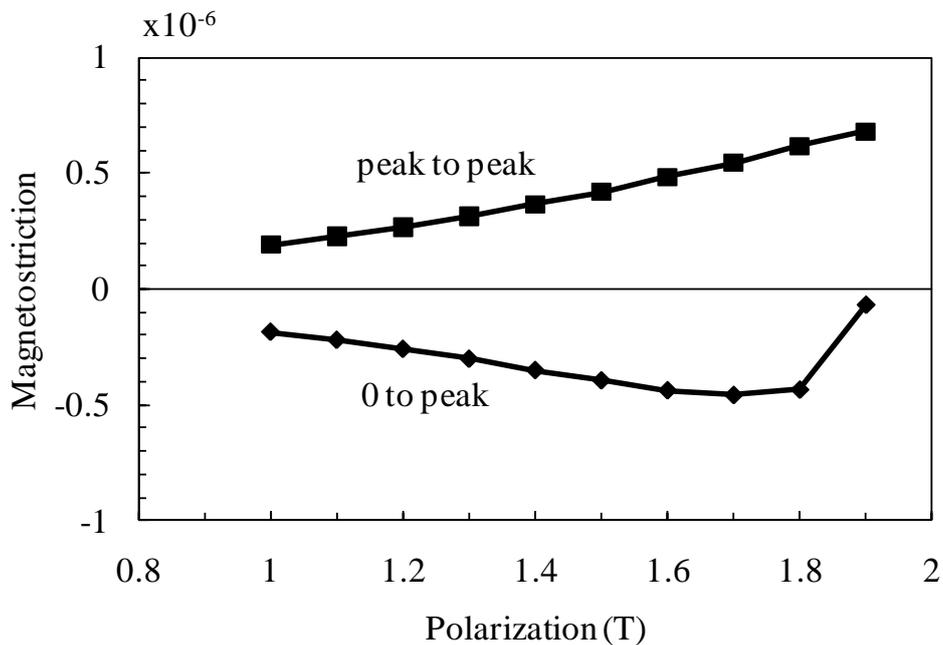
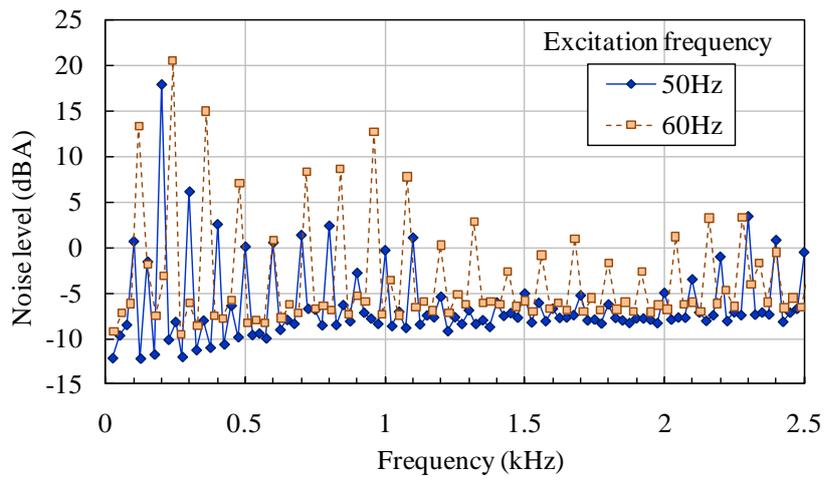


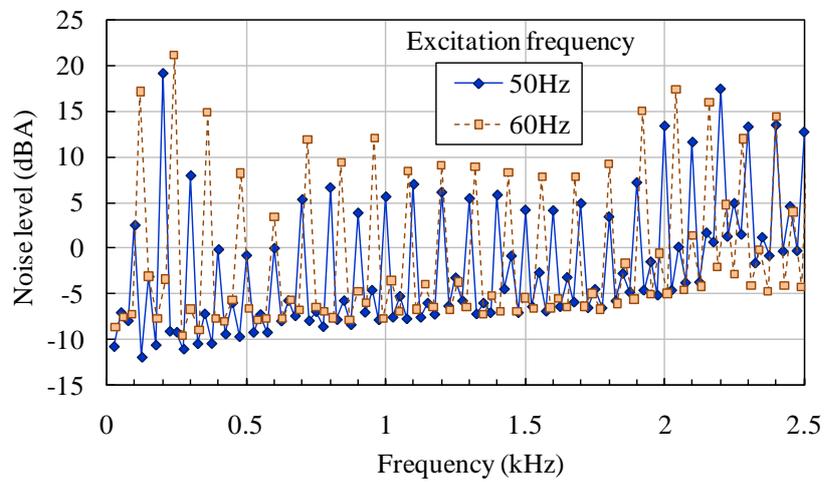
図 6.3 モデル鉄心に用いた材料の磁歪特性 (50Hz 励磁)

の騒音差が最大となった 1.5T での騒音の周波数スペクトルを図 6.4(a)と(b)に、それらから算出される 0.30MPa を基準とした 0.15MPa での上昇量を図 6.4(c)に示す。図 6.4(c)で見ると、高調波成分の周波数が高い程、0.15MPa と 0.30MPa の差が広がる傾向があるが、特定の周波数での明確なピークは見られず、共振は発生していないと考えられる。

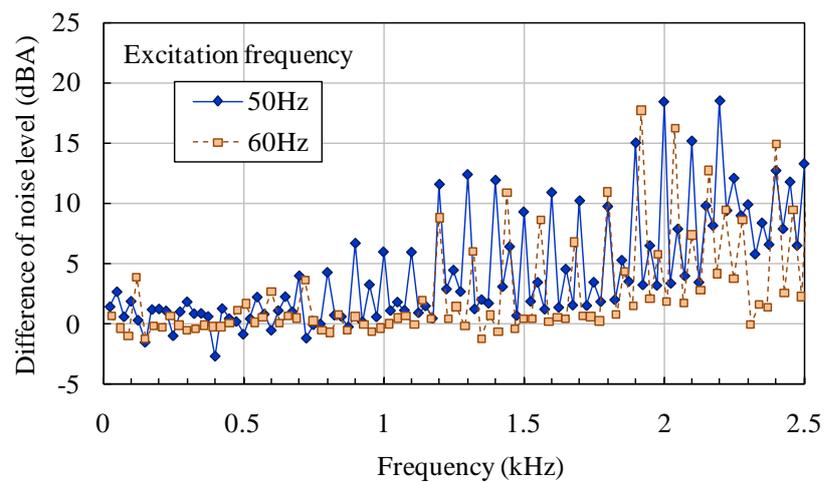
図 6.4(c)に示す 0.15MPa での騒音上昇は、50Hz 励磁では 700Hz 付近、60Hz 励磁では 1.2kHz 付近の比較的高い周波数で開始し、100Hz または 120Hz の整数倍の高次高調波がほぼ全て上昇している。周波数スペクトルにおいて一定周波数毎にピークが見られる関数として、一定周期でデルタ関数が並ぶくし型関数がある。このことから類推して、騒音の増加原因は励磁の半周期毎に発生するインパルス音の可能性はある。インパルス音は物体同士の衝突によって発生するが、それが起こり得るのは鉄心接合部と考えられる。接合部では、磁束が電磁鋼板表面の垂直方向に流れて隣接する鋼板に渡



(a) 鉄心締め付け圧力 0.30MPa



(b) 鉄心締め付け圧力 0.15MPa



(c) 0.30MPa を基準とした 0.15MPa の騒音差

図 6.4 モデル鉄心の騒音周波数成分 (磁束密度 1.5T)

るため^[5.10] ^[6.5]，励磁の半周期毎に鋼板間に電磁吸引力が発生する。その上に鋼板間に空隙があれば鋼板同士の衝突が発生するため，インパルス音が生じると考えられる。

前記の様な現象は通常は低磁束密度から発生すると考えられるため，今回の様な 1.5T からの騒音異常上昇はそのままでは説明できない。そこで通常では発生しない大きさの空隙が形成されたと仮定すると，特定の磁束密度以下では衝突は発生しないこともあり得ると考えられる。すなわち，低磁束密度では電磁吸引力が小さく，そのため鋼板の振動変位も小さいため，空隙が大きいと衝突が発生しない場合があり，一定の磁束密度を超えて初めて衝突が発生することになる。この磁束密度のしきい値が，今回は 1.4T と 1.5T の間にあったと思われる。通常では発生しない大きさの空隙が発生した理由は，本来，端面で突合せとなるべき鋼板同士が先端で重なってしまう異常接合が形成されたためと推定される。

ところで，図 6.2 では 1.7T を越えると 0.15MPa の騒音レベルは 0.30MPa と同等になり，異常上昇は見られなくなる。0.30MPa では全磁束密度で異常上昇が見られないため，インパルス音が殆ど発生しておらず，磁歪が騒音レベルを支配していると考えられる。よって，0.15MPa も 1.7T を越えると，磁歪による騒音の増加量がインパルス音の増加を大きく上回っていると考えられる。この理由については，今後の検討で明らかにしていく必要がある。

騒音の異常上昇が 0.30MPa で見られないのは，高圧力で異常接合による空隙が減少し，鋼板衝突時の衝撃が減少したためと考えられる。このことから，異常のある接合部に対する締め付け圧力の増加が騒音抑制に効果的と考えられたため，全体の平均締め付け圧力は 0.15MPa のままで，鉄心四隅の接合部で順に図 2.6 の木板端部のボルトの増し締めを試した。その結果，ある接合部近傍のボルト増し締めで騒音レベルは図 6.5 の様に変化し，平均締め付け圧力が 0.15MPa でも 0.30MPa と同程度の騒音レベルとなった。

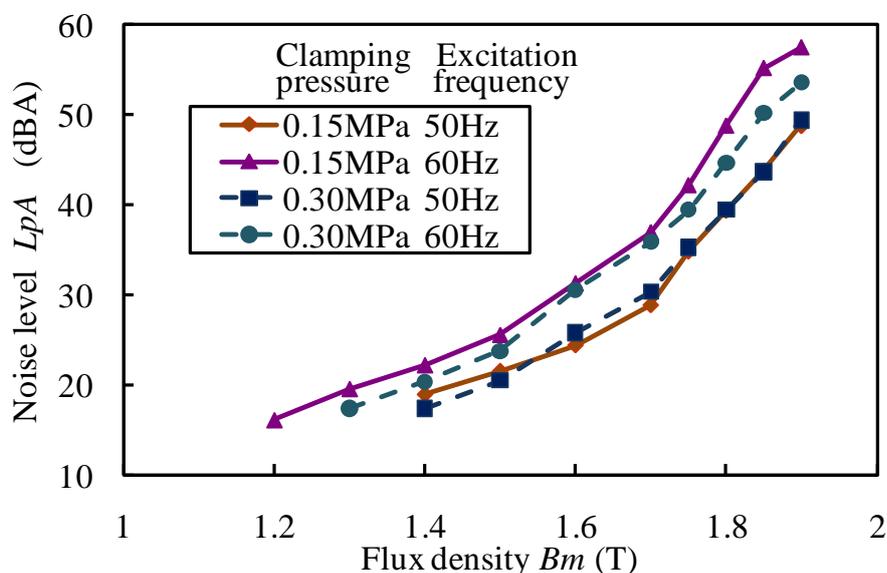


図 6.5 モデル鉄心の騒音レベル

(0.15MPa では接合部に近接する 2 本のボルトを強く締付け)

6.3 異常接合による騒音増加の実測と検討

6.3.1 鉄心の接合状態を変更可能とする実験方法

前節では 3 相モデル鉄心の騒音増加の原因を異常接合と推定した。この仮説を検証するために接合部の鋼板積層状態を容易に変更できる別のモデル鉄心を使用して接合部の騒音を測定し、検討を行った。そのモデル鉄心は単相 2 脚積鉄心で、寸法は脚とヨークの幅を 150mm、外形を 750mm×450mm とした。鋼板積層数は 6 とし、これで 6 段ステップラップを構成した。材料には板厚 0.30mm の方向性電磁鋼板を用いた。図 6.6 に示す様に、平置きのみで測定したため、そのままでは鉄心への締め付け圧力はなく、自重のみが加圧力となる。

接合部は 4 か所に形成されるが、騒音測定はその内の 1 箇所のみを対象とした。具体的には図 6.6 で示す様にモデル鉄心幅方向の中央位置で接合部

直上の高さ 10cm の位置にマイクロホンを 1 本設置して騒音測定を行った。他の測定条件については、単相であるために生じる相違を除き、6.2 節と同一とした。但し今回は音圧波形も測定するため、騒音計の音圧出力をデジタルオシロスコープに入力した。励磁周波数は 50Hz のみとした。

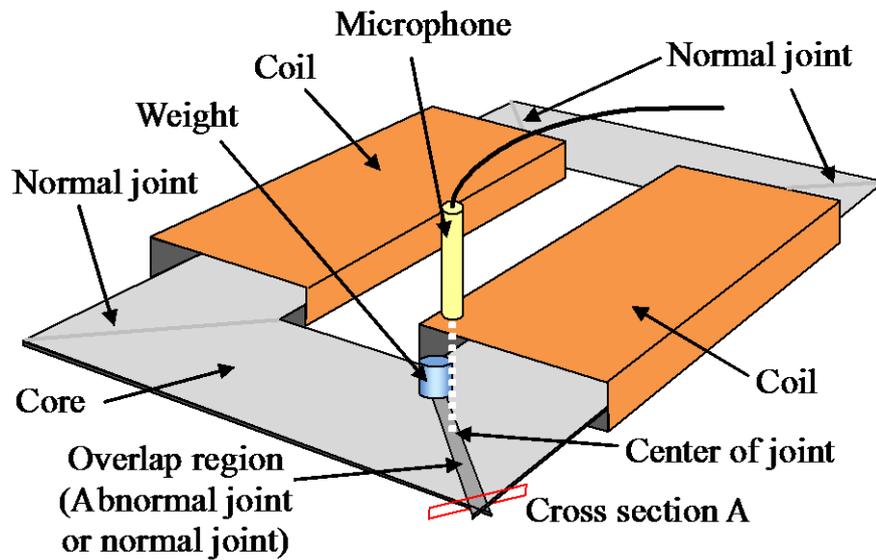


図 6.6 接合部が発生する騒音を評価するための単相モデル鉄心

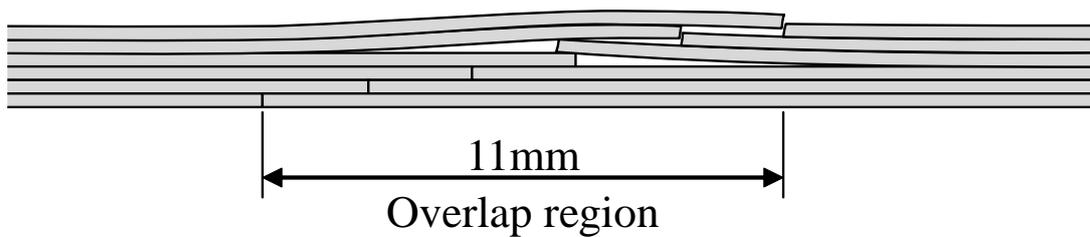


図 6.7 異常接合部を含む A 断面

6.3.2 異常接合状態での騒音測定結果

異常接合が発生したケースとして、図 6.6 に示す騒音測定対象の接合部のみにて、図 6.7 に示す様に上から 3 層目の鋼板を突合せとせず一方を他方に載り上げさせた状態を故意に作り、騒音測定を行った。この図 6.7 は、図 6.6 の枠 A で示す位置の断面を示す。また、接合部への加圧効果についても検討するため、直径 41mm の 500g の分銅を励磁状態で接合部上に置き、騒音が最少となる位置を探して、その状態でも騒音測定した。更に、鋼板の載り上げのない正常接合での測定も行った。以上の 3 ケースで測定された騒音レベルを図 6.8 に示す。異常接合の騒音レベルは正常接合部に対して 12~20dBA 高い。また、異常接合でも 500g の荷重をかけると騒音は低下するが、正常接合よりもなお 5~9dBA 高い。すなわち、接合部に異常が発生すると騒音が極めて増大し、軽い加圧でそれは抑制されるが、なお正常接合よりも騒音が大きいことがわかる。

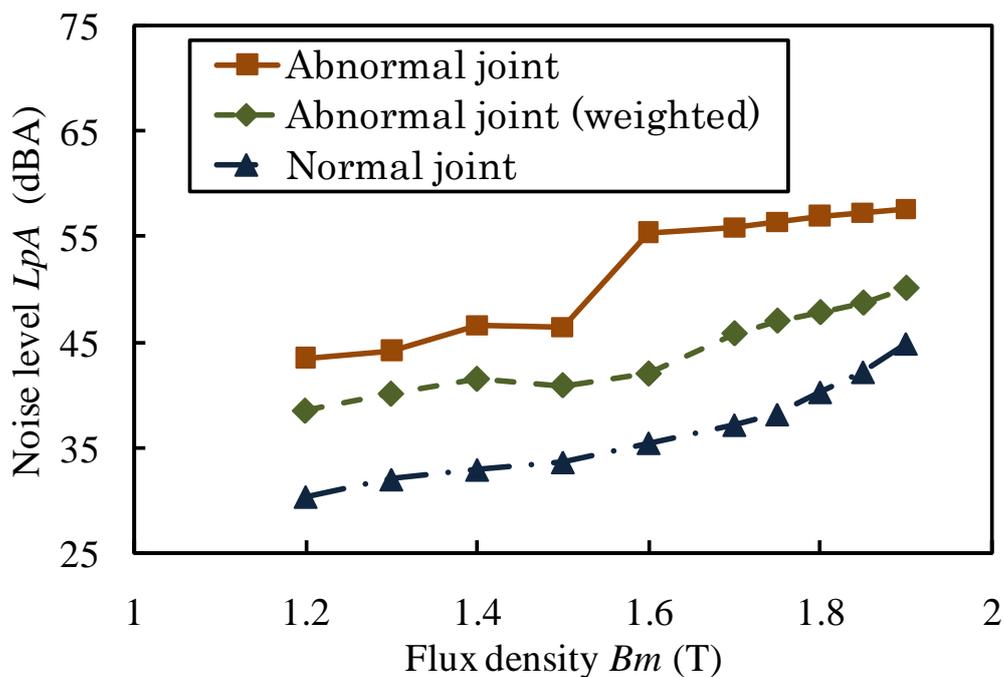


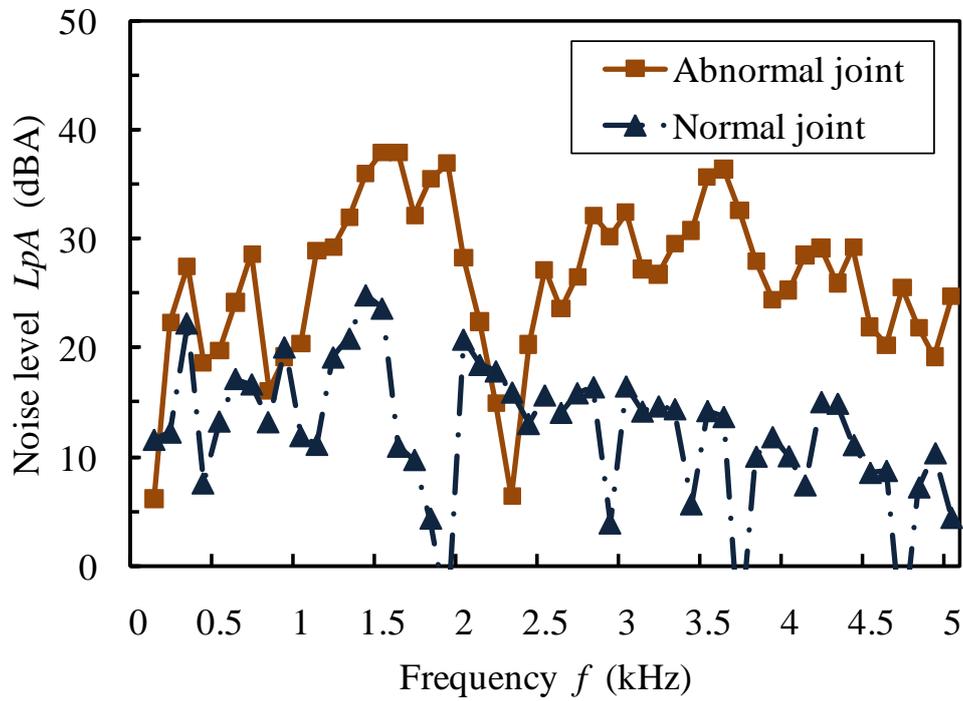
図 6.8 接合部の騒音レベル (50Hz 励磁)

磁束密度 B_m が 1.5T での上記 3 ケースでの音圧波形の周波数スペクトルを図 6.9 に示す。周波数分析は、図 6.4 の測定と同じく励磁周波数の 1/2, すなわち 25Hz 間隔で行ったが、主要成分は励磁周波数の 2 倍である 100Hz とその高調波であったため、図 6.9 にはこれらの成分のみ抽出して表示した。図 6.9(a)からわかる様に、異常接合による騒音は正常接合に対して 1kHz 付近から特に増加している。これは図 6.4(a)の 3 相モデル鉄心での結果と類似しており、3 相モデル鉄心で発生した騒音増加の原因が接合部の異常であることを裏付ける一つの証拠であると考えられる。なお図 6.9(b)から、異常接合に荷重をかけると騒音はほぼ全周波数域で減少することがわかる。

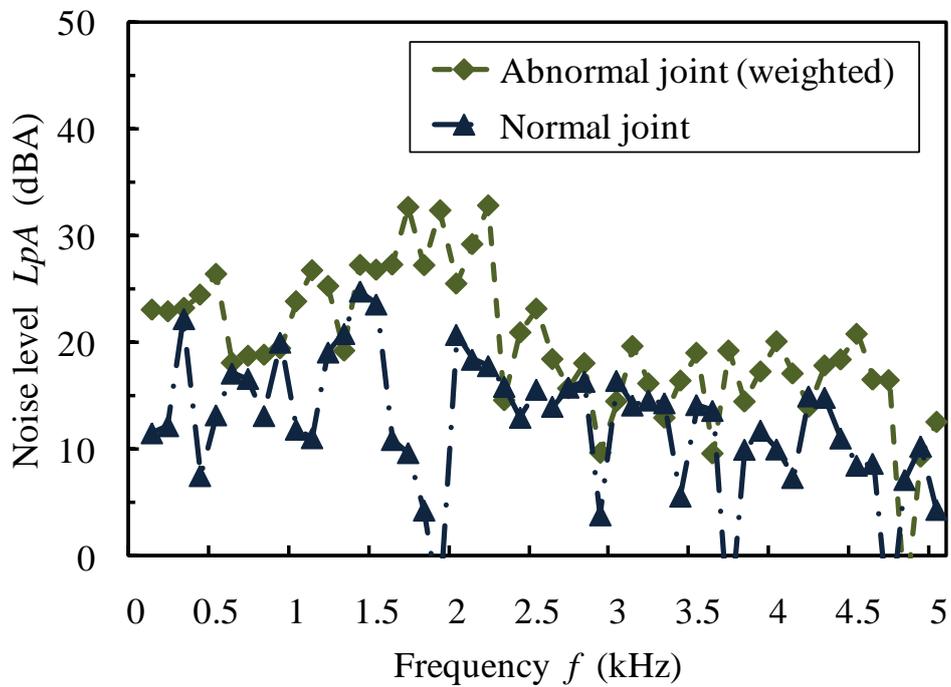
6.3.3 音圧波形の実測結果と検討

前記の現象を更に詳しく調査するために、音圧波形についても検討した。音圧波形を見ても、例えば鉄心の特定位置の振動の情報を得ることができないが、発音源の振動状態を推定することは可能である。なお、音圧波形測定では騒音計の A 特性補正は使用せず、平坦特性とした。また、励磁電圧に同期させた 256 回のアヴェレージング処理を行った。

磁束密度 B_m が 1.5T での音圧波形を、鉄心に設置した 2 次コイルで測定された磁束密度波形と併せて図 6.10 に示す。図 6.10(b)の異常接合では磁束密度の上昇初期で急峻な音が発生し、その後には減衰音が続いている。これはまず、鋼板の隣接鋼板への衝突でインパルス音が発生し、引き続き発生する鋼板の固有振動数でのインパルス応答が音圧変化として現れたものと見られる。これと比較し、図 6.10(c)の異常接合に荷重をかけた状態や図 6.10(d)の正常接合では、異常接合で見られたインパルス音の発生は見られない。なお、異常接合では荷重をかけても不正な鋼板の載り上げ自体は解消しないため、鋼板間の空隙は正常接合よりもまだ大きく、騒音が大きいと思われる。

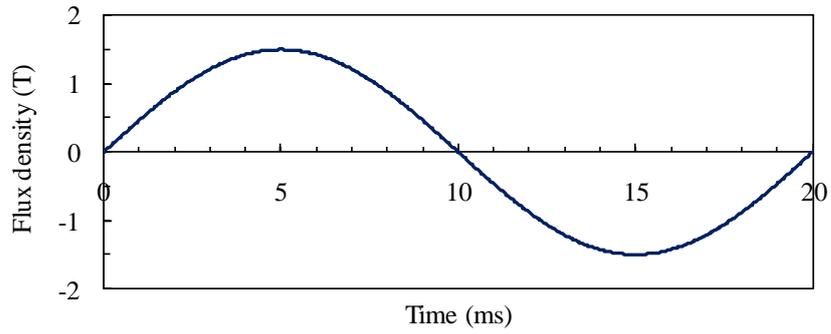


(a) 異常及び正常接合

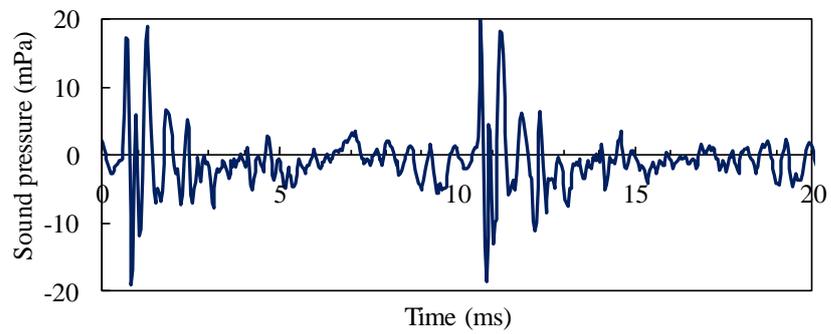


(b) 荷重をかけられた異常および正常接合

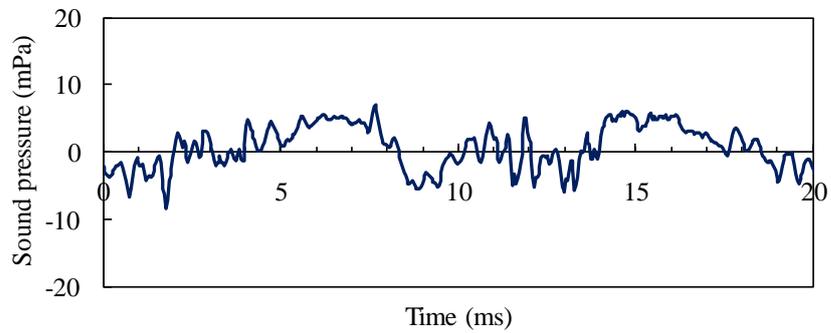
図 6.9 接合部の騒音周波数成分 (磁束密度 1.5T, 50Hz 励磁)



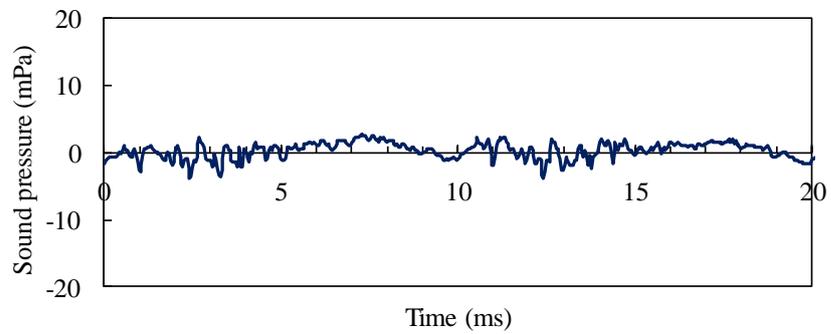
(a) 磁束密度波形



(b) 音圧波形 — 異常接合



(c) 音圧波形 — 荷重を掛けられた異常接合



(d) 音圧波形 — 正常接合

図 6.10 磁束密度と音圧の波形 (磁束密度 1.5T, 50Hz)

図 6.8 の異常接合の騒音レベルでは、1.5T と 1.6T の間に不連続な変化が見られる。この現象を検討するため、1.6T でも音圧波形を測定し、結果を図 6.11 に示す。図 6.10(b)で見られたインパルス音は図 6.11 の I に対応するが、振幅が増大していることがわかる。更に II の位置に別のインパルス音の新たな発生も見られる。これらの変化については、磁束密度の上昇によって鋼板の衝突力や電磁吸引力による振動が増加して空隙を拡張させ、新たに衝突が発生したことが原因と推測される。

図 6.11 では更に、インパルス音 I と II の間にインパルス応答による音が見られ、これと同様の現象は図 6.10(b)でも見られる。インパルス応答は物体がインパルスを受けた後に固有振動数で減衰振動する現象で、鉄心接合部でこの現象が起こり得る場所としては、図 6.7 で示す 1 層目の鋼板の異常接合のために浮き上がっている部分が考えられる。

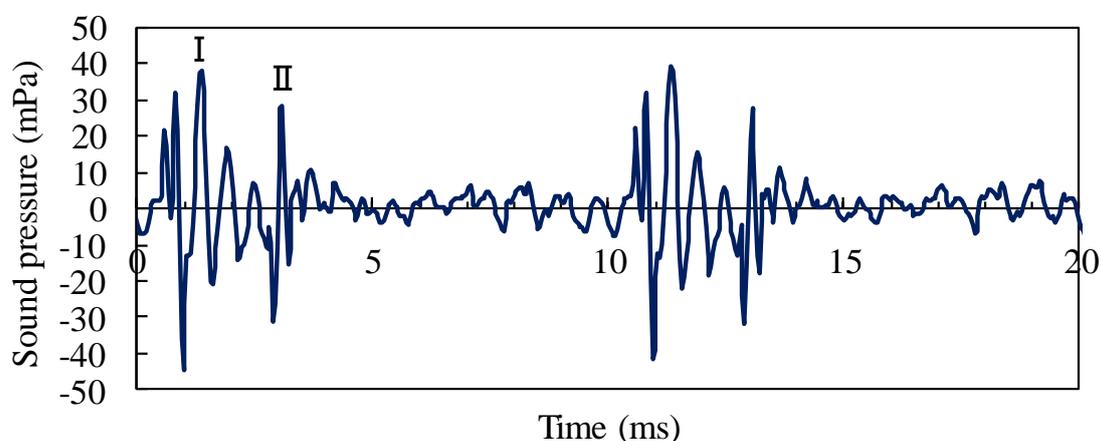


図 6.11 異常接合部の音圧波形 (磁束密度 1.6T, 50Hz 励磁)

6.4 結言

積鉄心の接合部が発する騒音について、3 相モデル鉄心や接合部構造を変更可能な単相モデル鉄心を用いて実験を行った。ここでは、本来は端面で突

合せとなるべき鋼板同士が先端で重なってしまう異常接合について検討を行った。この異常接合では鋼板間に空隙が生じ、通常では見られない騒音増加現象が発生する。今回の検討で下記の知見を得た。

- (1) 異常接合では音圧波形にインパルス音が見られ、それによって騒音レベルが増加する。これは異常接合で生じた空隙内で鋼板同士が電磁吸引力によって衝突して発生すると考えられる。このインパルス音は高次の高調波成分を増加させる。
- (2) 鋼板同士の衝突は、鉄心の磁束密度が特定の値を超えてから開始する場合がある。また、特定の磁束密度から特に強くなる場合もある。それらの場合には、磁束密度の変化に対して騒音レベルが不連続変化を示す。
- (3) 異常接合のインパルス音は接合部に対する加圧によってほぼ消滅するが、騒音レベルはなお正常接合よりも大きい場合がある。これは、正常接合よりも空隙がまだ大きく、電磁吸引力で接合部全体に発生する振動が大きいためと考えられる。
- (4) 鋼板衝突後に発生するインパルス応答振動が原因と思われる減衰音が音圧波形上で見られた。

参考文献

- [6.1] 溝上, 藪本, 久保田:「モデル変圧器による積鉄心の騒音特性挙動の検討」, 電気学会マグネティックス研究会, MAG-03-98 (2003)
- [6.2] B. Weiser, H. Pfützner, and J. Anger, “Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores”, IEEE Trans. on Magnetism, Vol.36, No.5, pp.3759-3777 (2000).
- [6.3] 溝上, 黒崎:「変圧器鉄心接合部での異常ラップによる騒音増加」, 電気学会論文誌 A, Vol.132, No.2, pp.192-197 (2012)

- [6.4] 前島, 叶井:「最近の変圧器低騒音化技術」, 日立評論, Vol.67, No.2, pp.55-60 (1985)
- [6.5] T. Nakata, N. Takahashi, and Y. Kawase, “Magnetic performance of step-lap joints in distribution transformer cores”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.18, No.6, pp.1055-1057 (1982).

第7章 結論

本論文では送配電システムで用いる変圧器の鉄心が発する騒音を取り上げ、その低減と推定を可能とする技術を確立するための検討を行った。鉄心の騒音はその素材である方向性電磁鋼板の磁歪特性や鉄心接合部の構造、鉄心の共振振動などによって影響を受ける。これらが騒音に与える影響を実験によって定量的に示した。また、変圧器設計時に必要となる騒音の推定技術の確立に向けて磁歪や振動を騒音に換算する方法を取り上げ、その精度の検証を騒音の実測結果と比較することで行い、問題点を明らかにした。本研究で得られた成果を各章ごとに要約し、以下に示す。

第2章では本論文全体で一貫して用いる実験方法の検討を行った。また磁歪や振動を騒音レベルに換算する方法について述べた。これらによって得られた成果を以下に示す。

- (1) 騒音評価に用いるモデル鉄心の設置方法を検討し、横置きでは鉄心を置くテーブルの振動が影響するため、縦置きが望ましいことを実験で示した。
- (2) モデル鉄心の騒音測定位置について検討を行った結果、騒音測定位置数は8点以上とする必要があることを示した。
- (3) モデル鉄心騒音の評価精度を上げるためには、鉄心と測定位置の距離を増すことも有効であることを示した。その時の距離減衰には、面音源や線音源での減衰法則がおおよそ成り立つことを確認した。
- (4) モデル鉄心の振動測定法としてレーザー振動計を用いたシステムを開発した。自動測定化によって測定的大幅な省力化が可能となり、測定点数を飛躍的に増加させることができた。
- (5) 磁歪や鉄心の振動を音響理論に基づいて音圧レベルに変換可能な簡易的な騒音レベル換算法を明示した。

第3章では方向性電磁鋼板の圧延方向への圧縮応力が磁歪にもたらす影

響を取り上げ、モデル鉄心を圧延方向に圧縮することによる騒音変化を実測した。また素材特性としての磁歪も圧縮下で測定した。この磁歪特性に騒音レベル換算法を適用して検討した。これらによって得られた成果を以下に示す。

- (1) 圧縮応力は常に騒音レベルを上昇させることがわかった。本検討で用いたモデル鉄心での騒音増加率は約 2dBA/MPa であった。
- (2) 騒音周波数成分の圧縮応力への依存性が調査された。1.3T では、ほとんどの成分が応力増加に伴って上昇し、1.7T では全ての成分が増加することがわかった。
- (3) 磁歪と騒音の関係を圧縮応力によって引き起こされる変化の観点から議論した。検討は磁歪測定結果に騒音レベルへの換算法を適用して行った。Peak-to-peak 磁歪の変化は騒音変化と対応しないが、これは磁歪では支配的である 100Hz 成分が騒音では重要ではないためである。更に 100Hz 成分の圧縮応力への依存性についても、磁歪と騒音の間に傾向の相違がある。他の高調波成分については、磁歪と騒音で圧縮応力による変化の傾向が相似する成分もあるが、dB/MPa で表される増加率は異なる。このことから、圧縮応力による磁歪変化は騒音変化にほとんど対応しないと結論付けられた。
- (4) 圧縮応力によって引き起こされた鉄心の変形は 10dBA 以上の騒音増加を発生させることがわかった。この増加はほとんどの周波数成分に現れた。

第 4 章ではモデル鉄心の締め付け圧力を 0.05MPa から 0.3MPa まで変化させて、振動と騒音を測定して検討した。これらによって得られた成果を以下に示す。

- (1) 鉄心は締め付け圧力の増加と共に剛性が高まり、共振周波数が変化していくとともに共振を起こしやすくなると考えられる。今回用いた鉄心で

は 0.2MPa で共振周波数が 100Hz 付近となり，強い共振振動を起こしたと考えられる。

- (2) 上記の共振の影響は騒音オーバーオール値には現れないことがわかった。但し，騒音の 100Hz には，共振振動の影響が明確に現れている。これは振動周波数が 100Hz と低かったため，聴感補正によって騒音レベルへの影響が無視できるまで下がったためである。
- (3) 鉄心表面の振動を実測して騒音レベルに換算した。その結果，低周波音（100Hz）とそれよりも高周波数の音（300Hz 以上）との相対関係が実測騒音レベルと異なり，低周波音が強調されすぎる傾向となることがわかった。その原因は低周波音の回折と干渉による鉄心の各脚間および表裏面間での音の打ち消しと推測される。
- (4) 振動の加速度レベルも算出し，実測騒音と比較した。その結果は上記の騒音レベル換算法と同様で，低周波音とそれよりも高周波数の音との相対関係が実測騒音レベルと異なり，低周波音が強調されすぎる傾向となった。

第 5 章では鉄心の接合部形式と同時積枚数の変化で生じる騒音差をモデル鉄心によって検討した。また，鉄心磁歪をひずみゲージで測定し，接合部形式によって生じる差も検討した。更にこの磁歪特性と素材の磁歪特性を騒音レベルに換算して検討した。これらによって得られた成果を以下に示す。

- (5) 騒音レベルについては，ステップラップが従来ラップよりも低く，同時積枚数の増加時は，同等あるいは増加することがわかった。
- (6) 鉄心磁歪を騒音レベルに換算して適用して検討を行った結果，ステップラップが従来ラップよりも低い結果となり，更に高調波成分についてもラップ法によって生じる差が実測騒音レベルと同傾向であるため，鉄心磁歪は騒音と一定の関連を示すことが判明した。
- (7) 騒音や鉄心磁歪での接合部形式や同時積枚数による差は基本周波数

(100Hz)ではなく高調波成分で発生しており、高調波の評価が重要であることがわかった。

- (8) 正弦波励磁した単板サンプルによる磁歪は鉄心磁歪の値を大きく下回り、基本周波数成分と高調波成分の大小関係も一致しないことがわかった。この不一致は、鉄心で発生する複雑な磁化条件が原因と考えられる。

第 6 章では鉄心の接合部に関して、端面で突合せとなるべき鋼板同士が先端で重なってしまう異常接合を騒音の観点で検討した。実験では 3 相モデル鉄心に加えて接合部構造を変更可能な簡易モデル鉄心も用いた。これらによって得られた成果を以下に示す。

- (1) 異常接合では鋼板間に空隙が生じるため、通常では見られない騒音増加現象の発生が観測された。異常接合が発生すると音圧波形にインパルス音が見られ、それによって騒音レベルが増加することが判明した。これは異常接合で生じた空隙内で鋼板同士が電磁吸引力によって衝突して発生すると考えられる。このインパルス音は高次の高調波成分を増加させる。
- (2) 鋼板同士の衝突は、鉄心の磁束密度が特定の値を超えてから開始する場合があり、また、特定の磁束密度から特に強くなる場合もあることがわかった。その場合には、磁束密度の変化に対して騒音レベルが不連続変化を示す。
- (3) 異常接合のインパルス音は接合部に対する加圧によってほぼ消滅するが、騒音レベルはなお正常接合よりも大きい場合があることがわかった。これは、正常接合よりも空隙がまだ大きく、電磁吸引力で接合部全体に発生する振動が大きいためと考えられる。
- (4) 鋼板衝突後に発生するインパルス応答振動が原因と思われる減衰音が音圧波形上で見られた。

本研究の実施で得られた成果により、変圧器の設計時に考慮すべき鉄心に

関係する騒音変動要因が実際にどの程度の騒音変化をもたらすかを見積もることが可能となる。加えて、鉄心製造時に発生する可能性のある騒音増加を招く要因が、実際にどの程度の騒音上昇を引き起こすかを見積もることができる。また、変圧器設計時に必要となる騒音レベル推定法について、現在提案されている方法を改善するための指針を得ることが可能となる。更に、鉄心騒音を検討するための実験を行う場合に、より正確な結果を得るための指針を得ることができる。

謝 辞

本研究は岡山大学 大学院 自然科学研究科 元教授 故高橋則雄先生のご指導によって遂行されたものであり、懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心から感謝申し上げると共に、先生のご冥福をお祈り申し上げます。

また、指導の継承をご快諾いただきました岡山大学 大学院 自然科学研究科 船曳繁之教授には博士課程の継続について多大なるご尽力いただき、加えて論文作成についてもご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心から感謝申し上げます。

更に、研究の継続と本論文の作成に当たって懇切なるご助力をいただきました岡山大学 大学院 自然科学研究科 塚田啓二教授、鶴田 健二教授に深く感謝申し上げます。

博士課程での研究遂行と論文作成には新日鐵住金(株) 鉄鋼研究所 電磁鋼板研究部 黒崎洋介部長のご理解とご鞭撻をいただきました。深く感謝致します。また、研究を進める上でご指導とご助力いただきました新日鐵住金(株) 鉄鋼研究所 電磁鋼板研究部、八幡技術研究部、広畑技術研究部の皆様に感謝申しあげます。更に、実験やデータ採取にご尽力いただいた日鉄住金テクノロジー(株) 一貫試験係 磁気特性班、熱処理班の皆様には感謝致します。

旧新日本製鐵(株)でのご在職中に多大なるご指導をいただきました岐阜大学 元教授 岡崎靖雄先生、九州共立大学 元教授 野澤忠生先生、帝京大学 元教授 増井浩昭先生に深く感謝致します。

最後に、在学継続と論文執筆への専心に対し、理解を持って支えてくれた妻子に感謝します。