

氏 名	山 田 盛 一
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 7 年 12 月 13 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 57 年 3 月 学 習 院 大 学 大 学 院 自 然 科 学 研 究 科 物 理 学 専 攻 修 士 課 程 修 了
学 位 論 文 題 目	Mn-Zn フェライトの損失発生機構に関する研究
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 荒 井 賢 一 東 北 大 学 教 授 脇 山 徳 雄 東 北 大 学 教 授 中 村 憲 久

論 文 内 容 要 旨

電子機器の多機能・高性能化と小型化に対する要求は、それらを構成する電子部品の発展を必要とし、磁性材料においても例外ではない。電子機器の駆動に不可欠な安定化電源は、小型化のためにスイッチング周波数の高周波化、及びトランス、インダクター、コンデンサーなどの電磁気材料を小型化することで、発展してきた。この傾向は、FETなどのパワー用半導体の高性能化により更に顕著となりつつある。これらの動向及び要求に答えるため、電源用 Mn-Zn フェライトの高性能化の試みを続けて来た。

より低コアロスの Mn-Zn フェライトを開発するためには、コアロス成分の明確化が不可欠であるが、従来は定性的データしか得られていなかった。よって、本研究では、Mn-Zn フェライトのコアロス特性を左右する材料物性とコアロスの関係を系統的に整理し、励磁条件及び電気的性質・組成等に対するコアロスの性質から、コアロス成分の明確化を試み、その結果を用いて、高周波用材料と低周波用材料を開発し、製品化した。以下に明らかとなった結果を述べる。

第 1 章 緒 言

第 1 章においては、本論文の主題である Mn-Zn フェライトの成り立ちとその発展の歴史を概観し、その用途と求められる特性について述べている。次に電源トランス用 Mn-Zn フェライトの発展の背景をたどり、本研究が必要となる背景と目的を述べたものである。

第 2 章 Mn-Zn フェライトのコアロス特性

第 2 章においては、Mn-Zn フェライトの実用励磁条件におけるコアロス特性を把握し、コアロス解析の基礎を得ることを目的に、電気抵抗が種々異なる Mn-Zn フェライトを用いて、コアロスの励磁条件依存性を広範囲にわたって調べた。その結果、コアロスの周波数に対する勾配は、130kHz 以下の低周波領域では電気抵抗の上昇に伴い低下する傾向を示すが、500kHz 以上の高周波領域では、電気抵抗依存性が顕著で、特に低 B_m の条件において、電気抵抗の上昇に伴い $P_B \propto f^{-2}$ から $P_B \propto f^{-3}$ になり、古典的渦電流損失では説明できない急峻な周波数依存性を示した。このことから、定性的に残留損失の寄与が無視出来ないことを明らかにした。また、コアロスの B_m に対する勾配は、 $B_m < 30\text{mT}$ の範囲では電気抵抗が変化してもほぼ $P_B \propto B_m^{-2}$ で表されるが、 $B_m = 50\text{mT} \sim 100\text{mT}$ の範囲では、電気抵抗率の上昇に伴い $P_B \propto B_m^{-2}$ から $P_B \propto B_m^{-3}$ に変化し、コアロスの主要な成分が渦電流損失からヒステリシス損失に変わることを推定した。

第3章 コアロス成分の分離^{(1), (2), (3)}

第3章においては、交流電気抵抗の周波数特性を定式化し、損失成分として新たに誘電損失を導入することで、交流電気抵抗の性質とコアロスとの関係を把握し、その結果をもとに、励磁磁束密度の変化が透磁率の周波数特性に与える影響を検討することにより、残留損失のコアロスへの寄与を考察した。

そのため、Mn-Zn フェライトの交流電気抵抗を、直流電気抵抗率の大きさに2種類に分類し、直流電気抵抗率の異なる種々の試料を用いて系統的に調べた。その結果、低電気抵抗率の試料が示す誘導的周波数依存性は、直流電気抵抗と複素透磁率の磁気損失項 μ'' を用いることで、測定値と良くフィッティング出来ることを明らかにした。また、高電気抵抗率の試料が示す容量的周波数依存性は、直流電気抵抗と誘電損失項 ϵ'' で表されることを確認した。これをもとに、容量的周波数依存性を示す試料について、誘電損失を含めた形で渦電流損失を定式化した。

これらの渦電流損失を支配していると考えられる交流電気抵抗（抵抗とインダクタンスの直列等価回路から得られる ρ_s 及び抵抗とキャパシタンスの並列等価回路から得られる ρ_p ）の性質を系統的に把握したことで、測定された全コアロス P_B とヒステリシス損失 P_h から、 $(P_B - P_h)$ の周波数依存性が、低電気抵抗試料は $(P_B - P_h) \propto f^2$ に従い、高電気抵抗試料は $(P_B - P_h) \propto f^2 / \rho_p$ にほぼ従うことを、系統的に理解することが出来た。この結果、共鳴周波数以下では、電気抵抗率を大きくすることが誘電損失と渦電流損失をともに低減することになり、コアロス低減に非常に有効であることを明らかにした。

また、透磁率の周波数依存性を、0.2~100mTの広範囲な励磁磁束密度にわたって測定し、高電気抵抗試料においては、2~3MHzの範囲で寸法共鳴を起こすこと、及び、測定される $(P_B - P_h)$ は f^2 / ρ_p より急峻な周波数依存性を示すことから、寸法共鳴による残留損失の寄与が無視できないことを明らかにした。

第4章 コアロス成分の実験的分離^{(4), (5)}

第4章においては、コアロス成分の定量的分離を目的に、Mn-Znフェライトの Fe^{2+} イオン量及びカチオン欠陥量などの不定比性が種々異なる焼結体を作製し、不定比性とコアロス及び電気抵抗との関係を整理した。その結果、ヒステリシス損失が最小値になる温度 T_{min} と $(P_B - P_h)$ 及び電気抵抗率が Fe^{2+} イオン量に強く相関を持つことを明らかにし、 T_{min} でのコアロスと電気抵抗の測定値から、図1に示すように、 $(P_B - P_h) = k / \rho_p + b$ なる相関関係を見出した。これにより、従来まで明らかにされていなかった、渦電流損失（これは誘電損失を含む）と残留損失を定量的に求めることが出来ることを初めて明らかにした。その結果、従来は実用的励磁条件では残留損失は無視できると考えられていたが、十分に高電気抵抗化された試料においては、実用的励磁条件である100mTにおいて、図2に示すように500kHzで約50%、1MHzでは約90%の残留損失が発生することを明らかにした。

また、残留損失の周波数依存性は励磁磁束密度 B_m が20mTより小さい範囲では $P_r \propto f^{4.4 \sim 4.6}$ のような急峻な依存性を示し共鳴型であること、及び、 B_m が100mTでは $P_r \propto f^{2.1}$ で表され緩和型に変化することを明らかにした。

このような周波数依存性の変化は、磁壁移動の磁化過程を仮定することで、磁壁内スピンの反転周波数が励磁磁束密度に比例すること、及びその結果として、励磁磁束密度の上昇に伴い磁壁内スピンの反転周波数が自然共鳴周波数に近づくと推定できるため、自然共鳴による損失が発生すると考えることで説明できることを示した。よって、Mn-Znフェライトの残留損失発生機構として、磁壁内スピンの自然共鳴モデルを提案した。また、スピネル相の組成に対する残留損失の依存性を求めた結果、図3に示すように残留損失は Fe イオン量の増大に伴い大きくなることを明らかにした。残留損失の発生機構とスピネル相の組成依存性の結果から、残留損失の低減方法として、結晶粒の微細化による

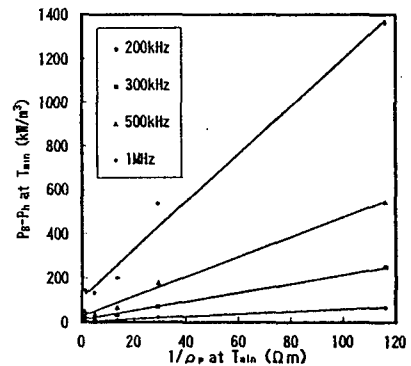


図1. T_{min} でのコアロスと電気抵抗の相関

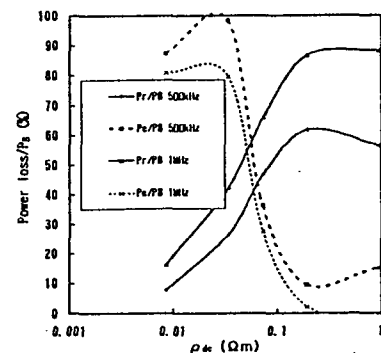


図2. 渦電流損失及び残留損失の場合

単磁区化及びスピネル相の高電気抵抗化による渦電流の低減が有効な方策であることを見出した。

第5章 電源トランス用低コアロス材の開発

第5章においては、第2章から述べてきたコアロスの発生に関する知見に、各種添加物及び焼結体組織制御方法の検討結果を加え、材料の高特性化を試み、1 MHz 対応材及び100kHz 対応材を開発した結果について述べている。

共鳴周波数以下では、電気抵抗を大きくすることがコアロス低減に非常に有効であるとの知見にもとづき、 SiO_2 及び CaO 添加量の最適化と新規な添加物を探索した結果、 HfO_2 を SiO_2 及び CaO と同時添加することで、従来まで知られていた添加物に比べ約2倍の高電気抵抗が得られることを見出した。この添加物を用いることにより、図4に示すように500kHz~1 MHz の周波数範囲で、従来材の1/2~1/3にコアロスを低減したB40材を開発した。

また、以上述べてきたように、粒界層成分の選択と焼結過程での粒界層形成の制御により渦電流損失の低減は、十分に可能となった。このような技術と合わせて、使用条件に応じた最適組織形成の技術を確立することで、用途に応じたあらゆる材料を開発することが可能になると考える。このような見地から、比較的的低周波である100kHz~200kHz 対応電源トランス材の開発を行った。

そのために、焼結過程での組織形成に与える各種焼結条件の効果を調べた。その結果、比較的早い昇温速度と1 vol%程度の酸素分圧下で昇温することで、ポアが微細になり、結晶粒内にポアが少ない状態で結晶粒を成長させることが出来ることが分かった。また、最適な Fe^{2+} イオン量を得るためには、焼結保持中の酸素分圧のみならず、冷却過程での温度-酸素分圧の制御が必要である。

Fe^{2+} イオンの酸化還元反応から得られる、熱平衡状態での温度-酸素分圧直線の冷却速度依存性を調査し、冷却速度に応じた最適な温度-酸素分圧直線を見だし、実用的な連続炉においても良好な磁気特性が得られる焼結技術を確立した。その結果、従来材に比べコアロスを40%低減したBH1材を開発することが出来た。

第6章 結 論

結論においては、本研究で解明された事項について述べている。

- (1) 電気抵抗が種々異なる Mn-Zn フェライトについて、コアロスの励磁条件依存性を広範囲にわたって調べ、高電気抵抗化により古典的渦電流損失では説明できない $P_B \propto f^3$ に近い急峻な周波数依存性を示すことを確認し、定性的に残留損失の寄与が無視出来ないことを明らかにした。
- (2) Mn-Zn フェライトの交流電気抵抗を、直流電気抵抗率の大きさを2種類に分類し、直流電気抵抗率の異なる種々の試料を用いて系統的に調べ、渦電流損失を支配していると考えられる交流電気抵抗（抵抗とインダクタンスの直列等価回路から得られる ρ_s 及び抵抗とキャパシタンスの並列等価回路から得られる ρ_p ）の性質を系統的に把握した。その結果、誘電損失と定式化し共鳴周波数以下では、電気抵抗率を大きくすることが誘電損失と渦電流損失をともに低減することになり、コアロス低減に非常に有効であることを明らかにした。
- (3) 透磁率の周波数依存性を、0.2~100mT の広範囲な励磁磁束密度にわたって測定し、高電気抵抗試料においては、2~3 MHz の範囲で寸法共鳴を起こすこと、及び、測定される $(P_B - P_h)$ は f^2 / ρ_p より急峻な周波数依存性を示すことから、寸法共鳴による残留損失の寄与が無視できないことを明らかにした。
- (4) Mn-Zn フェライトの Fe^{2+} イオン量及びカチオン欠陥量などの不定比性とコアロス及び電気抵抗との関係を整理し、 T_{\min} での測定値から、 $(P_B - P_h) = k / \rho_p + b$ なる相関関係を見出し、渦電流損失（これは誘電損失を含む）と残留

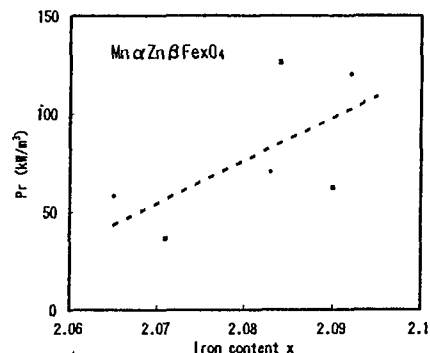


図3. 残留損失の Fe イオン量依存性

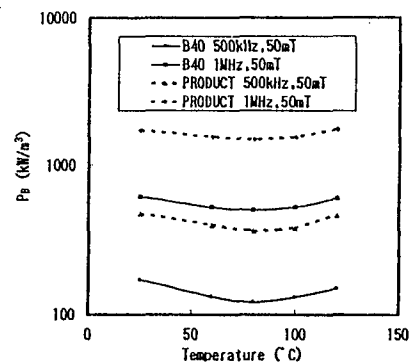


図4. 開発材 (B40) と従来材のコアロス

損失を定量的に求めることが出来ることを初めて明らかにした。

- (5) 実験値から求めた残留損失の周波数依存性から、残留損失の発生機構として、磁壁移動に伴う磁壁内スピンの自然共鳴モデルを提案した。また、スピネル相の組成に対する残留損失の依存性を求めた結果、残留損失はFeイオン量の増大に伴い大きくなることを明らかにし、残留損失の低減方法として、結晶粒の微細化による単磁区化及びスピネル相の高電気抵抗化による渦電流の低減が有効な方策であることを見出した。
- (6) 新規な添加物HfO₂を見出したことにより、500kHz～1MHzの周波数範囲で、従来材の1/2～1/3にコアロスを低減したB40材を開発することが出来た。
- (7) 焼結過程での組織形成に与える各種焼結条件の効果を明らかにし、また冷却速度に応じた最適な温度-酸素分圧直線を見出したことで、従来材に比べコアロスを40%低減したBH1材を開発することが出来た。

発表論文

- (1) S. Yamada, E. Otsuki and T. Otsuka; "AC RESISTIVITY OF Mn-Zn FERRITES", Proceedings of The 13th International Telecommunications Energy Conference, 703-708, 1991
- (2) S. Yamada, E. Otsuki and T. Otsuka; "Ac Resistivity and Power Loss of Mn-Zn Ferrites", IEICE Trans. Commun. vol. E75-B (11), 1192-1198, 1992
- (3) S. Yamada and E. Otsuki; "Ac Resistivity and Power Loss of Mn-Zn Ferrites", FERRITES, Proceedings of ICF-6, 1151-1154, 1992
- (4) 山田盛一, 大槻悦夫; "電源用Mn-Znフェライトの渦電流損失解析", 日本応用磁気学会誌, 19, 421-424, 1995
- (5) S. Yamada and E. Otsuki; "Analysis of Eddy Current Loss in Mn-Zn Ferrites for Power Supplies", IEEE Trans. on Magn. to be published in Sept. '95

診 査 結 果 の 要 旨

スイッチング電源は、高効率で小形化が可能であることから電子機器の安定化電源として広く用いられており、その効率は主にトランスとスイッチング用半導体素子によって決定される。スイッチング電源用トランス材料としては一般に低コアロス・高透磁率特性を有する Mn-Zn フェライトが使用されているが、その更なる低コアロス化および高周波化の研究は、今後一層の電源の高効率化、小形化をはかるためには極めて重要である。しかしながら従来の Mn-Zn フェライトの材料開発は、結晶粒界に高電気抵抗層を形成することにより渦電流損失の低減をはかることを唯一の指針として進められ、コアロスの発生機構に関する研究はあまりなされていない。

本論文は、Mn-Zn フェライトのコアロス発生機構を励磁条件、温度条件等を種々変えて詳細に検討することにより、コアロス低減のための指針を明らかにしたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒言で、Mn-Zn フェライト開発の歴史的背景、コアロス発生機構に関する研究の現状および研究目的を述べている。

第 2 章では種々の組成比をもつ Mn-Zn フェライトのコアロスの周波数および励磁磁束密度依存性を検討し、ヒステリシス損失および渦電流損失の励磁条件依存性と電気抵抗依存性を明らかにしている。また、500kHz 以上の周波数帯域においては、従来ほとんど重要視されていなかった残留損失が無視できなくなることを述べている。

第 3 章では Mn-Zn フェライトの交流電気抵抗の周波数依存性から、高電気抵抗を示す試料では結晶粒界層の誘電損失を渦電流損失の一部として取り込むことにより、渦電流喪失の周波数依存性がよく説明できることを見出している。また、Mn-Zn フェライトの寸法共鳴が残留損失の一部となっていることも明らかにしている。これは注目すべき知見である。

第 4 章では Fe^{2+} イオン量およびカチオン欠陥量が異なる種々の Mn-Zn フェライトの、コアロスおよび電気抵抗を検討した結果について述べている。すなわちヒステリシス損失が最小となる温度は Fe^{2+} イオン量によってほぼ定まること、残留損失は Fe^{3+} イオン量の増加に伴い大きくなること、また残留損失には磁壁内のスピンの自然共鳴による損失が含まれることを明らかにしている。さらに残留損失低減方法としては結晶粒の微細化による単磁区化、およびスピネル相の高電気抵抗化が有効であることなども述べている。これは材料開発にとって有用な成果である。

第 5 章では前章までに得られた知見をもとに、Mn-Zn フェライトに SiO_2 、 CaO および HfO_2 を微量添加し、焼成条件を選ぶことにより、従来の 2 倍の高電気抵抗を有する Mn-Zn フェライトが得られ、500kHz～1 MHz の周波数範囲でコアロスが $1/2$ ～ $1/3$ に低減したことを述べている。

第 6 章は総括である。

以上要するに本論文は、スイッチング電源用 Mn-Zn フェライトのコアロスおよび電氣的・磁氣的特性を検討し、コアロスの原因の解明をはかるとともに、低コアロス特性を有する Mn-Zn フェライトの作成に成功したもので、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。