

電源トランス用高飽和磁束密度低損失 MnZn フェライト

MnZn Ferrites with Low Loss and High Flux Density for Power Supply Transformer

藤田 明 FUJITA Akira JFE スチール スチール研究所 鉄粉・磁性材料研究部 主任研究員(課長)・Ph. D.
福田 豊 FUKUDA Yutaka JFE フェライト 倉敷工場 製造課製造係 課長
西澤慶太郎 NISHIZAWA Keitarou JFE フェライト 技術部 課長
戸川 治朗 TOGAWA Jirou 戸川技術研究所

要旨

フライバック方式のスイッチング電源用 MnZn フェライトコアには高飽和磁束密度, 低損失であることが要求される。従来の三元系では, Fe_2O_3 量の増加にともない飽和磁束密度は高くなったが, 鉄損が最小となる温度が低温側にシフトし, 100°C における鉄損が著しく増大した。NiO を三元系に加えると, 鉄損が最小となる温度は逆に高温側にシフトした。NiO 量を増やすことにより, この温度を変えずに, Fe_2O_3 量を増やすことが可能になる。その結果, 100°C の飽和磁束密度を 20% 高めることができ, 新材質 MB1H の開発に結びついた。この材質を用いることにより, 同出力のトランスの体積を 30% 小さくすることができた。

Abstract:

New MnZn ferrite with high saturation flux density, B_s was developed as a material suitable for transformer cores built into fly-back mode power supplies. Addition of NiO into the ternary Mn-Zn-Fe-O system requires higher Fe content to keep the temperature of minimum iron loss at around 100°C , compared to the original composition. This modification results in enhancement of B_s at 100°C . The new product "MB1H" was realized by choosing optimal composition so that B_s becomes high and iron loss is moderate. The transformer made with MB1H, designed to generate the same output power as ones with conventional materials, has proved to increase saturation flux density 20% at 100°C and to reduce 30% in volume.

1. はじめに

一般家庭電気製品, OA 機器, 産業機器などで直流電源を必要とする機器の電源部分には, 50/60 Hz の商用電源を直流電圧に変換して供給するためのスイッチング電源が組み込まれている。このスイッチング電源に使われるトランスの磁心材料には小さい磁界で磁化され, かつコア自体の損失(鉄損)が小さい, いわゆる軟磁性であることが要求される。軟磁性材料は金属系と酸化物系に分けられる。金属系材料は電気抵抗が小さいために高周波で駆動した場合には, 渦電流による損失が大きくなる。この電源回路においてトランスは, 数十~数百 kHz 程度の高周波で駆動されるため, 渦電流損失抑制の観点から, 電気抵抗の高い酸化物系の軟磁性材料, 主に MnZn フェライトが使われている。JFE スチールのグループ企業である JFE フェライトでは, このような電源トランスに適した低損失 MnZn フェライト

コアとして各種の商品を販売している。

しかしながら, これらの MnZn フェライトは金属系軟磁性材料と比べると飽和磁束密度が低く, 同じ磁束を造り出すためには, 体積の大きなコアが必要となる。また, 従来の MnZn フェライトは, 金属系に比べてキュリー温度が低く 250°C 以下であるため, トランスの設計動作温度である 80°C から 100°C 付近では, 室温の状態に比較して, さらに磁束密度が減少する。

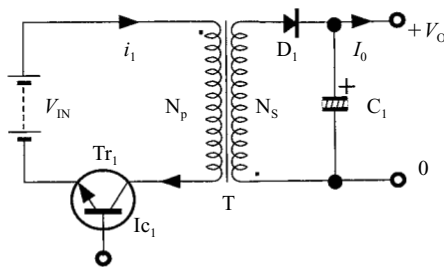
そこで今回, MnZn フェライトの主成分 $\text{MnO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ の三元系に NiO を加えることにより, 飽和磁束密度の増加を試みた。

本稿では, 始めにスイッチング電源に求められる特性について述べ, その中で特に重要である鉄損と飽和磁束密度に影響を及ぼす要因について述べる。特性向上のために, 主成分組成を変更し, NiO を加えた実験結果を述べる。最後に, 飽和磁束密度向上の効果を実形状のコアを試作して評価した結果について述べる。

2. スイッチング電源用フェライトコアに求められる特性

ソフトフェライトを始めとする軟磁性材料は、トランス磁心に用いる場合、巻線を施して電流を流すことにより磁性体としての機能を発現する。自身で磁界を発生する永久磁石材料と異なり、その用いられ方により要求特性はさまざまである。AC100 Vを入力とするスイッチング電源だけでも、絶縁型と非絶縁型があり、また消費電力量により、採用される大きさ、形状や回路方式が異なってくる。一般に出力が大きくなるほどトランスのコアサイズも大きくなる。本稿のフェライトコアの用途として対象としているのは、コンバータ方式のうち、出力が50~60 W程度以下の小容量の電源に用いられるフライバック方式の電源である。典型的な例としては、ノート型パーソナルコンピュータの電源アダプタに組み込まれているトランスである。

フライバック方式による電源回路の基本構成を Fig. 1 に示す¹⁾。トランジスタ Tr_1 が ON の状態でトランスの一次側巻線に電力が蓄えられ、 Tr_1 が OFF となるとトランス二次側巻線に電流が流れ、トランス内に蓄えられていたエネルギーが出力側 (V_0) に放出される。このサイクルを繰り返すことにより、安定した直流電圧を供給している。飽和磁束密度の異なるフェライトコアの B - H カーブを Fig. 2 に示した。点線のカーブで示したコアに比べて飽和磁束密度の高いコア(実線)の方が、第一象限の細い線で示した実動状



Tr_1 : Transistor, T: Transformer, D_1 : Diode, C_1 : Capacitor, V_{IN} : Input voltage, N_p : Primary winding, N_s : Secondary winding

Fig. 1 Schematic diagram of electric circuit for flyback converter

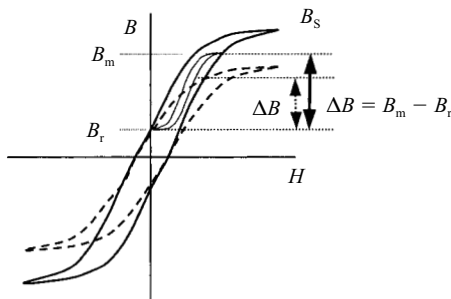


Fig. 2 B - H curves of Mn-Zn ferrite cores (Small curve in the first quadrant refers to the curve in practical drive.)

態における B の駆動範囲 (ΔB) を大きくできる。フライバック方式のような、トランスにエネルギーが一時的に蓄えられる方式においては、エネルギー密度が高められるため有利である。一方、 ΔB を大きくするには B - H カーブの縦軸と交わる値も小さくしなければならない。これは残留磁束密度 B_r と呼ばれ、磁界をゼロにしてもコアに磁束が残っている状態を示し、この値が大きいほどヒステリシスが大きい、すなわち損失が大きいことを表している。トランスの最大磁束密度を B_m とすると、 ΔB は $B_m - B_r$ となる。

ここで、フライバック方式において、 ΔB (T) の効果を整理してみると、トランスの一次側の巻線数 N_p は、

$$N_p = (V_{IN} \cdot t_{ON}) / (\Delta B \cdot A_e) \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる¹⁾。ここで、 V_{IN} は入力電圧 (V)、 t_{ON} はトランジスタの ON 時間 (s)、 A_e はコアの断面積 (m^2) である。入力電圧が一定の場合、ON 時間を短くするか、あるいは分母である ΔB と断面積 A_e を大きくすると、巻線数が少なくなる。ON 時間を短くすることは、トランジスタのスイッチング周波数を高めることであるが、フライバック方式の場合、50~100 kHz で駆動されるため限界がある。これらのことを考慮すると、 ΔB を大きくすることが、巻線数が一定でも、断面積 A_e を小さくできるため、トランスのサイズを小さくする現実的な方法である。また、断面積を変えない場合でも ΔB が大きければ巻線数を少なくでき、これによっても小型化できる。

トランスの温度上昇は、コア自体の損失(鉄損)による発熱と、巻いた銅線のジュール熱による発熱(銅損)によるものである。コア自体の特性を変えずに、トランスを小型化した場合は、必然的に巻線が占める空間も小さくなり、銅線の線径を細くする必要があり、結果的に電気抵抗が高くなり銅損が増大する。 ΔB を大きくすることにより巻線数を減らすことが可能となれば、銅線の線径を変えずに省スペース化できる。一方、 ΔB を高くしても損失の大きなコアでは、鉄損として発熱し、その結果、トランスの温度が上昇する。したがって、低損失であるという条件も無視できない。ただし、駆動周波数が低くなるにつれて鉄損は周波数のほぼ 2 乗に比例して低下する。フライバック方式では、駆動周波数が 50~100 kHz 程度であるため、極限まで損失を下げる必要はないと見なされる。

したがって、フライバック方式で用いられる場合に MnZn フェライトに要求される特性は、まず飽和磁束密度が高いこと、次に損失が低いことの 2 点である。

3. 開発方針

MnZn フェライトの飽和磁束密度を高めるには、(1)焼結密度を高める、(2)スピネル構成イオンの磁気モーメントの

総和を大きくする、(3)キュリー温度を高めるなどの手段が考えられる。

焼結密度を高めることにより、磁束密度が向上することは明らかであり、このためには、最適な焼成条件を選択すること、微量添加成分の種類と量を最適化することが重要となる。

MnZn フェライトの主相であるスピネルは、Fig. 3 で示すように、結晶的に等価な A, B サイトに構成イオンである、Mn, Zn, Fe が分布しており、その周りを酸素が取り囲んでいる。A, B 各サイトの磁性イオンが持つ磁気モーメントは、酸素を介した超交換相互作用により平行を保ちつつ逆向きに配列している。したがって、各サイトの磁気モーメントは一部打ち消し合っており、酸化物磁性材料が金属系に比べて飽和磁束密度が低い原因となっている。磁性イオンが A, B サイトをどう占めるかにより、全体の磁気モーメント、ひいては飽和磁束密度が決まる。すなわち、飽和磁束密度は主成分組成でおおよそ決まると言える。

一般的な金属磁性材料と同様に、スピネル化合物の飽和磁束密度は温度の上昇にともない低下する。キュリー温度が高いものは、その低下の度合いが少なく、100°C での飽和磁束密度を高く維持できる。キュリー温度は、熱エネルギーに対する超交換相互作用の強さを意味し、これも主成分組成によりほぼ決まる。すなわち、(2)と(3)においては、主成分組成の選択がきわめて重要となる。

MnO-ZnO-Fe₂O₃ 三元系においては、磁気異方性定数 K_1 がゼロで飽和磁歪定数 λ_s が小さい領域が存在する²⁾。透磁率の高い材質にはこの領域が主成分組成として採用される。従来の電源用 MnZn フェライトの主成分組成には、100°C 付近で低損失となるよう、この温度で磁気異方性定数 K_1 と飽和磁歪定数 λ_s が小さくなる領域である、Fe₂O₃ = 52~54 mol %, ZnO = 12~14 mol %, 残部 MnO の組成が選ばれる。主成分組成において、Fe₂O₃ 量を増やすと、飽和磁束密度が高くなる傾向が認められるが、鉄損が最小となる温度も低温側にシフトする。Fe₂O₃ 量を一定にして ZnO の量を変えた場合も鉄損が最小になる温度が変化する。鉄損の温度依存性は大きいため、鉄損が最小とな

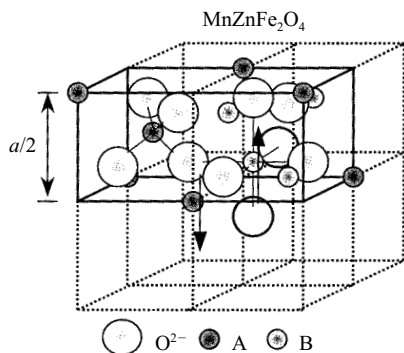


Fig.3 Crystal structure of spinel

る温度と、トランスの動作温度を合致させる必要がある。したがって、飽和磁束密度を高めるには、MnO-ZnO-Fe₂O₃ の三元系で、Fe₂O₃ をできる限り増やし、かつ損失が最小となる温度が100°C 付近となる組成を見出すことが重要である。

一方、三元系に新たな磁性イオンを加えることにより、MnZn フェライトの特性を変えることも考慮すべきである。少量の Co²⁺ を加えることにより、鉄損の温度依存性を顕著に小さくできた例³⁾ に見られるように、スピネル格子のあるサイトを新たな磁性イオンが占めることにより、大きな変化が引き起こされることも期待できる。Co²⁺ は飽和磁束密度を高める効果はなかったため、磁性を有する第四イオンとして Ni²⁺ を選択し検討した。

4. 鉄損温度特性、飽和磁束密度に及ぼす主成分組成の影響

4.1 実験方法

MnZn フェライトコアは通常の粉末冶金的方法により作製した。Fe₂O₃, Mn₃O₄, ZnO, あるいは NiO の原料を混合、仮焼した粉に SiO₂, CaCO₃ などの微量添加物を加えて粉碎し、成形、焼成した。試料の形状は、外径 31 mm, 内径 19 mm, 厚さ 7 mm のトロイダルコアである。

組成は以下の水準を選択し、すべての場合において残部を MnO とした。

- (1) ZnO 量 : 10 mol%, Fe₂O₃ 量 : 53~56 mol%
- (2) ZnO 量 : 4~16 mol%, 90~100°C 付近で鉄損が最小となる Fe₂O₃ 量
- (3) ZnO 量 : 9.4 mol%, NiO 量 : 0.0~0.8 mol%, Fe₂O₃ と NiO の合計は 53.6 mol%
- (4) ZnO 量 : 10 mol%, Fe₂O₃ 量を 53.5, 54.9 mol%, NiO : 3 mol%
- (5) ZnO 量 : 10 mol%, NiO : 0~8 mol%, 90°C 付近で鉄損が最小となる Fe₂O₃ 量

単位体積あたりの鉄損 P_{cv} は、100 kHz, 200 mT の正弦波励磁で、交流 BH アナライザ(岩崎通信機(株)製 SY-8216)を用い、-30~140°C の温度範囲で測定した。

飽和磁束密度は、トロイダルコアに 1 次 20 turn-2 次 40 turn の巻線を施して直流 BH ループトレーサー(理研電子(株)製)を用い、室温から 140°C の温度範囲で、1200 A/m の磁界で測定した。

4.2 結果および考察

4.2.1 三元系材料の飽和磁束密度および鉄損温度依存性

MnZn フェライト三元系組成において、Fe₂O₃ 量を変えた場合、Fe₂O₃ 量の増加にともない、Fig. 4 に示すように 100°C における飽和磁束密度は単調に増加する。一方、鉄

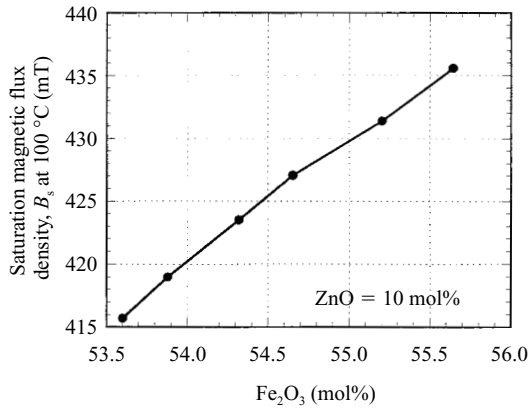


Fig. 4 Saturation magnetic flux density, B_s at 100°C in MnZn ferrites with 10 mol% of ZnO

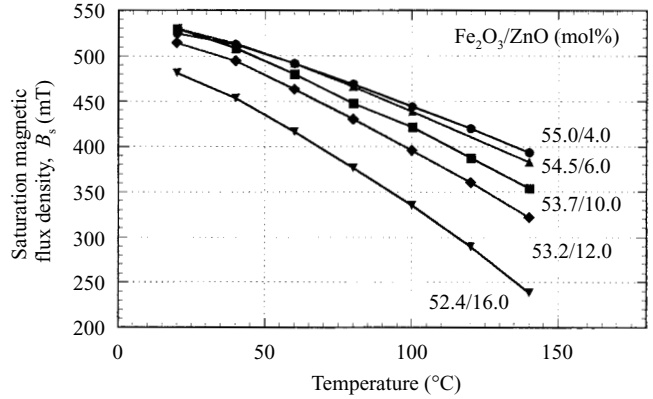


Fig. 6 Temperature dependence of saturation magnetic flux density in MnZn ferrites with various Fe_2O_3 and ZnO contents

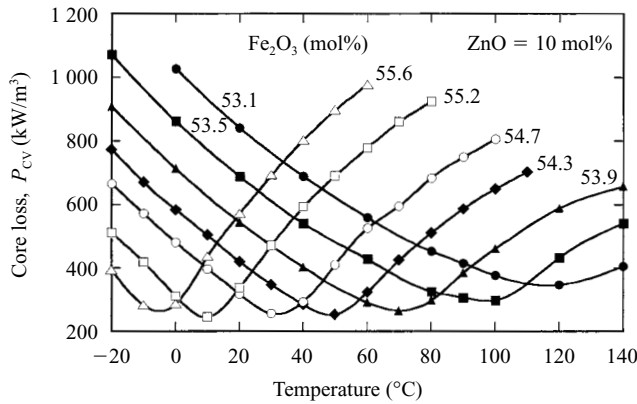


Fig. 5 Temperature dependence of core loss in MnZn ferrites with various Fe_2O_3 contents at 100 kHz and 200 mT

損が最小となる温度は Fe_2O_3 量の増加にともない低温側にシフトする。**Fig. 5** で明らかなように、高い飽和磁束密度が得られる $Fe_2O_3 = 55.6$ mol% では、トランスの動作温度である 100°C 付近で鉄損は著しく増大して 1000 kW/m^3 を超える。したがって、鉄損による発熱のためトランスの温度が上昇し、さらに鉄損が増大して著しく発熱するおそれがある。

これらの結果は、ZnO 量が 10 mol% のときの結果であるが、 Fe_2O_3 量を一定にして ZnO 量を増やした場合も、鉄損が最小となる温度は低温側にシフトする³⁾。したがって、ZnO 量と Fe_2O_3 量を調整することにより、鉄損が最小となる温度が変わらない組成を選択することができる。ZnO 量を変えた場合に、鉄損が最小となる温度が 90~100°C になるように Fe_2O_3 量を選択した組成で、飽和磁束密度の温度変化を比較したものが **Fig. 6** である。ZnO 量を減らして Fe_2O_3 量を増やすことにより、測定した全温度範囲で飽和磁束密度は高くなっている。ZnO 量を 4.0 mol% まで減らすことにより、100°C おける飽和磁束密度は 450 mT 付近まで増加するが、増加分は小さくなっており、さらに ZnO 量を減らすことによる伸びは期待できない。ZnO が少ない組成では鉄損温度変化が急峻になるなどの問題もある。

4.2.2 NiO 含有効果

主成分三元系の組成に新たに NiO を加えることを検討した。Ni イオンは 2 価になると考えられるので、鉄損の温度変化、すなわち磁気異方性定数の温度変化に大きな影響を与える Fe^{2+} と置き換える形で組成を選択した。結果は、**Fig. 7** に示したように、NiO 量を増やすにしたがって鉄損が最小となる温度が高温側にシフトしていく。したがって、100°C 付近における鉄損は増加する。鉄損が最小となる温度を 100°C に戻すためには、 Fe_2O_3 量を増やす必要がある。逆に言えば、飽和磁束密度が高くなることが期待される Fe_2O_3 の多い組成において、NiO を加えることにより鉄損が最小となる温度を高めることができることを示唆している。100°C 付近で鉄損が最小となる組成において Fe_2O_3 量を 53.5 から 54.9 mol% に増やしたところ、20°C で鉄損が最小となった。**Fig. 8** は、この組成において、NiO を 3 mol% 含むことにより 100°C 付近に調整した例である。この一連の温度依存性の変化は、CoO を含むことにより、鉄損の温度変化を変えた場合に似ており、磁気異方性定数 K_1 の温度変化に因ると考えている。 K_1 は低温では大きな負の値となり、温度が高くなるにしたがい上昇してゼロとなり、さらに高温の領域で正の値となり上昇する。 $K_1 = 0$ となる温度で鉄損が最小となる。主成分組成の Fe_2O_3 量を増やした場合、 Fe^{2+} が K_1 に対して正に寄与し、その結果 $K_1 = 0$ となる温度は低温にシフトする。NiO を含む場合は、逆に Ni^{2+} が負の方向に寄与する。したがって、 Fe^{2+} と NiO の量を調整することにより、100°C 付近で $K_1 = 0$ にすることができると考えられる。

これらの結果を踏まえて、鉄損が最小となる温度を 100°C 付近となるよう、NiO を加えた四元系で組成比を調整して、それらの飽和磁束密度の温度依存性を調べた。**Fig. 9** に示したように、NiO = 4 mol% で 100°C における飽和磁束密度は 450 mT を超えている。それ以上の含有量では 470 mT 付近まで増加するが、室温付近では NiO 量を増すにつれ低下し始める。より高い温度領域では温度に対

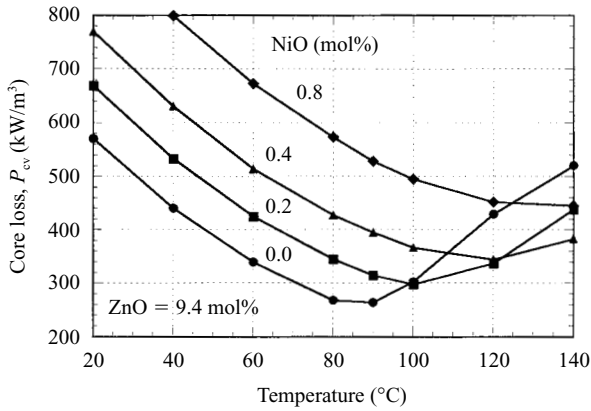


Fig. 7 Temperature dependence of core loss in MnZn ferrites with various NiO contents at 100 kHz, 200 mT

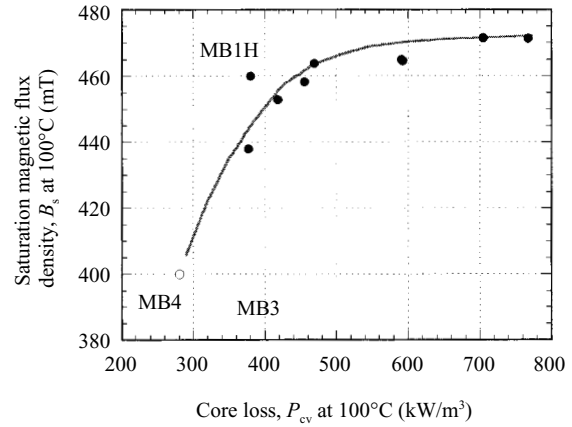


Fig. 10 Plots of core loss at 100 kHz and 200 mT and saturation magnetic flux density at 100°C in MnZn ferrites

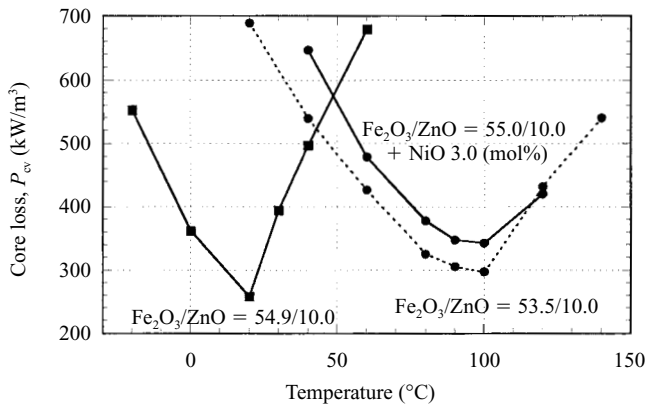


Fig. 8 Temperature dependence of core loss in MnZn ferrites with various Fe₂O₃ and NiO contents at 100 kHz and 200 mT

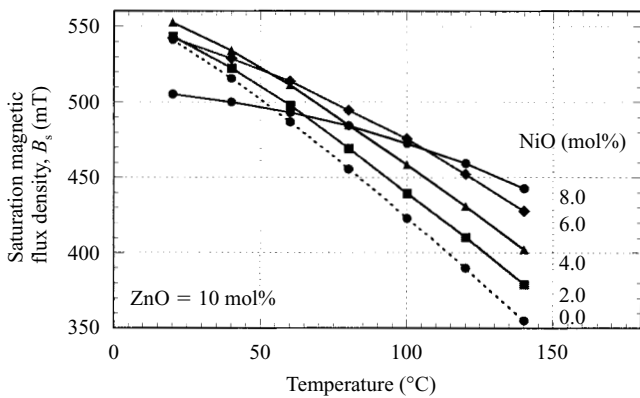


Fig. 9 Temperature dependence of saturation magnetic flux density in MnZn ferrites with various NiO contents

する飽和磁束密度の低下が小さく、NiO含有によりキュリー温度が上昇したものと考えられる。このようにNiO量が8 mol%までの組成物について、100°Cにおける鉄損と飽和磁束密度の値をプロットすると、Fig. 10に示したように、相反する関係となった。すなわち、磁束密度が高くなる組成では鉄損は増大し、鉄損が低下する組成では磁束密度は大きく低下してしまう。これは、鉄損を決定している要因の一つの磁歪定数が、NiOを含み、Fe₂O₃を増やし

Table 1 Comparison of properties of MB3 and MB1H

Material		MB3	MB1H
Saturation magnetic flux density at 1 200 A/m (mT)	23°C	510	540
	100°C	390	460
Core loss* (kW/m ³)	23°C	650	980
	60°C	440	600
	100°C	350	380
Curie temperature (°C)		215	300

* 100 kHz and 200 mT

た組成では、最適組成から離れて磁歪が大きくなっているためと考えられる。飽和磁束密度が470 mT以上となる組成では、その増加分は小さいにもかかわらず、鉄損が著しく増大する。したがって、鉄損と飽和磁束密度とのバランスのとれた組成は、400 kW/m³、460 mT付近と考えられる。この付近の組成を選択し、新材質MB1Hとして商品化した。また、組成が四元系となり、Fe₂O₃を多く含む組成となっていることから、最適焼成条件、すなわち焼成温度や雰囲気酸素濃度がこれまでの組成において最適となる条件と異なっていると考えられる。この最適焼成条件を選択することにより、鉄損が低下し、かつ焼結密度も高くなり、最終的にはTable 1に示す特性が得られた。

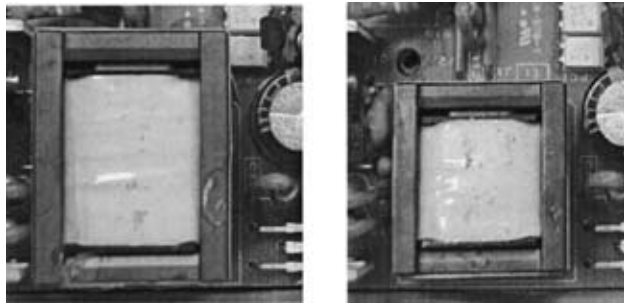
5. MB1H材を用いたトランスの試作

4章で述べたように、飽和磁束密度が高いMB1H材を、フライバック方式のスイッチング電源に用いた場合の性能について、従来材のMB3材を用いた場合と比較した。市販の電源を入手し、トランス部分をMB3材、MB1H材でそれぞれで作製したものに置き換えた。インダクタンスの値が同じになるように、コアサイズ、巻線数をTable 2のように設定し、コア中脚部のギャップを調整した。

MB1H材はMB3材に比べると飽和磁束密度が20%高く、MB3材を使用したときの270 mTに対して350 mTと、ΔBが30%大きくとれる。このことから、(1)式より断面積を

Table 2 Shape and dimension of cores, incremental magnetic flux density, and winding condition of transformers

Material	Core type	Cross sectional area (mm ²)	Volume (mm ³)	ΔB (mT)	Primary winding	Secondary winding
MB1H	EEPC-25D	41.5	2 340	340	$\phi 0.30 \times 2 : 70$ turns	$\phi 0.60 \times 2 : 7$ turns
MB3	EEPC-27D	48.9	3 480	270	$\phi 0.35 \times 2 : 75$ turns	$\phi 0.80 \times 2 : 8$ turns



(1) MB3 EEPC-27D (19.2 g) (2) MB1H EEPC-25D (13.7 g)

Photo 1 Transformer using MB3 (1) and MB1H (2) designed to show the same output power

小さくすることが可能となり、Photo 1 のように、MB3 材の EEPC-27D コアに対して、MB1H 材では EEPC-25D コアにすることができた。Table 2 に示したように、コア断面積で 20% 減、体積としては 30% 減となっている。また、巻線数も MB3 材に比べると少なくすることができた。また、トランス稼働時における温度上昇試験の結果は、コア部分、巻線部分ともに、両トランスの差は 2°C 未満であった。なお、電源の変換効率はコア材質を置き換えることにより、69.9% から 70.2% まで 0.3% 上昇した。

この結果から、飽和磁束密度の高いコアを用いることによりトランスの小型化が可能で、その際に、コアの損失が多少大きくても ΔB 増加の効果により、発熱量を増やすことなく効率を高められることを確認した。

6. おわりに

- (1) 三元系 MnZn フェライトの飽和磁束密度は、 Fe_2O_3 量を増やすことにより高められるが、損失が最小となる温度が低下し、その結果 100°C 付近の損失が増大する。ZnO 量も含めた組成の選択により、100°C での飽和磁束密度は 440 mT 程度まで高められる。
- (2) 主成分組成に NiO を導入することにより、損失が最小となる温度は高温側にシフトする。このことより、

NiO を含む組成では、100°C 付近で損失を最小とするために Fe_2O_3 量を増やすことができ、その結果、100°C における飽和磁束密度が高められる。

- (3) これらの結果をもとに開発した新材質 MB1H 材では、MB3 材と比べて飽和磁束密度を 20% 高められる。フライバック方式のスイッチング電源トランスを MB3 材から MB1H 材に置き換えた結果、飽和磁束密度増加の効果により、体積比率で 30% 小型化でき、効率も高められる。このときのコイル、コアの発熱による温度上昇は従来材と同程度であった。

参考文献

- 1) 戸川治朗. 実用電源回路 設計ハンドブック. 1988 年, p. 121. [CQ 出版]
- 2) Ohta, K.; Kobayashi, N. Jpn. J. Appl. Phys. vol. 3, 1964, p. 576-580.
- 3) 藤田明, 後藤聡志. 広い温度範囲で鉄損の低い MnZn フェライト. 川崎製鉄技報. vol. 34, no. 3, 2002, p. 1.



藤田 明



福田 豊



西澤慶太郎



戸川 治朗