

# フォワード型スイッチング電源のトランスコアに最適な MnZn フェライト

## High Performance MnZn Ferrites for Transformer Core Used in Forward Mode Switching Power Supply

後藤 聡志 GOTOH Satoshi	JFE ケミカル ケミカル研究所 磁性材開発センター長・工博
大竹 利昭 OTAKE Toshiaki	JFE ケミカル フェライト部 参事
福田 豊 FUKUDA Yutaka	JFE フェライトタイランド ラヨン工場長
戸川 治朗 TOGAWA Jirou	戸川技術研究所 所長

### 要旨

各種電子機器に使われるスイッチング電源トランスコア用の MnZn フェライトについて、これまで開発した低損失材と今後の開発方向を示した。コアロスと飽和磁束密度の改善に加え、特にコアロスの温度および周波数依存性をそれぞれ改善した MBT3 と MBF4 を紹介した。さらに市販のフォワード型電源を用いて電源効率改善に最適な材質を、汎用材 MB3、MB4 と比較して評価した。効率は  $MB3 \leq MB4 < MBT3 \leq MBF4$  の順に増加した。材質評価の正弦波磁束条件では MBT3 のコアロスが最も低いが、実際のフォワード型電源では矩形波電圧による高調波成分が重畳するため、周波数特性の良い MBF4 が最良となったと考えられる。

### Abstract:

Low loss MnZn ferrites which have been developed until now for transformer cores in switching power supplies were introduced with future development trends. In addition to the improvement on core loss and saturation magnetic flux density, the temperature and frequency dependence of the core loss have been particularly improved in new materials, MBT3 and MBF4, respectively. The most suitable material for enhancing the power supply efficiency of a commercial forward mode switching power supply was evaluated in comparison with the current materials, MB3 and MB4. The efficiency increased in the order of  $MB3 \leq MB4 < MBT3 \leq MBF4$ . Although MBT3 shows the lowest loss under the sinusoidal flux condition, the highest efficiency can be obtained as using MBF4, which shows lower harmonic losses derived from the rectangular wave voltage in the actual power supply due to the excellent frequency dependence of the core loss.

### 1. はじめに

軟磁性材料は直流磁界からギガヘルツ (GHz) 域の高周波帯域まで、静止器あるいは回転機として電力変換や信号変換などの用途に幅広く使用されている。それらの中で JFE スチールグループでは方向性および無方向性の電磁鋼板、鉄粉、ソフトフェライトを製造・販売している。中でもソフトフェライトは金属系軟磁性材料に比較して比抵抗が格段に高く、数千ヘルツから数百メガヘルツの間で優れた軟磁性特性を示すため、高周波電源トランス、チョークコイル、ノイズフィルターなどのコアに広く使用されている。ソフトフェライトコアへの需要は、デジタル家電、パソコン、

携帯電話など民生電子機器の急速な普及に呼応して、なお拡大の傾向にある。この分野において、フェライトコアに対しては、従来材に比較して高周波化、低損失化、高透磁率化、高磁束密度化といった、より高機能でかつ小型、薄型形状のものが要求されている。

このようなソフトフェライトの中で、MnZn フェライトは各種電子機器に搭載されるスイッチング電源の電源トランスコアとして広く使用されている。電源効率向上のため、MnZn フェライトでは低損失であることが最も重要な項目の一つである。JFE ケミカルグループである JFE フェライトでは、これまでに、汎用低損失材として MB3 とさらに低損失である MB4 を製造・販売してきた。しかしながら、近年、電子機器メーカーや電源トランスメーカーから、このような汎用低損失材だけでなく、各ユーザーの設計・製造に適し

新たな材料の要求が高まっている。そこで、ユーザーの製品の特徴・ニーズに適合した高特性品、高付加価値品のさらなる開発・製品化を進め、電源部分で比較的体積を占めるトランスの小型化・薄型化に対応することが急務となっている。

このような状況の中で、スイッチング電源の中でも比較的容量が小さく、駆動周波数も 50 k ~ 100 kHz 程度の AC アダプタなどに適用されることの多い、フライバック型スイッチング電源用に最適な MB1H を開発した<sup>1,2)</sup>。この材料は汎用材 MB3 に比べて 100℃におけるコアロスがほぼ同じで、飽和磁束密度が 20% 高く、高磁束密度設計が可能なトランス小型化に適した材質であり、市場から高い評価を得ている。

一方、比較的容量が大きく駆動周波数も 100 k ~ 300 kHz 程度となる、フォワード型スイッチング電源のトランスコアに適した材料は、従来どおり MB3 や MB4 が主流であり、100 kHz, 100℃の条件下で低損失化した材質が良いとされている<sup>3)</sup>。しかしながら、近年、電源メーカーでのトランス設計方針は種々異なり、トランスコアの形状や駆動条件もさまざまである。さらに動作磁束密度を飽和近くまで高くしたものや、100℃以上まで温度が上昇することを見越したものなど、従来設計からかなり外れた使用方法も始めている。

そこで、本論文では、まず各種用途に対応して新規に開発した電源用低損失材の紹介を行う。次に、市販のフォワード型電源を利用して各種材質のトランスコアの実装特性を調査し、最適材質の評価、検討を行った結果について述べる。

## 2. 各種低損失材の開発

### 2.1 開発動向

JFE ケミカルは JFE フェライトと共同で、酸化鉄からフェライトコアまで一貫生産する企業グループとしての強みを活かし、損失、透磁率などの特性に優れた材料の開発、および高特性と高生産性が両立できる精密雰囲気制御が可能なローラーハース炉の開発を進めてきた。図 1 にこれまで開発した電源用の材料と今後の開発方向を示す。汎用材 MB3 を出発材料として、コアロス、飽和磁束密度とこれらに大きな影響を及ぼす温度、周波数の観点からそれぞれ改善する方向に進んでいる。図 1 の○で囲まれた材料は量産化されているもの、□で囲まれた材料はラボ開発を終了し少量サンプル段階のもの、◇で囲まれた材料は開発中のものである。開発方向は図に示すように、(1)100 kHz, 200 mT, 100℃でのコアロス改善、(2) コアロスの温度依存性改善、(3) 高周波域でのコアロス改善、(4) 飽和磁束密度の改善の 4 方向である。

電源用低損失材である MB4 は、コアロス値 270 kW/m<sup>3</sup> (100 kHz, 200 mT, 100℃) で、汎用電源材 MB3 に比較すると約 20% の損失改善が図られており、省エネルギーという社会的ニーズに応えることができる材料である。また、MBT1 と MBT2 は、通常の電源材の欠点である、コアロスの温度依存性を改善したもので、常温から 100℃付近まで低

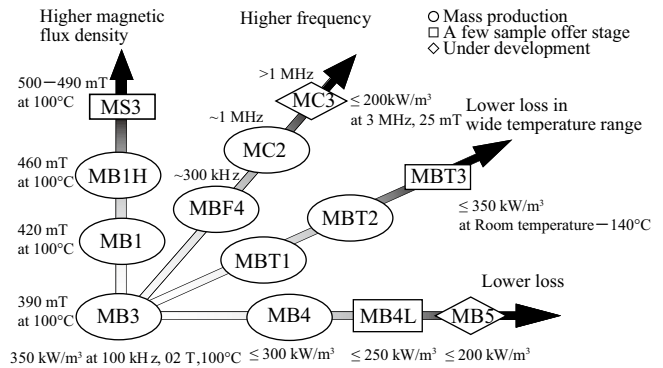


図 1 スwitchング電源用の低損失 MnZn フェライトの開発動向

Fig. 1 Schematic diagram of development of low loss MnZn ferrites for switching power supplies

い損失値を示す<sup>4~6)</sup>。自動車を始めとして、使用される温度環境が大きく変化する用途への展開がなされている。MB1H は 460 mT (100℃) の高い飽和磁束密度が特徴で、トランスの設計磁束密度を高くすることができ、50 W 程度以下のフライバック型スイッチング電源の小型化用途に最適である。MC2 は、コアロス値 65 kW/m<sup>3</sup> (500 kHz, 50 mT, 100℃) で、業界 No. 1 特性を有しており、小型・薄型化が要求される数百キロヘルツ以上で駆動させる特殊電源の用途に使用されている。

次に、汎用材 MB3, MB4 に代わるフォワード型スイッチング電源用の低損失材として開発した、MB1H のコアロス改善材、MBT3, MBF4 の 3 種について紹介する。

### 2.2 高温域で飽和磁束密度の高い MB1H の低損失化

従来の三元系 MnZn フェライトの飽和磁束密度は、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量を磁歪定数が零となる 52.5 mol% 程度から増やすことにより高められるが、ZnO 量も含めた三元系組成の選択では、100℃での飽和磁束密度はたかだか 440 mT 程度であり、また図 2 に示すように損失が最小となる温度が室温付近まで大きく低下し、その結果 100℃付近の損失が増大する。ここで、NiO を導入することにより、図 2 に示すように損失が最小となる温度は高温側にシフトする。このことにより、NiO を含む組成では、100℃付近で損失を最小とするために Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量を増やすことができ、その結果、100℃における飽和磁束密度が高められる。このように開発されたのが MB1H であるが、MB3 や MB4 に比べてコアロスは高めである。これは、磁歪定数零の組成域から外れていること、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量が多いことで Fe<sup>2+</sup> イオン量が増え、同じ焼成条件であると結晶粒の比抵抗が低下し、粒界に析出して渦電流損失を抑制する微量添加物の効果が弱まることが原因と考えられる。

そこで、微量添加物の種類と添加量を見直し、十分な効果が得られる量に切替え、さらに焼成条件も冷却域での酸素

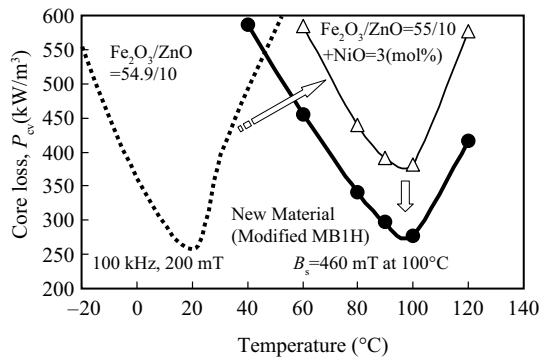


図2 高飽和磁束密度を有する MB1H改善材のコアロスの温度依存性

Fig. 2 Temperature dependence of core loss in the modified MB1H with high  $B_s$

濃度を見直して、粒界抵抗相が十分形成できるよう調節した。その結果、図2に示すようにMB4クラスの280 kW/m<sup>3</sup> (100 kHz, 200 mT, 100°C)のコアロス値を得ることができた。100°Cにおける飽和磁束密度は460 mTを維持しており、MB1Hの特徴を維持したままさらに低損失化することが可能となった。MB4クラスまで低損失化できたことにより、フライバック型スイッチング電源中心であった用途が、フォワード型スイッチング電源へ広がると期待できる。ただし、本材料は焼成条件の変更をともなうため、現在量産炉での安定焼成化に向けて調整中である。

### 2.3 コアロス温度依存性の小さな低損失材 MBT3

図1に示すMBT1は、MnZnフェライトの主成分組成であるFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の一部をCoOで置換することにより、結晶磁気異方性の温度変化<sup>7)</sup>を緩和し、コアロスの温度依存性を小さくした、量産品としては世界初の材料である。この基本技術を用いながら、MBT2では以下の観点に基づいて低損失化を図り、連続炉での量産化に成功した。

- (1) ヒステリシス損失を低減するために主成分組成と微量添加物組成を選択
- (2) コアロスを極小化するような結晶粒径や空孔分布を実現するために、焼成温度や焼成雰囲気中の酸素濃度を精密に制御
- (3) JFEケミカルで開発し、生産している高純度酸化鉄原料JC-CPWの使用<sup>8)</sup>

MBT3では、上記の要点を中心として、いっそう焼成で精密な雰囲気制御を実施することにより、さらなる低損失を実現している。

図3にMBT3のコアロス温度特性をMB4とMBT2と比較して示す。MBT3は室温から140°Cの高温域までコアロス値350 kW/m<sup>3</sup> (100 kHz, 200 mT)以下を実現しており、広い温度範囲で低損失材として利用可能である。また100°Cでのコアロスは250 kW/m<sup>3</sup>弱であり、各種低損失電源材の中で最も低い値を実現している。MBT3の組成は従来のMBT1、

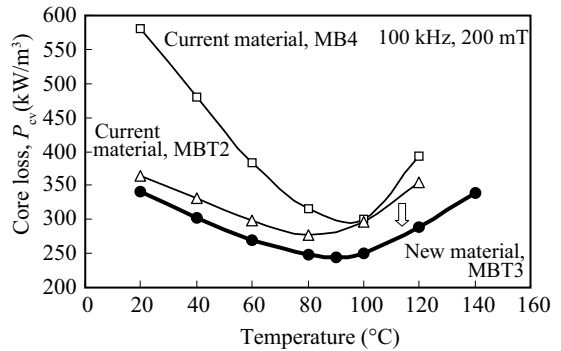


図3 開発材 MBT3のコアロスの温度依存性

Fig. 3 Temperature dependence of core loss in a new material, MBT3

MBT2と変わらず、広い温度範囲でコアロスが全体に最も低減できる焼成条件で製造される。

### 2.4 100 k ~ 300 kHz 程度の周波数域での低損失材 MBF4

MBF4は100 kHzにおけるコアロスがMB4と同等で、さらに高周波数域の300 kHz程度までMB4よりも低いコアロスを実現した材料である<sup>9)</sup>。現行のフォワード型スイッチング電源の一般的な駆動周波数が100 k ~ 300 kHzであることを考慮したものである。図4にMBF4のコアロス温度特

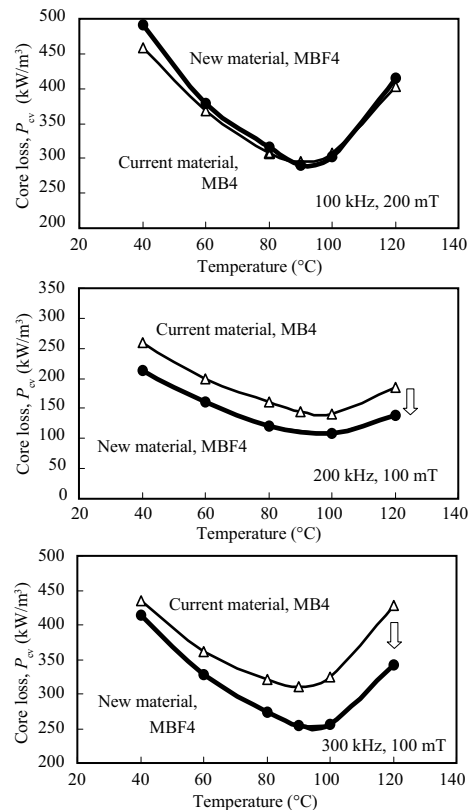


図4 開発材 MBF4のコアロスの温度依存性

Fig. 4 Temperature dependence of core loss in a new material, MBF4

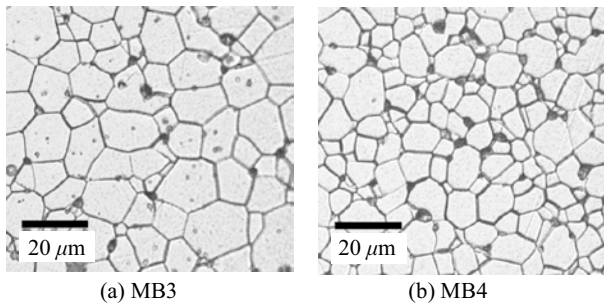


写真 1 (a)MB3 (平均粒径 9 μm) と (b)MB4 (平均粒径 6 μm) の結晶構造

Photo 1 Microstructures of (a)MB3 and (b)MB4 with the average particle sizes of 9 μm and 6 μm, respectively

性を周波数ごとに MB4 と比較して示す。図 4 に示すように、100 kHz, 200 mT の条件では MB4 とほぼ同等のコアロス温度特性を示し、200 kHz, 300 kHz と高周波になるにつれて MB4 よりも低いコアロスを示す。この特性は、従来の MB3, MB4 の焼成条件に比べて最高保持条件を低温、短時間とし、写真 1 に示すように平均結晶粒径を従来の 9 μm 程度から 6 μm 程度まで抑え、高周波域でのコアロス低減を図った結果である。結晶粒径をさらに小さくすると 100 kHz でのコアロスが増大するため、最適値を選定した。また、他の焼成条件も最適化を図っている。

MBF4 は、広い周波数域において、すなわち 100 kHz,

200 mT ならびに 300 kHz, 100 mT の条件でともにコアロス値  $300 \text{ kW/m}^3$  以下という、他に類のない特性を有しており、200 k ~ 300 kHz で設計されることの多い最近のフォワード型スイッチング電源への展開が期待されている。

### 3. フォワード型スイッチング電源でのトランスコア実装評価

#### 3.1 フォワード型スイッチング電源と測定方法

各種電源用低損失 MnZn フェライトを用いて実形状トランスコアを作製し、市販のフォワード型スイッチング電源へのコア置換実装試験で電源特性を評価し、コア材質の磁気特性との比較、検討を行った。

一般的な市販のフォワード型スイッチング電源 (出力 12 V/10 A) を使用し、メイントランスのコアを各種材質のもので置き換えて実装特性を評価した。ボビンと巻線構造は同一でコア材質だけが異なるトランスとするため、トランス端子の刺さる基板部分を改良し、アタッチメントでトランスボビンからの端子を受けるようにした。商用 60 Hz, AC100 V 電源から電圧変更用スライダックで AC200 V に変換し、さらにノイズ除去のための絶縁トランスを介して電力を供給した。入力側に電力計、出力側に電子負荷 (最大 144 W) を接続して、入力電力と負荷電力の比から電源効率を測定した。またトランスコアの外脚部 4 ヶ所、背部 1 ヶ所

表 1 200 kHz で駆動したときの電源効率と温度上昇の比較

Table 1 Comparison of power supply efficiency and temperature rise in driving at 200 kHz

Driving frequency: 200 kHz		Original core	MB3 EER35A	MB4 EER35A	MBT3 EER35A	MBF4 EER35A
Input	$V_{in}$ (V)	200	200	200	200	200
	$I_{in}$ (A)	1.02	0.99	0.98	0.96	0.95
	$W_{in}$ (W)	142	139.2	139.2	136.2	136
Output	$V_o$ (V)	11.81	11.81	11.81	11.80	11.80
	$I_o$ (A)	10	10	10	10	10
	$W_o$ (W)	118.10	118.10	118.10	118.00	118.00
Efficiency	$\eta$ (%)	83.17	84.84	84.84	86.64	86.76
Environment	RT (°C)	29.8	27.7	28.2	15.1	15.6
Core temperature	$T_1$	48	49	46	40	37
	$T_2$	55	51	45	39	34
	$T_3$	54	48	44	40	37
	$T_4$	52	50	47	38	32
	$T_5$	54	50	46	48	48
	$T_{average}$	52	49	46	41	37
Temperature rise	$\Delta T_1$	18	21	18	25	21
	$\Delta T_2$	25	23	17	24	18
	$\Delta T_3$	24	20	16	25	21
	$\Delta T_4$	22	22	19	23	16
	$\Delta T_5$	24	23	18	19	18
	$\Delta T_{average}$	23	22	18	23	19

$V_{in}, V_o, I_{in}, I_o, W_{in}, W_o$ : Input and out put voltage, current and power, respectively

$\eta$ : Power supply efficiency,  $W_o/W_{in}$  RT: Room temperature

$T_1-T_5$ : Temperatures at five points of the core

$\Delta T_1-\Delta T_5$ : Temperature rises at five points of the core

に熱電対を取り付けて、電源部品が露出した状態のまま室温で稼働させ、その後のコアの温度変化を測定した。さらに、トランス1次巻線の入力電流と入力電圧の波形をオシロスコープで観察し、正常な動作であることを確認した。

### 3.2 各種電源材を用いたトランスコアの実装結果

各種材質コアの実形状トランスを作製し、市販電源のオリジナルコア（EER-35A 形状で材質不明）と置換して、周波数 200 kHz で駆動したときの電源特性を表 1 に示す。トランスコアは同じく EER-35A 形状で、材質は MB3, MB4, MBT3, MBF4 の 4 材質である。電源駆動条件は入力電圧 AC200 V, 出力電流 DC10 ~ 8 A となるよう電子負荷を設定した。出力電圧と入力電流はそれぞれおよそ 12 V と 1 ~ 0.6 A となる。

電源効率  $\eta$  はオリジナルコアが最も低く 83.2% であるのに対し、各材質使用のトランスコアでは MB3 < MB4 < MBT3 < MBF4 の順で効率が上昇している。MBT3 と MBF4 はほぼ同じ高い効率を示す。特に MBF4 は 86.8% とオリジナルに対して 3.6%, MB3 に対しても 2.0% 高い値を示している。

温度の絶対値はいずれも問題のない低いレベルであり、温度上昇  $\Delta T$  はオリジナルコアが平均 23℃ に対し、比較的差は小さく 18 ~ 23℃ の範囲にある。 $\Delta T$  が低いのは電源カバーがなく開放された状態で、熱の発散が良好な条件であることが原因と考えられる。同じ条件で駆動周波数を 122 kHz に下げた場合の結果を表 2 に示す。電源効率は

表 2 122 kHz で駆動したときの電源効率と温度上昇の比較  
Table 2 Comparison of power supply efficiency and temperature rise in driving at 122 kHz

Driving frequency: 122 kHz		MB4 EER35A	MBT3 EER35A	MBF4 EER35A
Input	$V_{in}$ (V)	200	200	200
	$I_{in}$ (A)	0.66	0.6	0.56
	$W_{in}$ (W)	111	109.3	108.7
Output	$V_o$ (V)	11.80	11.80	11.80
	$I_o$ (A)	8	8	8
	$W_o$ (W)	94.40	94.40	94.40
Efficiency	$\eta$ (%)	85.05	86.37	86.84
Environment	RT (°C)	16	14.5	13.5
Core temperature	$T_1$	31	26	28
	$T_2$	26	23	22
	$T_3$	27	23	21
	$T_4$	21	17	20
	$T_5$	18	22	23
	$T_{average}$	25	22	23
Temperature rise	$\Delta T_1$	47	41	42
	$\Delta T_2$	42	38	36
	$\Delta T_3$	43	38	35
	$\Delta T_4$	37	32	34
	$\Delta T_5$	34	37	37
	$\Delta T_{average}$	41	37	36

200 kHz 駆動時と変わらず MB4 < MBT3  $\approx$  MBF4 の順に高くなっている。

### 3.3 各種材質コアロス特性と電源実装特性の相関

前節までに示したように、今回使用したフォワード型スイッチング電源とトランス条件ではコア材質として MBF4 が最も優れ、MBT3 がほとんど同等でこれに続く結果となった。トランスの稼働温度が 40 ~ 50℃ であることを考慮すると、図 3 で示したようにコアロス温度特性に優れる MBT3 が最も効率が高くなると期待されるが、MB4 と同じ温度特性を示す MBF4 の方が若干高効率となった。

この原因を考察するため、MBF4 と MBT3 の詳細な磁気特性を系統的に調査し比較した。R31 (外径 31 mm, 内径 19 mm, 高さ 7 mm) 形状の標準リングコアで、温度、周波数、磁束密度を広範囲に変えてコアロス特性を測定した。図 5 に周波数と磁束密度を変えた場合の MBT3 と MBF4 のコアロス特性を示す。温度は 100℃ と 40℃ の場合を示した。100℃ の場合、磁束密度 50 mT, 100 mT ではおよそ 80 kHz で、150 mT ではおよそ 100 kHz で、200 mT では 120 kHz 程度で両者のコアロス値が逆転しており、一般的に高周波になるにつれて MBF4 の方が低損失を示す。100 kHz, 200 mT の条件では MBT3 のコアロスが最小であるが、これより周波数が上昇すれば MBF4 の方が低損失となり、実際

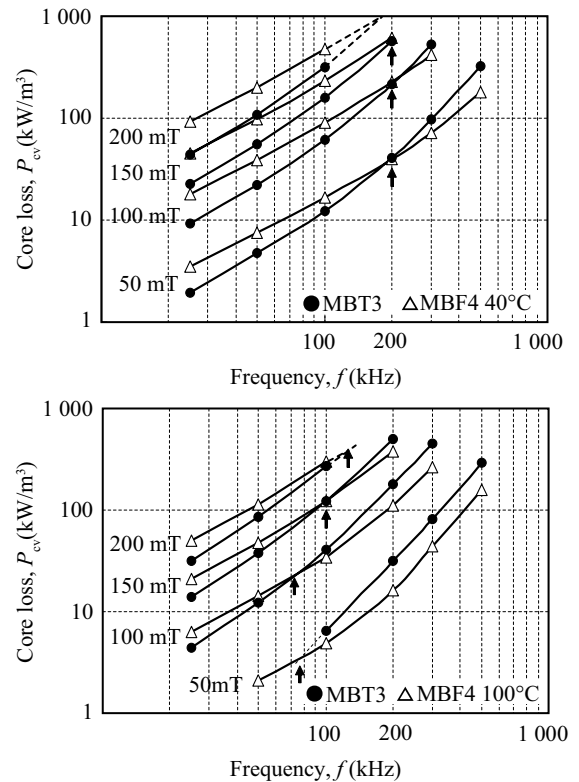


図 5 40℃ と 100℃ における開発材 MBT3 と MBF4 のコアロスの周波数依存性

Fig. 5 Frequency dependence of core loss in the new MnZn ferrite materials, MBT3 and MBF4 at 40°C and 100°C



に使用する場合、電源の稼働周波数条件を広く考慮する必要があることが分かる。40℃の場合は、コアロス逆転周波数が若干高周波側にシフトし、50～200 mT の範囲ではおよそ 200 kHz である。

フォワード型スイッチング電源は一般的に三角波の重畳した矩形波電流、矩形波電圧で駆動されるため、励磁波形は基本周波数に対して多くの高調波成分を含む。基本周波数が 122 kHz であれば 366 kHz, 610 kHz 成分があり、基本周波数が 200 kHz であれば 600 kHz, 1 MHz 成分の高周波が重畳している。そこで、これら高周波域のコアロスを考慮すると、MBT3 よりも MBF4 の方が全体にコアロスが低くなっていると考えられる。したがって、40℃でも最終的に MBT3 よりも MBF4 の方が、若干効率が高くなったと推測される。温度が全体に高くなっても、先に述べたコアロス逆転周波数が下がる方向にあるので、ますます MBF4 の方が有利になると考えられる。これらの結果から、特定条件下でのコアロス評価結果だけでなく、電源の稼働温度と周波数域を考慮して、材質のコアロス温度特性と周波数特性のバランスから最適材を選定することが重要であると結論できる。

特定電源、特定条件での評価結果であるが、今回検討したフォワード型電源には温度特性よりも周波数特性を重視した MBF4 が最適ということになる。今後さらに稼働温度や設定磁束密度を広範囲に変えて、種々の条件で駆動される場合の特性解析が必要であるが、コアロスの周波数依存性改善の方がより効果的であるという一例が示された。

#### 4. おわりに

これまで開発したスイッチング電源トランスコア用の MnZn フェライトを、(1)100 kHz, 200 mT, 100℃でのコアロス改善、(2) コアロスの温度依存性改善、(3) 高周波域でのコアロス改善、(4) 飽和磁束密度の改善の4方向でまとめ、開発の方向を示した。その中で特にフォワード型スイッチング電源に最適と考えられ、従来材よりさらにコアロスの温度依存性を改善した MBT3 と同じく周波数依存性を改善した MBF4 の詳細をまとめた。

さらに、フォワード型スイッチング電源のトランスコアに最適なコア材質の決定を図るべく、市販電源を用いて各種材質トランスコアを置換して実装し、電源効率、温度上昇の関係を調査した。周波数を 200 kHz と 122 kHz の二とお

りで測定したが、いずれも MBF4 が最も優れ、ほぼ同レベルで MBT3 が続き、次に MB4, MB3 がほぼ同等で並ぶ。材質評価の標準条件 100 kHz, 200 mT では MBT3 のコアロスが最も低いが、200 kHz 以上の高周波になると室温～60℃付近の低温域でも MBF4 のコアロスが他材質に比べて大きく低減する。この効果が今回の電源効率改善に寄与していると考えられる。今後さらに各材質の詳細な磁気特性を調査し、電源トランスへの実装評価と併せて最適材質の開発につなげる予定である。

#### 参考文献

- 1) Soga, N.; Nishizawa, K.; Fukuda, Y.; Fujita, A.; Gotoh, S.; Nakashima, S.; Togawa, J. Proc. of the 9th International Conference on Ferrites, San Francisco. 2004, p. 567-572.
- 2) 藤田明, 福田豊, 西澤慶太郎, 戸川治朗. JFE 技報. 2005, no. 8, p. 32-37.
- 3) 戸川治朗. 実用電源回路設計ハンドブック. 1988, p. 148-174. [CQ 出版]
- 4) 藤田明, 後藤聡志. 日本応用磁気学会誌. 2002, 26, p. 471-474.
- 5) 藤田明, 後藤聡志. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 3, p. 111-115.
- 6) Fujita, A.; Gotoh, S. J. Appl. Phys. 2003, vol. 93, no. 10, p. 7477-7479.
- 7) Stijntjes, T. G. W.; Klerk, J.; Broese van Groenou, A. Philips Res. 1970, rep. 25, p. 95-107.
- 8) 津崎昌夫, 高木堅志, 吉川文明, 島崎守美. 川崎製鉄技報. 1992, vol. 24, no. 2, p. 148-149.
- 9) Gotoh, S.; Kikuchi, T.; Kijima, S.; Yoshimatsu, H.; Otake, T.; Fukuda, Y.; Togawa, J. Proc. of the 10th International Conference on Ferrites, Chengdu. 2008, p. 248-251.



後藤 聡志



大竹 利昭



福田 豊



戸川 治朗