

高周波対応低ロス圧粉磁心材料の開発

伊志嶺 朝之*・渡辺 麻子・上野 友之
前田 徹・徳岡 輝和

Development of Low Iron-Loss Soft Magnetic Powder Core for High Frequency Application — by Tomoyuki Ishimine, Asako Watanabe, Tomoyuki Ueno, Toru Maeda and Terukazu Tokuoka — Recently, there has been a growing trend toward a low carbon society. In the field of energy, development of clean power generation systems, such as solar and wind generators, have been promoted. Electric vehicles are also replacing petrol vehicles in the automotive industry, and energy-saving electrical appliances are expected more than ever. Due to this trend, small and powerful power-supply devices with better conversion efficiency are increasingly demanded, and accordingly, require high performance inductors.

Thus far, the authors have engaged in the development of powder magnetic cores, which are made by compacting soft magnetic powders coated with an insulating film, for use in motors and solenoid valves. In this study, the technology accumulated in the development of these cores has been successfully applied to that of an inductor core. The developed inductor core shows superior properties to ferrite and dust cores which are commonly used for inductors. In this paper, the advantageous properties of the developed core and the result of application to the inductor are reported.

Keywords: soft magnetic material, inductor, reactor, choke coil, converter, inverter, eco-friendly vehicle

1. 緒言

近年、低炭素社会の実現へ向け、エネルギー分野では太陽光発電や風力発電を中心としたクリーン電力へのシフトが進んでいる。自動車分野では化石燃料による内燃機関から電気駆動システムへの移行が進んでおり、また家電分野においても消費電力低減の動きが活発である。これらのトレンドの中で重要な役割を果たすのが、蓄電技術・エネルギー回生技術・電圧制御技術であり、所要の電力に効率よく変換する“電源デバイス”が求められている。近年では、変換効率および部品のサイズ低減の観点からスイッチング電源が主流となっている。その中で、変圧回路や整流回路に用いられているチョークコイルやトランスコイル、パワーインダクタ及びリアクトルと呼ばれる、鉄心と巻線からなるコイル部品が、電源デバイスの性能を大きく左右する。発電所・蓄電池から電子機器への一方通行であった従来のエネルギーシステムは、今後、消費機器で発生する余剰エネルギーの回生も含めた双方向のシステムが主流となる。これに向けて、電源デバイスや電源用コイルにも、変圧／整流機能の複雑多様化や大容量電力への対応、省スペース／コンパクト化などの性能向上が求められている。

筆者らはこれまでに、コイル部品の鉄心に用いられる軟磁性材料として、金属磁性粉末を加圧成形して得られる「圧粉磁心材料」の開発を行ってきた^{(1),(2)}。電源デバイスにおける上述の課題に対し、これまで培った技術を基礎として、材料特性を対象周波数帯域である数100kHz帯へ適

用すべく改善を検討した結果、高充填密度という特徴を維持したまま、高周波応答性を飛躍的に改善する事に成功し、本用途で従来用いられてきたフェライトや汎用ダストコアに比べて優れた特性を有する「高周波対応低ロス圧粉磁心材料」の開発に成功した^{(3)~(5)}。本報では、開発材の諸特性と、これを用いた電源コイル部品への応用例について報告する。

2. 開発ターゲットに向けた現状技術と課題

電源デバイスのコンパクト化や大電力処理の観点においては、電源用コイルに用いられるコア材料には、飽和磁束密度が高く、電気-磁気エネルギー変換効率が高いことが求められる。表1に高周波用軟磁性コアに用いられる代表的な軟磁性材料と電源特性得失を一覧表で示す。電源用の鉄心として従来汎用的に用いられている軟磁性材料としては、フェライトや汎用ダストコアがある。フェライトは、動作時に鉄心で発生する損失（鉄損）が低く電源効率優れるが、飽和磁束密度が低いために、図1に示すように大容量電源として設計した場合、製品サイズが大きくなり、巻線として使用する銅の使用量も増大する課題がある。一方、汎用ダストコアは、圧粉磁心材料と同じく金属磁性粉末を圧縮成形して得られ、フェライトに比べて飽和磁束密度に優れ良好な大電流処理能力（直流重畳特性）を有する

表1 高周波用電源コイルに用いられる軟磁性材と電源特性

材 料	構造模式図	磁性体含有率	電源サイズ	電源容量	電源効率	複雑形状
軟磁性材における支配因子		—	磁束密度充填密度	磁束密度充填密度	鉄損電気抵抗	複雑成形性
フェライト(スピネル型)		100vol %	△	△	◎	○
汎用ダスト(Fe-Si-Al, Fe-Si-B)		50~70	○	○	△	○
アモルファス箔(Fe-Si-B)		80~90	◎	◎	○	×
従来焼結軟磁性材(純鉄~3Si)		90~95	◎	◎	×	◎

◎>○>△>×の順に各項目に対しメリットがあることを示す

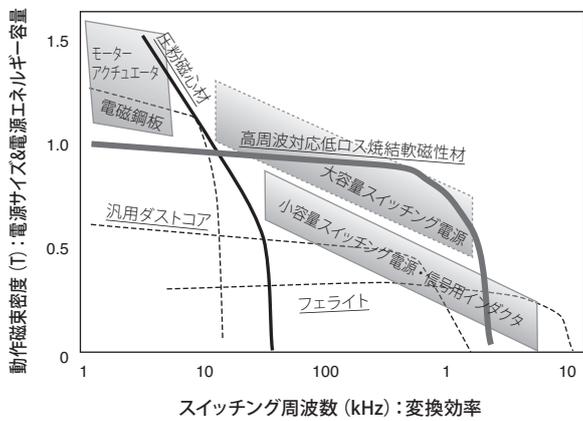


図1 代表的軟磁性材の用途と性能領域および開発目標

ことから、製品の小型化が可能だが、フェライトに比べて鉄損が大きいため、発熱が大きく温度上昇の問題や電源効率が低いなどの課題を有する。また、上記以外にも、高い磁束密度と変換効率を実現するアモルファス箔も存在するが、圧延法である点と積層構造をとっているため複雑形状のコアを実現し難い点や、製造コストが粉末冶金法に比べて著しく高い点、電気抵抗が低く高周波域では変換効率が著しく低下するなどの問題があり、適用用途が限られている。これらから、既存の軟磁性材にはいずれも、今後求められる電源デバイスの小型/大電力化の実現に向けて課題を有しているのが現状であり、優れた特性を有する新しい軟磁性材が望まれている。

3. 高周波対応低ロス圧粉磁心材料の諸特性

3-1 開発アプローチおよび実験方法 筆者らは、これまでモータやアクチュエータといった比較的low周波帯

域(〜数kHz)で動作するデバイスに対して、極めて軟磁気特性に優れた圧粉磁心材料を開発し、これらの開発の中で圧粉磁心材料の飽和磁束密度と損失特性を大幅に向上させる技術を培ってきた。しかしながら、スイッチング電源用の鉄心は駆動周波数が数10〜数100kHzと高いため、鉄損が高周波域で極めて大きいことから、汎用ダストコア以上に発熱と電源効率が問題となる。そこで、従来の圧粉磁心材料に対して、数100kHzの高周波域での使用動作に対して最適化することにより、汎用ダストコアやフェライトを超える新しい軟磁性材料の開発を目指した。

図2に圧粉磁心材料の鉄損に及ぼす支配因子についてまとめた⁽²⁾。鉄損は、ヒステリシス損失(Wh)と渦電流損失(We)の和からなる。コア材料内の磁界の方向の変化に必要な外部エネルギーであるWhの低減には低保磁力化が必要であり、材料内部の不純物量の低減や磁気異方性や磁歪定数の小さな磁性合金の使用などが有効であるが、特に圧粉磁心材においては、粉末成形時に生じる歪みの熱処理による除去も重要な技術となる。一方、Weはコア材料内の磁界の変化に伴う誘導起電力で発生する渦電流によるジュール熱であり、Weの抑制には材料の電気抵抗の向上が必要である。これに対しても、電気抵抗の大きな磁性合金の使用などが有効であり、特に圧粉磁心材においては粉末粒子間の電氣的絶縁処理や、粉末粒子径の微細化による渦電流発生領域の細分化などが重要な技術となる。また、Whは周波数の1乗に比例するのに対し、Weは2乗に比例することから、本開発においては高周波領域で顕著になるWeの抑制が重要である。

これまで筆者らは、低損失高飽和磁束密度を示す圧粉磁心材料を実現すべく、①高耐熱絶縁皮膜処理による高温焼鈍技術、②高電気抵抗-高飽和磁束密度を両立する薄肉均一被覆処理技術、を開発してきた。本報では、さらに③粉末粒子設計技術、④軟磁気特性に優れた磁性合金粉末の採用および組成最適化技術、を新たに開発し適用

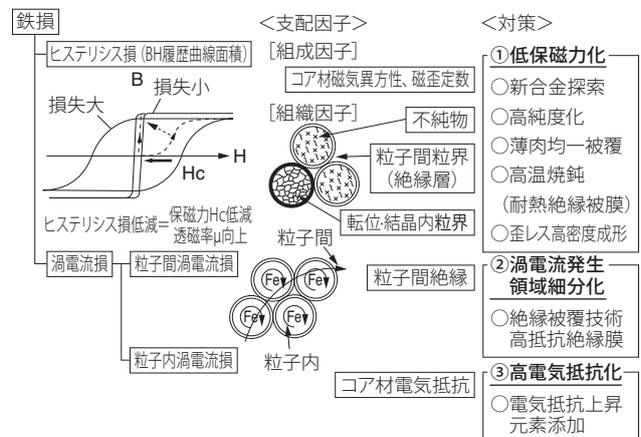


図2 圧粉磁心材料の鉄損に及ぼす支配因子

検討を行った。すなわち、従来用いていた変形性に富む純鉄粉末を、軟磁気特性に優れた高合金粉末に置き換えるために、もっとも大きな課題である硬質粉末の高密度成形と絶縁抵抗の維持を両立する技術開発がポイントとなる。

軟磁気合金粉末として低損失特性に優れたセンダスト合金粉末に対し、新たに開発した絶縁被膜処理を行った後、成形用潤滑剤を混合し、一軸加圧成形法にて980MPaで外径34mm内径20mm高さ5mmのリング形状に成形した。続いて、窒素雰囲気中で熱処理を行うことにより成形歪みを除去した後、磁気特性の測定を行った。

3-2 開発材の諸特性 表2に開発材の諸特性を、図3に開発材の鉄損の周波数依存性を、従来材である汎用ダストコアおよびフェライトとの比較で示す。汎用ダストコアとして、開発材と同じくFe-Si-Al系合金粉末を用いた市販のダストコアを、フェライトにはMn-Zn系フェライトを比較材として選択した。鉄損の周波数依存性から、下記の式(1)を用いて、ヒステリシス損失係数Khと渦電流損失係数Keを算出した。汎用ダストコアと比較してみると、開発材はヒステリシス損失係数、渦電流損失係数ともに低

く抑えられていることが分かる。その結果、電源デバイスへの適用に向けた対象周波数である100kHz付近では、鉄損として汎用ダストコアに対して半減以下の損失低減が可能であることが分かる。また、飽和磁束密度に関しても、汎用ダストコアに対して10%以上高い値を示している。

$$W_{Bf} = Kh \times f + Ke \times f^2 \quad \dots\dots\dots (式1)$$

※ W_{Bf} は磁束密度B、周波数fで動作させた時に鉄損を示す

一方、フェライトと比較した場合、飽和磁束密度は1.7倍の値を示しており、電源デバイスのコンパクト化や大電流処理化へのメリットが期待できる。鉄損に関しては、依然としてフェライトに比べて劣っているが、電源コイルとしてどの程度の差が生じるかについては後述する。図4に、開発材の透磁率の周波数依存性を示す。開発材は、100kHzまでフラットな透磁率を示しており、電源用コイルとして優れた特性であることが分かる。

表2 開発材の諸特性

材 質	単 位	開発材	ダストコア	フェライト
		Fe-Si-Al系合金粉末	Fe-Si-Al系合金粉末	Mn-Zn系フェライト
飽和磁束密度*	Tesla	0.89	0.80	0.51
鉄 損**	kWm ⁻³	380	843	57
ヒステリシス損失係数***	kWsm ⁻³	3.1 × 10 ⁻³	6.6 × 10 ⁻³	0.5 × 10 ⁻³
渦電流損失係数***	kWs ² m ⁻³	7.5 × 10 ⁻⁹	1.8 × 10 ⁻⁸	5.5 × 10 ⁻⁹
透磁率****	—	56	52	2400

* 室温での測定結果
 ** 磁束密度0.1T、周波数100kHz、温度100℃での測定値
 *** 10k~100kHzにおける鉄損の周波数依存性より算出
 **** 鉄損測定時の透磁率

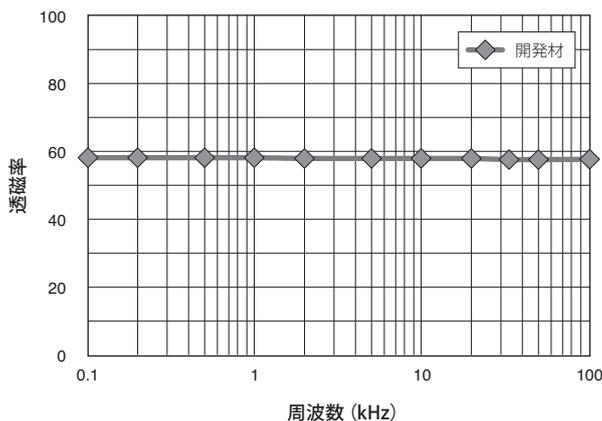


図4 透磁率の周波数依存性

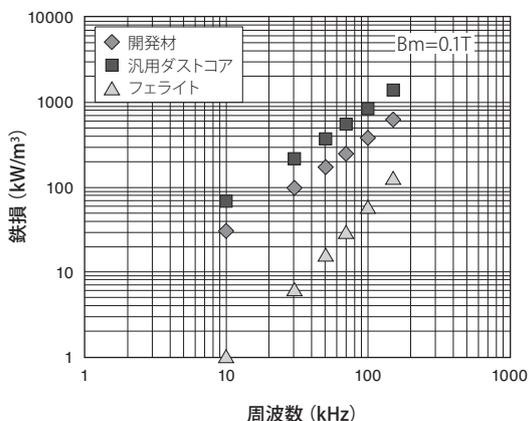


図3 鉄損の周波数依存性

4. 開発材の電源コイルへの応用

4-1 開発材を用いた電源コイルの設計と試作 開発材を用いて、電源コイルとしての性能を調べるために、ハイブリッド自動車などの次世代型環境対応車に搭載されるDC-DCコンバータを想定し、市販の車載用降圧型DC

表3 チョークコイルコアの設計条件

入力電圧Vin	200V	周波数f	100kHz
出力電圧Vout	14V	インダクタンスLs	2.6μH
出力電流Idc	100A	コイル	8 × 2mm 平角線

— DCコンバータを用い、同等の動作を再現できる評価系を構築した。電源コイルの設計は、表3に示す条件仕様に基づいて行った。コア形状の設計は、以下に示す式(2)~(4)に基づいて、リングサンプルの直流磁化特性からインダクタンス L_s が目的の値となるように形状を決定した。比較材は、用意したコンバータに予め搭載されていたフェライトコアとした。巻線は、フェライトコアと同じ形状の平角線とした。

$$L_s = \frac{N^2}{R_m} \quad \dots\dots (式2)$$

$$B_{max} = \frac{LI_{max}}{NS} = \frac{NI_{max}}{RmS} \quad \dots\dots (式3)$$

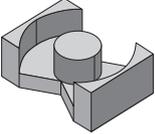
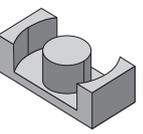
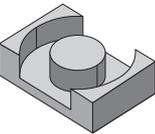
$$R_m = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad \dots\dots (式4)$$

N : コイル巻数
I : 直流電流
S : コア断面積
 l_c : コア磁路長
 l_g : ギャップ長
 μ_r : 比透磁率
 μ_0 : 真空透磁率

設計は、以下に述べる2ケースを行った。一つ目は、同じ巻線条件のもとで、より省スペース化、特に実装面積の低減を主体としたケース（以下、Case1）を検討した。2つ目は、フェライト材よりも巻線数を低減することを主体としたケース（以下、Case2）を検討した。巻線は部品コストや製品重量に占める割合が大きいのので、巻線数や使用量の低減のニーズは大きい。しかしながら、飽和磁束密度の低いフェライトコアでは巻線数を低減すると、直流重畳特性が低下し所定の電流において変換処理することができなくなるため、巻線数を低減することは難しい。

表4に開発材を用いた電源コイルの設計結果を示す。開発材は、上述の通りフェライト材に対して飽和磁束密度特性に優れるため、Case1、Case2ともに形状的なメリットを見出すことが可能である。Case1では、同じ巻線数5

表4 チョークコイルコアの設計結果

コア材質	フェライト	開発材	開発材	
—	—	Case1	Case2	
部品外観				
実装面積	1120mm ²	760mm ² (-35%)	1120mm ²	
部品高さ	28mm	25mm (-11%)	22mm (-25%)	
コア	重量	70g	59g (-16%)	75g (+7%)
	体積	14cm ³	10cm ³ (-30%)	13cm ³ (-7%)
コイル	巻数	5ターン	5ターン	4ターン
	重量	71g	66g (-7%)	59g (-17%)
全体重量	141g	125g (-12%)	134g (-5%)	

()内の数字はフェライトを基準とした際の変化率を示す

ターンにて実装面積やコア体積、全体重量を大きく低減することができている。更に、Case2では、開発材を用いることで4ターンへ巻線数を低減することができている。これにより部品の低背化や軽量化が図れている。

上記の設計結果をもとに、実際に電源コイルの作製を行った。試作したコア材およびチョークコイル部品の外観を写真1に示す。開発材のコアは、30×50×20tの素材より所定の形状に切削加工する方法で作製した。

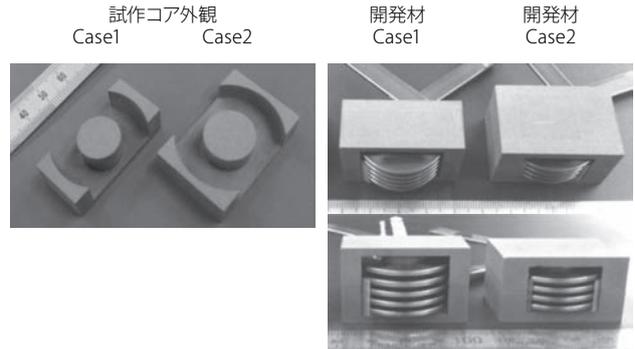


写真1 試作コア材（左）とチョークコイル部品（右）

4-2 試作電源コイルの評価 図5に試作コイルのインダクタンスの直流重畳特性を示す。開発材を用いたコイルの特性は、Case1、Case2ともにほぼ同じ特性を示している。設計条件 ($L_s 2.6\mu\text{H}@I_{dc} 100\text{A}$) に対して、 $2.4\mu\text{H}$ とおおよそ設計値に近い値が得られた。設計値との若干のずれに対しては、設計に用いたリングサンプル（外径34mm内径20mm高さ5mm）に対して、実際作製した加工用素材（30×50×20t）では素材内部の密度分布が大きく、直流磁化特性が僅かに変化していることが原因として考えられる。この点については、設計に用いる直流磁化特性に

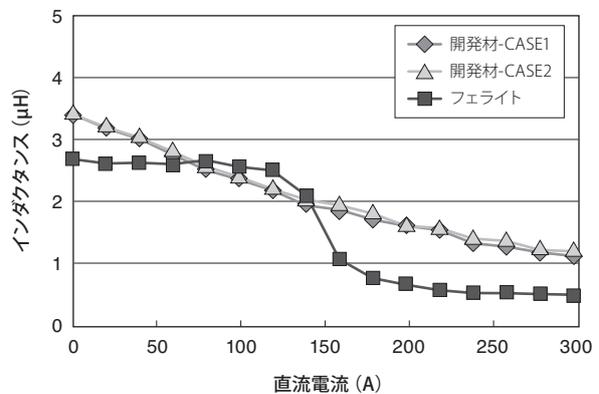


図5 試作チョークコイルの直流重畳特性

今回の結果を反映させることで、精度を高めていくことが期待できる。

一方、フェライトコアは仕様条件である100Aを超える高電流領域から急激にインダクタンスが低下しているのに対して、開発材は高電流領域においても比較的高いインダクタンスを示していることが分かる。このフェライトコアの高電流領域でのインダクタンスの急激な低下は、磁気飽和により透磁率が低下することにより生じ、飽和磁束密度が低いことが原因である。このことから、飽和磁束密度に優れた開発材を用いることで、フェライトコアに対して部品の小型化や巻線数の低減を図った上で、更に高電流領域での使用が可能、つまり大電力処理に対応できるということが分かる。

図6に直流電流100Aにおけるインダクタンスの温度依

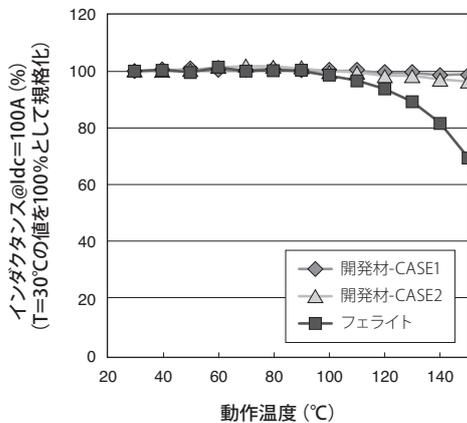


図6 Idc = 100Aにおけるインダクタンスの温度依存性

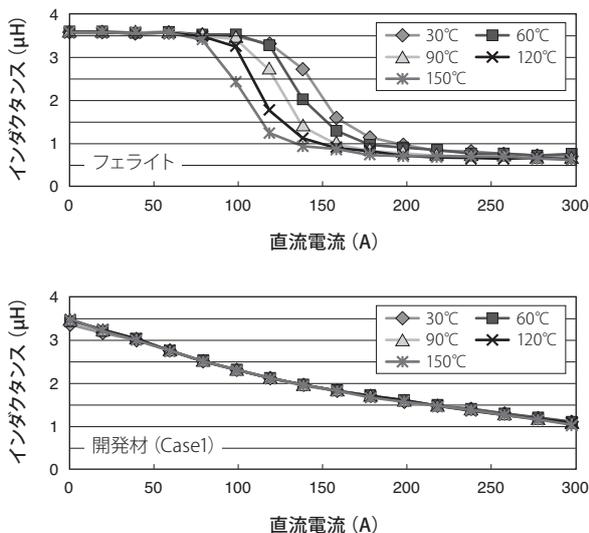


図7 直流重畳特性の温度依存性 (上:フェライト/下:開発材)

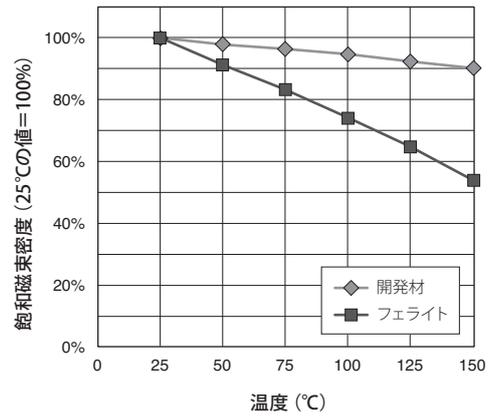


図8 飽和磁束密度の温度依存性

存性の測定結果を示す。開発材は室温から150℃まで安定したインダクタンスを示すのに対して、フェライトコアは90℃以上の温度域で急激にインダクタンスが低下する。図7に、開発材とフェライトの直流重畳特性の温度依存性をそれぞれ示す。開発材は、150℃まで一定の依存性を示すが、フェライトでは高温になるにつれて磁気飽和によりインダクタンスが低下する電流領域が低電流側にシフトしており、これによりインダクタンス値は上述のように温度上昇に伴って低下することになる。開発材とフェライトの間で見られるこの直流重畳特性の温度依存性の差異の原因は、飽和磁束密度の温度依存性と関係があることは明らかである。図8に示すように、フェライトでは飽和磁束密度は150℃で室温に対して半減するのに対して、開発材では10%程度の低下に留まっている。これは、キュリー温度がフェライトは200℃前後であるのに対して、開発材は約500℃と極めて高いことが主因として挙げられる。

4-3 試作電源コイルのコンバータ実装評価 作製した電源コイルを、上述の市販の車載用降圧型DC-DCコンバータへ実装し、表3にて示した電源仕様に動作させ、コアおよびコイルの温度上昇を評価した。尚、電源デバイスには予め水冷ジャケットによる冷却機構が備わっていたので、これを用いた(水冷温度は60℃)。電源デバイスでは、電源コイル部品の発熱により、電源コイル自体だけでなくその周辺部品への影響も無視できないため、デバイス自体の信頼性向上には電源コイルの温度上昇の低減は重要な課題である。

図9に、試作電源コイルのコアの表面温度の雰囲気温度依存性を示す。開発材は、Case1、Case2の間で部品形状の違いが主因と思われる若干の差異はあるが、フェライトコアとほぼ同等の動作温度を示している。このことから材料特性としてフェライトに対して劣っている鉄損特性の差が、電源デバイスでの動作状態では温度上昇として大きな差を生じないことが分かった。図10に示すように、開発材はフェライトに対して熱伝導性に優れており、この点を

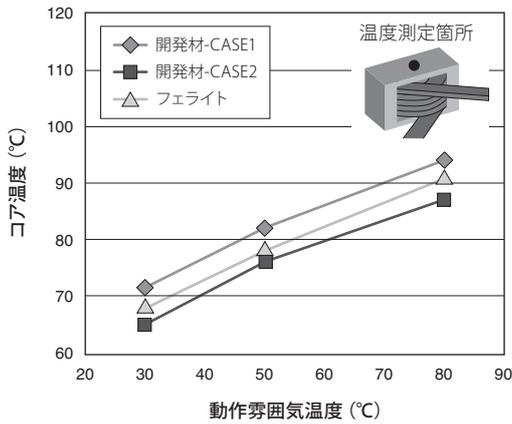


図9 コア温度の動作雰囲気温度依存性

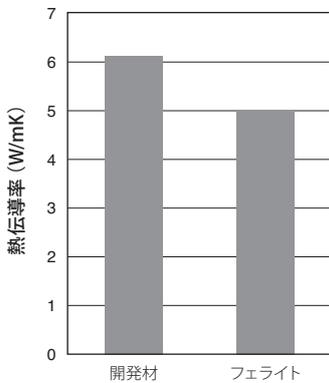


図10 開発材の熱伝導率

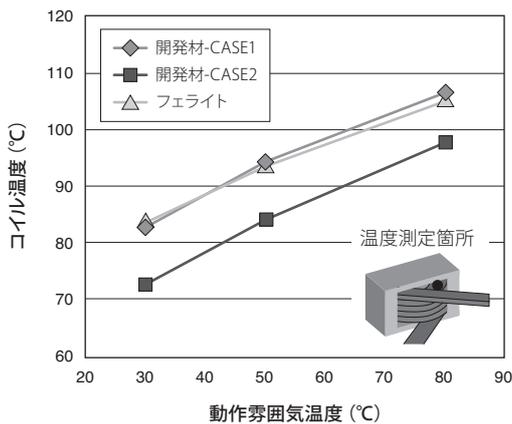


図11 コイル温度の動作雰囲気温度依存性

主因として、上述の結果が得られたと推測される。

図11に、試作電源コイルの巻線コイル表面における温度の雰囲気温度依存性を示す。コア温度の結果と比較する

と、いずれの材料もコイル温度の方が高い値を示している。電源デバイスにおいては、動作仕様条件や電源回路方式などにも依存するが、今回のようにコイル温度が問題となるケースは少なくない。さらに、結果を見ると、開発材Case1とフェライトコアはほぼ同じ温度上昇を示しているのに対して、開発材Case2は10°C以上低い温度を示している。コイルの発熱は、コイルを流れる直流電流によるジュール発熱が大部分であり、上記の結果は、開発材Case2は巻線数を低減しているため、コイルの直流抵抗が低下したことが主要因であると考えられる。このことから、フェライトに対して飽和磁束密度に優れる開発材を用いることで、コイルの巻線数の低減設計によりコイルの温度上昇抑制に効果があると言える。

5. 結 言

本研究では、低炭素社会の実現へ向け、これまで当社が培ってきた高性能圧粉磁心材料の材料技術を基礎として、近年ニーズが高まっている電源コイル部品へ適用が可能な新しい軟磁性材料の開発に取り組んだ。以下に総括する。

- (1) 電源デバイスが動作する100kHz帯への材料特性の最適化を検討した結果、従来の汎用ダストコアに対して鉄損が1/2以下、飽和磁束密度もフェライトに対して1.7倍以上と、優れた特性を有する材料を開発した。
- (2) 車載用のDC-DCコンバータへの適用を視野に、電源コイル部品を設計検討した結果、開発材を用いることで既存のフェライトコアに対して部品の小型軽量化や、巻線使用量の低減が可能であることを確認した。
- (3) 電源コイルを作製し評価を行い、開発材を用いることで、フェライトに比べ小型化しつつ更に大電流域での変換処理が可能なことや、フェライトでは対応できない150°Cまで安定して動作可能であることを確認した。
- (4) 作製した電源コイルをDC-DCコンバータへ実装し、動作中の発熱温度上昇について評価を行った結果、コアはフェライトと同等の温度上昇であり、巻数の低減設計によりコイル温度上昇を抑えられることを確認した。

以上の結果より、開発材は大電力処理や省スペース/コンパクト化といった電源デバイスのニーズに対して従来材を超える優れたポテンシャルを有すると言え、今後実用化を目指した開発を進めていく。

なお、本研究は独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「H21年度イノベーション実用化助成事業」の助成を受けて実施した。

参 考 文 献

- (1) 島田ら、SEIテクニカルレビュー第162号、50 (2003)
 - (2) 前田ら、SEIテクニカルレビュー第166号、1 (2005)
 - (3) 渡辺ら、粉体粉末冶金協会平成22年度春季大会概要集 116 (2010)
 - (4) 伊志嶺ら、粉体粉末冶金協会平成22年度春季大会概要集 117 (2010)
 - (5) 伊志嶺ら、粉体粉末冶金協会平成22年度秋季大会概要集 138 (2010)
-

執 筆 者

伊志嶺朝之* : エレクトロニクス・材料研究所
アドバンストマテリアル研究部
焼結部品および圧粉磁心材料の開発に
従事



渡辺 麻子 : エレクトロニクス・材料研究所 アドバンストマテリアル
研究部
上野 友之 : エレクトロニクス・材料研究所 アドバンストマテリアル
研究部 主査
前田 徹 : エレクトロニクス・材料研究所 アドバンストマテリアル
研究部 主査 (工学博士)
徳岡 輝和 : エレクトロニクス・材料研究所 アドバンストマテリアル
研究部 主査

* 主執筆者