

圧粉磁心による車載充電器用小型、高放熱型 チョークコイルの開発

鄭 暁光*・伊志嶺 朝之・山本 伸一郎
徳岡 輝和・大橋 紳悟・藤川 裕之
早崎 俊克

Downsized High-Heat-Dissipation Choke Coil Designed with Powder Cores — by Xiaoguang Zheng, Tomoyuki Ishimine, Shinichiro Yamamoto, Terukazu Tokuoka, Shingo Ohashi, Hiroyuki Fujikawa and Toshikatsu Hayasaki — Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed magnetic powder core materials for power inductors used in eco-friendly vehicles. Pure iron based powder cores with an operating frequency range from 10kHz to 30kHz have been used for boost converter reactors in hybrid-electric vehicles (HEVs), while low-loss Fe-Si-Al alloy powder cores with an operation range of several hundred kHz have shown the potential to replace ferrite cores for buck converter choke coils. Our low-loss alloy powder cores are also a competitive alternative for choke coils in plug-in HEV and EV on-board chargers, which generally operate in a range from 50kHz to 200kHz. This paper compares differences in size, weight, power loss, and DC-bias characteristics between E-type choke coils that are respectively designed with Fe-Si-Al alloy powder cores and ferrite cores for the power factor correction (PFC) of the charger. The simulation results show that alloy powder cores significantly reduce the size and weight of choke coils compared with ferrite cores. This paper also describes a new choke coil structure that we have developed to improve the heat dissipation of E-type choke coils. The experimental results indicate that the newly designed choke coil has a lower operating temperature than that of E-type choke coils.

Keywords: inductor, choke coil, PFC, charger, powder core, heat dissipation

1. 緒 言

地球温暖化・化石燃料枯渇対策として、自動車のCO₂排出削減・燃費向上が重要であり、化石燃料を用いた内燃機関からバッテリーを動力源とする電動駆動システムへの転換が進められている。自動車の電動化において、モータ、バッテリーのほか、HEVに搭載されモータ出力を向上するための昇圧コンバータ、HEV/EVに搭載され駆動バッテリーの高電圧を補機用低電圧に変換する降圧コンバータ、さらにPHEV/EVに搭載され外部電源でバッテリーを充電できる車載充電器などの電力変換装置が重要となっており、その小型化、高効率化に向けた開発が進められている。これらの電力変換装置はスイッチング電源^{*1}の一種であり、電圧変換、エネルギー伝送に使われるリアクトル、またチョークコイルと呼ばれるパワーインダクタを多く使用している。このパワーインダクタは通常、鉄心（コア）にコイルを巻くことで構成されており、その鉄心となる軟磁性材料の特性がパワーインダクタのみならず電源装置の体格、性能に大きな影響を及ぼしている。

当社では、数10kHz駆動周波数に適した純鉄系圧粉磁心^{*2}材料の開発と共に、コイル加工、部品組み立て技術を構築し、HEV昇圧コンバータ用リアクトルの開発と実用化を進めてきた^{(1),(2)}。また、数100kHz高周波用途に適した合金

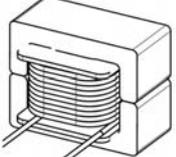
粉末を用いた低ロス圧粉磁心材料の開発も進めており、HEV降圧コンバータ用チョークコイルへの適用を検証してきた⁽³⁾。

一方、家庭用電源からの充電を可能とし、CO₂排出の削減効果が期待できるPHEV/EVの開発が車メーカーにより進められており、充電の役割を担う車載充電器の小型化、高性能化が求められている。この車載充電器の電圧変換に用いられるチョークコイルの駆動周波数は通常、50kHz～200kHzの範囲にあり、当社で開発してきた合金系低ロス圧粉磁心材を適用できる可能性が高い。そこで、筆者らは充電器回路用チョークコイルに要求される電気仕様を分析し、コア材選定、磁気設計、放熱性、作りやすさを最適化した小型、高放熱型チョークコイルを開発した。本稿では、その開発の経緯、実験検証の結果について報告する。

2. チョークコイルの概要と開発方針

チョークコイルはコアの形状によって大きく分けてトロイダル型とE型に分類できる。この二種類のチョークコイルに対し、コア材料、空気ギャップの導入、放熱性、及びコイル巻きの容易さを比較した結果を表1に示す。まず、

表1 トロイダル型とE型チョークコイルの比較

	トロイダル型	E 型
		
コア材	フェライト、圧粉磁心など	
空気ギャップ	設け難い	設け易い (設計の自由度が高い)
放熱	銅損優先	鉄損優先
コイル巻き	手巻きが主流	自動化が容易

利用するコア材は何れもフェライト材、圧粉磁心材などによって成形できる。また、磁路に空気ギャップを取り入れることでチョークコイルの磁気特性を調整することができる。トロイダル型と比べて、E型は通常、2個のコアから構成され、突合せの足の寸法調整により、容易に空気ギャップを設けることができるため、磁気設計の自由度が高い。また、放熱については、実装時の置き方、コアとコイルの内外位置関係から、トロイダル型はコイル部の放熱性が高いのに対し、E型はコア部の放熱性が高い。そして、コイル巻き加工は、トロイダル型の場合、リング状のコアにコイルを巻きつける工程が複雑になるため、手巻きが主流である。一方、E型は別部品のボビンにコイル巻きを行った後に、コアを組み付ける構造であるため、比較的容易にコイル巻きを自動化できる。

車載充電器用チョークコイルの開発においては、小型、放熱性、作りやすさを考慮する必要がある。チョークコイルの小型化は部品コストの削減以外に、充電器自体の小型化に繋げることができる。このチョークコイルの小型化を実現するためには、設計は電気仕様に適したコア材の選定を行うほか、ターン数、磁路断面積、空気ギャップ長さなどの設計パラメータの最適化を行う必要がある。また、チョークコイルの小型化に伴い発熱密度が増加し、温度上昇が課題となるため、効果的な放熱構造が必須となってくる。一方、作り易さの面で、構造が簡素で、容易に自動生産ができることが望ましい。筆者らはこれらの観点で、車載充電器用チョークコイルの開発に取り組んだ。

3. 車載充電器用チョークコイルの設計

3-1 チョークコイルの電気仕様 充電器回路をもとにチョークコイルに必要な電気仕様となる電流-インダクタンス仕様の一例を推定した。図1は充電器回路の一例であり、PFC (Power Factor Correction : 力率改善) 回路、変圧絶縁、整流平滑回路によって構成されている。チョークコイルはPFC回路に2個、平滑回路に1個用いら

れている。ここではPFC回路用チョークコイルに求められる電気仕様を検討した。

入力電圧200V、出力3kWの普通充電を想定する場合、PFC回路用チョークコイルの定格電気仕様の一例を表2に示す。チョークコイルに要求される直流重畳特性^{*3}は平均電流に対するリップル電流の比率に決められる。その関係を図2に示す。通常、3kW容量のPFC回路はピーク電流を押さえ、電流が0Aにならないような連続電流モードの動作が望ましい。図2(a)は平均電流に対するリップル率が200%であり、電流が0A以下にならない臨界モードにおける電流波形を示す。図2(b)はリップル率50%における電流波形を示す。リップル率を200%から50%に下げることによって、ピーク電流は42.4Aから26.5Aに低減することができる。回路設計の観点から、リップル率の低減により、ピーク電流を抑えることができるため、チョークコイルに求められる直流重畳特性^{*3}を緩和できるほか、コンデンサ、

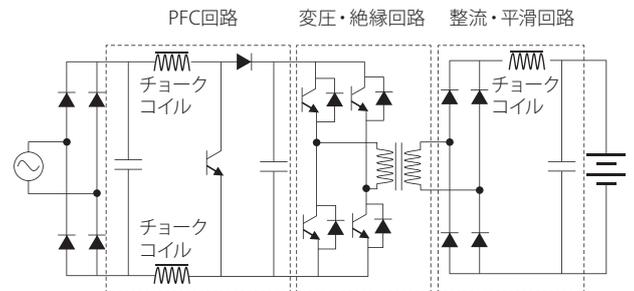


図1 車載充電器回路例とチョークコイル

表2 PFC回路用チョークコイルの入出力仕様

入力電圧	出力電圧	平均電流
100V (50Hz)	200V (DC)	15A (50Hz)

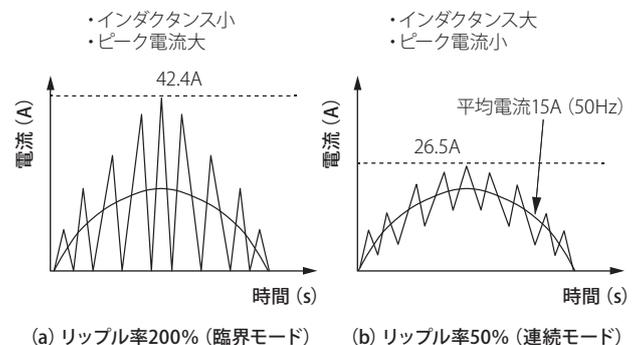


図2 チョークコイルのリップル電流

パワー半導体など関連部品への要求スペックの低減にも寄与できる。

平均電流の最大値、 $15\sqrt{2}A$ におけるリップル率を50%にすることを設計目標とする場合、**図1**の回路、**表2**の入出力仕様に基いて試算した結果、チョークコイルのインダクタンス値を78.1 μ Hにすれば達成できる。その際、PFC回路はピーク電流が26.5Aとなり、且つ連続電流モードで動作する。以降は、78.1 μ H@26.5Aを目標仕様とし、チョークコイルの設計検討を進めた。

3-2 フェライト材と圧粉磁心材の特性比較 **表3**に当社で開発を進めてきた高周波用途の圧粉磁心材とフェライト材の特性比較を示す。Fe-Si-Al粉末を用いた当社の圧粉磁心材料は、高電気抵抗と高飽和磁束密度を両立する独自の絶縁被覆技術と、軟磁気特性に優れる合金組成の最適化などにより、汎用的なダストコア材と比較し磁束密度の向上と損失の低減を実現した材料である。また、チョークコイルで最もよく用いられるフェライト材と比べても、約2倍の飽和磁束密度が得られるだけでなく、キュリー温度^{*4}(約500℃)が高いことから高温環境においても安定した磁気特性が得られる。

一方、コア磁気特性の比較を行う場合、磁路に空気ギャップを設けることで磁気特性を調整できるため、空気ギャップの影響を含めた特性比較が必要である。そこで、任意のE型コア(**図3**)を用いて120℃における両材料のAL値(nH/N²)と起磁力NI(AT、アンペアターン)の関係

表3 開発圧粉磁心材とフェライト材の特性比較

	単位	圧粉磁心材	フェライト材
主な成分		Fe-Si-Al系合金粉末	Mn-Zn系フェライト
飽和磁束密度 ^{*1}	Tesla	~0.89	~0.50
鉄損 ^{*2}	kWm ⁻³	400~1000	60~350
初期透磁率	—	50~80	2000~5000
使用温度	℃	150℃以上	~120℃

※1：室温の値 ※2：磁束密度0.1T、周波数100kHz、温度100℃での値

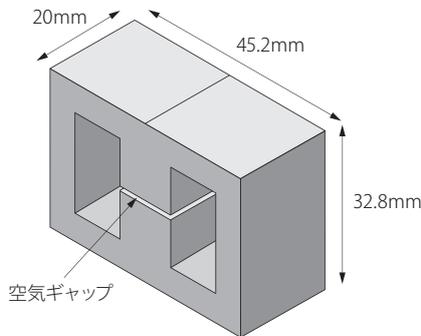
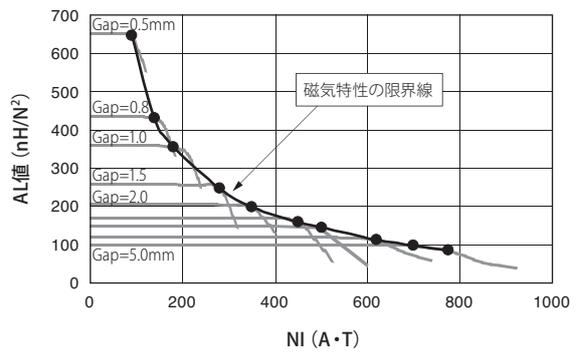


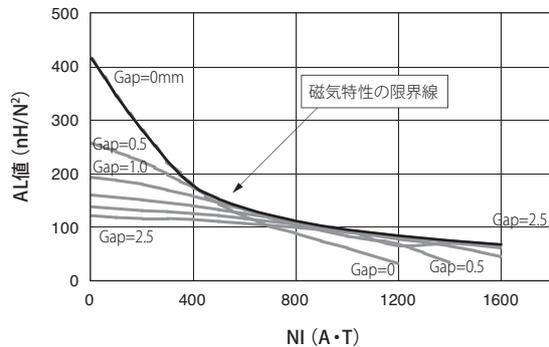
図3 材料特性比較に用いたE型コア

係をFEM磁界解析^{*5}を利用して計算し、その結果を比較した。ここで、フェライト材は一般的なパワーインダクタに使われる透磁率が3300程度のもを用いている。

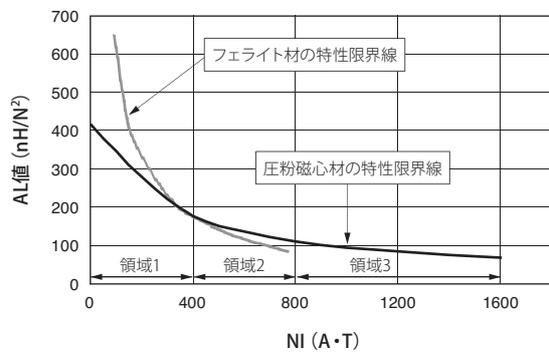
フェライト材は磁気飽和するまでAL値-NI特性曲線が水平の直線を呈しており、空気ギャップを増やすにつれて、インダクタンスは小さく、飽和電流は大きくなる(**図4(a)**)。空気ギャップ毎のAL値-NI曲線の飽和し始める点を繋いでできた右肩下がりの曲線はフェライト材磁気特性の限界線と見なすことができる。一方、**図4(b)**は当社開発圧粉磁心材のギャップ毎のAL値-NI特性曲線であり、透磁率の非線形性が強いいため、それぞれ右肩下がりの曲線となっ



(a) フェライト材コアのAL値-NI特性曲線(120℃)



(b) 当社圧粉磁心材コアのAL値-NI特性曲線(120℃)



(c) AL値-NI特性の比較

図4 圧粉磁心材コアとフェライト材コアの磁気特性比較

ている。これらの曲線の最大AL値で構成した最上側の曲線は圧粉磁心材の磁気特性の限界を表している。

両者の磁気特性限界線を重ね合わせると、ある点でクロスしていることが分かる(図4(c))。NI値が低い領域1では、フェライト材は圧粉磁心材よりAL値が高く、低電流、高インダクタンスの仕様に適している。領域2では、圧粉磁心材はAL値が高いため、フェライト材より大きなインダクタンスを提供できる。NIの値が高い領域3において、フェライト材の場合、高い透磁率と低い飽和磁束密度に起因する磁束飽和を避けるために、5mm以上の空気ギャップが必要となる。この場合、ギャップ周囲の漏れ磁束が大きくなり、高周波銅損の増大を招く問題が生じる。これに対し、圧粉磁心材のギャップは2.5mm以下に制限することができるため、漏れ磁束による損失を抑えたチョークコイルの設計が可能である。

チョークコイルのインダクタンスはAL値とターン数の自乗との積で計算されるため、図4(c)の関係から、ターン数を増やし、高いNI値で圧粉磁心を用いて設計すれば、より小型のチョークコイルを得られることが分かる。一方、車載充電器用チョークコイルは定格電流が10~20A程度であり、比較的細い巻線を使用しているため、チョークコイル全体体積に対するコイル部の体積割合が小さく、ターン数の増加に伴う体積増加は限定的である。

ここでは、3-1章で試算した目標仕様の78.1uH@26.5Aを適応すると、フェライト材が有利な領域1では、最大NI値が約400ATであり、最大電流の26.5Aに対し、約15ターンしか巻けず、インダクタンス値の達成には比較的大きなコアが必要とされる。圧粉磁心材を用いて設計を行う場合、領域2または領域3を活用し、ターン数を増加することで、より小さなコアでチョークコイルを実現できる。なお高いNI領域で設計できることの根本的理由は圧粉磁心材の高い飽和磁束密度にある。

3-3 チョークコイルの設計結果比較 フェライト材と開発圧粉磁心材を用い、それぞれ78.1uH@26.5Aの電気仕様を満たすE型チョークコイル設計を行った結果を表4に示す。ターン数、磁路断面積、ギャップ寸法などの磁気パラメータは当社独自のチョークコイル設計ツールを用いて体積が最小となるよう最適化を実施した。

設計結果から圧粉磁心材を用いたチョークコイルはフェライト材設計と比べ、体積を34%、重量を45%小型化できることが分かった。図5はそれぞれの形状を示す。また、図6は両者の直流重畳特性を示している。圧粉磁心材の方はピーク電流(26.5A)までのインダクタンスが高いため、回路動作時のリップル電流をより小さくできる。損失についてFEM磁界解析を用いた予測を行った結果、銅損と鉄損の合計では、圧粉磁心材設計がフェライト材設計より約2W大きいものの、これは3kWの出力に対し約0.13%の割合でしかなく、充電効率への影響は僅かである。損失の内訳を見ると、圧粉磁心材設計は鉄損が大

表4 チョークコイル設計結果の比較

		フェライト材設計	圧粉磁心材設計
体積(立方体計算)		64.5cm ³	42.5cm ³ (-34%)
重量	コア使用量	187g	75g
	コイル使用量	27g	43g
	トータル重量	214g	118g (-45%)
インダクタンス(目標仕様78.1uH~@26.5A)		87.8uH@26.5A	88.7uH@26.5A
コイル	ターン数	ø1.5mm × 15 turns	ø1.5mm × 36 turns
	巻線層数	3層巻き	4層巻き
空気ギャップ		2.0mm	1.0mm
最大動作磁束密度		0.20T	0.54T
損失	鉄損	0.13W	1.6W
	銅損(50Hz)	4.3W	6.0W
	銅損(50kHz*)	1.7W	0.64W
	損失合計	6.2W	8.2W (+34%)

*スイッチング周波数を50kHzとする

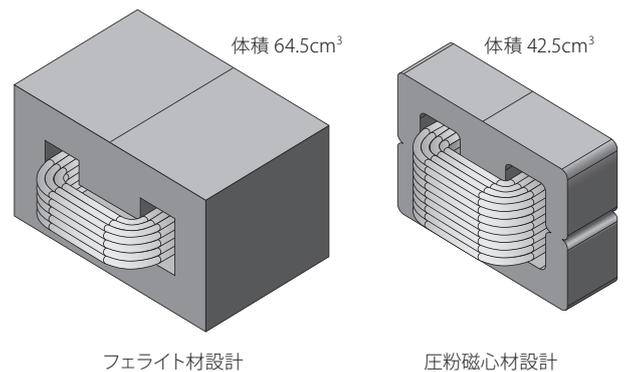


図5 チョークコイルの形状

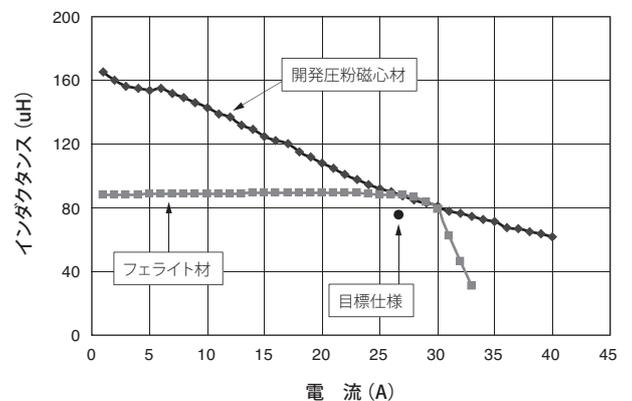


図6 チョークコイルの直流重畳特性

きいのに対し、フェライト材設計では、漏れ磁束による高周波銅損が大きい。

次に、両者の体積当たりの発熱密度を比較した（表5）。圧粉磁心材設計は小型化と発熱増加に伴い全体平均発熱密度がフェライト材設計の2倍近くに上がっており、温度上昇が懸念される。また、コイル発熱密度がコア発熱密度より10倍以上高いことから、コイルの放熱を優先した構造が必要である。

表5 チョークコイルの体積発熱密度

	フェライト材設計	圧粉磁心材設計
全体の平均発熱密度 (W/cm ³)	0.10	0.19
コイル発熱密度 (W/cm ³)	1.98	1.37
コア発熱密度 (W/cm ³)	0.003	0.12

4. 新構造チョークコイルの考案と実験検証

圧粉磁心材によるE型チョークコイルの放熱性を検証するため、試作サンプルを駆動回路に組み込み、定格電圧にて動作させた際に生じる温度上昇を実測した。冷却条件について、充電器が車の水冷システムを利用することを想定し、チョークコイルの水冷放熱環境を模擬した（図7）。温

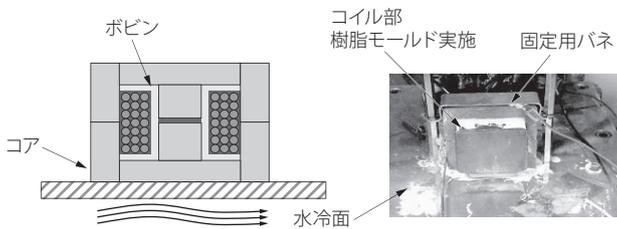


図7 E型チョークコイル動作時の温度実測

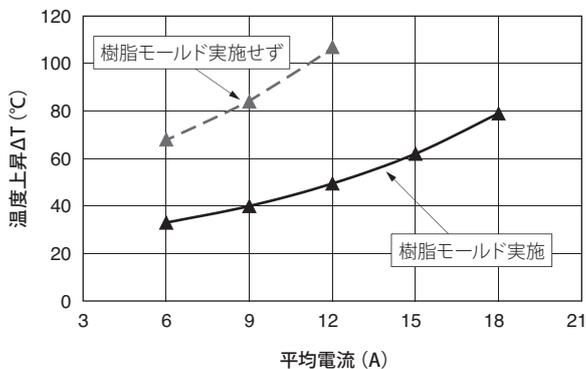


図8 E型チョークコイルの温度上昇

度実測結果は図8に示しており、平均電流の増加につれ、コイル部最大温度の上昇が大きくなり、定格電流15Aにおける温度上昇が60°Cまで増加し許容範囲を超過することが分かった。これはコイルと水冷面の間に熱伝導率が低い樹脂材ボビンとコアによる大きな熱抵抗が介在しているためである。

放熱性を改善するため、二つの単純形状のコアの組合せによる新しい構造のチョークコイル（図9）を考案し、コイル部を放熱面に近づけることで放熱性の向上を図った。図10に新構造チョークコイルの実装時の断面を示す。新構造チョークコイルではコイル部に直接的な放熱ルートができていくことが分かる。また、空気ギャップはインナーコアの寸法を調整することで実現できる。

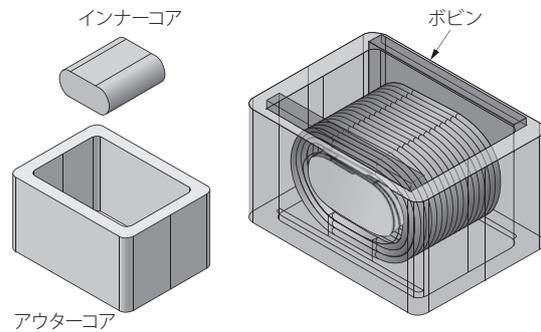


図9 新構造のチョークコイル

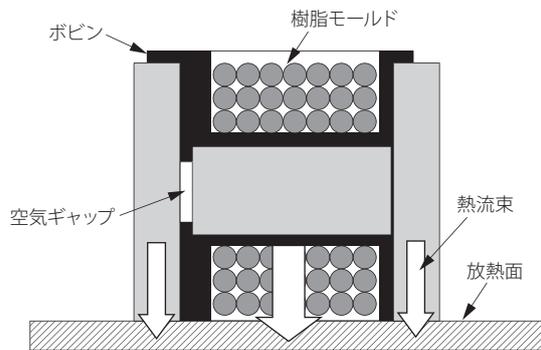


図10 新構造チョークコイルの断面図

E型と新構造の特性比較について、表6に設計結果を、図11に直流重畳特性を示す。体積について新構造はE型と比べ、無駄なスペースがなく立方体に設計できるため、よりコンパクトになり、E型より小さくなっている。一方、損失の面では、空気ギャップの増加と、磁束の漏れ方の変化によって、高周波銅損がE型より約1.3W増加した。な

表6 E型と新構造の設計結果比較

		E型設計	新構造設計
コア材料		圧粉磁心	
体積 (立方体計算)		42.5cm ³	37.1cm ³
重量	コア使用量	75g	88g
	コイル使用量	43g	42g
	トータル重量	118g	130g
インダクタンス (目標仕様 78.1uH ~ @26.5A)		88.7uH@26.5A	88.9uH@26.5A
コイル	ターン数	φ1.5mm × 36 turns	
	巻線層数	4層巻き	3層巻き
空気ギャップ		1.0mm	1.5mm
損失	鉄損	1.6W	1.8W
	銅損 (50Hz)	6.0W	5.8W
	銅損 (50kHz※)	0.6W	1.9W
	トータル損失	8.2W	9.5W

※スイッチング周波数を50kHzとする

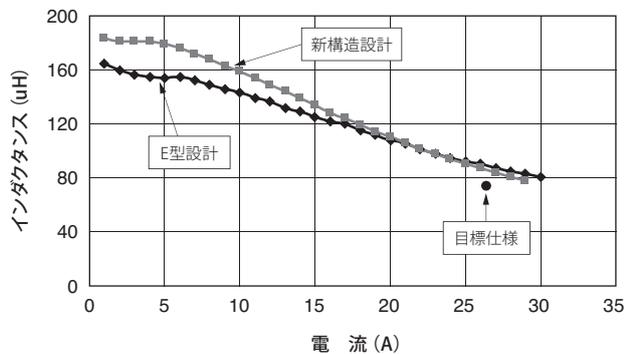
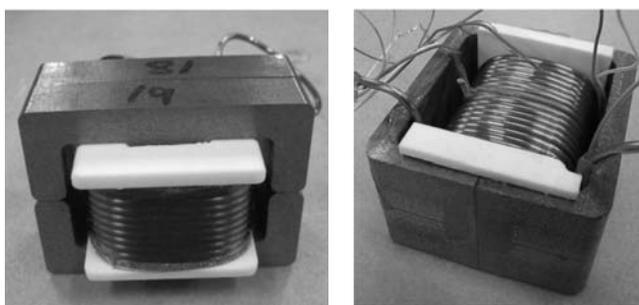


図11 新構造チョークコイルの直流重畳特性



(a) E型設計

(b) 新構造設計

写真1 試作チョークコイル

お直流重畳特性は両者がほぼ同じ性能を有する。写真1にE型と新構造の試作品の写真を示す。

放熱性の実験検証はE型と同じ条件で実施し、その実測結果を図12に示す。新構造チョークコイルは定格電流

15Aにおいて、最大温度上昇がE型の60℃から40℃まで低下し、優れた放熱性を備えていることを確認できた。また、作りやすさの面では、新構造はE型と同様にコイル巻きの自動化が容易であるほか、コア形状が単純であるため、プレス成形による製造に適している。

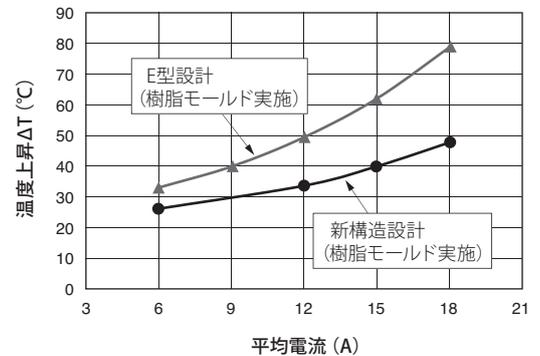


図12 新構造チョークコイルの温度上昇

5. 結 言

本研究では、PHEV/EVに搭載される車載充電器に向け、当社低ロス圧粉磁心材を用いて、小型化、高放熱化を目標とし、新しい構造のチョークコイルの開発に取り組んだ。結論を以下に示す。

- ①FEM磁界解析を用いてフェライト材と圧粉磁心材の磁気特性を比較した結果、コイルターン数を増加し、圧粉磁心材の高飽和磁束密度を活用した設計を行う場合、チョークコイルを小型化できるという可能性を見出した。
- ②フェライト材と圧粉磁心材を用いて、充電器PFC回路用E型チョークコイルを具体例に詳細設計を行い、フェライト材より、圧粉磁心材を用いた設計が体格、重量共に大幅に低減できる結果を得た。
- ③放熱実験で確認したE型チョークコイルの放熱課題に対し、インナーコアとアウターコアの組み合わせによって構成され、放熱性を向上させた新構造チョークコイルを開発し、その優れた放熱性を実験で検証した。また、新構造チョークコイルはコイル巻きの自動化が容易であるほか、コアが成形し易い形状のため、生産性にも優れている。

以上の結果により、圧粉磁心材を用いた新構造チョークコイルは小型と高放熱性との両立を実現できることが分かった。今後、その実用化を目指した開発を進めていく。

用語集

※1 スイッチング電源

IGBTなどのパワー半導体を用いて、インダクタ、コンデンサをON/OFF制御し、電圧または電流を調整する電力変換装置。

※2 圧粉磁心

絶縁被覆を施した軟磁性粉末を加圧成形して得られる磁心材料。

※3 直流重畳特性

インダクタに流れる交流電流に直流電流を重畳させる際の、インダクタンスの変化と直流電流の関係を指す。

※4 キュリー温度

磁性材料が磁気特性を失う温度を指す。

※5 FEM 磁界解析

有限要素法 (Finite Element Method) という数値計算方法を用いた磁界分布の計算。

参考文献

- (1) 神頭 他、SEIテクニカルレビュー第175号、78 (2009)
 - (2) 吉川 他、SEIテクニカルレビュー第178号、116 (2011)
 - (3) 伊志嶺 他、SEIテクニカルレビュー第178号、121 (2011)
-

執筆者

鄭 暁光* : 自動車技術研究所
パワーインダクタの開発、設計に従事



伊志嶺朝之 : アドバンストマテリアル研究所

山本伸一郎 : 自動車技術研究所

徳岡 輝和 : アドバンストマテリアル研究所 主査

大橋 紳悟 : 自動車技術研究所 主席

藤川 裕之 : 自動車技術研究所 主幹

早崎 俊克 : 自動車技術研究所 所長

*主執筆者