

自動車の進化を支える金属系パワーチョークコイルの開発と実用化

Development and Commercialization of Metal-based Power Choke Coils that Support the Evolution of Automobiles

大坪 睦 泰
Mutsuyasu Otsubo

松谷 伸 哉
Nobuya Matsutani

堀内 一 志
Hitoshi Horiuchi

要 旨

自動車の電子制御回路（ECU）の電源部に使用されるパワーチョークコイル（PCC）は、電子制御回路の高機能化や半導体の進化により大電流・高周波化が求められ、従来のフェライト磁性材を用いたPCCでは、対応困難になってきていた。筆者らは、金属系複合磁性材（メタルコンポジット：MC）とコイル一体成形技術を開発し、車載用途として事業化に成功した。開発した車載用PCC-MCは従来比で約2倍の電流を流すことができるため、電源回路の40%以上の小型化を達成し、各種ECUの小型化を可能にした。また150℃の耐熱性、30Gの耐振性、3000時間の信頼性を有しており、高温のエンジンルームへの搭載も可能とした。

Abstract

Power choke coils (PCCs) used in the power supply section of electronic control circuits (ECUs) in automobiles require higher currents and higher frequencies due to the higher functionality of ECUs and the evolution of semiconductors. This has become difficult to handle with conventional PCC using ferrite magnetic materials. We have developed a unique magnetic metal-based composite material (metal composite; MC) and coil integral molding technology, and succeeded in being the first worldwide to commercialize it for in-vehicle applications. The developed in-vehicle PCC-MC can handle about twice as much current as the conventional one, so the power supply circuit can be reduced in size by 40% or more. It is also resistant to heat of 150°C, resistant to vibrations of 30G, and reliable for 3000 hours of performance, making it possible to install in a high-temperature engine room.

1. はじめに

1990年代、自動車の電子化が進展する中で電子制御回路（ECU: Electronic Control Unit）の電源回路に用いられるインダクタ（パワーチョークコイル：PCC）は、高機能化や半導体の進化により、大電流、高周波化が求められるようになった。また、搭載場所がエンジンルームやエンジン直付けに変化することによって、耐熱性や耐振性の要求が厳しくなった（第1図）。

従来用いられていたPCCは、高周波特性に優れた酸化物のフェライト磁性材を用いるものが主流であったが、飽和磁束密度（Bs）が低く、大電流を流すと必要なインダクタンスが確保できず、大電流化とPCCの小型化の両立は困難であった。

インダクタンスLと透磁率μの関係式、透磁率μと飽和磁束密度Bsの関係式を示す。

$$L = \mu N^2 S / l \quad \dots \dots \dots (1)$$

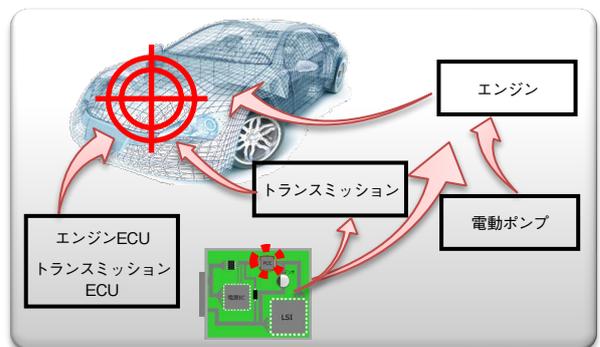
$$B_s = \mu H \quad \dots \dots \dots (2)$$

N: コイル巻き数, S: 断面積, l: 磁路長,

H: 磁界

大電流が流れ磁界Hが大きくなったとき、飽和磁束密度Bsが小さいと透磁率μが小さくなり、インダクタンスが小さくなる。

■ECU 搭載場所の変化



■ECU/回路の変化



第1図 自動車ECUの進化とPCCへの要求

Fig. 1 Evolution of automobiles and requirements for PCC

そこで筆者らは大電流特性に優れた高い飽和磁束密度Bsを有する金属磁性粉を用い、これと絶縁材（バインダーシステム）を複合化することで高周波化に対応する金属系複合磁性材（メタルコンポジット：MC）とコイル一体成形プロセスを開発した。このMC材やコイル一体成形プ

プロセスを車載仕様に改良することで、車載用途での事業化を実現した。

2. 車載用PCC-MCのコンセプト

大電流、小型化、高信頼性を実現するために、金属系複合磁性材料と、コイル一体型構造の開発がポイントとなった。

磁性材料は、粉末の表面を絶縁皮膜で覆った金属磁性材と、結合剤で構成される。できるだけ金属磁性材の充填（じゅうてん）率を高めることが、磁気特性を向上させるために必要となるが、耐圧の確保とのトレードオフになる。また、高温環境で使用することを想定し、耐熱性に優れた結合剤の選定が重要になった。

コイル一体型構造においては、車載での使用に耐えるため、断線不良および成形体内部の欠陥（クラック）を発生させない構造およびプロセスの実現を目指した。

これらを実現するためのキーとなった技術を以下に示す。

- 磁性粉組成（FeSiCr系）による高磁束密度／低損失／耐湿性とシリコンバインダーシステムによるクラックレス／耐熱性を実現した金属系複合磁性材料技術
- 磁性粉の絶縁処理と無機材料の配合により材料の高耐圧化と高充填を両立すると共に、粉末の流動制御による一体成形のクラックレスを実現した高信頼性材料技術
- 高耐振・高信頼性を実現した、接合レス端子構造と磁性コアの超均一密度制御プロセス技術

これらの詳細について、次章以降で述べる。

3. 金属系複合磁性材料技術

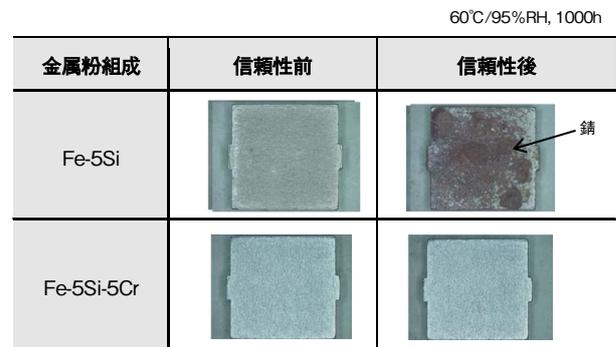
MC材は、大電流特性に優れた金属磁性粉と絶縁材（バインダーシステム）とを複合化した金属系複合磁性材である。この金属系複合磁性材とコイルを一体化することで、次の大きな2つの材料課題がある。

- ① 高温多湿下での錆（さび）発生
- ② PCC-MCのコアクラック

①については、金属磁性体として、大電流特性を有する磁性特性として飽和磁束密度（Bs）が高い、すなわち鉄（Fe）成分を多く含有した組成が好ましい。しかし、第2図に示すように金属粉組成Fe-5Siが多湿環境下（60℃ / 95%RH, 1000 h）で錆（主にFeの酸化物）を発生させ、それが回路上に脱落し、短絡等を引き起こす懸念が生じた。

従来、金属系磁性体として、一般に耐食性が優れているといわれるセンダスト（FeSiAl）系、パーマロイ（FeNi）

系、アモルファス系を用いても、PCCとして錆の発生を抑制することは困難であった。また、最終PCCコア全体に、錆防止のコート材で覆うことが考えられたが、PCC-MCのコンセプトである、簡易なプロセス、単純構造に反するため採用せず、金属磁性材の組成自体から見直しを行った。筆者らは、酸素親和力が強い元素を導入することで、Feの酸化を抑制するアプローチを試みた。特にCrは、自由エネルギーが、酸化物としてFeで形成されるそれに比して低いために表面に析出しやすく、耐食性を有する良好な不動態層として形成されることが予想される。Crは非磁性組成のため磁気特性の低下を招くが、Fe成分中にCr成分とSi成分とを共存させることで磁気特性を損なうことなく、耐食性も向上することを見出した。第2図に耐湿試験比較を示す。耐湿試験は60℃ / 95%RH, 1000 hの条件で行った。従来の金属粉組成Fe-5Siは、サンプル全面にわたってFeの酸化物が発生した。一方、Crを導入した金属粉組成Fe-5Si-5Crサンプルは耐湿試験後も全く鉄の酸化の発生を確認できず、耐食性が向上したことがわかる。このようにFe系磁性材に対してCrとSiを共存させるアプローチで磁気特性と耐久性の両立が実現でき、FeSiCr系金属磁性材の開発に成功した。



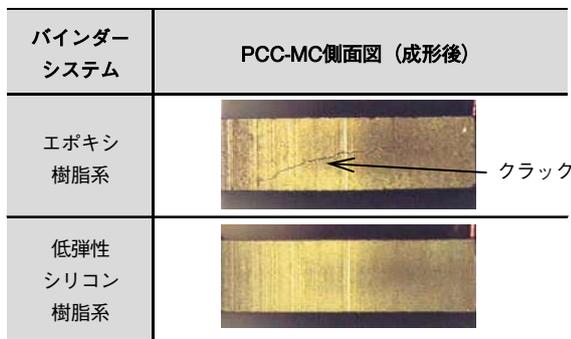
第2図 耐湿試験比較

Fig. 2 Comparison of humidity resistance

②のクラック（亀裂）については、コイルをMC材と一体で圧縮成形するプロセスで、内蔵されたコイルが成形時に圧縮され、その後の成形圧力解放時に、コイルが元に戻ろうとする（スプリングバック）現象により発生することがわかった。従来のエポキシ樹脂系を用いた場合、PCC-MCの側面部にクラックが多発した様子を第3図の上の図に示す。このクラックは、MC材に含まれる結着性を有する樹脂量を増やすことで抑制できるが、金属磁性粉の含有量が減少するため、磁気特性が低下し、所望のインダクタンス値を満たすことができない。また、機械的強度の観点からエポキシ樹脂系を用いることが好ましいが、ユーザーの耐熱要求の向上（150℃以上）に伴い、耐熱性も含めて、

バインダーシステムの見直しが不可避となった。このため、筆者らは高耐熱性を有するシリコン樹脂系をベースに、樹脂の損失弾性率に着目し、少ない樹脂量でも成形圧力解放時にコイルのスプリングバックの応力を吸収しうる複合低弾性シリコン樹脂系を見出した。第3図に従来エポキシ樹脂系と低弾性シリコン樹脂系を用いたPCCの側面比較（上下が成形方向）を示す。エポキシ樹脂系では、側面の上下方向に引き裂かれるクラックが多発するが、低弾性シリコン樹脂系を用いた新バインダーシステムではクラックレスを実現している。

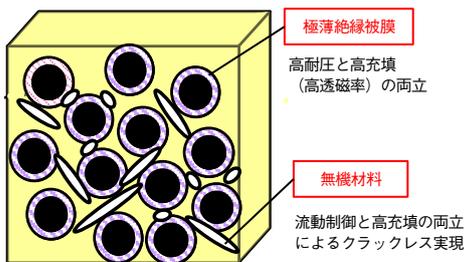
①②の課題を解決した新金属複合材料技術で、コイル一体のPCC-MCを実現した[1][2]。



第3図 バインダーシステム比較
Fig. 3 Comparison of binder system

4. 高信頼性材料技術

PCC-MCにおいて車載用途に求められる高信頼性を確保するにあたり、2つの課題があった。1つは、十分な絶縁性能の確保、もう1つは、クラックの抑制である。金属系複合磁性材の構成を、第4図に示す。これら2つの課題に対し、絶縁被膜形成技術の確立、無機材料の粒子径制御で解決を図った。

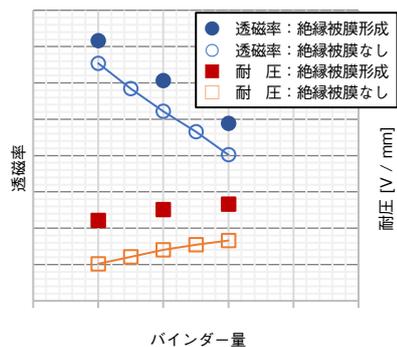


第4図 金属系複合磁性材の構成模式図
Fig. 4 Schematic diagram of the magnetic metal composite material

4.1 絶縁性の確保

故障時でも十分な安全性を確保するため、市場での使用環境・使用条件と時間に対して寿命を想定し、高負荷（保証以上）の温度履歴を印加した後に、高バイアス電圧を付加して故障までの加速寿命試験を実施する必要がある。材料においてもその絶縁性能として $10^5 \Omega$ 以上の抵抗値が求められ、また車の電動化が進むことで、ヘッドライトのLED化など高電圧で使用されるケースも増え、耐圧性の向上（従来150 V/mmに対し、250 V/mm）が不可欠であった。

車載で求められる絶縁性や耐圧性の向上には、金属磁性粉への酸化膜の形成や、バインダー量を増やすことが一般的な手法であるが、金属磁性粉間のギャップが大きくなると充填率が下がるため、透磁率との間にはトレードオフの関係があった。従来技術のエポキシ樹脂系では充填率を上げるため成形圧力を大きくすることが一般的に採用されていたが、この方法では金属磁性粉間のギャップが小さくなり耐圧性が低下する。コイルのスプリングバックを助長させ耐クラック性が低下する、という課題があった。これを解決するため、金属系複合磁性材で採用した耐熱性があり低弾性な物性を有するシリコン樹脂系をベースに、磁性粉表面に極薄で均一な絶縁被膜を形成する技術を確立した。第5図に示すように絶縁性被膜を形成することで、高耐圧と高透磁率を同時に向上できていることが分かる。



第5図 バインダー量と透磁率/耐圧の関係
Fig. 5 Relationship between binder amount and magnetic permeability / withstand voltage

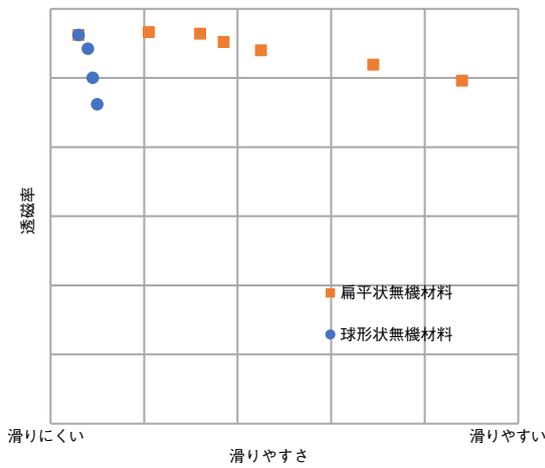
4.2 クラック抑制

クラックができる大きな原因は、コイル一体成形において加圧成形で発生する金属磁性粉の偏り（粉が全体に均一にいきわたらないこと）である。

この場合の開発のポイントは、加圧成形時に金属磁性粉を滑りやすくしてクラックを抑制することであった。崩れやすい扁（へん）平状の無機材料を用いて金属磁性粉同士

が流動しやすく、わずかなすき間を埋めるように無機材料の粒子径を設計することで、密度の高い充填率を確保しながらクラックの抑制を行った。

第6図に無機材料を添加した場合の透磁率と滑りやすさの指標の関係を示す。無機材料を添加することにより、粉末間の摩擦が小さくなり、滑りやすさは大きくなるが、磁性粉間にすき間ができるため、透磁率は低下する。しかしながら、扁平状の無機材料を使うことで、球形状に比べて磁性粉間のすき間を小さくすることができ、透磁率の低下を抑えることができることがわかる。

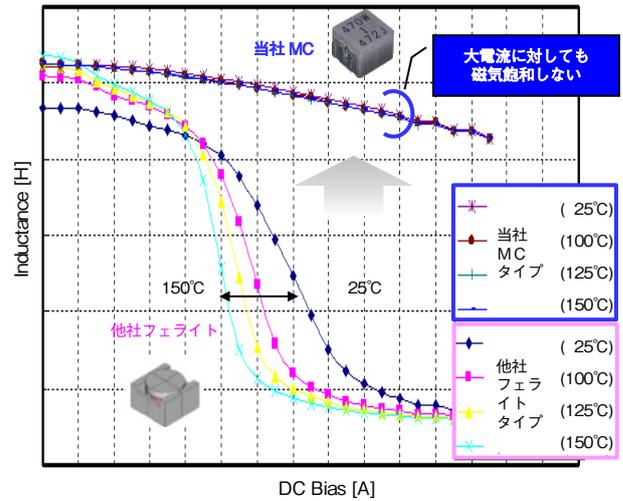


第6図 タルク添加時の滑りやすさと透磁率の関係
Fig. 6 Relationship between slipperiness and magnetic permeability when adding inorganic materials

5. 開発品と従来品の比較

開発したメタルコンポジットタイプのPCCと従来のフェライトタイプのPCCとの比較を行った。

第7図に示すように、高い飽和磁束密度を持つPCC-MCでは大電流に対しても磁気飽和しにくく、温度依存性もほとんどない。このため、フェライトタイプのPCCと比較してより大きな電流でインダクタンスを保つことができる。



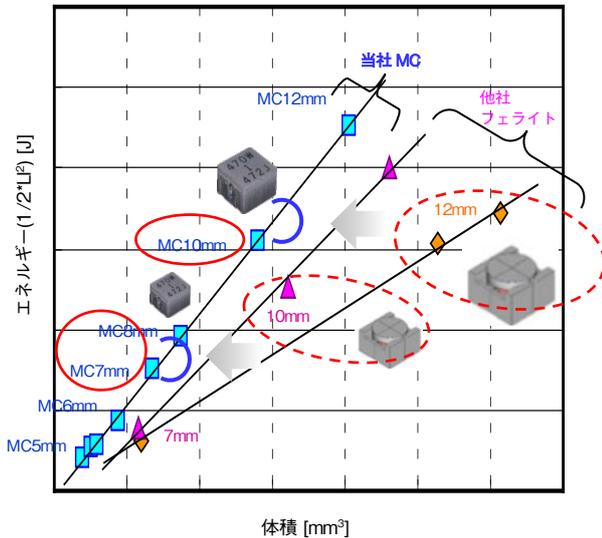
第7図 PCC-MCとフェライトPCCの直流重畳特性
Fig. 7 Current superimposition characteristics of PCC-MC and ferrite PCC

第1表 従来技術との比較

Table 1 Comparison with conventional technology

	メタルインダクタ (当社：車載用)	フェライトインダクタ (他社：車載用)	メタルインダクタ (他社：民生用)
コア材：Bs	MC：15 T	フェライトコア (NiZn)：0.45 T	MC：15 T
構造	MC一体成形 コイルリード直引き出し	コア・巻線組立構造 コイルリード内部半田接合	MC一体成形 コイルリード内部接合
材料	金属磁性材+シリコン樹脂	ドラムコア+リングコア+ 端子板+エポキシ接着剤	金属磁性材+エポキシ樹脂
飽和電流	○ 5 A	× 2.5 A	△ 4.5 A
耐熱性	○ 150°C (ピーク180°C)	△ 125°C	△ 125°C
耐振動性	○ 10 G~30 G	× ≤44 G	△ 44 G~10 G
耐湿性	○ 信頼性3000時間	○	× 錆発生
性能/体積	○ 100%	× 50~70%	△ 80~90%

第8図に、フェライトタイプのPCCとMCタイプのPCCのエネルギー（ $1/2LI^2$ ）と体積の比較を示す。同等のエネルギー（重量性能）を持つフェライトタイプのPCCと比較するとMCタイプのPCCでは、およそ40%の小型化が可能であることが分かる。



第8図 PCC-MCとフェライトPCCの体積／エネルギー比較
 Fig. 8 Volume and energy comparison between PCC-MC and ferrite PCC-MC and ferrite PCC

また、第1表に示すように、飽和磁束密度（Bs）の高い金属磁性材、耐熱性の高いシリコン樹脂を用いることで、飽和電流値は従来のフェライトタイプのPCCの約2倍の5A、150℃以上の耐熱性、10G以上の耐振動性、3000時間の耐湿性を実現している。

6. まとめ

金属系複合磁性材とコイル一体成形技術を開発することで、新たな「金属コンポジット・パワーチョークコイル（PCC-MC）」を実現した。

開発した車載用PCC-MCは、高い耐熱性・耐振性・耐溶剤性・過度電流に対する高飽和性能などを実現しており、インダクタ部品を高温下でエンジンルームへ搭載することを可能にした。さらに大電流に対応できる面実装大型品を開発供給することで、これまでトロイダルコイルのバスバー接続が一般的であった補機モータドライバなども基板実装が可能となり、機電一体化の車載用途への適用を可能にした。これらにより、車の電子化、電動化の普及、加速に大きく貢献した。

自動車市場では今後さらに電子化・電動化・自動運転化が進むため、小型・高性能な電源系インダクタの需要は高まる一方である。本開発品の基本技術をベースにシリーズラインナップの拡大を進めていく。

参考文献

- [1] 松谷 伸哉 他, "金属コンポジット材を用いたパワーチョークコイルの開発," 2005年春季粉体粉末冶金協会講演概要集, P73, 2005.
- [2] 松谷 伸哉 他, "金属コンポジット材を用いたパワーチョークコイルの開発," 2006年春季粉体粉末冶金協会講演概要集, P133, 2006.

執筆者紹介



大坪 睦泰 Mutsuyasu Otsubo
 パナソニック インダストリー (株)
 デバイスソリューション事業部
 Device Solutions Business Div.,
 Panasonic Industry Co., Ltd.



松谷 伸哉 Nobuya Matsutani
 パナソニック インダストリー (株)
 技術本部
 Engineering Div., Panasonic Industry Co., Ltd.



堀内 一志 Hitoshi Horiuchi
 パナソニック インダストリー (株)
 デバイスソリューション事業部
 Device Solutions Business Div.,
 Panasonic Industry Co., Ltd.