

# 磁気特性に優れる圧粉磁心の開発経緯と 実用化事例及び今後の展開

Practical and Potential Applications of Soft Magnetic Powder Cores  
with Superior Magnetic Properties

上野 友之\*  
Tomoyuki Ueno

鶴田 聖  
Hijiri Tsuruta

齋藤 達哉  
Tatsuya Saitou

渡辺 麻子  
Asako Watanabe

伊志嶺 朝之  
Tomoyuki Ishimine

山田 浩司  
Koji Yamada

近年、世界的な環境意識の高まりから、自動車分野ではハイブリッド車に代表されるように省燃費車が広く普及し始め、エネルギー分野では、太陽光や風力等を活用した発電機の普及が推し進められている。これらの機器には、電動機構や電源装置が必須であり、それらに用いられる中核部品のひとつに、鉄心と銅巻線からなる電磁変換コイルがある。その磁心材料として、一般的には電磁鋼板やフェライト等が知られているが、各種機器の小型化や高効率化、高出力化を実現するために、当社では交流磁気特性と形状自由度に優れた圧粉磁心を開発し、ハイブリッド車のリアクトル用途等で実用化してきた。圧粉磁心は、絶縁被覆された磁性粒子をプレス成形して作製する材料であり、優れた磁気特性を得る観点から、磁性粉末の組成制御や高純度化、絶縁膜材料とその被覆方法、ならびに潤滑剤やバインダ等の添加剤を、用途に応じて開発することが重要な要素である。これらの技術を活用して当社が開発した純鉄系および合金系(Fe-Si-Al)磁心は、優れた磁気特性を示し、モータやチョークコイル用途に適している。

Recently, environmental awareness has been growing worldwide, and energy saving vehicles, such as hybrid vehicles (HVs), and clean energy generated by solar and wind power generation are being promoted. Electrical operating systems and electric power devices are necessary for these applications, and electromagnetic conversion parts which are comprised of cores and windings are the key parts for them. While laminated steel and ferrite core are conventional materials for the cores, for downsizing these systems and devices and improving their power efficiency, we have developed a soft magnetic powder core (SMPC) which exhibits superior magnetic properties in a high frequency region and a high degree of forming freedom. Moreover, we have put it into practical use as an HV reactor, etc. The SMPC is produced by press-forming powder with an insulator layer. In order to improve its magnetic performance, the modification of magnetic particles composition and the elimination of impurities are effective. In addition, the development and modification of insulation layer materials, its coating technologies, and additive materials such as lubricants and binders are also important. The Fe-Si-Al alloy core developed by us exhibits superior magnetic characteristics.

キーワード：圧粉磁心、低コアロス(低損失)、高磁束密度、形状自由度、実用化実績

## 1. 緒 言

低炭素化社会の実現に向けて、自動車の電動化や家電・エレクトロニクスの省電力化、クリーンエネルギーの活用等が推進されている。これらには電動機構や電源装置等の電磁変換を必要とする重要機器が搭載されており、その一例としてモータ、トランス等が挙げられる。上述の機器の中核を担う部品のひとつに磁心と銅巻線から構成される電磁変換コイルがあり、当社では、その磁心材料として交流磁気特性に優れた圧粉磁心の開発を推進している。本材料は、絶縁膜で覆われた磁性粉末をプレス成形して作製するため、従来から広く用いられる電磁鋼板やフェライトと比較して形状自由度に優れている。さらに、個々の粒子が絶縁されており電気抵抗が高いために電磁変換効率に優れ、磁心材料中の鉄の含有量が多いために飽和磁束密度\*1が高いという特長がある。これらの利点を活かして、その用途は年々拡大しており、近年

は、各種機器において小型化や高出力化の要求が増大しており、磁心材料においても、その用途や使用環境に応じた高性能化が求められるため、材料組成や絶縁膜等に関する研究開発が重要である。本報では、圧粉磁心の概要について述べた後に、当社における圧粉磁心の低コアロス化等の高性能化に向けた開発や、各種機器での実用化事例について詳述し、最後に将来に向けた展望を記載する。

## 2. 圧粉磁心の概要

### 2-1 軟質磁性材料の種類と圧粉磁心の位置付け

一般的に磁性材料は硬質磁性材料と軟質磁性材料に大別され、本報では、外部磁場の影響により磁化しその大きさや方向を容易に変化させることが可能な後者の材料について取り上げる。軟質磁性材料は、本報で述べる圧粉磁心の他に、電

磁鋼板やフェライト、アモルファス薄帯等があり、これらは各種機器に求められる磁気特性に応じて使い分けられている。

図1に主な軟質磁性材料の用途を動作周波数と磁束密度の関係で整理した概念図を示す。動作周波数が低く磁束密度が高い用途の代表としてはモータが挙げられ、従来はラジアルギャップモータが主流であったが、近年は磁気回路が三次元的なアキシアルギャップモータ\*2等の実用化が徐々に進んでいる。動作周波数が高くなると電磁弁や大容量電源用のリアクトル等が挙げられ、さらに周波数が100kHz帯になると、小型電源用のチョークコイルやトランス等が挙げられる。これらの用途では、近年、動作速度や応答性向上ニーズの増大、さらにSiCデバイスに代表されるような周辺機器の進化に伴い高周波化が進んでいる。そのため、材料としては動作周波数が高い領域で高磁束密度を有し、かつプロセスとしては三次元的な磁気回路設計を具現化できる高い形状自由度を有する磁心が求められている。圧粉磁心は、絶縁被覆された磁性粉末を用いて粉末冶金法で作製されるため、高周波領域での磁気特性に優れ、かつネットシェイプ化\*3が比較的容易で形状自由度が高い点が特長であるため、上述の用途に適している。

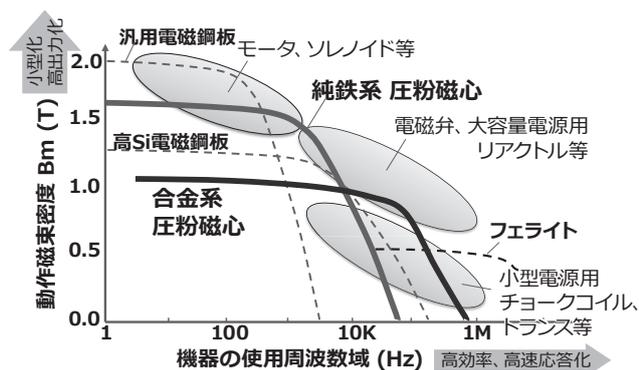


図1 軟質磁性材料の適用領域

## 2-2 圧粉磁心の組織と作製プロセス

圧粉磁心の組織模式図を電磁鋼板との対比で図2に示す。電磁鋼板は層間しか絶縁されていないが、圧粉磁心は全ての粉末が絶縁被覆されているため電気抵抗が高く、交流磁界での動作に際して渦電流\*4を粉末内部に閉じ込めることで、電磁変換時のエネルギー損失（以下、コアロス）を大幅に抑制することができる。

次に圧粉磁心の作製プロセスを図3に示す。圧粉磁心は、平均粒径約50~300μmの純鉄や鉄系合金（Fe-Si、Fe-Si-Al等）の磁性粉末に、厚さ約20~200nmの絶縁膜を施した後、金型に充填して加圧力600~1,500MPaで相対密度約80~98%にプレス成形し、成形で生じた残留歪みを解放するために400~800℃で熱処理を行い作製される。

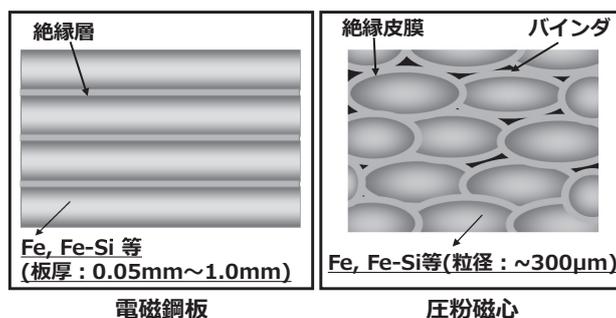


図2 軟質磁性材料の組織模式図

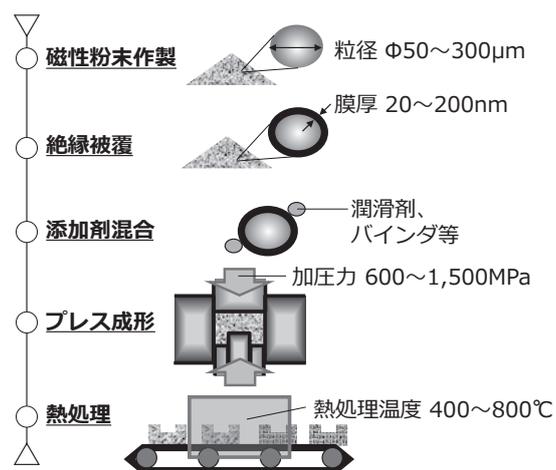


図3 圧粉磁心の作製プロセス

## 3. 圧粉磁心の実用化事例

本章では、当社独自に開発した圧粉磁心を、自動車の省燃費化に貢献する用途で実用化した事例として、内燃機関用途ではクリーンディーゼル用のコモンレール式の燃料噴射弁<sup>(1)</sup>とガソリンエンジン用点火コイルについて、ハイブリッド車用途では昇圧コンバータ用のリアクトル<sup>(2)</sup>について、それぞれ詳述する。

### 3-1 コモンレールシステムの燃料噴射弁用途

コモンレール式ディーゼル燃料噴射弁(写真1)には約1,800気圧以上に蓄圧された燃料を数100μsec以下の短時間で複数回噴射することが要求される。したがって、本用途の圧粉磁心には高い磁気吸引力、高速応答性に加えて高温強度や、磁気吸引面の寸法精度・面粗度等の高い加工精度が必要である。上記の要求を満たすために、本材料には、①極微量で高い絶縁性能および高温強度を向上させる結合樹脂(バインダ)の開発、②高密度を達成するプロセスの開発、が必要であり、特に①に関しては、エンジン周辺で用いられるため、耐熱温度200℃が必要である。

絶縁被覆された純鉄粉をプレス成形する際、図3に記載の通り一般的には上記粉末に保形用のバインダ(~0.5mass%)



写真1 ディーゼル燃料噴射弁 (断面) と本用途の圧粉磁心

と金型との摺動抵抗低減用の潤滑剤 (0.6~1.0mass%) の添加が必要であるが、本件では高密度化を目的として潤滑剤添加を排する代わりに金型表面に潤滑剤を直接塗布する金型潤滑法を開発して適用した。さらに金型を加温する温間成形法とも組み合わせ、潤滑剤を通常添加 (0.6mass%) した場合に対して、同じ成形圧力で約20%の高密度化を実現した。

図4に開発材と従来材の密度と磁束密度 $B_{8000A/m}$ の関係を示す。両材料ともに高密度化に伴い磁束密度は増加する傾向がある。そして、成形圧力が882MPaと同一条件で比較した場合、開発材は従来材より磁束密度が約0.3T高く、1.5~1.6Tという非常に高い磁束密度を得ることができた。

強度向上に関しては、独自の高耐熱強度を有する樹脂を開発した。本樹脂は、成形時に粉末同士の擦過による絶縁膜の損傷を抑制する効果も備えている。図5に、同一成形圧力で作製した両材料の室温から400℃までの曲げ強度を示す。開発材は、従来材に対して室温で約15%強度が向上した。さ

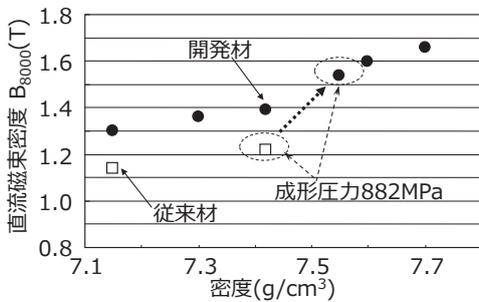


図4 開発材と従来材の密度と磁束密度の関係

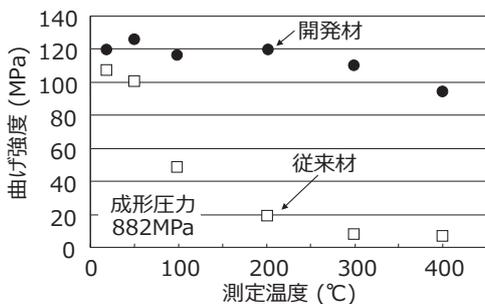


図5 開発材と従来材の測定温度と曲げ強度の関係

らに測定温度が上昇すると従来材の曲げ強度は著しく低下するのに対して、開発材では殆ど強度が低下せず、200℃における強度は従来材の約6倍の120MPaを得ることができた。これは、潤滑剤量の低減に伴う密度向上と、開発した絶縁樹脂が持つ高い耐熱強度の効果と考えられる。

以上の開発成果により、本材料は、2003年から実用化を開始し、2015年10月時点で累計5,000万個を超える実績がある。また、本開発技術は、(社)粉体粉末冶金協会技術進歩賞や、近畿地方発明表彰・文部科学大臣発明奨励賞等を受賞した。

### 3-2 ガソリンエンジンの点火コイル用途

点火コイルは、バッテリー電圧を数万ボルトに昇圧し、スパークプラグを用いてガソリンに放電火花点火を行う部品である。近年、燃費性能を向上させるため排気再循環 (EGR) や過給技術の普及により、より高エネルギーかつ高電圧の点火コイルが求められている。

写真2に点火コイル用途の圧粉磁心ならびにそれを用いた点火コイルを示す。磁心材料として一般的な電磁鋼板よりも磁気飽和し難い圧粉磁心を用いることで大エネルギーを実現し、かつ、三次元的な磁気回路を形成可能な利点を生かしている。また、プロセス面では長尺なツバ付き円柱形状の圧粉磁心を高密度に成形した後に、金型との摺動抵抗を低減して抜き出し、表面の絶縁膜を損傷させない成形技術が特に重要である<sup>(3)</sup>。

当社では2014年に本用途の圧粉磁心の実用化を開始し、本製品は、日本粉末冶金工業会新製品賞を受賞した。



写真2 点火コイル (左) と本用途の圧粉磁心 (右) の外観

### 3-3 ハイブリッド車のリアクトル用途

リアクトルは、ハイブリッド車等のモータ駆動システムの昇圧コンバータに搭載され、磁気エネルギーの蓄放電を繰り返すことにより、昇圧時のリップル電流 (電流の脈動成分) の平滑化を行う。従来、リアクトル用の磁心として一般的に用いられていた電磁鋼板に対して純鉄系の圧粉磁心は、高周波特性に優れ、かつ磁氣的等方性を有するため、三次元的な磁気回路を形成することが可能となり、リアクトルの小型・軽量化を実現できる。

リアクトル用の圧粉磁心(コア)は、略かまぼこ形のサイドコアと、コイルに沿うよう角Rを有する直方体形のみドルコアを組み合わせ構成される。本用途に圧粉磁心を適用するには、コア形状でのコアロス(特に渦電流損失<sup>\*4</sup>)低減が重要であった。

まず、サイドコアの渦電流損失対策について述べる。従来は、金型構造をシンプルにするため、**図6**の従来コアに示す通り略かまぼこ面をパンチで成形していたが、その面と直行する金型(ダイ)との摺動面は絶縁膜が損傷する。その結果、みドルコアと対向する面が導通し、過大な渦電流がコアの表面に発生しコアロスが大幅に増大する。この対策として、みドルコアと対向する面がダイと摺動せずパンチで成形されるように成形方向を90°回転した。この際、**図6**の開発コアに示す形状に変更し、段付きダイを用いて下パンチへの応力集中を緩和し、金型の破損を防止する技術が重要である。

	コア形状	成形方法	コア使用形態
従来コア	成形方向 肩部 摺動面	上パンチ 下パンチ ダイ	渦電流 磁束 みドルコア
開発コア	成形方向 パンチ面 摺動面 形状変更(段付きダイ化)	上パンチ 下パンチ 段付きダイ	渦電流を抑制 磁束 みドルコア

図6 サイドコアの成形方法検討による渦電流損失低減

次にみドルコアの渦電流対策について述べる。**図7**にコア形状および成形方法を示す。この場合、上下パンチを用いた成形面以外の4面は金型から抜き出す際にダイとの摺動抵抗によって粒子が塑性流動するため、コア表面に導通層が形成され、コアロスが大幅に増大する課題があった。この対策として、表面導通層を除去し、コア表面に高電気抵抗層を形成するレーザー加工法を開発した(**図8**)。写真3にコア摺動面の断面組織をSEM観察した結果を示す。レーザー照射前は、隣接粒子が塑性流動により導通し、粒子間の境界も不鮮明である。一方、レーザー照射後は高電気抵抗の酸化物が形成されると共に、粒子間の境界も鮮明で、導通が遮断されていることが明白である。

以上の技術開発により、ハイブリッド車用のリアクトルコアの実用化に成功した。本開発コアを用いたリアクトルは、従来の電磁鋼板を用いた場合に対して、同一性能で約10%の小型・軽量化を実現している。また、本製品は、日本粉末冶金工業会新製品賞を受賞した。

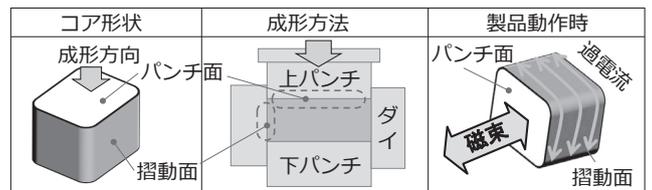


図7 みドルコアの成形方法と摺動面導通の課題

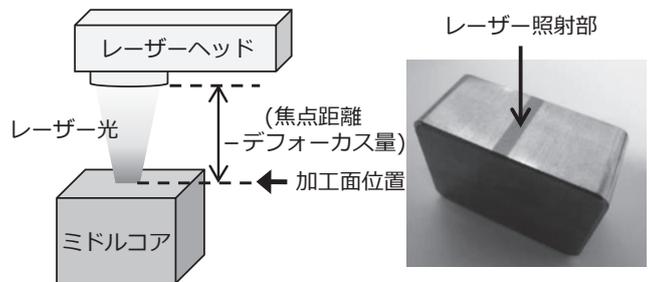
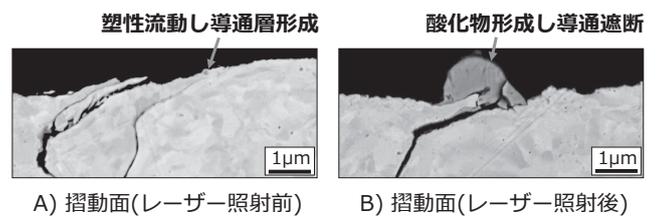


図8 レーザ照射法



A) 摺動面(レーザー照射前) B) 摺動面(レーザー照射後)

写真3 レーザ照射前後での金型摺動面の断面組織

#### 4. 圧粉磁心の将来への展望

本章では、純鉄系圧粉磁心の用途拡大を目指して、さらなる低コアロス化への開発内容とモータ用の磁心への適用検討、および次世代半導体デバイスの普及に備えた極低コアロスの合金系圧粉磁心の開発内容について記す。

##### 4-1 純鉄系圧粉磁心の低コアロス化とモータ適用

純鉄系圧粉磁心の低コアロス化には、原料鉄粉の高純度化や、保磁力が最小となる約650℃での熱処理を実現する高耐熱絶縁膜の開発が重要である。**図9**に、水または不活性ガスを用いたアトマイズ法<sup>\*5</sup>で作製した純鉄粉を元に作製した圧粉磁心のコアロス特性を、一般的な電磁鋼板(JIS: 35A360)の実測値との対比で示す<sup>(4)</sup>。水アトマイズ粉に高耐熱絶縁膜を付与した開発材料はガスアトマイズ法を用いて作製した純鉄系の圧粉磁心の最高値に肉薄するコアロスが得られており、さらに、電磁鋼板よりコアロスが低く周波数が高くなるとその差はより顕著になる。また、圧粉磁心は形状自由度にも優れるため、例えばモータの小型化や高トルク密度に寄与するアキシシャルギャップモータ等のコア形状が複雑な用途に好適である。

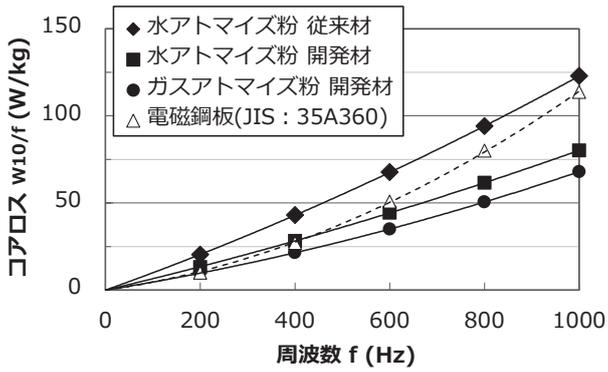


図9 圧粉磁心と電磁鋼板の周波数別コアロス特性

#### 4-2 高周波対応の極低コアロス合金系圧粉磁心

電源分野では、インバータ等の小型高性能化を目指し、次世代半導体を用いたスイッチング動作の高周波化が進む。それに伴い、チョークコイルやトランスにもさらに高周波領域に対応する優れた磁心材料が求められる<sup>(5)</sup>。当社はこれらの要求に応えるべく、純鉄系圧粉磁心で培った、①高耐熱絶縁膜技術、②高密度化と低コアロス化を実現する薄肉均一被覆技術を基盤として新たな材料開発を進めている。高周波域で優れた磁気特性を有するFe-Si-Al系合金粉末を採用し、当社開発技術の適用により従来のFe-Si-Al系圧粉磁心に対し大幅なコアロス低減を実現した<sup>(6)</sup>。さらに車載等の高温環境での

動作が求められる用途に対しても、図10に示すように合金組成の最適化により、高温域でよりコアロスを低減できる材料を開発した。また、Fe-Si-Al粉末は塑性変形性に乏しい硬質粒子なために高密度成形が困難である。そこで、当社はより磁性粒子の充填密度を高め飽和磁束密度を向上するべく、写真4に示す微粗均質な粒子配列を実現する粉末処理技術を開発した。

表1に開発したFe-Si-Al系圧粉磁心の諸特性を示す。開発材はFe-Si-Al系の従来材と比べると、フェライトと比較し得るほど低いコアロスを示していることがわかる。またフェライトに対して1.7倍の高い飽和磁束密度を有していることから、従来材やフェライトに比べてチョークコイルやトランスの小型化・発熱低減に寄与する優れた材料である。

また、表1に示す通りFe-Si-Al合金はフェライトに対してキュリー温度が高く、高温域まで磁気特性が安定している。図11に、フェライトおよび開発材を用いて設計製作したチョークコイルのインダクタンスの温度依存性を示す。

フェライトは、150℃ではインダクタンスが30%も低下するのに対して、開発材ではインダクタンスの低下なく高温まで安定した性能を示す。このためフェライトではコイルの冷却機構が必要になるが、開発材ではそれが不要となるため電源の小型化や部品点数削減による低コスト化に寄与できる。

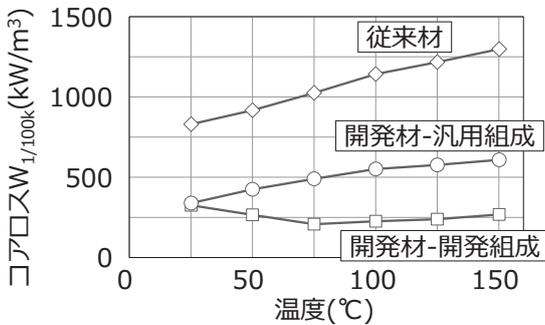
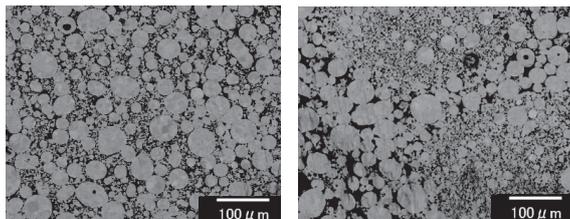


図10 従来材および開発材のコアロスの温度依存性



開発技術(充填率83%) 従来技術(充填率79%)

写真4 粒子配列制御による高密度化

表1 開発材の諸特性

材 質	単 位	開発材	従来材	フェライト
		Fe-Si-Al合金 (開発組成)	Fe-Si-Al合金 (汎用組成)	Mn-Zn系 フェライト
飽和磁束密度	Tesla	0.89	0.80	0.51
コアロス (25℃)	kW/m³	325	830	57
コアロス (100℃)	kW/m³	226	1142	50
比透磁率	-	56	52	2400
キュリー温度	℃	500	500	250

\*コアロス測定条件：0.1T/100kHz

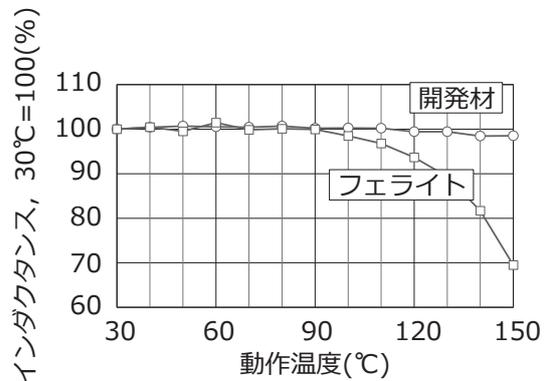


図11 インダクタンスの温度依存性の比較

上記の開発成果により、(社)粉体粉末冶金協会技術進歩賞を受賞した。また、本開発の一部は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の「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。関係者に深謝する。

## 7. 結 言

来るべく省エネルギー社会に向けて、電磁変換部品の中核を成す磁心材料には高い次元で持続的な性能の進化が求められる。粉末冶金技術を活用して当社が開発した圧粉磁心は、低コアロスと高磁束密度を両立し、省燃費自動車の各種基幹機構で実用化を果たし、十数年以上の量産実績がある。今後は、次世代のニーズに合わせて一層の高性能化を目指すとともに、電動機構の根幹であるモータ用途や、次世代半導体デバイスの普及に備えてチョークコイルや、トランス用途での実用化を期待している。

## 用語集

### ※1 磁束密度、飽和磁束密度

磁性材に生じ得る最大の磁束密度 (単位面積当りの磁束量) が飽和磁束密度で、高いほどコアを小型化できる。

### ※2 アクシシャルギャップモータ

円盤状のロータとステータが対向する構造を持つモーターで、一般的なラジアルギャップモータに対して、薄型化 (扁平化)、高トルク密度化の点で利点がある。

### ※3 ネットシェイプ化

本報では、最終目標形状に機械加工等を適用せずに、金型を用いた圧粉成形だけで直接仕上げる製造法を指す。

### ※4 渦電流、渦電流損失 (ロス)

金属中の磁界変化を打ち消すために流れる電流を渦電流といい、これが熱に変わることによって生じるエネルギー損失のことを渦電流損失という。例えばIHヒーターは、この原理を利用したもので、電気抵抗が低いほど、この損失は大きくなる。

### ※5 アトマイズ

金属粉末の製造方法のひとつで、金属の溶湯に高速で水やガスを噴霧して微細な粉末を得る手法。

## 参 考 文 献

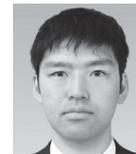
- (1) 島田良幸 他、「高性能圧粉磁心材料の開発」、粉体および粉末冶金、第53巻、第8号、pp.686-695 (2006年8月)
- (2) 五十嵐直人 他、「車載用リアクトルの小型化を可能にした純鉄系圧粉コア」、SEIテクニカルレビュー第186号、pp.92-97 (2015年1月)
- (3) A. Watanabe et al., "Development of High Density and Low-Loss Soft Magnetic Powder Core," Proceedings of Euro PM 2015 (2015)
- (4) 前田徹 他、「極低鉄損焼結軟磁性材料の開発」SEIテクニカルレビュー第166号、pp.1-6 (2005年3月)
- (5) 伊志嶺朝之 他、「高周波対応低ロス圧粉磁心材料の開発」、SEIテクニカルレビュー第178号、pp.121-127 (2011年1月)
- (6) T. Ishimine et al., "Development of FeSiAl-Based Low Iron Loss Soft Magnetic Powder Cores," Proceedings of the 2014 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, 09-189 (2014)

## 執 筆 者

上野 友之\* : アドバンストマテリアル研究所  
主席  
博士 (工学)



鶴田 聖 : アドバンストマテリアル研究所



齋藤 達哉 : アドバンストマテリアル研究所  
博士 (工学)



渡辺 麻子 : アドバンストマテリアル研究所  
主査



伊志嶺朝之 : アドバンストマテリアル研究所  
主査



山田 浩司 : アドバンストマテリアル研究所  
グループ長



\*主執筆者