

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

Pure Iron Based Soft Magnetic Composite Core That Enables Downsizing Automotive Reactors

五十嵐 直人*
Naoto Igarashi

魚住 真人
Masato Uozumi

小菅 敏行
Toshiyuki Kosuge

佐藤 淳
Atsushi Sato

草別 和嗣
Kazushi Kusawake

山口 浩司
Koji Yamaguchi

近年の世界的な環境への関心の高まりにより、環境負荷の小さいHEV (Hybrid Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 等の需要が高まっている。本製品はHEVやPHEVに搭載される自動車モータ駆動システムの昇圧コンバータに搭載されるリアクトル用圧粉コアである。リアクトル用圧粉コアは、従来の電磁鋼板コアに対して高周波特性に優れ、また等方的な磁気特性を活かした3次元磁気回路設計を行えることにより、リアクトルの小型・軽量化に期待されている。本開発では、鉄基軟磁性粉末として磁束密度が高く小型化に有利で経済性にも優れた純鉄粉を選定し、粉末粒径の最適化、圧粉磁心材料の特性を最大限発揮する製品形状の検討、またレーザー加工による表面改質方法の開発を行うことで、これまで電磁鋼板が用いられていた車載用リアクトルコアの圧粉コア化に成功すると共に、従来リアクトルに比べて同一性能で約10%の小型・軽量化を達成した。

With the recent increased interest in the environment, there is a growing demand for environmentally friendly vehicles like hybrid electric vehicle (HEV) and plug-in hybrid electric vehicle (PHEV). This product is a soft magnetic composite core used for boost converter of motor drive system in HEV or PHEV. With soft magnetic composite core, we successfully downsized and reduced weight compared with conventional electromagnetic steel sheet core by utilizing characteristics of high magnetic flux density and isotropic magnetic properties. In this development, we satisfied the demand of downsizing and weight reduction by: using pure and fine iron powder which is superior in downsizing, optimizing powder particle size, examining (or re-designing) of the product shape to maximize the characteristics of the soft magnetic composite, and developing surface modification method by laser processing. As a result, we developed the pure iron based soft magnetic composite core for automotive reactor which had been produced by electromagnetic steel sheet, and achieved downsizing of 10% and weight reduction with the same performance.

キーワード：リアクトル、昇圧コンバータ、圧粉磁心、焼結軟磁性

1. 緒言

近年の世界的な環境意識の高まりと燃料価格高騰を背景にCO₂排出量や低燃費走行等の環境負荷の小さいHEV (Hybrid Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 等の開発が世界各国にて進められている。

本製品はHEVやPHEV等に搭載される自動車モータ駆動システムの昇圧コンバータに搭載されるリアクトル用コアである(図1)。リアクトルは、磁気エネルギーの蓄積と放出を交互に行うことによる電圧の変換(昇圧)と、その昇圧の際に発生するリップル電流の平滑化の役割を担い、コアはその機能を果たすための中核部品となる。

ハイブリッド自動車にとって部品の小型・軽量化は優先課題である。従来、リアクトル用コアには電磁鋼板^{*1}が用いられていたが、高周波特性に優れ、また等方的な磁気特性を有する圧粉磁心材料を用いることで、新しい3次元磁気回路設計によるリアクトルの小型・軽量化が期待されている。

そこで我々は、高い飽和磁束密度を有する純鉄系軟磁性粉末を用い、また粉末冶金法の形状自由度を活かし圧粉コアの

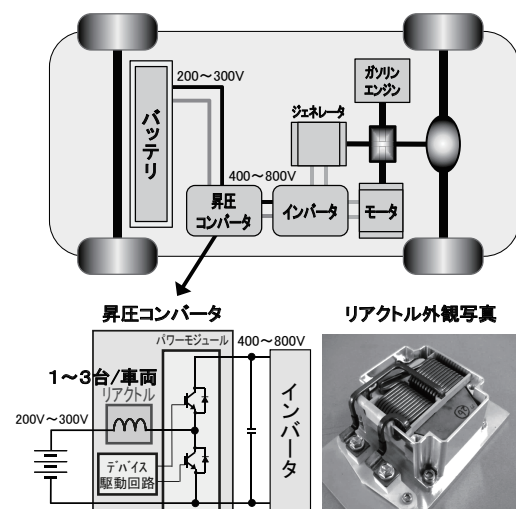


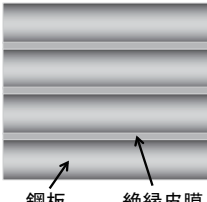
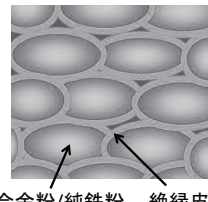
図1 車載用リアクトルの構成例

特性を最大限に発揮できる製品形状の検討、そしてレーザー照射による表面改質法の検討を行うことにより、車載用リアクトルの小型・軽量化を可能とするリアクトル用圧粉コアの開発を行った。

2. リアクトルコア用圧粉磁心材料の検討

圧粉磁心材料とは、表1に示すとおり、個々の粒子表面に絶縁被膜処理を施した磁性粉末を加圧成形した成形体である。互いの粒子は金属結合しておらず、粒子表面の絶縁皮膜によって構造的に電気抵抗を高めることで、特に1kHz以上の高周波領域において優れた交流磁気特性を示す。また3次元的に等方な磁気特性を有することから、粉末冶金法の特徴であるネットシェイプ成形^{*2}を活かし、従来材料である電磁鋼板では実現困難な形状の磁性部品や新規磁性部品への適用が期待されている。

表1 電磁鋼板、及び圧粉磁心材料の特徴

| 項目 | 電磁鋼板 (Fe-6.5wt%Si) | 圧粉磁心材料 | |
|--------|--|--|--------|
| | | 合金(Fe-Si系) | 純鉄(Fe) |
| 材料構造 |  |  | |
| 損失(鉄損) | ◎ | ○ | △ |
| 飽和磁束密度 | △ | ○ | ◎ |
| 磁気等方性 | × | ○ | ○ |

リアクトル用コアに要求される特性を表2に示す。近年の市場においては、リアクトルの小型化を目的とした高出力化(高インダクタンス化^{*3})、また冷却機構簡略化や高効率化を目的とした高放熱特性・低損失化(低発熱化)が求められている。上記要求を満足させるためには、圧粉磁心材料の①高

表2 リアクトル用圧粉コアに要求される特性

| リアクトルの仕様 | コアに要求される特性 | |
|-----------|------------|--------|
| インダクタンス特性 | 電磁気特性 | 透磁率 |
| | | 飽和磁束密度 |
| | | 鉄損 |
| 耐熱・放熱特性 | 熱特性 | 熱伝導率 |
| | | 比熱 |
| | | 線膨張係数 |
| | | 組立強度 |
| 硬度 | | |

磁束密度化、②低鉄損化が必要となる。

圧粉磁心材料の磁束密度Bは、母材である鉄基軟磁性粉末の材料特性によって概ね決定される。また、粉末冶金においては、鉄基軟磁性粉末をプレス成形により押し固め圧粉磁心材料を作製しており、圧粉磁心材料という構造体における鉄基軟磁性粉末の充填率=密度による影響も受ける。そのため圧粉磁心材料の高磁束密度化にあたっては、母材となる鉄基軟磁性粉末の飽和磁束密度だけではなく、粉体特性としての粉末圧縮性についても考慮する必要がある。

リアクトル用圧粉コアの要求特性である鉄損 $W_{B/I}$ は、材料内磁束変化が緩和現象(磁気共鳴など)を伴わない領域であれば、ヒステリシス損失(W_h)と渦電流損失(W_e)の和で表される。

ヒステリシス損失W_hは、図2に示すような、静磁界での変換損失(ループ面積)に相当するものであり、材料内の磁場方向を変えるのに必要な最低限のエネルギーになる。つまり、磁場変化のしきい値である保磁力H_cが小さな材料ほど低損失となる。高周波では単位時間当たりの磁場変化回数(動作周波数)に比例して損失は大きくなる(W_h ∝ H_c × f)。一方、渦電流損失W_eは高周波動作時に顕著となる損失であり、磁場変化に対する電磁誘導で発生する起電力に伴う誘導電流のジュール損失である。材料の電気抵抗ρが高いほど、また、渦電流発生領域のサイズd(圧粉磁心材料の場合は絶縁された軟磁性粉末の粒径に相当)が細分化されているほど低損失となる。また、起電力は磁場変化速度、つまり、周波数に比例して増大するため、単位時間あたりでは周波数の2乗に比例することになる(W_e ∝ d × f² / ρ)。

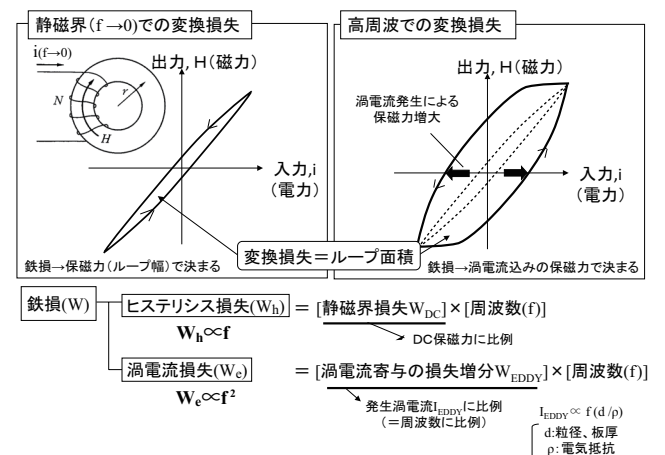


図2 圧粉磁心材料の磁気履歴曲線と変換損失

図3に鉄基軟磁性粉末の粒径と鉄損の関係を示す。渦電流損失W_eは、粉末粒径が大きくなるに従って増加している。これは粒径が大きくなることで渦電流発生領域

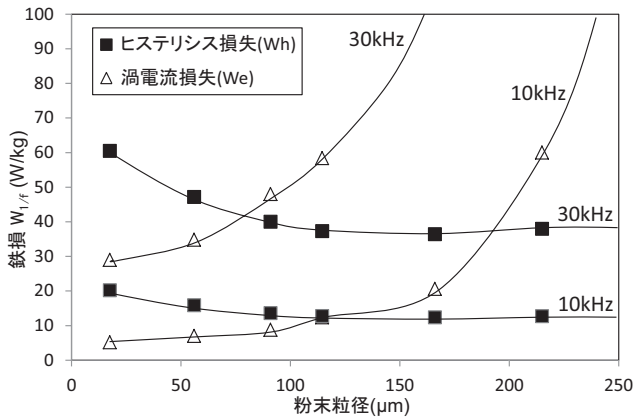


図3 鉄基軟磁性粉末の粒径と鉄損の関係(例)

が増大するためである。一方、ヒステリシス損失Whは、粉末粒径が大きくなるに従い減少している。これは、粒径が大きくなることで磁気的なギャップである粒子表面積の割合が相対的に低下するためである。その結果、動作周波数に応じて、鉄損値が最小値となる粉末粒径が決定される。実際の圧粉磁心材料の製造においては、粉末成形時の粒子の塑性変形や、製品を金型から取り出す際の摺動抵抗によって粒子表面の絶縁皮膜が破損し、渦電流発生領域のサイズdが増加することで渦電流損失が増加する。そのため、圧粉磁心材料の製造においては、粒子表面に被覆した絶縁皮膜を成形以降の工程において如何に破損させずに維持させるかが大きな開発ポイントとなる。

リアクトル用圧粉コアの鉄基軟磁性粉末の選定にあたっては、表3に示すとおり、純鉄粉や合金粉がその候補となる。純鉄粉は、①飽和磁束密度が高く部品の小型化に適する、②粉末の圧縮性が良く成形性に優れる、③原料コストが比較的安価であるといった長所がある。それに対して、合金粉は①材料固有の飽和磁束密度はやや低い、②粉末の圧縮性が悪く密度が上がりにくい、③純鉄に比べて電気抵抗が高いため、高周波での渦電流損失が少ないといった特徴がある。

我々は、リアクトルコアの要求特性と照らし合わせ、高磁束密度で部品の小型化が期待できる純鉄系の粉末を採用し、低損失化対策として鉄粉粒子の微粒化による渦電流発生領域の微細化、及び製造時の絶縁皮膜破損防止による渦電流損失増加抑制プロセスについて開発を行った。

表3 圧粉磁心材料の鉄基軟磁性粉末比較

| | 純鉄粉 (Fe) | 合金粉 (Fe-Si系) |
|--------|----------|--------------|
| 飽和磁束密度 | ◎ | ○ |
| 電気抵抗 | △ | ◎ |
| 粉末圧縮性 | ◎ | × |
| 原料コスト | ○ | △ |

3. リアクトル用圧粉コアの低鉄損化対策

3-1 製造工程

今回対象となるリアクトル用コアは、サイドコアと呼ばれる略かまぼこ形の部品2つ、ミドルコアと呼ばれる直方体の部品6つによって構成されている。

サイドコア、ミドルコアの製造工程を図4に示す。いずれも基本的な製造工程は同じで、鉄基軟磁性粉末を押し固める成形工程、そして成形時に粉末内に発生した残留ひずみを取り除く熱処理工程によって構成されるが、ミドルコアについては後述するレーザー照射工程による製品表面の改質を行っている。

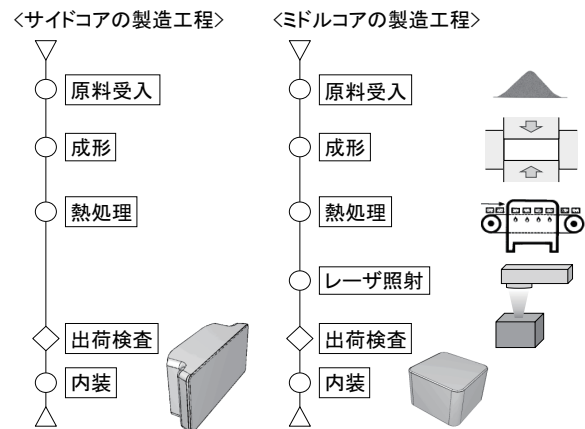


図4 リアクトル用圧粉コアの製造工程

リアクトル用圧粉コアの低鉄損化にあたっては、①粒子内渦電流損失については、前述のとおり原料粉末の微粒化による渦電流発生領域の微細化にて対策を図った。また②粒子間渦電流損失については、粉末表面が絶縁被膜に完全に覆われていれば理論上電流は流れず発生しない損失ではあるが、成形工程において製品を金型から取り出す際に、金型との摺動抵抗や、粉末自体の塑性変形によって粉末表面の絶縁皮膜が破損することで導通層が形成され、大きな渦電流が発生してしまう。特に純鉄粉は合金粉と比較して柔らかいため粉末成形時に変形して絶縁被膜の破損を招きやすく、結果、渦電流損失が大きくなるといった課題があった。

そこで、この製品表面に発生する渦電流について、サイドコアとミドルコアそれぞれに適した対策により防止した。

3-2 低鉄損化対策：サイドコア

サイドコアは、リアクトルのケース形状に沿った略かまぼこ形の部品である。このような形状を成形する場合、金型構造の簡便さを考え、図5の従来形状のように略かまぼこ面をパンチ面とし成形するのが一般的である。

上記成形方法を選択した場合、略かまぼこ面はパンチで成

| | 製品形状 | 成形方法 | 製品動作時 |
|-----|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 従来品 | 成形方向 肩部 摺動面 | 上パンチ 下パンチ ダイ | 渦電流 磁束 ミドルコア |
| 開発品 | 成形方向 形状変更(段付きダイ化) 摺動面 | 上パンチ 下パンチ 段付きダイ | 渦電流を抑制 磁束 ミドルコア |

図5 成形方法検討による渦電流損失低減

形されるため金型との摺動が無く製品表面の電気絶縁性は維持されるのに対し、側面は金型から製品を取り出す際の摺動抵抗によって製品表面の絶縁被膜が破損する。

その結果、実機動作時においてミドルコアと対抗する面は導通面となり、大きな表面渦電流が発生することで損失が大幅に増加する問題が発生した。

そこで表面渦電流の発生を抑制するべく、ミドルコアとの対抗面を電気絶縁性が維持されるパンチ成形面となるように成形方向の変更を検討した。成形方向を変更するにあたっては、サイドコアの肩部をどのように成形するのが課題となる。単純に成形方向のみを変更し、ミドルコアとの対抗面をパンチ面とした場合、肩部は凹形状のパンチにて成形する必要があり、成形圧縮時の応力によりパンチ破損が予想された。そこで、図5に示すとおり、リアクトルのケースと干渉しない範囲で製品形状を変更し、サイドコアの肩部を凹形状のパンチではなく、金型構造が単純な段付きダイで成形する対策を行った。その結果、図6に示すとおり、成形工程における電気絶縁性の低下を抑制することで、従来形状に比べて

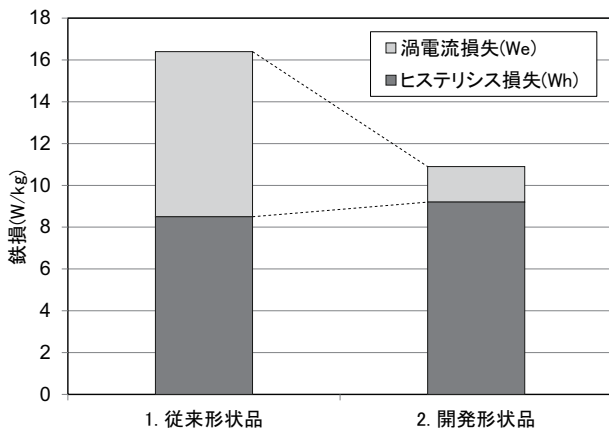


図6 成形方法変更による鉄損低減効果

渦電流損失は大幅に低減し、圧粉磁心材料が持つ磁気特性を最大限発揮させることに成功した。

3-3 低鉄損化対策：ミドルコア

ミドルコアは、コイルの中に挿入配置され、コイル形状に沿うように角Rの付いた直方体形状である。このような形状を成形する場合、金型構造の簡便さを考え、通常は図7のように角R部をダイで成形するのが一般的である。

本成形法を選択した場合、コイルと対向する4面は製品を金型から取り出す際の摺動抵抗によって導通面となるため、実機動作時において、コアの外周面をぐるりと回る非常に大きな渦電流が流れることになり、損失が大幅に増加する問題が発生した。

| 製品形状 | 成形方法 | 製品動作時 |
|---------------------|--------------------|--------------------------|
| 成形方向 パンチ面 摺動面 | 上パンチ 下パンチ ダイ | パンチ面 摺動面 渦電流 磁束 |

図7 ミドルコアの成形方法と低鉄損化課題

対策としてサイドコアと同様に成形方法の変更が考えられるが、コイルと対向する面をパンチ面とする場合、パンチ端面は凹形状となり、成形圧縮時の応力によりパンチの破損が予想された。そこで、成形時に発生した導通層を除去・改質する方法の検討を行った。

図8にレーザー照射工程の概略図を示す。ミドルコアの摺動面に対して、スリット状にレーザーを照射することで、導通層の一部を溶融・酸化し、ミドルコアの摺動面をぐるりと回る大きな渦電流の遮断を図っている。

図9にレーザー照射前後のミドルコア摺動面の表面性状を示す。レーザー照射前の表面性状では、粒子間の境界が不鮮

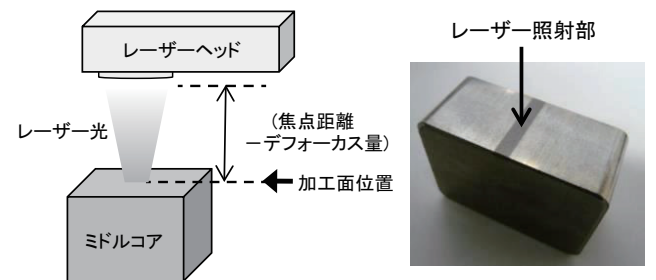


図8 レーザー照射工程概略

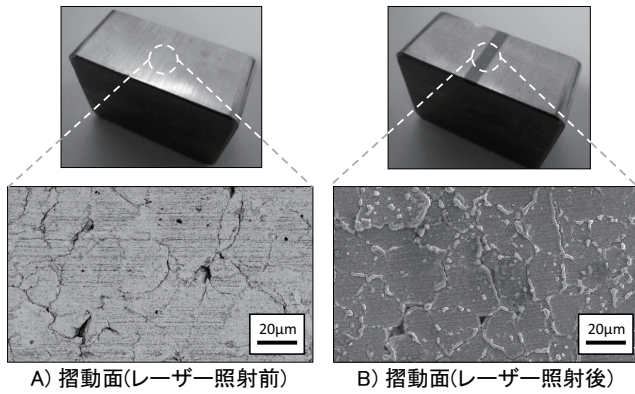


図9 摺動面の表面性状(レーザー照射前後)

明である。これは製品をダイから取り出した際の摺動抵抗によって、製品表面の粒子が塑性変形し、金属粒子同士が接触し導通層を形成しているためである。一方、レーザー照射後の表面性状では、粒子境界が明確化しており、導通層が改質されているのが判る。

図10にレーザー照射前後のミドルコア摺動面の断面組織を示す。レーザー照射前の断面組織では、摺動面の近傍に金型との摺動抵抗による粒子の塑性変形によって形成された導通層が見られるのに対し、レーザー照射後では、導通層が熔融・球状化しており、レーザー照射によって導通層が酸化し電気絶縁性が回復しているのが判る。

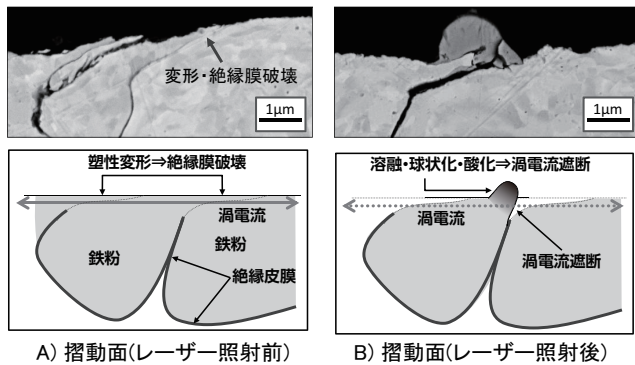


図10 摺動面の断面組織(レーザー照射前後)

図11にレーザー照射によるミドルコアの鉄損低減効果を示す。レーザー照射を行うことにより、ミドルコア摺動面の導通層が電気絶縁化され、ミドルコアの外周面をぐるりと回る渦電流が遮断された結果、渦電流損失が大幅に低減している。本製法は消耗補材が不要で簡便、また産業廃棄物を出さないといった環境面にも配慮した製法であり、工程コストを

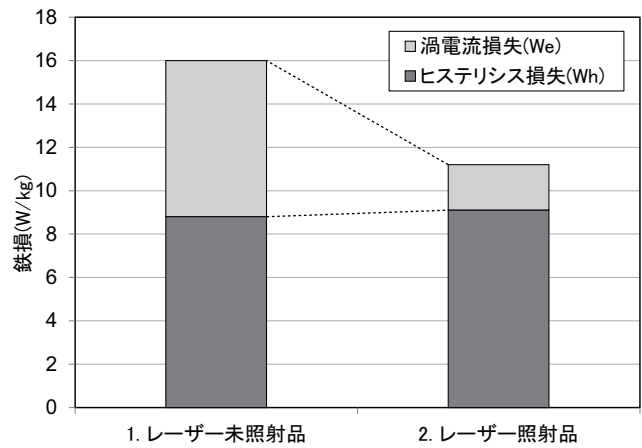


図11 レーザー照射によるミドルコア鉄損低減効果

抑えつつ、圧粉磁心材料が持つ磁気特性を最大限発揮させることに成功した。

4. 結 言

鉄基軟磁性粉末として磁束密度が高く小型化に有利で経済性にも優れた純鉄粉を選定し、粉末粒径の最適化、粉末冶金法の形状自由度を活かし圧粉コアの特性を最大限に発揮できる製品形状の検討、またレーザー照射による表面改質方法の開発を行うことで、車載用リアクトルコアの圧粉化に成功すると共に、従来、電磁鋼板が用いられていたリアクトルに比べて同一性能で約10%の小型・軽量化を達成した。

用語集

※1 電磁鋼板

主に鉄にケイ素を添加した軟磁性鋼板を積層して成形したコア。

※2 ネットシェイプ成形

最終完成品の複雑形状を機械加工等の後加工を施すことなく実現する粉末成形技術。

※3 インダクタンス

リアクトルにおいて磁気エネルギーを蓄える能力を現す指標。この値が大きいほど大きなエネルギーを蓄えることができる。

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) 山本ら、SEI テクニカルレビュー第185号、29 (2014)
- (4) 電気学会マグネティックス技術委員会編、「磁気工学の基礎と応用」、46 (1999)

執 筆 者

五十嵐直人* : 住友電工焼結合金(株) 主任技師



魚住 真人 : 住友電工焼結合金(株) 主席技師



小菅 敏行 : 住友電工焼結合金(株) 伊丹製造部長



佐藤 淳 : 自動車新領域研究開発センター 主席



草別 和嗣 : 自動車新領域研究開発センター 主査



山口 浩司 : 解析技術研究センター 主幹



*主執筆者