

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02233

研究課題名(和文) 鉄系メタルコンポジットバルク鉄心材料とギャップレスリアクトル・トランスの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of Iron-based metal composite bulk magnetic core and its application to gapless reactor and transformer

研究代表者

佐藤 敏郎 (SATO, Toshiro)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：50283239

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)： SiC/GaNパワーデバイス高周波DC-DCコンバータのボトルネック課題である高周波鉄心材料の低損失化・高耐熱化の実現を目的に、鉄系メタルコンポジットバルク鉄心の研究開発とMHzスイッチングDC-DCコンバータへの実装試験を行った。熱酸化膜付き2.6 μ mサイズFe系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット鉄心はベンチマークであるNi-Znフェライトの1/3以下のMHz鉄損を有し、定格出力120WのGaNパワーデバイスMHzスイッチングLLC共振絶縁型DC-DCコンバータへの実装試験によって97%以上のトランス効率と鉄心の単位体積当たりの伝送電力90 W/cm³を実現できることが示された。

研究成果の概要(英文)： In order to realize the compact and light-weight highly efficient SiC/GaN power device DC-DC converter with a bottle-neck issue on the magnetic core for high frequency reactor and transformer, a novel heat resistant Fe-based metal composite magnetic core with small iron loss at MHz band was developed. The composite magnetic core consisting of 2.6 μ m size Fe-based amorphous powder with a thermally oxidized surface layer and 200 resistant epoxy resin binder exhibited 1/3 smaller MHz band iron loss than that of a bench mark core of Ni-Zn ferrite. The gapless leakage transformer using the Fe-based amorphous composite magnetic core was applied to a GaN power device MHz switching LLC resonant DC-DC converter. The novel magnetic core transformer operated in MHz switching resonant converter with a rating power of 120 W had an efficiency of 97% over and a power density per unit core volume of 90 W/cm³.

研究分野：電気電子工学

キーワード：パワーエレクトロニクス SiC/GaNパワーデバイス DC-DCコンバータ リアクトル/トランス 鉄心材料

1. 研究開始当初の背景

(1) SiC/GaN パワーエレクトロニクス
 次世代パワーエレクトロニクスの開発競争が世界的に激化しており、我が国においても、Si パワー半導体に替わる SiC/GaN パワーデバイスを核にした高効率パワーエレクトロニクスの開発と社会実装を目指した複数の国家プロジェクトが推進されている。

(2) ボトルネック課題
 小型軽量・高効率の超高周波スイッチング SiC/GaN パワーデバイス DC-DC コンバータを実現する際、リアクトルやトランスの高周波化・低損失化がボトルネックとなっている。数百 kHz 以上の高周波用鉄心材料としてはスピネルフェライトが多用されてきたが、飽和磁束密度が低く (Mn-Zn 系で 0.5 T 程度, Ni-Zn 系で 0.2~0.4 T)、80°C 以上の温度では鉄損の温度係数が正となり熱暴走の危険がある。GaN パワーエレクトロニクスが得意とする MHz 帯以上では、実質的に Ni-Zn フェライトしか選択肢がなく^①、GaN パワーデバイスの特徴 (低オン抵抗, 高速スイッチング特性, 高温動作) を活かし DC-DC コンバータの小型軽量化・高効率化を実現するには高周波鉄損が小さく、熱暴走リスクのない新規の高周波鉄心材料の開発が必要である。

2. 研究の目的

MHz 帯で動作する SiC/GaN パワーデバイス DC-DC コンバータ用の低損失・高耐熱鉄心材料の実現を目指し、微細金属磁性粉末と高耐熱バインダからなる鉄系メタルコンポジットバルク鉄心材料を開発し、リアクトル/トランスへの適用、さらには、DC-DC コンバータに実装して新規鉄心材料の有用性を実証することを目的に研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 鉄系メタルコンポジット鉄心

図 1 に鉄系メタルコンポジット鉄心の模式図を示す。軟磁性金属粉末を非磁性バインダで結合して鉄心を構成する。単一の粉末粒径を仮定して計算される^②軟磁性金属粉末の体積充填率とコンポジット鉄心の実効比透磁率の関係を図 2 に示す。粉末粒子が面心立方配置、あるいは六方最密配置するとき最密充填となり、このときの粉末充填率は 74% となる。コンポジット鉄心の透磁率を高くするには、磁性粉末自身の透磁率が高いことと粉末充填率を高くすることが必要である。

(2) 微細金属磁性粉末と高抵抗皮膜形成

出発材料として金属磁性粉末を採用し、粉末の微細効果によってうず電流損失を低減するには、粉末表面に高抵抗皮膜を形成してうず電流を粉末内部に閉じ込め (図 1 参照)、鉄心中を流れるマクロうず電流を抑制する必要がある。本研究では、ペンタカルボニル鉄を出発原料とする 1.6 μm サイズカルボニル鉄粉と水アトマイズ法で作製される 2.6 μm サイズ Fe 系アモルファス磁性粉末 (FeSiBCCr

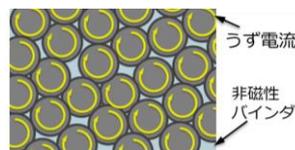


図 1 鉄系メタルコンポジット鉄心の模式図

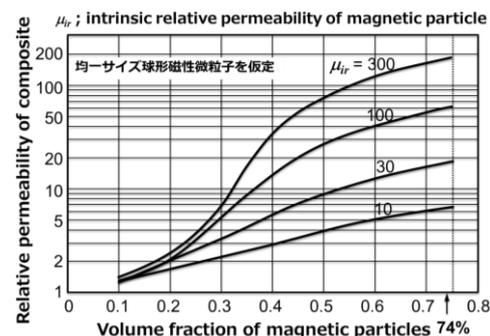
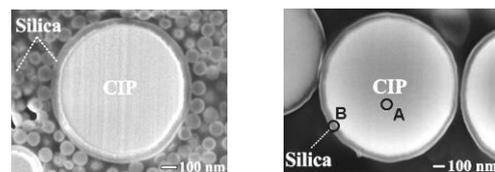


図 2 軟磁性金属粉末の体積充填率とコンポジット鉄心の実効比透磁率の関係^②

表 1 金属磁性粉末の物性値

	カルボニル鉄粉	Fe系アモルファス磁性粉末
組成 (重量%)	Fe; up to 97.8 % C; 1.0 %max. N; 0.9 %max. O; 0.5 %max.	87.83Fe-6.59Si- 2.54B-2.53Cr-0.51C
平均粉末粒径 D_{50}	1.6 μm	2.6 μm
飽和磁化 M_s	2.1 T (21 kG)	1.26 T (12.6 kG)
粉末保磁力 H_c	720 A/m (9 Oe)	128 A/m (1.6 Oe)



(a) 1.07ml-TEOS/1g-CIP (b) 0.32ml-TEOS/1g-CIP

図 3 TEOS 加水分解によってカルボニル鉄粉表面 (CIP) にシリカ (SiO₂) を形成した例

系)を採用した。これらは、量産されている金属軟磁性粉末としては最も微細な軟磁性粉末である。表 1 に出発粉末の物性値を示す。

a. TEOS 加水分解法シリカ (SiO₂) 皮膜

アンモニアを触媒とする TEOS (tetraethoxysilane; Si(OC₂H₅)₄) の加水分解法によってカルボニル鉄粉 (CIP) 表面にシリカ (SiO₂) 皮膜を形成した例を図 3 に示す。TEOS 過剰の場合は鉄粉表面以外にシリカナノ粒子が析出するが、適量の TEOS 量によって鉄粉表面のみにシリカ皮膜を形成できる。

b. 熱酸化皮膜

カルボニル鉄粉および Fe 系アモルファス磁性粉末に対する乾燥空气中熱処理による熱酸化皮膜形成法を検討した。カルボニル鉄粉が有するナノ結晶組織 (結晶子サイズ; 約 10 nm, 結晶磁気異方性が小さく、低保磁力に寄与) を維持して酸化皮膜形成可能な最高熱処理温度は 240°C であり、約 30 分の熱処理によって 20 nm の Fe₂O₃/Fe₃O₄ 混晶皮膜が形成される。Fe 系アモルファス磁性粉末につい

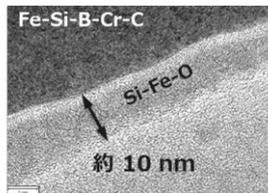


図4 Fe系アモルファス磁性粉末の熱酸化皮膜

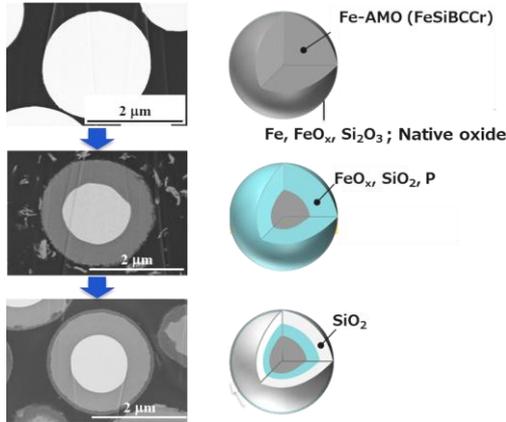


図5 Fe系アモルファス粉末の表面改質によるシリカ (SiO₂) 単相皮膜形成

ては、300°C熱処理によって10~15 nm厚の皮膜が形成され、XPSによる表面分析によって皮膜層はFe-Si-Oガラス相でできていることを明らかにした(図4参照)。

c. Fe系アモルファス粉末の表面改質によるシリカ (SiO₂) 単相皮膜

Fe系アモルファス磁性粉末が有するSi元素に着目し、二段階酸処理表面改質によるシリカ (SiO₂) 単相皮膜形成法を確立した。図5は出発材料粉末からシリカ (SiO₂) 単相皮膜形成までの工程を示すものであり、第一段階のリン酸処理によって粉末表面からFeが溶出してリン酸鉄を析出すると同時に、粉末表面では鉄の酸化物 (FeO_x)、シリカ (SiO₂)、Pが存在することがXPS表面分析から明らかになっている。さらに、第二段階塩酸処理によって表面からFeO_x、Pが溶出し、粉末表面はシリカ (SiO₂) 単相の皮膜が形成される。図5は粉末表面が二層の皮膜で構成されている場合であるが、リン酸や塩酸濃度および処理時間の最適化によって単層シリカ皮膜形成が可能であることを確認している。

(3) 非磁性バインダ

鉄系メタルコンポジット鉄心の非磁性バインダとして、研究協力者の信州大学村上泰教授が開発した200°C以上のガラス転移点を有する200°C耐熱エポキシレジンを採用した。

(4) 鉄系メタルコンポジット鉄心の作製

金属磁性粉末を樹脂バインダとともにプレス成型して作製されるダストコアでは、粉末サイズが数μm以下になると球形粉末形状の変形効果による成形密度の向上が困難になる。本研究では、高圧プレスによらないメタルコンポジット鉄心の作製法として、図6に示すキャスト法を採用した。高抵抗皮膜処理した磁性粉末と樹脂前駆体溶液を

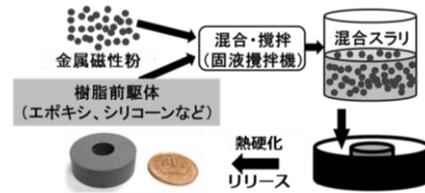


図6 キャスティング法による鉄系メタルコンポジット鉄心の作製

表2 体積抵抗率と熱伝導率

		体積抵抗率 (Ω・m)	熱伝導率 (W/m・K)
54 vol.% カルボニル鉄粉/エポキシコンポジット	As-made粉末	6.5×10^{-2}	1.38
	200°C・6時間熱酸化	100	1.2
65 vol.% 鉄系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット	As-made粉末	4×10^5	1.13
	300°C・3時間熱酸化	6×10^5	1.05
Mn-Zn系フェライト		1	5
Ni-Zn系フェライト		1×10^5	1

真空攪拌してスラリーを作製し、これを鋳型に流し込んで熱硬化・リリースする。

表2は最密充填キャスト法で作製された鉄系メタルコンポジット鉄心の体積抵抗率と熱伝導率を評価した結果を示すものである。前項で示した磁性粉末の高抵抗皮膜形成法の中で大気中熱処理による熱酸化皮膜形成が最も簡便であり、表2のデータは熱酸化皮膜付き磁性粉末を用いた場合を示している。カルボニル鉄粉/エポキシコンポジット鉄心では、大気中熱処理で形成される酸化皮膜が抵抗率の低い酸化鉄由来であるために、コンポジット化しても体積抵抗率は100 Ω・mの程度である。これに対し、Fe系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット鉄心では、粉末表面に高抵抗のガラス層が酸化皮膜を構成するため、コンポジットの体積抵抗率はNi-Znフェライトの6倍程度となっている。鉄系メタルコンポジット鉄心の熱伝導率は1.0~1.4 W/m・Kであり、Ni-Znフェライトと同程度である。

表2に示したカルボニル鉄粉/エポキシコンポジットおよびFe系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット鉄心の磁化特性、比透磁率と損失係数tanδの周波数特性を図7に示す。静磁化曲線から見積もられる飽和磁化を比較すると、カルボニル鉄粉/エポキシコンポジット鉄心は約1 T、Fe系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット鉄心は0.84 Tであり、Ni-Znフェライトの4倍以上の値を有する。

比透磁率や損失係数tanδは初透磁率範囲内の微小な交流磁界振幅で評価されるため、磁気ヒステリシスの影響はほとんどなく、メタル系ではうず電流損がtanδの大小を決定

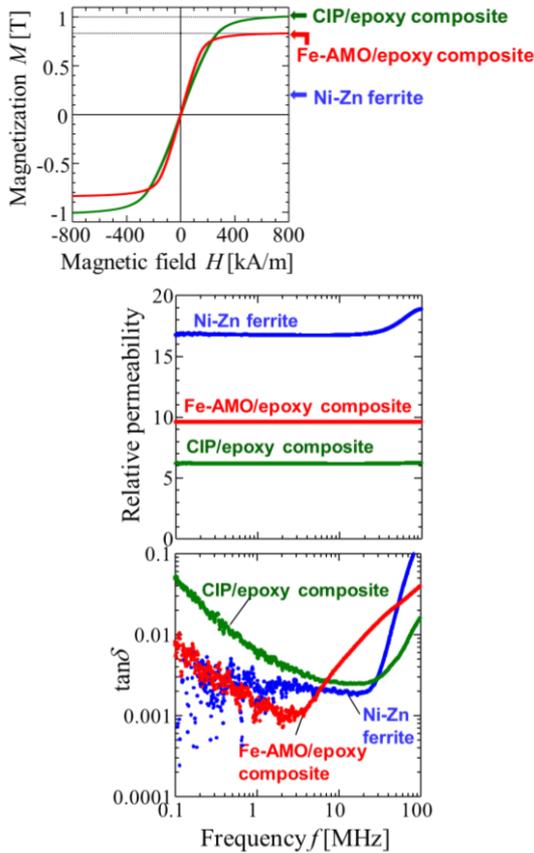


図7 鉄系メタルコンポジット鉄心の磁化特性、比透磁率と損失係数 $\tan\delta$ の周波数特性

する。カルボニル鉄粉/エポキシコンポジットおよび Fe 系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジットの比透磁率は、それぞれ、6 と 10 と低い、100 MHz まで一定である。公称比透磁率 20 を有する Ni-Zn フェライトは 30 MHz 以上の周波数で自然共鳴の影響が現れ、 $\tan\delta$ が急増する。30 MHz 以上では、比較した三種類の中でカルボニル鉄粉/エポキシコンポジットの $\tan\delta$ が最も小さい。Fe 系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジットは 6 MHz 以下で最も小さい $\tan\delta$ を示す。

図8は周波数 2 MHz で測定した鉄損の最大磁束密度依存性を示すものである。表3に、2 MHz, 20 mT における鉄損比較の結果を示す。MHz 帯鉄損は Fe 系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジットが最も小さい。MHz 帯鉄心のベンチマークである Ni-Zn フェライトと比較すると、周波数 2 MHz, 最大磁束密度 20 mT では、公称比透磁率 20 の Ni-Zn フェライトの約 1/6, MHz 帯以上で最小鉄損を有すると謳われる[®]Fair-Rite 社の Ni-Zn フェライト (67 material) の約 1/3 である。

本文では図示しないが、粉末粒径の異なる二種類の Fe 系アモルファス磁性粉末 (2.6 μm , 12.8 μm サイズ) を出発材料にし、両者を最適割合で混合することでメタルコンポジット鉄心の粉末充填率が 72% に向上し、比透磁率は 21 まで高くなる。加えて、周波数 3 MHz までは 2.6 μm 粉末単体コンポジットの鉄損と同程度であることを確認している。

スピネルフェライトでは熱暴走をおこす

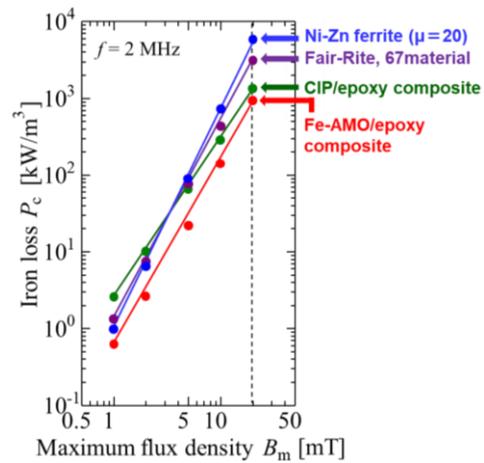


図8 鉄系メタルコンポジット鉄心の鉄損特性

表3 MHz 帯鉄損の比較

カルボニル鉄粉/エポキシコンポジット	1338 kW/m ³
Fe系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジット	939 kW/m ³
Ni-Znフェライト(公称比透磁率; 20)	5884 kW/m ³
Fair-Rite, 67material	3105 kW/m ³

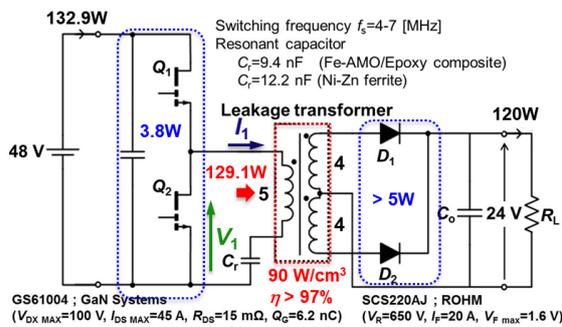
$f = 2 \text{ MHz}, B_m = 20 \text{ mT}$

200°C の高温下でも鉄系メタルコンポジット鉄心は磁気特性がほとんど変化しないことを確認しており、フェライトを凌駕する MHz 帯低鉄損特性と 200°C 耐熱性が実証された。

(5) GaN パワーデバイス LLC 共振型 DC-DC コンバータへの実装評価

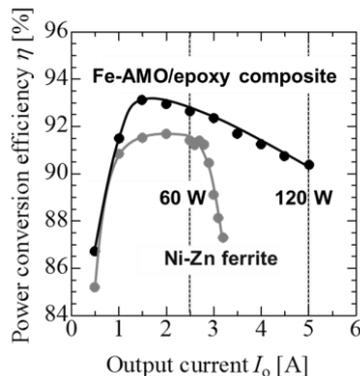
鉄系メタルコンポジット鉄心は透磁率が低いので、ギャップレスで閉磁路構造を取っても漏れ磁束が鉄心全体から発生し、トランスを構成した場合にはリーケージトランスとして動作する。図9に Fe 系アモルファス磁性粉末/エポキシコンポジットトロイダル鉄心リーケージトランスを GaN パワーデバイス LLC 共振型 DC-DC コンバータに実装して評価した結果を示す。図9(a)は回路構成とリーケージトランスの仕様である。コンバータの仕様は入力 48 V-出力 24 V・5 A (出力電力 120 W) である。スイッチング周波数を 4~7 MHz に設定した。1 次側ハーフブリッジ回路に GaN-FET を採用し、2 次側整流回路に SiC-SBD を使用した。同図に同一寸法の公称比透磁率 20 の Ni-Zn フェライトリーケージトランスを併記した。鉄系メタルコンポジット磁心の 1 次インダクタンスは Ni-Zn フェライトトランスの約半分である。トランスの結合係数 k は 0.82~0.86 であった。

図9(b)はコンバータの効率と出力電流の関係を示したものである。Ni-Zn フェライトリーケージトランスを用いた場合、出力 80 W (出力電流 3.33 A) 以上でフェライトコアが発熱シクラック破壊した。この場合の出力電圧を 24 V 一定にレギュレーションする周波数範囲は 5.7~4.5 MHz であった。一方、鉄系メタルコンポジット鉄心リーケージトランスを用いた場合は、20~120 W の広い負荷範囲で効率 90% を超え、出力 36 W の時に効率が最高 (93.3%) となった。軽負荷から定格負荷範囲のコンバータの動作周波数は 6.3



Fe-AMO/epoxy composite Ni-Zn ferrite
 鉄心寸法; Φ_o 15.5mm \times Φ_i 9.0mm \times h11.1mm
 体積1.39 cm³
 巻線; 1次側5ターン, 2次・3次側4ターン

(a) 回路構成とリーケージトランスの仕様



(b) コンバータの効率と出力電流の関係

図9 鉄系メタルコンポジット鉄心を実装した LLC 共振型 DC-DC コンバータ

~4.8 MHz であった。

図9(a)の回路図中に定格出力時(120 W)のコンバータ各部の電力を示す。鉄系メタルコンポジット鉄心トランスは97%を超える効率で動作しており、このときのトランス鉄心の伝送電力体積密度は90 W/cm³となる。FinSix社のT. Sagneriが報告した数十MHz動作コンバータへの搭載を前提としたFair-Rite社67 materialトランスの電力密度は40 W/cm³であり^④、本研究によるリーケージトランスの1/2以下である。

4. 研究成果

(1) 主な成果

本研究による鉄系メタルコンポジット鉄心がベンチマークであるNi-Znフェライトを凌駕するMHz帯低鉄損、200°C高温耐熱性を有することを実証するとともに、MHzスイッチングDC-DCコンバータへの実装によって、

- ・コンバータの高効率化
- ・トランス鉄心体積電力密度90 W/cm³を達成の成果をあげた。開発鉄心の体積電力密度はFair-Rite社67 materialトランスの2倍以上に達し、鉄心の小型化に大きく貢献する。

(2) 国内外における位置づけとインパクト 超高周波スイッチングDC-DCコンバータの

研究開発では海外勢が先行しているが、本研究の成果によって高周波鉄心材料のボトルネック課題が解決され、先行する海外勢を追い越す糸口を拓いた。

(3) 今後の展望

本研究を推進するにあたって、次々世代の超高周波(10 MHz~100 MHz)鉄心材料として、一軸磁気異方性鉄系メタルコンポジット鉄心材料を着想し、超小型軽量・高効率電源システムの実現を目的に、今後も継続して研究開発を進めていく予定である。

<引用文献>

- ① M. Harrison, The future of power electronic design, Plenary Session, APEC 2016.
- ② L. Olmedo et al., Microwave characterization and modelization of magnetic granular materials, Journal of Applied Physics, Vol. 73, 1993, 6992-6994.
- ③ A. J. Hanson et al., Measurements and performance factor comparisons of magnetic materials at high frequency, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, 2016, 7909-7925.
- ④ T. Sagneri, The Challenges of VHF Power Conversion, Plenary Session, APEC 2016.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① Naoki Yabu, Kanako Sugimura, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Fabrication and evaluation of composite magnetic core using iron-based amorphous alloy powder with different particle-size distribution, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 54, in press, 2018, 査読有
DOI: 10.1109/TMAG.2018.2832662
- ② Kanako Sugimura, Naoki Yabu, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Novel method for making surface insulation layer on Fe-based amorphous alloy powder by surface modification using two-step acid solution processing, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 54, in press, 2018, 査読有
DOI: 10.1109/TMAG.2018.2834467
- ③ K. Sato, T. Sato, M. Sonehara, H. Takeuchi, Low permeability composite magnetic core transformer with high coupling coefficient and its application to PFM controlled quasi-resonant mode flyback-type DC-DC converter, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 41, 132-139, 2017, 査読有
DOI: 10.3379/msjmag.1708R003
- ④ Kanako Sugimura, Daisuke Shibamoto, Naoki Yabu, Tatsuya Yamamoto, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Tsutomu Mizuno, and Hideaki Mizusaki, Surface-Oxidized

Amorphous Alloy Powder/Epoxy-Resin Composite Bulk Magnetic Core and Its Application to Megahertz Switching LLC Resonant Converter, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, #2801406-1-6, 2017, 査読有

DOI: 10.1109/TMAG.2017.2718042

⑤佐藤紘介, 杉村佳奈子, 佐藤敏郎, 曾根原誠, 竹内英樹, 表面酸化カルボニル鉄粉メタルコンジット磁心トランスの試作とフライバックコンバータへの応用, 日本磁気学会論文特集号, 1巻, 44-52, 2017, 査読有

DOI: 10.20819/msjtmjsj.17TR110

⑥ K. Sugimura, Y. Miyajima, M. Sonehara, T. Sato, F. Hayashi, N. Zettsu, K. Teshima, and H. Mizusaki, Formation of high electrical-resistivity thin surface layer on carbonyl-iron powder (CIP) and thermal stability of nanocrystalline structure and vortex magnetic structure of CIP, AIP Advances, Vol. 6, 055932-1-8, 2016, 査読有
DOI: 10.1063/1.4944705

他 1 件

[学会発表] (計 29 件)

① Kanako Sugimura, Atsuya Ueno, Daisuke Shibamoto, Kosuke Sato, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Surface-oxidized Carbonyl-iron powder/epoxy composite bulk magnetic core and its application to a MHz switching buck dc-dc converter, MMM-INTERMAG 2016 Joint Conference, 2016.

② Kanako Sugimura, Yuki Miyajima, Fumitaka Hayashi, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Nobuyuki Zettsu, Katsuya Teshima, Hideaki Mizusaki, Formation of high electrical-resistivity thin surface layer on carbonyl-iron powder (CIP) and thermal stability of nanocrystalline structure and curling magnetic structure of CIP, MMM-INTERMAG 2016 Joint Conference, 2016.

③ Kanako Sugimura, Daisuke Shibamoto, Tatsuya Yamamoto, Ryosuke Hirayama, Atsuya Ueno, Kelvin Lai Siong Ong, Naoki Yabu, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Tsutomu Mizuno, Hideaki Mizusaki, Surface-oxidized amorphous alloy powder/epoxy resin composite bulk magnetic core and its application to MHz band switching LLC resonant converter, INTERMAG2017, 2017.

④ T. Yamamoto, Y. Konno, T. Dobashi, K. Sugimura, T. Sato, Y. Bu, T. Mizuno, LLC resonant converter using magnetocated wire and iron-based metal composite core, INTERMAG2017, 2017.

他 25 件

[図書] (計 1 件)

① 佐藤敏郎, 他, 丸善出版, (磁気便覧 (日

本磁気学会編)), 2016, pp. 740-749.

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 磁心材料及びその製造方法

発明者: 曾根原誠, 佐藤敏郎, 村上泰, 杉村佳奈子

権利者: 信州大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-170452

出願年月日: 平成 28 年 9 月 1 日

国内外の別: 国内

名称: SiO₂含有被膜を備えた Si 含有 Fe 基合金粉及びその製造方法

発明者: 佐藤敏郎, 曾根原誠, 杉村佳奈子, 藪直希

権利者: 信州大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-151599

出願年月日: 平成 29 年 8 月 4 日

国内外の別: 国内

名称: 一軸磁気異方性バルク磁性材料及びその製造方法

発明者: 佐藤敏郎

権利者: 信州大学

種類: 特許

番号: 特願 2017-198361

出願年月日: 平成 29 年 10 月 12 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://amdl.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 敏郎 (SATO, Toshiro)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号: 50283239

(2) 連携研究者

舟木 剛 (FUNAKI, Tsuyoshi)

大阪大学大学院・工学研究科・教授

研究者番号: 20263220

曾根原 誠 (SONEHARA, Makoto)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号: 30456496

(3) 研究協力者

村上 泰 (MURAKAMI, Yasushi)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号: 90219907