

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：13601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18047

研究課題名(和文) 絶縁被覆磁性微粒子誘電体中分散複合材料巻線間充填型UHF帯高Qインダクタの開発

研究課題名(英文) Development of high quality factor inductor using magnetic particle with insulated surface film / dielectric composite core for UHF band

研究代表者

曽根原 誠 (SONEHARA, Makoto)

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：30456496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：大気中熱処理した表面酸化膜付鉄微粒子を複合材料として、RFスパイラルインダクタの巻線間に磁心として充填したところ、0.4～2.4 [GHz]において同サイズの空心インダクタのQ値に比べて約20%高い結果が得られた。複合材料内の渦電流損失とインダクタの近接効果を低減できたものと考えられ、大きな知見である。

また、LC直列共振RF模擬回路に複合材料磁心RFインダクタを用いたが、空心の場合に比べて、反射係数が約0.5dBも低下した。共振半値幅も複合材料磁心RFインダクタを用いた回路の方が狭かった。回路の抵抗が低減したことを示唆し、本研究の最も重要な知見であり、その優位性が示され当初目標を満足した。

研究成果の概要(英文)：The iron based magnetic particles with surface oxide film heat-treated in the air were filled as a magnetic core between the windings of the RF spiral inductor. The Q-factor of the composite core inductor was 20% higher than that of the same size of the air-core inductor at 0.4 to 2.4 [GHz]. It is considered that eddy current loss in the composite material and proximity effect of the inductor can be reduced, which is a big finding.

In addition, the composite core RF inductor was used for the LC series resonance RF simulation circuit, reflection coefficient in the circuit using the composite core inductor decreased by about 0.5dB as compared with the case of the air core. The resonance half-width width in the circuit using the composite core inductor was also narrower than that of the air-core inductor case. This suggests that the resistance of the circuit was reduced, it was the most important finding of this research, its superiority was demonstrated and satisfied the initial goal.

研究分野：磁気工学

キーワード：RFインダクタ 複合材料 磁性微粒子 絶縁被覆 性能指数 近接効果 インダクタンス値 UHF帯

1. 研究開始当初の背景

次世代高速携帯通信規格であり家庭向けブロードバンド回線並みの通信速度(ダウンロード; 100 Mbps, アップロード; 50 Mbps)をもつLTE (Long Term Evolution; 概ねUHF帯(0.3~3 [GHz])を利用)が普及し、スマートフォンだけでなく、モバイル無線ルータ、無線機能を具備した各種家電などへ順次展開されており、近い将来には全てのデジタル機器が無線でリンクされる見込みである。このように今後益々無線通信の重要性が高まると想定されるが様々な課題がある。その一例として、通信の安定性の向上と端末のバッテリー駆動の長時間化がある。両者を解決する方法として、端末における受信側CMOS-LNA (Complimentary Metal Oxide Semiconductor - Low Noise Amplifier, 相補型金属酸化膜半導体で構成された低雑音増幅器)の低損失・高効率化が挙げられ、これが実現されれば微弱な電波でも受信できることから通信の安定性の向上が期待でき、また増幅回路の消費電力を低減できることからバッテリー駆動の長時間化だけでなく省エネ化も期待できる。例えばCMOS-LNA回路は、MOS-FETの他にインダクタなど各種受動素子らが多数使用されており、差動入力・差動出力構成で差動信号の平衡度(バランス)が崩れると増幅回路動作が大幅に低減するものである。研究代表者は、チョークおよびインピーダンス整合用として多数使用されているインダクタの低損失化(高Q化)によるLNA回路全体の高効率化を図ることを検討した。ここでQ値(性能指数)とは、角周波数 ω [rad/s]×インダクタンス値L [H]/抵抗値R [W]である。

現在利用されているインダクタは、小型・集積化の観点から平面型空心インダクタである。図1に平面型スパイラルインダクタの断面図を示す。図1(a)のように空心の場合、巻線Bを流れる電流によって生じる磁束が隣接する巻線AおよびCに鎖交する。すると巻線AとCでは誘導現象による渦電流が発生し、これが損失の原因になっている(近接効果)。

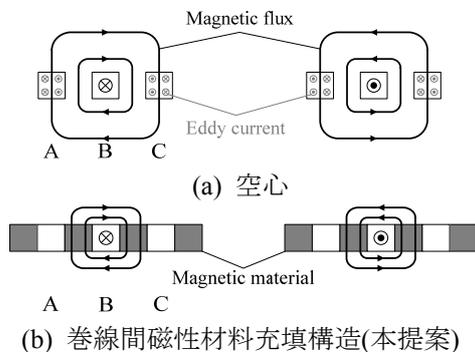


図1 平面型スパイラルインダクタの断面図

2. 研究の目的

研究代表者は既に平均粒径 1.1 μm のカルボニル Fe 粉をエポキシ樹脂中に分散させた複合材料を平面コイルの巻線内に埋め込ん

だ本課題のインダクタを試作・評価をしている。このインダクタは、同サイズの空心インダクタに比べて1 GHz前後でインダクタンスL、Q値が増大していることが確認された。しかしながら、約2 GHz以上においてQ値が減少しており、詳細は後述するが微粒子の凝集による渦電流流路の増大が主な原因であると考えられ、凝集を如何に分散させ、UHF帯でより高いQ値を有するインダクタを開発することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 絶縁体による磁性微粒子表面修飾に関する研究

前述の通り現在使用している複合材料(Fe系磁性微粒子; 平均粒径 1.1 μm /エポキシ樹脂)における問題点は微粒子同士の凝集である。複合材料中の渦電流は、個々の微粒子内を還流する渦電流による成分と複数の微粒子を跨って流れる渡り渦電流による成分に分けられるが、微粒子の分散性が悪く、微粒子クラスタを形成するような場合は後者による損失が支配的となる。申請時点では、最稠密に近い状態まで金属磁性微粒子の体積含有率(55 vol.%程度)を高めており、微粒子同士が接触しており材料Q値が低いと考えられた。そこで本研究では、渡り渦電流を抑制するために金属磁性微粒子の表面修飾によって微粒子同士の電氣的接触を緩和するための検討を進めた。表面修飾の方法として、大気中熱処理に依る酸化被膜を付けることを検討し、実験した。またフラックス法に依るシリカ被膜についても検討して実験した。作製に関する装置や分析装置(EPMAやXRDなど)は、既設のもので作製・評価した。ここでは本研究内容に知見のある同学環境・エネルギー材料科学研究所・所長の手嶋勝弥氏に適宜ご助言を頂いた。また研究協力者の所属研究室博士生1名と修士生1名と共に実験した。

(2) UHF帯用複合材料の開発

前記(1)で作製される絶縁体により表面修飾された磁性微粒子をエポキシ樹脂中に混合し、既存の遊星式攪拌装置で攪拌し、ペースト状複合材料を作製し、既存のスクリーン印刷機を用いて高周波特性測定用試料を作製した。複合材料の絶縁体被覆厚と複素透磁率および複素誘電率の周波数特性の評価には、既存の同軸法によるインピーダンス・マテリアルアナライザを用い、学術的にも未知な複合材料を被覆厚と電氣的高周波特性の関係性を明らかにする。ここでは、研究協力者の所属研究室修士生1名と共に実験した。

(3) 巻線間複合材料充填型インダクタの解析

前記(2)における複合材料の複素透磁率および複素誘電率の周波数特性の測定結果を用いて、巻線間複合材料充填型RFインダクタの電磁界解析を行なった。電磁界解析には、

既設で実績のある三次元電磁界解析ソフトウェア；HFSS を利用した。本項目以降は、RF インダクタの測定やRF 回路に知見のある長野工業高等専門学校・講師の中山 英俊氏にご助言を頂いた。ここでは、研究協力者の所属研究室修士生1名と共に実験した。

(4) 巻線間複合材料充填型インダクタの試作・測定

巻線間複合材料充填型インダクタの試作に必要なスパッタ装置、めっき装置、フォトリソグラフィ装置などは所属研究室クリーンルーム内に整備しており、これまでの各種薄膜素子の試作実績から円滑に研究できる。以前試作した各種薄膜素子において、その下地にわずかに1 μm でも表面粗さ（凹凸）があると、解析結果と実測結果に差異が見られ、下地の平坦化プロセスの導入も視野に入れて開発を進めた。試作された本インダクタは、既設で実績のある GSG プロンプ接続のネットワークアナライザにより、インダクタンスおよび等価直列抵抗の高周波特性を測定し、 Q 値を見積もった。ここでは、研究協力者の所属研究室修士生2名と共に実験した。

(5) 巻線間複合材料充填型インダクタの RF 回路への適用実験

CMOS-LNA 回路の模擬回路を試作し、本インダクタの適用実験を行なった。ここでは、集積回路に知見がある同学科・助教の宮地幸祐氏にご助言を頂いた。ここでは、模擬回路外注先企業1社の協力を得て、研究協力者の所属研究室修士生2名と共に測定した。

研究全体を通して、同じ研究室の信州大学工学部電気電子工学科 教授の佐藤 敏郎 氏に適宜ご助言頂いた。

4. 研究成果

(1) 絶縁体による磁性微粒子表面修飾に関する研究

本開発項目で使用した磁性微粒子は、TIANYI 社製 YX5/5 で、平均粒径は1.37 μm 、組成比は $\text{Fe}_{97.6}\text{O}_{0.93}\text{N}_{0.71}\text{C}_{0.85}$ (wt.%) のカルボニル鉄粉 (CIP) である。表面酸化膜付 CIP の作製には、マッフル炉 (デンケン・ハイデンタル；KDF-009) を用いて、大気中熱処理とした。熱処理条件は、熱処理時間6 h 一定で、熱処理温度 T_a をパラメータとし、20 $^{\circ}\text{C}$ 刻みで $180 \leq T_a \leq 280$ [$^{\circ}\text{C}$] の6条件とした。昇温レートは1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で、6 h の熱処理後は炉冷した。なお、熱処理時間に対する表面酸化膜付 CIP の諸特性についての詳細は割愛するが、6 h までは熱処理時間に対して表面酸化膜が一樣に厚くなったが、熱処理時間を6 h より長くした場合、表面酸化膜の厚さならびに組成はほとんど変化しなかったため、熱処理時間は6 h とした。

結晶構造の観察には粉末 X 線回折法 (XRD) で X 線回折装置 (RIGAKU ;

RINT2200V/PC) を用い、表面酸化膜付 CIP の表面観察には電界放出形走査電子顕微鏡 (FE-SEM) (日立ハイテック；SU-8000) を用いた。また、静磁化曲線の測定には振動試料形磁力計 (VSM、理研電子；BHV-55) を用いた。全て既設である。

図2に断面 SEM 像を示すが、同図(b)から(d)より、熱処理温度が高くなるに伴い、CIP 表面の色が層状に濃色になりそれが厚くなるのが分かる。濃色が表面酸化膜である。また図3に XRD 回折パターンから見積もった α -Fe の結晶子サイズ D と各 CIP の VSM で測定された保磁力 H_c の関係を示す。同図より、 H_c は概ね D の6乗に比例していることが分かり、臨界直径以下の磁性ナノ粒子におけるランダム異方性が適用できることが示唆され、重要な知見が得られた。

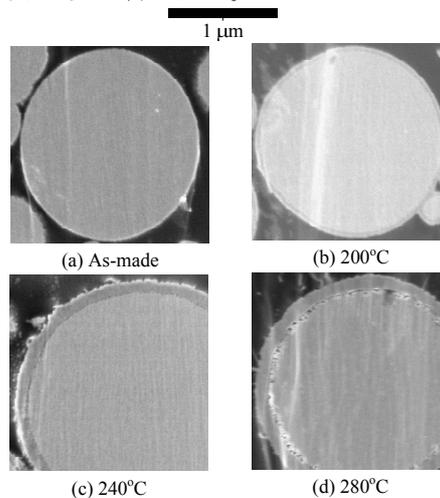


図2 表面酸化膜付 CIP の断面 SEM 像

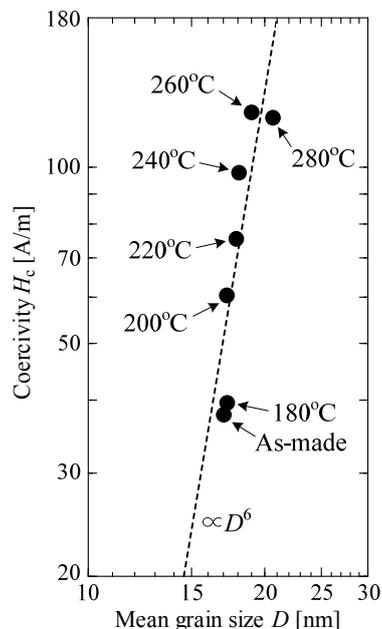


図3 表面酸化膜付 CIP の各熱処理温度に対する結晶子サイズ D と保磁力 H_c の関係

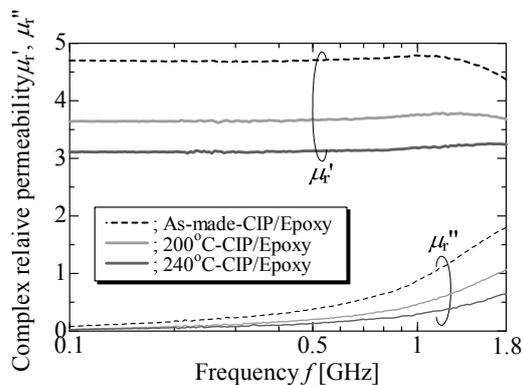
(2) UHF 帯用複合材料の開発

前項において、約 50 nm の表面酸化膜、約 190 emu/g の磁化、約 60 A/m の保磁力を有す

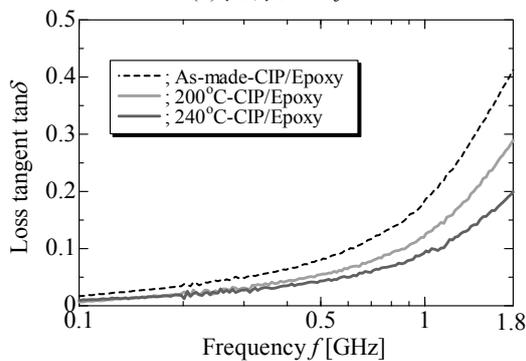
る熱処理温度 $T_a = 200$ [°C]の表面酸化膜付 CIP と、その倍の約 100 nm の表面酸化膜を有し、約 170 emu/g の磁化、約 100 A/m の保磁力を有する $T_a = 240$ [°C]の表面酸化膜付 CIP を代表として複合材料を作製した。また、比較のために熱酸化未処理の CIP を用いた複合材料も作製した。なお、全ての複合材料において各 CIP の体積充填率を 36%とした。各複合材料の複素比透磁率の周波数特性は、既設のインピーダンス・マテリアルアナライザ (Hewlett-Packard ; HP4291B) を用い、複合材料はリング状試料として同軸導波管法で測定した。

図 4(a)に As-made の CIP と Epoxy 樹脂を混合した複合材料 (以下、As-made-CIP/Epoxy 複合材料) と、各熱処理条件で大気中熱処理をした表面酸化膜付 CIP と Epoxy 樹脂を混合した複合材料 (以下、 T_a °C-CIP/Epoxy 複合材料と記述) の複素比透磁率の周波数特性の測定結果を示す。また図 4(b)には、同図(a)の複素比透磁率の虚部 μ'' を実部 μ' で割った損失係数 $\tan\delta$ の周波数特性を示す。

図 4 より、熱処理温度 T_a を高くするに伴い μ' および虚部 μ'' は共に減少し、特に μ'' の減少は著しい。 μ' が減少した理由は次の通りであると考えた。無線回路における RF インダクタの小信号動作を模擬した本測定では、磁化曲線の原点付近で微小なマイナーループを描くことになるが、保磁力が大きくなるとマイナーループの傾きすなわち透磁率が小さくなる。図 2 において熱処理温度 T_a が高くなると、表面酸化膜付 CIP 内部のぼぼ酸化さ



(a) μ' , μ'' vs. f



(b) $\tan\delta$ vs. f

図 4 各複合材料の複素透磁率 μ' , μ'' と損失係数 $\tan\delta$ の周波数特性の測定結果

れていない Fe ナノ結晶子が主と考えられる保磁力 H_c は増大するため、これが主因と考えられる。一方、 μ'' が著しく減少した理由は、 T_a が高くなると CIP 表面酸化膜の厚さが厚く、CIP 間を跨いで流れる渦電流が小さくなり、渦電流損失が低減したためと考えられる。

図 4(b) より、 T_a を高くするに伴い損失係数 $\tan\delta$ は大幅に減少し、As-made-CIP/Epoxy 複合材料に比べて 240°C-CIP/Epoxy 複合材料では概ね $\tan\delta$ は半分になった。これは極めて重要な知見である。

(3) 巻線間複合材料充填型インダクタの解析と (4) 巻線間複合材料充填型インダクタの試作・測定

既に巻線間のみ複合材料を充填したスパイラルインダクタが GHz 帯で最も Q 値が高くなることが明らかになっているため、同様の構造を採用した。

初めに、フォトリソと電気めっきを用いて、ガラス基板上に 2 turn の Cu スパイラルインダクタを作製した。フットプリントは $520 \times 450 \mu\text{m}^2$ 、厚さは $8 \mu\text{m}$ 、ライン/スペースは $55/15 \mu\text{m}$ である。次に、ペースト状の CIP/Epoxy 複合材料前駆体をメタルマスクを使用してスパイラルインダクタ上に直接印刷し、空气中 140°C で焼成した。最後にそのインダクタの表面を厚さが $5 \mu\text{m}$ になるまで研磨して、複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタを作製した。作製されたインダクタの上面および断面写真を図 5 に示す。

複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタの周波数特性は、既設のネットワーク・アナライザ (HP; 8720D) を用いた 1 port 測定で行なった。

図 6 に試作した複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタのインダクタンス L および Q 値の周波数特性の測定結果を示す。また ANSYS; HFSS を用いた電磁界解析の結果と同サイズの空心スパイラルインダクタの結果も併記する。

図 6(a) より、複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタのインダクタンス L は、UHF 帯で約 2 nH で、空心スパイラルインダクタの L よりも約 18% 高かった。図 6(b) より、複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタの Q 値は、約 2 GHz でピークを取り約 32 であった。また 0.4~2.4 [GHz] において酸化被膜付 CIP 複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタの Q 値は空心スパイラルインダクタの Q 値よりも約 20% 高かった。これは複合材料内の渦電流損失およびインダクタの近接効果をそれぞれ低減できたためであると考えられ、極めて大きな知見である。

(5) 巻線間複合材料充填型インダクタの RF 回路への適用実験

図 7 に巻線間複合材料充填型インダクタをダイサーで切出し、特性インピーダンス 50 Ω のコプレーナ線路上に Al ワイヤボンディン

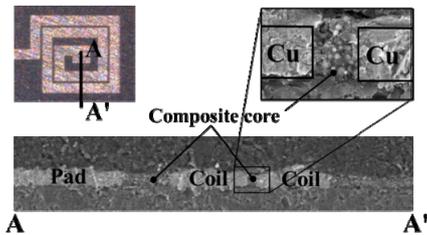
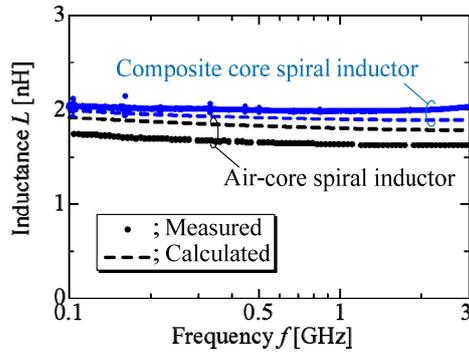
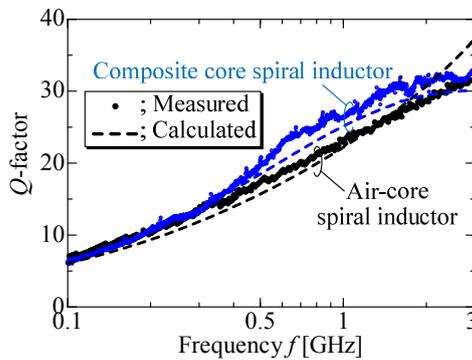


図5 複合材料巻線間装荷 RF スパイラルインダクタの試作結果



(a) L vs. f



(b) Q -factor vs. f

図6 複合材料巻線間装荷 RF スパイラルインダクタのインダクタンス L および Q 値の周波数特性の測定結果

グで接続した。図7には示していないが、同コプレーナ線路上に 12 pF のチップキャパシタも実装し、LC 直列共振 RF 模擬回路を外注で試作した。同回路は、前述のネットワーク・アナライザ (HP; 8720D) を用いた 2 port 測定で透過係数 S_{21} および反射係数 S_{11} の周波数特性を測定した。

図8にLC直列共振RF模擬回路の透過係数 S_{21} および反射係数 S_{11} の周波数特性の測定結果を示す。図8(a)より、共振周波数 (0.65 GHz 付近) で複合材料装荷 RF インダクタを用いた回路の S_{21} が空心インダクタを用いた回路のそれに比べて -0.066dB も低下し、損失が低減したことが示された。一方、図8(b)より、共振周波数で複合材料装荷 RF インダクタを用いた回路の S_{11} が空心インダクタを用いた回路のそれに比べて約 0.5dB も低下した。また、共振半値幅も複合材料装荷 RF インダクタを用いた回路の方が狭くなった。これらも回路の抵抗が低減したことを示唆するもので、本研究の最も重要な知見であり、

その優位性が示され、当初の目標を満足した。また、次項の主な発表論文等には記述していないが、上記内容が IEEE Transactions on Magnetics, 53 巻に掲載することが決定している。

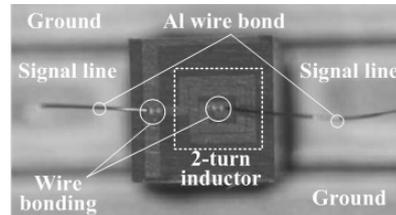
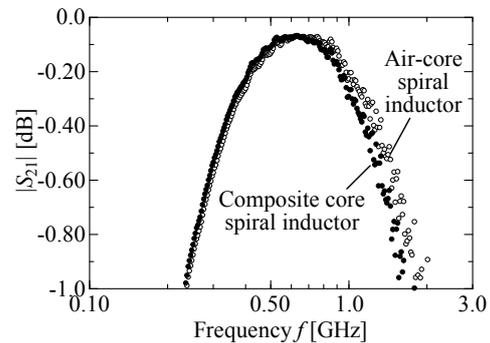
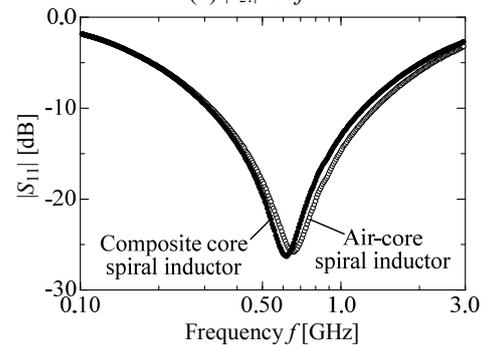


図7 複合材料巻線間装荷 RF スパイラルインダクタとチップキャパシタによる LC 直列共振 RF 模擬回路



(a) $|S_{21}|$ vs. f



(b) $|S_{11}|$ vs. f

図8 LC 直列共振 RF 模擬回路の透過係数 S_{21} および反射係数 S_{11} の周波数特性の測定結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

① 曾根原 誠, 宮嶋 優希, 佐藤 敏郎, 高 Q-RF インダクタ用表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料磁心の基礎検討, T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 査読有, 1 巻, pp.34-39, 2017

② 吉作 祥明, 加藤 貴規, 渡邊 悠生, 曾根原 誠, 中山 英俊, 後藤 洗亮, 佐藤 敏郎, MIM キャパシタと結合インダクタを用いた UHF 帯薄膜コモンモードフィルタの開発, 電気学会論文誌 A, 査読有, 137 巻, 4 号,

pp.221-228、2017

③ K. Sugimura, Y. Miyajima, **M. Sonehara**, T. Sato, F. Hayashi, N. Zettsu, K. Teshima, 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*、査読有、6巻、5号、P.#055932 (8 pages)、2016

④ **M. Sonehara**, K. Furihata, J. Koguchi, S. Tanaka, T. Sato、Fundamental study of high Q-factor RF spiral inductor using carbonyl-iron/epoxy composite magnetic core、*IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*、査読有、11巻、S1号、P.#4001604 (4 pages)、2016

〔学会発表〕(計17件)

① **M. Sonehara**, Y. Miyajima, S. Yamaguchi, T. Sato、Characterization of UHF band LC filter with RF spiral inductor using carbonyl-iron-particle/epoxy composite magnetic and chip capacitor、*Intermag2017*、2017年4月27日、Dublin, Ireland

② 宮嶋 優希, 山口 宗太, **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎、希塩酸処理したサブミクロン粒径CIPの磁気特性、平成29年 電気学会全国大会、2017年3月17日、富山

③ **曾根原 誠**, 宮嶋 優希, 佐藤 敏郎、UHF帯RFインダクタ磁心用表面酸化CIP/Epoxy複合材料の作製と特性評価、*電気学会マグネティックス研究会*、2016年12月12日、横浜

④ **曾根原 誠**, 宮嶋 優希, 佐藤 敏郎、高Q-RFインダクタ用複合材料磁心の基礎検討、*第40回 日本磁気学会学術講演*、2016年9月6日、金沢

⑤ 宮嶋 優希, **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎、酸化被膜付鉄系磁性微粒子/エポキシ複合材料を巻線間に充填したUHF帯高Qインダクタの開発、*JPCA Show 2016 (第46回国際電子回路産業展) アカデミックプラザ*、2016年6月1日～3日、東京

⑥ **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎、次世代スマートデバイス向けパワーデバイスの今、平成28年 電気学会全国大会、2016年3月16日、仙台(招待講演)

⑦ 宮嶋 優希, 杉村 佳奈子, **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎、RFインダクタの高Q化へ向けた複合材料磁心の基礎検討、平成27年度 電気学会 東海支部 学生発表会、2016年2月11日、長野

⑧ K. Sugimura, Y. Miyajima, F. Hayashi, **M. Sonehara**, T. Sato, N. Zettsu, K. Teshima, H. 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、*2016 Joint MMM-Intermag Conf.*、2016年1月13日、California, USA

⑨ **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎、磁性体装荷RFスパイラルインダクタ、*電気学会マグネティックス研究会*、2015年10月16日、長野(招待講演)

⑩ 杉村 佳奈子, 宮嶋 優希, 林 文隆, **曾根原 誠**, 佐藤 敏郎, 是津 信行, 手嶋 勝弥、鉄系メタルコンポジット鉄心材料用カルボニル鉄粉の高抵抗皮膜形成に関する基礎検討、*第39回 日本磁気学会学術講演会*、2015年9月11日、名古屋

⑪ **曾根原 誠**, 降幡 和彰, 宮嶋 優希, 佐藤 敏郎、複合材料磁心を装荷した高Q平面スパイラルRFインダクタ、*JPCA Show 2015 (第45回国際電子回路産業展) アカデミックプラザ*、2015年6月3日～5日、東京

他6件

〔産業財産権〕

○出願状況(計1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：国立大学法人信州大学
種類：特許
番号：特願 2016-170452
出願年月日：2016年9月1日
国内外の別：国内

〔その他〕
ホームページ等

信州大学 信州地の森
<http://www.shinshu-u.ac.jp/special/cooperation/2011/02/37552.html>

信州大学工学部電気電子工学科 先端磁気デバイス(佐藤・曾根原)研究室 ホームページ
<http://amd1.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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