

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

Basic examination of composite magnetic core with surface-oxidized carbonyl-iron powder (CIP)/epoxy for high Q-factor RF-inductor

曾根原誠[†]・宮嶋優希・佐藤敏郎

信州大学スピンドバイステクノロジーセンター, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

M. Sonehara[†], Y. Miyajima, and T. Sato

Spin Device Technology Center, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano 380-8553, Japan

The carbonyl-iron powder (CIP) was annealed in the air for the composite core of high Q-factor RF-inductor to see if an oxidized film would be formed on CIP surface. Results showed that not only the surface-oxidized film thickness but also the crystallite diameter and coecivity increased when increasing the annealing temperature and time. The most suitable annealing conditions were found to be 240°C and 6 h: about 40 nm of Fe₃O₄ and Fe₂O₃ were formed on the CIP surface under these conditions. A magnetic composite with the surface-oxidized film on magnetic particles was fabricated and its permeability measured. The inductance and resistance were calculated by a 3D full-model electromagnetic analyzer on the basis of measured permeability and the Q-factor was then estimated using these characteristics. The highest Q-factor, 33, was observed at 1.8 GHz, which was higher than that of the air-core from 0.1 to 1.8 GHz.

Key words: RF spiral inductor, surface-oxidized film, carbonyl-iron-powder/epoxy composite, Q-factor

1. はじめに

第四世代通信規格として注目されている LTE-Advanced¹⁾では、複数のアンテナを用いた MIMO (Multi-Input Multi-Output) による通信が採用されるなど携帯端末の無線回路部は増大する一方で²⁾, 携帯端末の体積増加を招く³⁾. 無線回路において最も専有面積の大きい素子は、平面スパイラル空心インダクタである⁴⁾. 従って、インダクタ素子の小型化⁵⁾, あるいはチップサイズパッケージ (CSP)⁶⁾などの RF-IC への集積化が急務である。これらが実現すれば、回路の小型化のみならず不要な配線ロスを低減でき、無線回路の高効率化に貢献することになる。上記に加えてインダクタ素子には、高い性能指数 Q 値が要求される。なお、Q 値は次式で表される。

$$Q = \omega L / R. \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、L はインダクタンス値、R は抵抗値である。筆者らは既に近接効果による損失の抑制を図るため、導体ライン間スペースに磁性材料を装荷する手法を考案し、Q 値が増大することを明らかにした¹⁰⁾. Fig. 1 に概略を示すが、Fig. 1 (a) の空心の場合、巻線 B を流れる高周波電流によって生じる交番磁束が隣接する巻線 A および C に鎖交し、巻線 A と C で誘導現象による渦電流損が生じる (近接効果)。一方、Fig. 1 (b) に示すように提案した手法では、各巻線を流れる電流によって生じる磁束は、隣接する巻線よりも透磁率が高い巻線間に埋め込まれた磁性材料をパスすることになり、近接効果による損失を抑制できる。巻線間に埋め込む磁性材料として、カルボニル鉄粉 (CIP) をエポキシ樹脂中に分散させた複合材料を用いた。CIP は、数十 nm のナノ結晶から成る平均粒径数 μm の多結晶粒子である。また、CIP 粒子内で還流磁区構造を持つため、表面に磁極が現れず、自発磁化や残留磁化があっても粒子間に磁気的な引力が発生し難いので、凝集し難い特長を有する¹¹⁾. CIP/Epoxy 複合材料の前躯体はスラリー状であり、RF-IC の工程として親和性の高いスクリーン印刷で巻線間に同前躯体を充填することができる。2 μm のカルボニル鉄粉/Epoxy (以下、CIP/Epoxy) 複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタを作製・評価したところ、1 GHz において $Q = 29$

を達成し、同サイズの空心インダクタよりも Q 値を 29% 高くすることができた。しかしながら、1 GHz より高い周波数では、Q 値が周波数に伴い減少した。これは周波数が高くなると渦電流が近接している CIP 同士間を跨いで流れ易くなり、渦電流損が増大したものと推測した。

そこで筆者らは、CIP の充填率を下げ複合材料の透磁率を下げることなく、CIP が近接しても渦電流が粒子間を跨いで流れないようにするために、CIP 表面を絶縁被覆することを提案した。液相加水分解法によるシリカ被覆を提案した^{12),13)}が、表面処理ができずエポキシ樹脂中に分散できなかったため、CIP を大気中熱処理して高抵抗酸化膜で被覆する手法を検討した。本稿はその基礎検討として、大気中熱処理温度における酸化被膜形成の差異や、表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料の複素透磁率の周波数特性の測定結果について述べる。最後に、表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料巻線間装荷 RF インダクタの電磁界解析結果についても記述する。

2. CIP の表面酸化

2.1 作製方法

使用した CIP は、TIANYI 社製の YXS/5 で、平均粒径は 1.37 μm ,

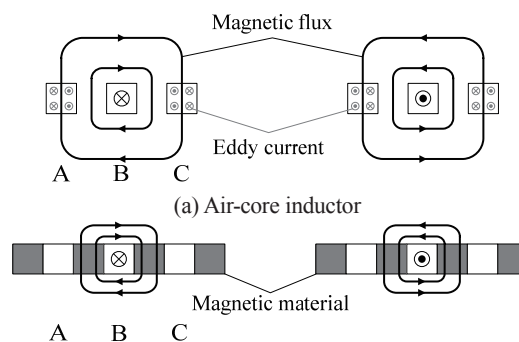


Fig. 1 Schematic cross section of the planar spiral inductors.

組成比は $\text{Fe}_{97.6}\text{O}_{0.93}\text{N}_{0.71}\text{C}_{0.85}$ (wt%) 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。10 g の CIP をシャーレ (ASONE; 2-9169-06, $\phi 100 \times 20$ mm) に均一に分散するように敷き詰めたものを 7 つ用意し、計 70 g をマッフル炉の中へ入れた。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°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、本稿では省略するが、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。

2.2 測定方法

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 の表面酸化膜の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天秤磁力計 (VSM, 理研電子; BHV-55) を用い、CIP のみを測定する場合は粉末測定用アクリルカプセル (理研電子; PC-625) に入れて測定した。

2.3 粉末 X 線回折法による X 線回折結果

Fig. 2 (a) に熱酸化未処理の CIP (図中および以降は、As-made と表記) と前述に示した熱処理条件で大気中熱処理をした各表面酸化膜付 CIP の粉末 X 線回折法による X 線回折結果を示す。Fig. 2 (a) より、熱酸化未処理の CIP の回折線ピークは、 $\alpha\text{-Fe}$ (110) が最も強い。一方、熱処理温度 T_a を高くするに伴い、 $\alpha\text{-Fe}$ (110) の回折線ピークは弱くなり、 Fe_3O_4 や Fe_2O_3 の回折線ピークが強くなる傾向が示された。また $T_a \geq 260$ [$^\circ\text{C}$] では Fe_2O_3 (104) に対応する回折線ピークが顕在する。これらより大気中熱処理をすると CIP 表面から酸化が始まり、 Fe_3O_4 が主の酸化被膜を形成し、更に熱処理温度 T_a を高くすると Fe_3O_4 よりも酸素リッチな Fe_2O_3 との混相酸化被膜を作ると推察され、CIP 内部までは酸化の影響が無いものと推測される。

Fig. 2 (b) に熱処理温度 T_a と Fig. 2 (a) 中において酸化されていない CIP 内部と考えられる $\alpha\text{-Fe}$ (110) 回折線のピーク値と半値幅を用いて Scherrer の式¹⁹⁾ で計算した平均結晶子サイズ D の関係を示す。Fig. 2 (b) より熱処理温度 T_a に対して Fe の平均結晶子サイズ D は単調に大きくなる傾向が示された。これは熱処理により $\alpha\text{-Fe}$ の結晶子が漸次成長したものと考えられる。

2.4 断面 SEM による表面酸化膜の観察

Fig. 3 に As-made CIP と各熱処理条件で大気中熱処理をした表面酸化膜付 CIP の SEM 断面像を示す。Fig. 3 (a) より、熱酸化未処理の CIP は、粒子の中心から表面まで同一色で、表面酸化膜は確認できなかった。一方、Fig. 3 (b) から同図 (g) より、熱処理温度 T_a が高くなるに伴い、CIP 表面が淡色に変わりそれが厚くなる。淡色に変わったものが表面酸化膜であると推察される¹⁹⁾。

Fig. 4 に熱処理温度 T_a に対する CIP 表面酸化膜の厚さ t_0 の関係を示す。各試料とも複数の断面 SEM 像から無作為に CIP を 100 個抽出し、各 CIP の表面酸化膜の厚さを見積り、その平均値をプロットで表し、最大値から最小値までをエラーバーで表している。Fig. 4 より、熱処理温度 T_a に対して表面酸化膜の厚さ t_0 は単調に厚くなる傾向が

示され、Fig. 2 (a) の粉末 X 線回折法による X 線回折結果において、熱処理温度 T_a が高くなるに伴い Fe_3O_4 や Fe_2O_3 の回折線ピークが強くなる傾向になることとよく一致する。

2.5 VSM による磁気特性の結果

Fig. 5 (a) に As-made CIP と各熱処理条件で大気中熱処理をした表面酸化膜付 CIP の静磁化曲線の測定結果を示す。また Fig. 5 (b) には、熱処理温度 T_a と Fig. 5 (a) より見積もられた 10 kA/m における磁化 M_m [emu/g] および保磁力 H_c [A/m] の関係を示す。Fig. 5 より、 T_a を高くするに伴い M_m は単調に減少する。これは T_a が高くなることで、増加した低磁化の Fe_3O_4 や Fe_2O_3 によって CIP 粒子全体の磁化は希釈されるが、各酸化物単体の磁化に対し、十分に磁化が高いことから、体積分率的にも $\alpha\text{-Fe}$ が大部分を占めるといえる。

一方、Fig. 5 (b) における保磁力 H_c が、ほぼ CIP 内部の非酸化 Fe ナノ結晶子によるものと仮定すると、上述のように熱処理温度 T_a によって結晶子は成長しているため、古典論では H_c が T_a 増加に伴い低下しても矛盾しないが、それに反して増加する。ここで、Fig. 6 に Fig. 2 (b) で示した $\alpha\text{-Fe}$ の結晶子サイズ D と各 CIP の保磁力 H_c との関係を示す。Fig. 6 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¹⁹⁾が適用できると考えられる。

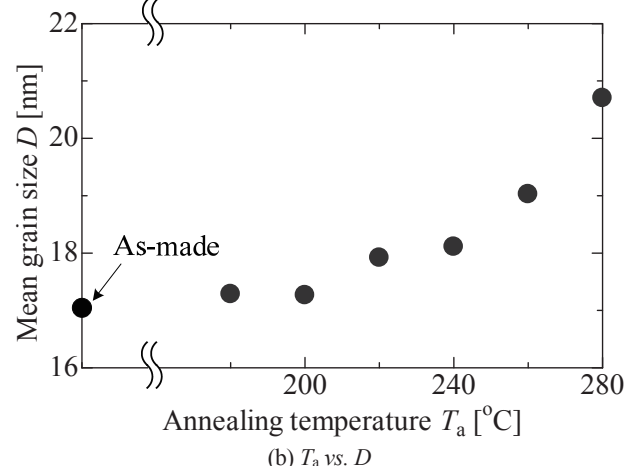
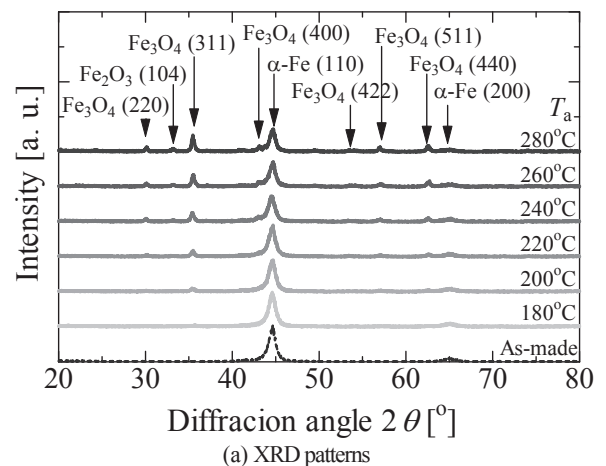


Fig. 2 (a) The XRD patterns and (b) the annealing temperature T_a dependence of mean grain size D in the CIPs with/without the surface-oxidized film.

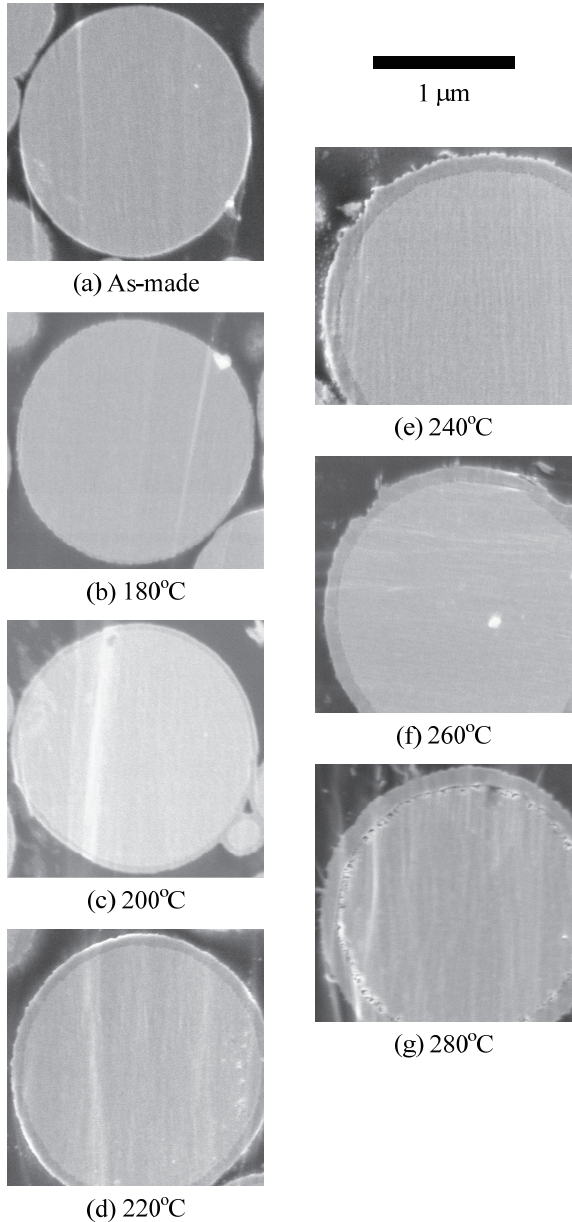


Fig. 3 Cross-section SEM images in the CIPs with/without the surface-oxidized film.

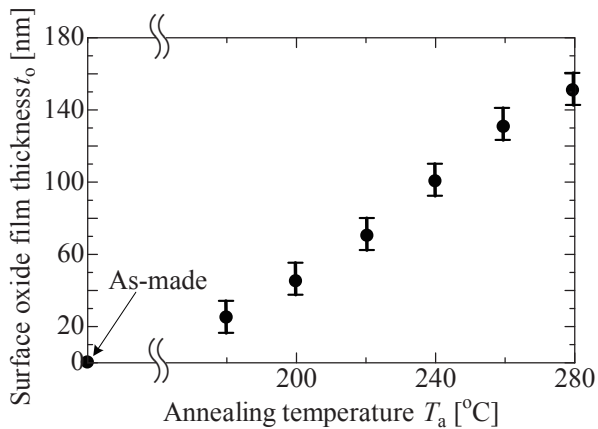


Fig. 4 The annealing temperature T_a dependence of surface-oxidized film thickness t_o in the surface oxide film on CIPs.

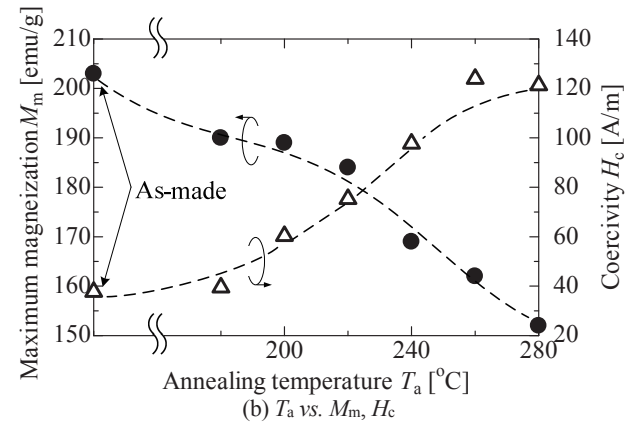
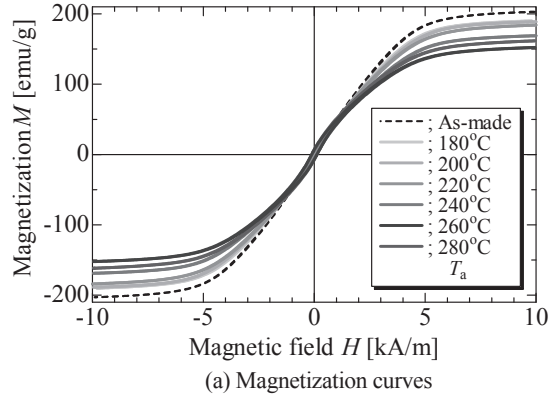


Fig. 5 Magnetization curves and relation between annealing temperature T_a , maximum magnetization M_m , and coercivity H_c in the CIPs with/without the surface-oxidized film.

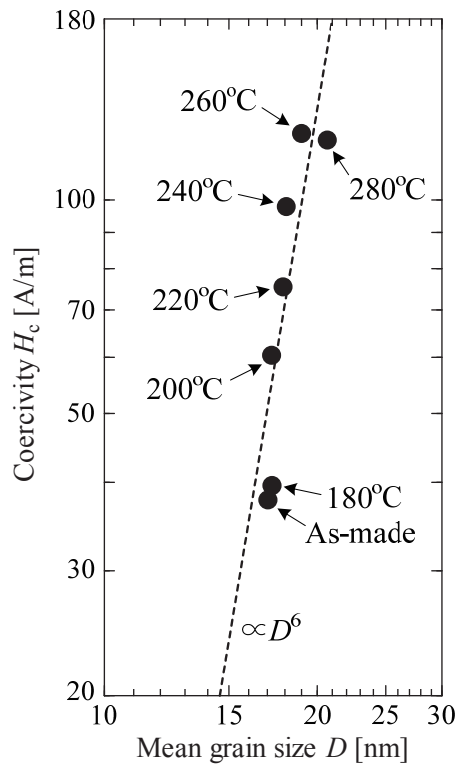


Fig. 6 Relation between mean grain size D and coercivity H_c in the CIPs with/without the surface-oxidized film.

3. 表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料

3.1 作製方法

2章において、約50nmの表面酸化膜、約190emu/gの磁化、約60A/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100nmの表面酸化膜を有し、約170emu/gの磁化、約100A/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。

複合材料の母材には、二液性Epoxy樹脂(ダイセル; CELV(W0925A, W0925B))を用いた。初めにW0925AとW0925Bを重量比1:1.05で真空ミキサー(THINKY; ARV-310LED)に入れ、500rpmで30s攪拌した後、1,000rpmで120s攪拌した。次に攪拌したEpoxy前駆体とCIPを重量比1:4.5で再び真空ミキサーに入れ、500rpmで30s攪拌した後、1,000rpmで120s攪拌し、CIP/Epoxy複合材料前駆体を作製した。

複素比透磁率の周波数特性測定用試料であるリング状試料(外径6mm, 内径3.5mm, 厚さ約1.8mm)は、以下の手順で作製した。スクリーン印刷機(MITANI; MEC-2400E)にスクリーンマスク(MITANI, リング形状3個)をセットし、ガラス基板(コーニング; イーグルXG, 49×60×1.1 [mm³])の上にポリイミドシート(東レ・デュポン; カプトン)を貼ったものを基板とし、CIP/Epoxy複合材料前駆体を印刷した。印刷後は、ホットプレート(ASONE; HHP-401)を用いて110°Cでプリベークした。印刷からプリベークまでの工程で約35µm厚のリング状複合材料試料ができる。この工程を15回繰り返し、約0.6mm厚で各工程のプリベークの時間は、1~5回目は3min, 6~10回目は4min, 10回目以上は5minとした。ポストベークは、マッフル炉を用いて120°C・5hとした。その後、ポリイミドシートから3個のリング状複合材料試料を剥がし、それらを重ねて約1.8mm厚の測定用試料とした。

直流抵抗率測定用試料である短冊状試料(長辺56mm, 短辺5mm, 厚さ約0.2mm)も前述のリング状試料作製の手順と概ね同じであるが、SUS304メタルマスク(MITANI, ガラス基板と同サイズ長方形形状49×60 [mm²])を用い、下地はガラス基板とした。印刷からプリベークまでの1回の工程で、0.2mm厚の長方形複合材料試料が作製できる。これを前述と同様にポストベークし、短冊状にダイシングした。

3.2 測定方法

各複合材料の複素比透磁率の周波数特性は、RFインピーダンス・マテリアルアナライザ(Hewlett-Packard; HP4291B)を用いて同軸導波管法で測定し、3.1節のリング状複合材料試料を用いた。

各複合材料の直流抵抗率は、デジタルマルチメータ(IWATU; VOAC7520H)とソースメータ(KEITHLEY; 2400)を用い四端子法で測定し、短冊状複合材料試料を用いた。電圧端子間は、30mmとした。

3.3 複素比透磁率の周波数特性の測定結果

Fig. 7(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Fig. 7(b)には、同図(a)および次式より算出した損失係数 $\tan\delta$ の周波数特性を示す。

$$\tan\delta = \mu'' / \mu' \quad (2)$$

Fig. 7(a)より、熱処理温度 T_a を高くするに伴い複素比透磁率の実部 μ' および虚部 μ'' は共に減少し、特に μ'' の減少は著しい。複素比透磁率の実部 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。Fig. 5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、複素比透磁率の虚部 μ'' が著しく減少した理由は、Fig. 4において T_a が高くなるとCIP表面酸化膜の厚さ t_0 が厚くなり、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であると考えられる。

Fig. 7(b)より、熱処理温度 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。

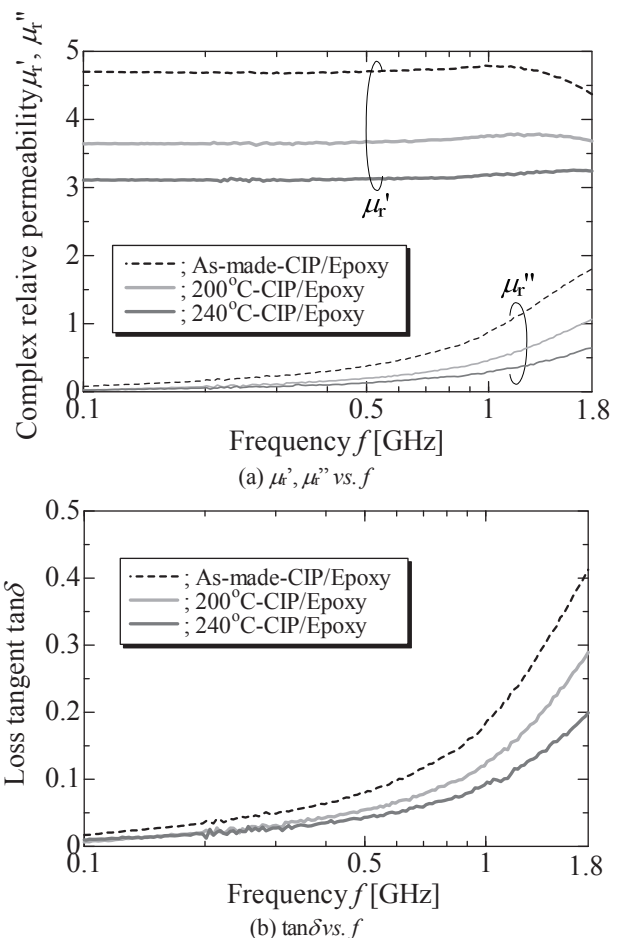


Fig. 7 Frequency f dependence of complex relative permeability μ', μ'' , and loss tangent $\tan\delta$ in the CIPs with/without the surface-oxidized film/epoxy composites.

3.4 直流抵抗率の測定結果

Table 1 に As-made-CIP/Epoxy 複合材料と T_a °C-CIP/Epoxy 複合材料の直流抵抗率の測定結果を示す。Table 1 より、熱処理温度 T_a を高くするに伴い直流抵抗率が增大する。これは、 T_a を高くするに伴い表面酸化膜 t_0 が厚くなったことに起因する。

4. 表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料巻線間装荷 RF インダクタの電磁界解析結果

4.1 解析方法

電磁界解析には、完全 3 次元 Full-wave 電磁界解析ソフトウェア HFSS (ANSYS ; Ver.15.0) を用いた。

Fig. 8 に電磁界解析で用いた複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタの解析モデルを示す。Fig. 8 (a) は上面模式図、同図(b) は断面模式図である。インダクタは 2 turn で、ライン/スペース $L/S=50 \mu\text{m}/10 \mu\text{m}$ 、サイズ $430 \times 370 \times 5 [\mu\text{m}^3]$ である。Table 2 に解析条件を示す。また解析には、Fig. 7 の複素比透磁率の周波数特性および Table 1 の直流抵抗率の測定結果をそれぞれ用いた。インダクタンス L および等価直列抵抗 R は、反射係数 S_{11} の解析結果を用いて次式より算出した。

$$R + j\omega L = 50(1 + S_{11}) / (1 - S_{11}) [\Omega]. \quad (3)$$

比較のため同サイズの空心インダクタについても解析した。空心インダクタの場合は、複合材料を空気とし、複素透磁率の実部を真空中の透磁率と同じ $4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$ 、複素透磁率の虚部を 0 とし、それぞれ周波数に対して一定とした。

4.2 解析結果

Fig. 9 に As-made-CIP/Epoxy 複合材料と T_a °C-CIP/Epoxy 複合材料を巻線間に装荷した 2 turn スパイラルインダクタおよび同サイズの空心インダクタの解析結果を示す。Fig. 9 (a) はインダクタンス L 、同図(b) は等価直列抵抗 R 、同図(c) は性能指数 Q 値のそれぞれ周波数特性である。

Fig. 9 (a) より、空心インダクタよりも複合材料を巻線間に装荷したインダクタの方がインダクタンス L は約 4% 増加し、Fig. 7 (a) の複素比透磁率の実部 μ_r' が高い複合材料ほど L は大きくなった。一方、Fig. 7 (a) より 1 GHz 以下では複素比透磁率の実部 μ_r' は概ね一定であるが、インダクタンス L は周波数依存性を有している。既報 10) における CIP/Epoxy 複合材料巻線間装荷スパイラルインダクタの実測結果でも同様な結果が得られているがこの理由は明らかになっておらず、次回以降の報告で考察する予定である。

Fig. 9 (b) より、空心インダクタよりも複合材料を巻線間に装荷したインダクタの方が等価直列抵抗 R は 1 GHz で約 11% 減少した。これは、複合材料を巻線間に装荷したことで、近接効果による交流損失を低減できたためである。また、1.4 GHz より高い周波数では、熱処理温度 T_a を高くした複合材料ほど R の上昇を抑えている。これは、

Table 1 DC resistivity in the CIPs with/without the surface-oxidized film/ epoxy composites.

Composites	DC resistivity [$\Omega \cdot \text{m}$]
As-made-CIP/Epoxy	263
200°C-CIP/Epoxy	588
240°C-CIP/Epoxy	732

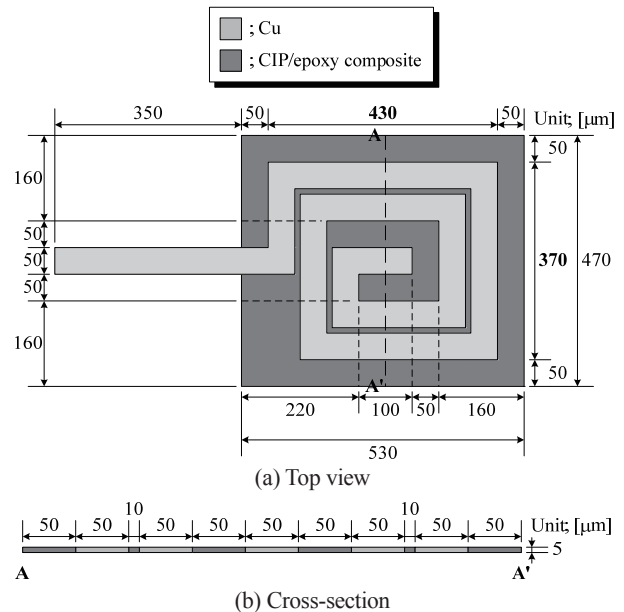


Fig. 8 Schematic top view and cross-section of 2-turn spiral inductor with composite magnetic core.

Table 2 Analysis conditions of 2-turn spiral inductor with composite magnetic core.

Analysis area	Size	20 x 20 x 20 [mm ³]
	Boundary condition	Radiation
Cells	Number	71,736
	Shape	Tetrahedron
Feed		Lumped port (50 Ω)
Convergence condition determination		Maximum number of passes; 20, Maximum delta S; 0.001
Position of inductor		Center

3.3 節と同じ理由で、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であると考えられる。

Fig. 9 (c) より、空心インダクタよりも複合材料を巻線間に装荷したインダクタの方が性能指数 Q 値は 1 GHz で約 20%、1.8 GHz で約 5% 増大した。Fig. 7 (b) において材料 Q 値である $\tan \delta$ では、CIP の表面酸化の効果は大きいですが、本インダクタは開磁路構造であるので、その効果が小さくなると考えられる。240°C-CIP/Epoxy 複合材料を用いた場合では、1 GHz 以上において空心インダクタよりも優れた Q 値を得ることが示唆された。

5. まとめ

1 GHz を超える周波数でも高い Q 値を得ることができる CIP/Epoxy 複合材料巻線間装荷 RF インダクタの開発の基礎検討として、大気中熱処理温度における酸化被膜形成の差異や、表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料の複素透磁率の周波数特性を明らかにし、表面酸化膜付 CIP/Epoxy 複合材料巻線間装荷 RF インダクタの電磁界解析を行なった。本研究により明らかになった諸点を以下に述べる。

- (1) CIP の大気中熱処理温度を高くするに伴い CIP 表面に形成される Fe_3O_4 と Fe_2O_3 の混相の酸化膜は単調に厚くなり、平均結晶子サイズは単調に大きくなった。
- (2) CIP の大気中熱処理温度を高くするに伴い磁化は単調減少し、保磁力は単調増加した。また、保磁力は平均結晶子サイズの 6 乗に概ね比例した。

- (3) CIP の大気中熱処理温度の高い複合材料ほど複素比透磁率の実部・虚部は共に減少し、損失係数は大幅に減少する傾向が示された。As-made-CIP/Epoxy 複合材料に比べて 240°C-CIP/Epoxy 複合材料では損失係数は半分になった。
- (4) CIP の大気中熱処理温度の高い複合材料ほど直流抵抗率は増大する傾向が示された。
- (5) 電磁界解析結果より、0.1~1.8 [GHz]において CIP の大気中熱処理温度の高い複合材料ほどインダクタンスは減少、等価直列抵抗は大幅に減少、性能指数は大幅に増大する傾向が示された。

今後は、CIP よりも約 10 倍電気抵抗率の高いアモルファス Fe 微粒子を用いて、1 GHz 以上の周波数においてより低い $\tan\delta$ を有する複合材料を検討し、本研究の成果を基に複合材料を巻線間に装荷した RF スパイラルインダクタを試作し、特性評価する予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科学研究費補助金 15K18047 の助成を、また本研究の一部は総務省 SCOPE (戦略的情報通信研究開発推進事業) 若手ワイヤレス研究者等育成型 165104001 の委託を受けており、ここに深謝します。

References

- 1) <http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/97-lte-advanced> (3GPP Homepage, in Japanese, accessed 2016-10-07).
- 2) E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. V. Poor: *Cambridge University Press*, NY (2007).
- 3) T. Maruyama, M. Sonehara, K. Ikeda, T. Sato, K. Yamasawa, and Y. Miura: *The Paper of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan* (in Japanese), MAG-10-201, pp.11-16 (2010).
- 4) O.A. Hidayov, N. H. Nam, G. Yoon, S. K. Han, and S. G. Lee: *Electronics letters*, **49**, 23, pp.1433-1435 (2013).
- 5) K. Ikeda, T. Suzuki, T. Maruyama, T. Minemura, M. Sonehara, and T. Sato: *J. Mag. Soc. Jpn.* (in Japanese), **34**, 2, pp.123-130 (2010).
- 6) H. Nakayama, T. Yamamoto, T. Sato, K. Yamasawa, Y. Miura, M. Munakata, and M. Yagi: *J. Mag. Soc. Jpn.* (in Japanese), **28**, 2, pp.157-163 (2004).
- 7) B. Viala, A. S. Royet, R. Cuchet, M. Aid, P. Gaud, O. Valls, M. Ledieu, and O. Acher: *IEEE Trans. Magn.*, **40**, 4, pp.1999-2001 (2004).
- 8) D. S. Gardner, G. Schrom, F. Paillet, B. Jamieson, T. Karnik, and S. Borkar: *IEEE Trans. Magn.*, **45**, 10, pp.4760-4766 (2009).
- 9) T. Maruyama, Y. Obinata, M. Sonehara, K. Ikeda, and T. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 10, pp.3196-3199 (2011).
- 10) M. Sonehara, K. Furihata, J. Koguchi, S. Tanaka, and T. Sato: *IEEJ Trans. EEE*, **11**, S1, pp.S3-S8 (2016).
- 11) M. Koeda, A. Harada, H. Ono, T. Ishikura, T. Kuroda, and H. Moro: *IEEJ Trans. Fundamentals and Materials* (in Japanese), **131**, 11, pp.949-954 (2011).
- 12) K. Sugimura, F. Hayashi, M. Sonehara, T. Sato, and K. Teshima: *The Annual Meeting Record IEEJ 2015* (in Japanese), 2-147, (2015).
- 13) K. Sugimura, Y. Miyajima, M. Sonehara, T. Sato, F. Hayashi, N. Zettsu, K. Teshima, and H. Mizusaki: *AIP ADVANCES*, **6**, #055932 (8pages), (2016).
- 14) E. F. Kaelble: *Handbook of X-ray*, Chapter 3, (McGraw-Hill, New York, 1967).
- 15) G. Herzer, *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 5, 1397-1402 (1990).

2016年10月07日受理, 2016年11月03日再受理, 2016年11月30日採録

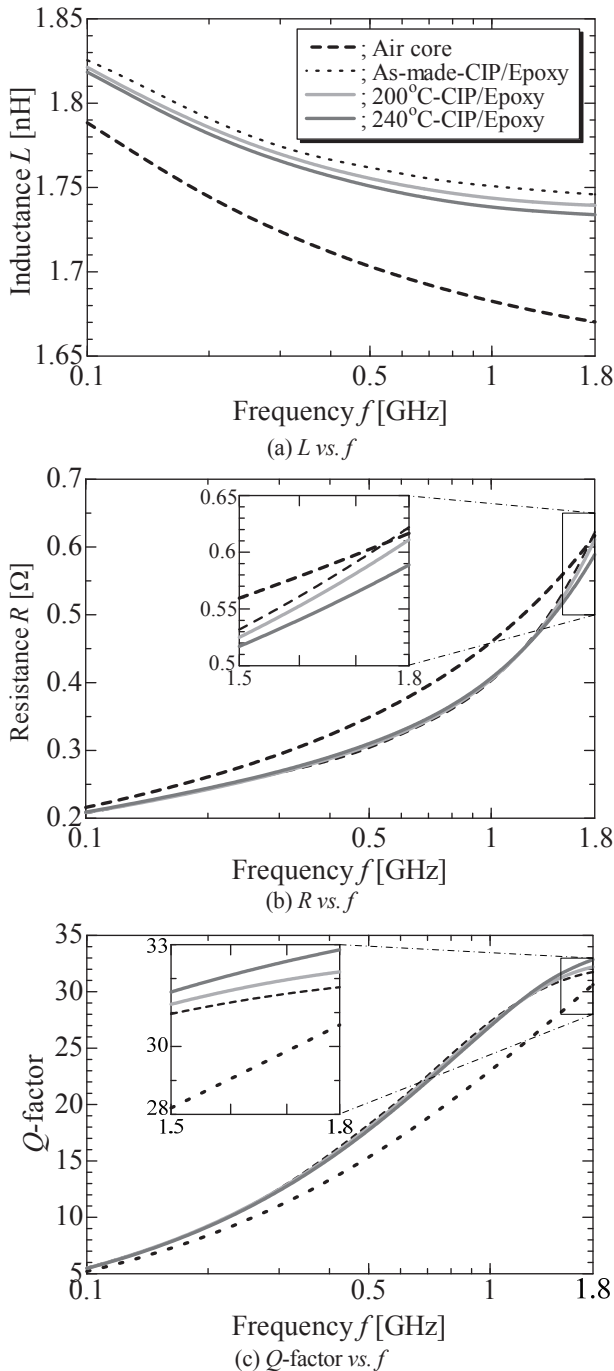


Fig. 9 Calculated frequency f dependence of inductance L , equivalent series resistance R , and Q -factor in the three kinds of 2-turn spiral inductor with composite magnetic core and air-core inductor.