

**デュアルフェーズエンジニアリングによるIoT社会に貢献する
広帯域電波吸収体の創製**

Development of a Wideband Microwave Absorber
Contributing to the Internet of Things Society Through
Dual-phase Engineering

課題番号：19H05620

杉本 諭 (SUGIMOTO Satoshi)

東北大学・工学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

本研究では、高い透磁率が見込まれるソフト磁性相と高い異方性磁界から高周波帯での機能が可能となるハード磁性相とのデュアルフェーズから構成されるモディファイド粉末を作製し、組織形態を制御によって広帯域で μ_r' と μ_r'' を整合領域内に入れた Early 5G 帯域で機能できる広帯域電磁波吸収体の開発を目的とする。

研究分野：磁性材料学，高周波磁性体，永久磁石材料

キーワード：電磁波吸収体，微粒子，複合，反射損失，透磁率

1. 研究開始当初の背景

世界中の様々なモノがインターネットにつながるIoT時代が到来し、情報通信（ICT）デバイスの数の急激な増大が見込まれている。これに伴い、多くの情報を高速で通信するために、周波数も現在のUHF帯から、Early 5G と呼ばれる 0.7~6GHz を中心とした SHF 帯へと高周波側への移行が決定されている。一方で機器からのノイズが増加し、この周波数帯まで及ぶ危険性も高まっており、その安全性にとっては発生ノイズの軽減が大きな課題となっている。

この対策としてノイズを吸収できる電磁波吸収体が知られているが、現有のソフト磁性材料の電磁波吸収体では、6 GHz 帯域まで磁化損失を示す比透磁率の虚部 μ_r'' を保つことができず、良好な電磁波吸収体とはならない。また、増加する多種多様なデバイスからは、多くの異なる周波数ノイズが出ることから、利用周波数域において広帯域で対応できる電磁波吸収体が切望されている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、高い透磁率が見込まれるソフト磁性相と高い異方性磁界から高周波帯での機能が可能となるハード磁性相のデュアルフェーズから構成されるモディファイド粉末を作製し、磁氣的相互作用と組織形態を制御して Early 5G 帯域で機能できる広帯域電磁波吸収体の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、表1に示すようなコンセプト、

すなわち、ハードフェライトの水素還元などの熱処理技術、メカノフュージョンなどの混合技術、アークプラズマデポジション法などのコーティング技術などにより、共鳴周波数が異なるソフト磁性相とハード磁性相が共存し、両相間の相互作用なども考慮したモディファイド磁性微粒子を作製する。さらに、電磁波吸収を広い周波数帯域で起こすには、比透磁率の実部 μ_r' と磁化損失を示す比透磁率の虚部 μ_r'' の値がある一定の範囲（整合領域）内になければならない。本研究では、分布形態や体積分率などの二相組織を制御するデュアルフェーズエンジニアリングによって、 μ_r' 、 μ_r'' を整合領域に入れ、広 GHz 帯域対応の電磁波吸収体を設計する。

表1 本研究における材料作製のコンセプト

作製法	ハード磁性 微粒子	ソフト磁性 微粒子	モディファイド(ハイブリッド) 微粒子
混合法	共沈法 ○	水素還元 (全還元) 水素プラズマ 反応法 (HPMR) ●	メカノフュージョン 反応 ●
コーティ ング法	-	水素還元 (全還元) 水素プラズマ 反応法 (HPMR) ●	有機金属分解法 ●
	共沈法 ○	-	アークプラズマ 蒸着法(APD) ●
熱処理	共沈法 ○	-	水素還元 (部分還元) ●

4. これまでの成果

4.1 メカニカル混合粉末

($\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末（以後、“CFO”と表記）と Fe 粉末をメカニカル混合した Fe+CFO 混合粉末を用いて樹脂複合体を作製した。透

磁率の周波数依存性から、CFO の混合割合が増大するにつれて MHz 帯域の μ_r' は減少するが、 μ_r'' は双峰型のプロファイルを示し、さらにそのピーク周波数が高周波数側にシフトすることが分かった。そこで、 μ_r'' の低周波側、高周波側のピーク周波数をそれぞれ f_r^{low} 、 f_r^{high} と定義し、横軸を CFO 混合量依存性として図 1(a)にまとめて示した。これより、 f_r^{low} 、 f_r^{high} は CFO の混合量を増加させると高周波数側にシフトしている。さらに同図中において、 μ_r'' が最大値を示した共鳴周波数を破線で結んで示したが、図中破線が CFO の混合量が増大するにつれて上昇しており、本研究でターゲットとしている 0.7-6 GHz 帯域全域にわたって変化させられることが分かった。

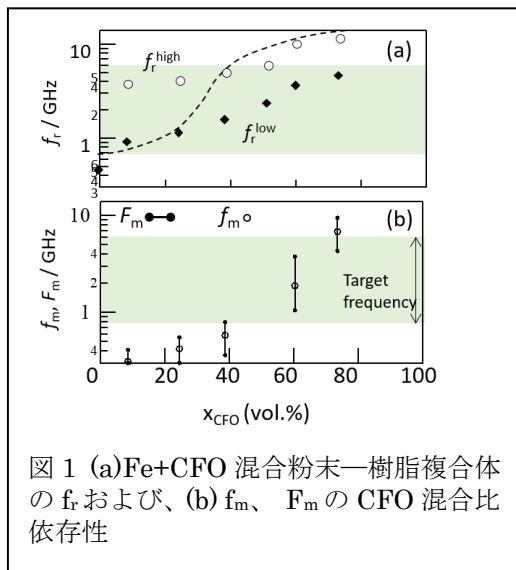


図 1 (a)Fe+CFO 混合粉末—樹脂複合体の f_r および、(b) f_m 、 F_m の CFO 混合比依存性

そこで、これら樹脂複合体の電磁波吸収特性(R.L)を測定した。図2に CFO を 60,74 vol.% を混合したときの樹脂複合体について電磁波吸収特性を示した。これより、CFO の混合比を変えることで電磁波の 99%以上を吸収するとされる $R.L. < -20\text{dB}$ となる周波数(マッチング周波数(f_m))が変化しており、本研究のターゲット周波数帯域内に存在していることが分かる。 f_m ならびにその変化する周波数範囲(F_m)の CFO 混合量依存性を調べ、その結果を図 1(b)に示した。図 1(b)より、 f_m 、 F_m について CFO の混合量が増加するにつれて増大する傾向を示し、特に CFO を 60-74 vol.% 混合したときに、本研究でターゲットにしている周波数帯域をカバーできる電磁波吸収体となったことがわかる。

4.2 アークプラズマデポジション (APD) 法

CFO 粉末表面に対して APD 法で微細な Fe 粒子を蒸着し、CFO/Fe 複合粉末を作製した。SEM 観察より数十 nm の Fe が CFO 粉末表面に蒸着されたことが分かり、APD 法を用いることで CFO/Fe のモディファイド粉末が形成できることがわかった。

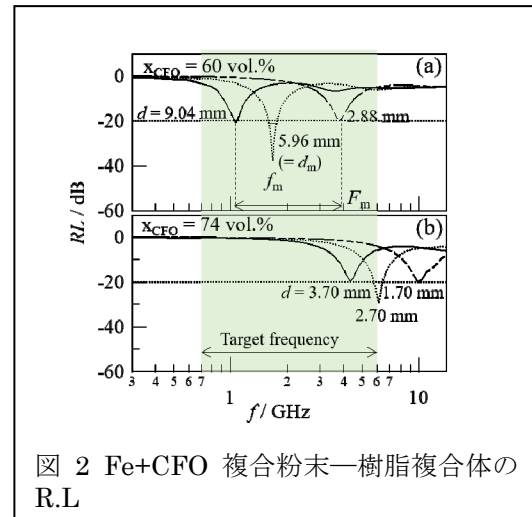


図 2 Fe+CFO 複合粉末—樹脂複合体の R.L

5. 今後の計画

2020 年度までの成果を基に、メカニカル混合による混合粉末、アークプラズマデポジション (APD) 法にてコアをハードフェライト粉末でシェルを Fe 系合金ナノ粒子としたモディファイド粉末、メカノフュージョン、スプレーコート、有機金属分解法などの種々の方法を用いてコアを Fe 系合金でシェルをハードフェライトナノ粒子としたモディファイド粉末を作製する。これらの作製条件、高周波磁気特性、電磁波吸収特性、組織の関係を調べてモディファイド粉末作製の最適な方法を抽出する。さらにシート状樹脂複合体を作製して電磁ノイズ抑制効果を評価し、その応用について検討する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] 麻 博隆, 阿加 賽見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭, “ α -Fe/ $\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ 混合粉末を用いた樹脂複合体における電磁波吸収特性”, 粉体および粉末冶金, Accepted. (一般社団法人粉体粉末冶金協会 2020 年度秋季大会 優秀講演発表賞), (2020).
- [2] 杉本 諭, “永久磁石材料の微細構造制御と高性能化に関する研究—電磁波吸収体に関する研究を中心に—”, 粉体および粉末冶金, 67 (12), 659-665, (2020). (DOI: 10.2497/jjspm.67.659).
- [3] 豊田 雄一郎, 阿加 賽見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭, “Fe 粉末における扁平化と高周波磁気特性”, 電気学会マグネティックス研究会資料 (MAG-20-062 ~ 063 · 065 ~ 072), MAG-20-065, 35-40, (2020).

7. ホームページ等

<https://sugimotolab-material-tohoku.jp/results/>