

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05620

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Development of a Wideband Microwave Absorber - Contributing to the Internet of Things Society Through Dual-phase Engineering

研究代表者

杉本 諭 (Sugimoto, Satoshi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10171175

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 122,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高透磁率のソフト磁性相と高い異方性磁界のハード磁性相とのデュアルフェーズからなるモディファイド粉末を作製し、組織制御によって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した。メカニカル混合、スピノーダル分解、アモルファスからの微細結晶化、水素還元と窒化、粉末コーティング、エアロゾルデポジション、などの材料科学に基づくプロセス技術を駆使し、種々のモディファイド磁性微粒子からなる樹脂複合体を作製した。結果、-20dB以下の反射損失を示す周波数がEarly 5G帯域に存在し、十分な電磁波吸収能とノイズ抑制効果をも示したことから、優れた電磁波吸収体となることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、デュアルフェーズを基とした材料複合化により、電磁波吸収体における特性向上の可能性を示唆した。中でもFe-Cr-Co系合金におけるスピノーダル分解と塑性加工の利用によって高性能が得られた結果は、世界初の研究となり、新たな材料開発の指針を示した。グラフェンと磁性粉末からなる複合膜における結果も、磁気損失のみで考えていた電磁波吸収特性の制御が、導電損失も含めた制御によって可能であることを示唆し、材料設計の多様化にも貢献した。一方、本研究で開発した種々の電磁波吸収体は、今後の高速通信社会におけるICTデバイスの動作安全性を担保し、安心安全の社会構築に大きく貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we created a modified powder consisting of a dual phase of a soft magnetic phase with high magnetic permeability and a hard magnetic phase with a high anisotropic magnetic field, and aimed to develop a broadband electromagnetic wave absorber that can function in the Early 5G band by controlling the microstructure. We created resin composites consisting of various modified powders by using process technologies based on materials science, such as mechanical mixing, spinodal decomposition, crystallization from amorphous, hydrogen reduction and nitriding, powder coating, and aerosol deposition. These resin composites showed good microwave absorption properties (ex. reflection loss less than -20dB) and good noise suppression effect in the Early 5G band. It suggested that these resin composites from modified powders have a possibility to become an excellent electromagnetic wave absorber, expecting greatly contribution for the creation of an advanced information society.

研究分野：磁性材料学

キーワード：電磁波吸収体 微粒子 透磁率 反射損失 伝送減衰率 二相分離組織 飽和磁化 保磁力

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、そのデバイス数の急激な増大が見込まれている。これに伴って多くの情報を高速で通信させる ICT 機器に用いられる周波数も、UHF 帯 (0.3 ~ 3 GHz) から Early 5G と呼ばれる 0.7 ~ 6 GHz を含む SHF 帯 (3 ~ 30 GHz) へと移行している。一方で、これらの ICT 機器数の増加は、機器からの外来ノイズや制御を司るインバータや電源からのスイッチングノイズ等を増加させ、それらの周波数も高周波化させている。結果的に、多くの ICT 機器が搭載され将来の安心安全の社会構築を司る自動車やロボットの自動走行や動作に及ぼす危険性が高まっている。このため、これらの機器からのノイズを減らし電磁干渉問題を抜本的に解決する電磁波吸収体の開発が急務となっている。しかし、現有の MnZn 系フェライトや Fe 系磁心材料などのソフト磁性材料を用いた電磁波吸収体では、6 GHz 帯域まで磁気損失を示す比透磁率の虚部 μ'' 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、増加する周波数の複数ノイズにも対応できる広帯域電磁波吸収体が切望されている。

永久磁石などのハード磁性材料ならば、要望される 0.7 ~ 6 GHz 対応の電磁波吸収体の作製は可能となる。しかし、対応周波数が高すぎる、焼結体では厚さ d は薄いものの 99% 以上の電磁波吸収 (反射損失 Reflection loss: $R.L. < -20$ dB) を示す周波数帯域幅 Δf が狭いなどの問題があり、将来、ICT デバイスを司るチップ内への応用には、適正な周波数での機能とさらなる薄肉化と広帯域化を両立させることが要望される。電磁波吸収を広い周波数帯域で満たすためには、図 1 に示すように材料の透磁率の実部 μ' と磁化損失を示す透磁率の虚部 μ'' の値がある一定の範囲 (整合領域) 内になければならない。しかし整合領域は周波数に対して変化するため、単一磁性相の自然共鳴ピークにて広帯域化させることは難しい。一方、電磁波吸収体の薄さは、透磁率の実部 μ' に比例するため、磁化の強さ I_s が高いソフト磁性の Fe 基金属材料が有利であるが、その単独材料では、上述したように異方性磁場 H_A が低く高周波では対応できない。

2. 研究の目的

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、組織形態を制御によって広帯域で μ' と μ'' 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した。

3. 研究の方法

研究開始時における概略図とスケジュールならびに計画をそれぞれ図 2 ならびに表 1 に示す。これを基に研究を始めた。

図 2 に示したように当初計画では、水素プラズマ金属反応法 (HPMR) にてソフト磁性ナノ粒子を作り、ハードフェライトなどハード磁性粉末との複合を考えていたが、ソフト磁性ナノ粒子の凝集が激しく、均一に混合や複合ができなかった。また、共沈法などで Co フェライトなどのハード磁性ナノ粒子を作製する予定であったが、メカニカル混合などによる複合化、電磁波吸収特性や磁気特性を測定するために用いる樹脂複合体の作製、組織観察、などに必要となる十分な粉末量がとれなかった。そこで均一に両磁性粉末を複合できる手法を調査したところ、ある程度の大きさの両磁性粉末同士のメカニカル混合や市販のソフト磁性粉末またはハード磁性粉末に対してコーティング法 (粉末スパッタ法、アークプラズマ蒸着法 (APD)) によって複合化する方法、さらに市販の両粉末をエアロゾル化し、二つのノズルからジェット気流に乗せて基板に衝撃固化させるエアロゾルデポジション (AD) 法による複合厚膜の作製、などが候補に挙がった。そのため AD 法については新たに渡邊を研究分担者として登録し、複合厚膜による電磁波吸収体の作製も同時に進め

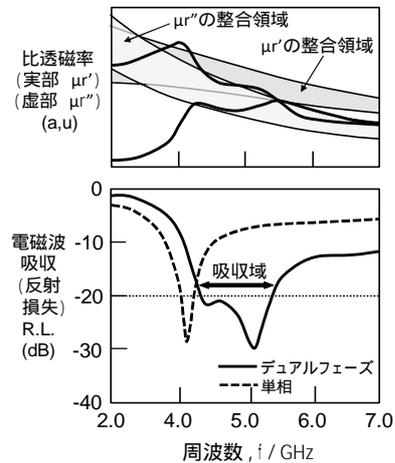


図 1 整合領域と電磁波吸収

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)
			メカニカル反応
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)

図 2 本研究の概略 (研究開始時)

表 1 本研究の研究項目とスケジュール (研究開始時)

研究項目	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
ハードフェライト粒子とソフト磁性粒子の作製	←→				
ハイブリッド微粒子 (メカニカル混合 & 部分還元)		←→			
ハイブリッド微粒子 (コーティング/APD, 有機金属分解)			←→		
樹脂複合体の作製と電磁波吸収特性の評価				←→	
電磁ノイズ抑制効果の評価					←→

ることとした。また、膜状の電磁波吸収体の場合、電気抵抗が関係し、その導電損失を利用して電磁波が吸収できることから、導電体であるグラフェンとの複合化も検討することとした。

さらに、永久磁石材料の一つである Fe-Cr-Co 系合金にも着目した。本系合金はスピノーダル分解にて強磁性の Fe-Co リッチ (γ_1) 相と非強磁性の Cr リッチ (γ_2) 相の二相に分離し、 γ_1 ナノ粒子が γ_2 相によって囲まれることで磁氣的に孤立化した微細組織となり、自然共鳴現象を有効に利用できることから、本系合金をコアとした複合粉末についても検討した。なお、この Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた研究は、これまでに報告例のない、二相分離変態を利用した新たな電磁波吸収材料の作製方法を提案するものとなり、その特性も既存材料を超えていることから、本系合金は 5G さらには Beyond 5G に対応した材料になりうると確信される。

4. 研究成果

本研究では、ソフト磁性相・ハード磁性相からなるデュアルフェーズが制御されたモディファイド磁性微粒子を用い、次世代通信帯域で機能できる広帯域かつ薄型の電波吸収体の開発を目的とした。様々な粉末作製ならびにコーティング技術を駆使してモディファイド磁性微粒子を作製し、0.7-6 GHz 帯域で機能する電磁波吸収体の開発を行った。以下、得られた成果を示す。

(1) メカニカル混合によるモディファイド磁性粒子の作製とその電磁波吸収特性

中間報告の通り、Fe と Fe_3O_4 (Fe+ Fe_3O_4) または Fe と $(\text{Co}_{0.5}\text{Fe}_{0.5})\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (CFO とする) (Fe+CFO とする) をメカニカル混合することによって、これらの混合粉末を得ることができた。また、これらの混合粉末から作製した樹脂複合体の複素比透磁率の周波数依存性を調べたところ、Fe+ Fe_3O_4 粉末の組み合わせでは目的とする 0.7 ~ 6 GHz の広帯域で機能するような電磁波吸収体は得られなかった。これは、ハード磁性相として用いた Fe_3O_4 相の磁気異方性が小さかったためと推察されたことから、 Fe_3O_4 粉末よりも異方性磁界が大きな CFO 粉末を用い、その樹脂複合体の電磁波吸収特性を調べた。その結果、Fe+CFO 混合粉末を用いることで μ_r'' が双峰型のプロファイルを示し、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。さらに、CFO の混合比 60, 74 vol.% と変えることで電磁波の 99% 以上を吸収するとされる $R.L. < -20$ dB を満たすマッチング周波数域も変化させることができ、本研究の目的周波数帯域に対応できた。

(2) アークプラズマ・デポジション (APD) 法によるモディファイド磁性微粒子の作製と電磁波吸収特性

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。図 3 に、CFO 粉末および Fe を蒸着した CFO/Fe 複合粉末の SEM 像を示す。図 3(a) より、CFO 粉末は微細な一次粒子が凝集して数百 nm 程度の二次粒子を形成している。一方、その CFO 粉末に APD 法にて Fe を約 22 wt% 蒸着した後の SEM 像 (図 3(b)) をみると、CFO 粉末とは粉末表面の形態が異なっていることが分かる。図 3(a), (b) の SEM 像を比較すると、数十 nm の Fe が CFO 粉末表面に蒸着されたことが分かる。上述(1)で述べた Fe+CFO 混合粉末に用いた Fe 粉末の平均粒径は数 μm オーダーであったことから、APD 法を用いることでそれより 1/100 以下の微細 Fe 粒子を蒸着でき、メカニカル混合よりも均一な複相組織の実現が可能であることが判明した。この CFO/Fe 複合粉末を用いた樹脂複合体の透磁率の周波数依存性を調べたところ、CFO/Fe 複合粉末では、図 4 のように CFO 単独粉末に比べ複素透磁率の虚部 μ_r'' の増大と周波数依存性のブロード化がみられた。さらに Fe の蒸着量に応じて共鳴周波数 f_r も変化させられることがわかり、モディファイド粉末の効果が得られたものと推察された。

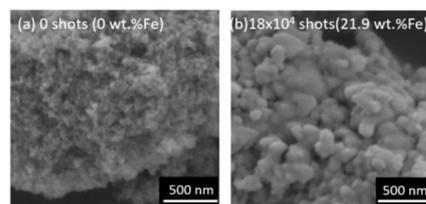


図 3 (a)CFO 粉末および(b)Fe を蒸着した CFO/Fe 複合粉末の SEM 像

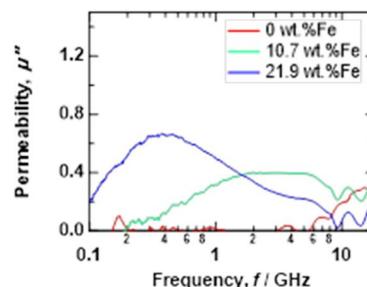


図 4 CFO/Fe 複合粉末を用いて作製した樹脂複合体の μ_r'' の周波数依存性

(3) Fe-Cr-Co 系合金を用いた電磁波吸収体の作製

ガスアトマイズ法で作製した Fe-Cr-Co 系合金粉末に対して多段階・連続冷却処理を施すことでスピノーダル分解を生じさせ、図 5 に示したように強磁性の FeCo リッチ (γ_1) 相が非磁性の Cr リッチ (γ_2) 相に囲まれた二相分離組織を持つ微粒子粉末を作製することができた。更に、多段階冷却処理で水冷する、または連続冷却処理の最終温度を変える、などの熱処理条件の変更によって、 γ_1 相と γ_2 相の両相の組成比率を変えることができ、磁気特性の異なる粉末を作製することができた。その両相の組成比が異なる粉末を用いた樹脂複合体の電磁波吸収特性を調査したところ、両相の組成比率を変えることによって適合する周波数を変化させられるチューナブルな電磁波吸収体になることが明らかとなった。この結果は、二相分離変態を示す合金において GHz 帯の電磁波吸収体になることを世界で初めて示したものであり、本研究における重要な成果の一つといえる。

この二相分離変態を示す Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いることで GHz 帯に対応できる電磁波吸収体を得られたが、さらに優れた電磁波吸収特性を獲得するためには透磁率を高める必要がある。そこで、Fe-Cr-Co 系合金の現有永久磁石の中では唯一冷間加工が可能であるという優れた特長の一つを用い、本組成合金粉末に対して塑性加工を施して粉末を扁平化することで、透磁率の増大を図った。

その結果、粉末自体が扁平となるだけでなく、内部の二相分離組織である α_1 相と α_2 相も扁平化し、マクロにもミクロにも形状に異方性をもった組織を有する微粒子粉末の作製ができた。この樹脂複合体の電磁波吸収とノイズ抑制効果を調査したところ、図 6 のように球状粉末(Sample C)に対してその後塑性加工によって扁平化した粉末(C-BM)を用いた方が、透磁率が顕著に増大した。さらに整合周波数 f_m と整合厚さ d_m の関係も調べたところ、図 7 に示したように f_m が高周波化し、 d_m も薄くなるのがわかった。以上より、Fe-Cr-Co 系合金粉末において熱処理による二相分離組織の制御に加え扁平化によって、目的周波数域において薄型で、かつ優れた電磁波吸収特性を有する電磁波吸収体を作製することが可能であり、さらにノイズ抑制シートに適用しても優れた伝送減衰率を示すことが明らかとなった。これらの成果を基に、東北大学と株式会社トーキンが共同で、5G 対応の新たな高性能電磁波吸収材料を開発し、既存の 5G 用ノイズ抑制シートよりも、電磁波吸収能が 1.5~2 倍、伝送減衰率も 2 倍と、高性能な電磁波吸収材料の開発に成功した。

(4) スパッタリング法による Fe-Cr-Co/Co スピネルからなるコア/シェル型モディファイド複合粒子の作製とその電磁波吸収・ノイズ抑制体の作製

上記研究成果(3)に示したように、Fe-Cr-Co 系合金粉末は優れた電磁波吸収体材料になりうるということが判明した。しかしながら、図 7 で示したように Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた電磁波吸収体では、3 GHz 以上の帯域では十分な電磁波吸収能が得られないという課題があった。これは Fe-Cr-Co 系合金の磁気異方性が十分でないためであると考えられた。そこで、Fe-Cr-Co 系合金の扁平粉末をコアとし、異方性磁界が大きな CoFe_2O_4 (CFO とする)粉末をコーティングした Fe-Cr-Co/CFO コアシェル粉末に着目した。その作製には粉末スパッタ法を用い、CFO を Fe-Cr-Co 系扁平粉末上にスパッタリングして所望のコアシェル粉末を得ることに成功した。このコアシェル粉末を用いた樹脂複合体の電磁波吸収特性とノイズ抑制効果を調べた結果、図 8 に示すように Fe-Cr-Co/CFO コアシェル磁性複合粉末を用いたノイズ抑制シートの電磁波吸収能を示す周波数は概ね 16 GHz と Fe-Cr-Co 系合金単独の扁平粉(C-BM(充填率 56vol.%))よりも高く、且つ $\omega \times \mu_r''$ (peak) の値も同シートと同程度の吸収能力を示していた。

また、Fe-Cr-Co/CFO コアシェル磁性複合粉末のノイズ抑制シートにおける伝送減衰率 ($P_{\text{loss}}/P_{\text{in}}$)も Fe-Cr-Co 系合金扁平粉末のみを用いた場合よりも 16~40 GHz の周波数帯域において良好な値を示した。さらに、 $(P_{\text{loss}}/P_{\text{in}})$ が極大となるピーク周波数は高周波側へ 7.4 GHz のシフトが見られた。以上より、本手法によって本研究の目的とした広帯域な電磁波吸収体及びノイズ抑制体の創製に成功したと言える。

(5) Fe/Fe₁₆N₂ 複合粒子を用いた電磁波吸収体の作製

HMPR 法で Fe ナノ粒子の作製には粉末の収率が低いことや凝集などの問題点から、市販の Fe_3O_4 ナノ粉

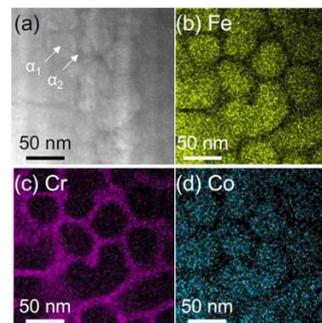


図 5 スピノーダル分解により FeCo-rich(α_1)相と Cr-rich(α_2)相の二相組織を有する Fe-Cr-Co 系合金粉末の(a) 断面 TEM 像、及び元素マッピング像(b) Fe, (c) Cr, (d) Co。

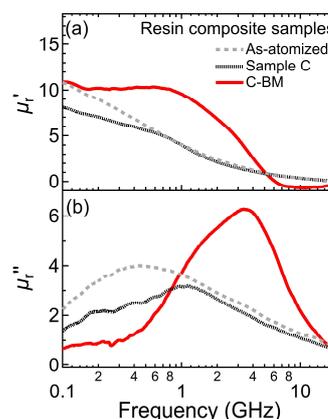


図 6 Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた樹脂複合体の透磁率の周波数依存性。原料粉末：As-atomized、最適熱処理した粉末：Sample C ならびに、それを扁平加工処理した粉末(C-BM)。

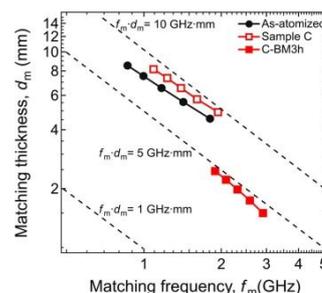


図 7 Fe-Cr-Co 系合金粉末を用いた樹脂複合体の整合周波数 f_m と整合厚さ d_m の特性。

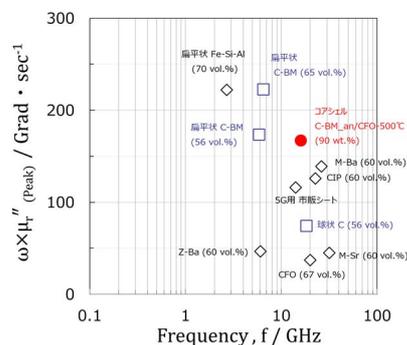


図 8 コア/シェル型 Fe-Cr-Co/CFO 複合粉末(赤丸で示す)の電磁波吸収能 $\omega \times \mu_r''$ (peak)。なお、他の材料からなるノイズ抑制シート及び 5G 市販シートの吸収能も併せて示した。

末を用い、それを水素還元して得られる Fe ナノ粉末を出発原料とし、それをアンモニアガス雰囲気下で部分窒化したところ、ソフト磁性の Fe 相とハード磁性の Fe₁₆N₂ 相からなる Fe/Fe₁₆N₂ 複合粒子の作製に成功した。また、この Fe/Fe₁₆N₂ 複合粒子を用いた電磁波吸収体における f_m と d_m の関係を調べた結果、図 9 に示すようにハード磁性相の Fe₁₆N₂ 相の割合を 43 wt.%, 61 wt.%, 63 wt.% と制御することで、2.4 ~ 5.7 GHz の帯域で薄型かつ整合関係が得られ、電磁波吸収体として機能可能と分かった。

(6) Fe/Fe-B 複合粒子を用いた電磁波吸収体の作製

Fe₃B 相は非平衡ながら本研究に適した異方性磁界を有する。そこで、Fe_xB_{100-x} 組成合金を用い、液体急冷法によってアモルファスな Fe-B 系急冷薄帯を作製し、さらにそれを熱処理することによって、ソフト磁性の Fe 相とセミハード磁性の Fe₃B 相を析出させたナノコンポジット・モディファイド粉末の作製を試みた。その結果、最適熱処理によって 50 nm 以下の Fe 相と Fe₃B 相からなる複相粉末が得られ、さらに同粉末を用いた樹脂複合体の高周波磁気特性を測定したところ、図 10 に示すように Fe_xB_{100-x} の Fe 分率 x の変化させることにより、ノイズ吸収の周波数帯も 0.7 ~ 5 GHz と広帯域をカバーできることが明らかになった。

(7) エアロゾルデポジション(AD)を用いたグラフェンと磁性粒子によるモディファイド複合粒子のノイズ抑制効果

AD 装置はエアロゾル化チャンパーと成膜チャンパーから構成され、成膜チャンパーは 50 ~ 1 kPa 前後に低圧され、原料であるドライな微粒子はエアロゾル化チャンパー内でガスと混合してエアロゾル化され、両チャンパーの圧力差で生じるガスの流れにより成膜チャンパーに搬送される。結果的に微粒子はスリット状のノズルから加速、噴射され、基板に衝突して厚膜が形成される。また、AD 法の成膜速度は通常のスパッタ法に比べて 2 桁以上高速であり、エアロゾルチャンパーならびにノズルをそれぞれ 2 つ用いることによって複合膜を高速で作製する試みを行った。

一方、本研究では複合粒子の原料の一つとして、軽量で面内方向へ高電気伝導性を有するグラフェンに注目した。このグラフェン粉と磁性カルボニル鉄粉(CIP)あるいは非磁性タングステン(W)粉の複合化粉を原料とし、AD 法による成膜を行った。

その結果、グラフェン単体では数百 μm の凹凸が生じて均質な成膜が困難であったのに対し、高比重の CIP あるいは W 粉との複合化によって、数 μm の膜厚まで均質な成膜が可能となった。グラフェンの AD 複合膜中における膜厚を変えてシート抵抗 R_S を変化させた場合のノイズ抑制効果を検討した結果、ミリ波帯では $R_S=20$ 付近で伝送減衰率 R_{tp} および (P_{loss}/P_{in}) が最大となり、市販の非磁性あるいは磁性 EMI 対策製品の 2 ~ 3 倍高い値 ($R_{tp} = 60$ dB) の特性を得ることができた。また、Sub 6 の 3.7 GHz 帯においても $R_S=4$ 付近で製品シートの 2 ~ 3 倍の (P_{loss}/P_{in}) 値を得ることができた。さらに、複数の EMI 対策製品シートと比較しても、代表的な 5G 帯域において十分優位な伝導性ノイズ抑制効果を示すことが確認された。この優れた電磁ノイズ抑制効果は、シート抵抗依存性のシミュレーション結果から、磁気損失に加えて電流損失も大きな支配的要因となっていることが予想された。

以上、上述研究成果 4 . (1) ~ (7) に記載した通り、本研究ではメカニカル混合、スピノーダル分解による二相分離変態やアモルファスからの微細結晶化、水素還元、粉末スパッタ法やアークプラズマ蒸着法 (APD) などのコーティング法、エアロゾルデポジション (AD) 法などの材料科学に基づくプロセス技術を駆使してデュアルフェースからなるモディファイド磁性微粒子の樹脂複合体を作製し、急成長する Early 5G の周波数帯域に適合した広帯域の電磁波吸収体を開発した。本研究で得られた成果は独創的かつ先駆的な研究成果と位置づけられるだけでなく、材料複合化によってマルチマテリアル化へと拡大する可能性をも示した研究である。

中でも Fe-Cr-Co 系合金のスピノーダル分解による二相分離変態の利用は、世界で初めての研究であり新たな材料開発の指針を示した。同時に、2020 年度から導入した AD 法を用いたグラフェンと磁性粉末からなる複合膜は、当初の計画では磁気損失のみで考えていた電磁波吸収特性の制御を電気抵抗でも可能であることを示すものであり、今後、磁気損失と導電損失の両方の制御によっても電磁波吸収特性の向上が可能であることを示唆し、材料設計手法の多様化にも貢献したものと見える。

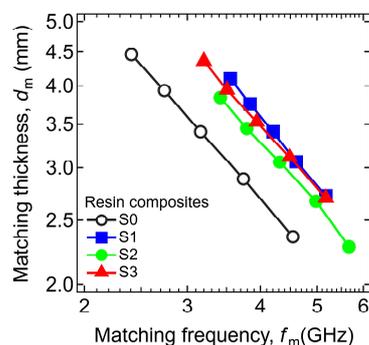


図 9 Fe/Fe₁₆N₂ 複合粒子を用いた樹脂複合体の f_m - d_m の関係 (S0: Fe ナノ粒子, S1-S3: Fe/Fe₁₆N₂ 複合粒子中 Fe₁₆N₂ がそれぞれ 43wt.%, 61wt.%, 63wt.%)

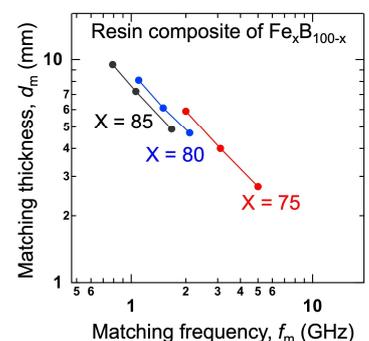


図 10 Fe/Fe₃B 複合粒子を用いた樹脂複合体の f_m - d_m の関係。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 阿加 賽見, 佐藤光晴, 松浦 昌志, 杉本 諭	4. 巻 MAG-23
2. 論文標題 Fe3O4ナノ粒子の還元・窒化によるFe-Fe16N2粉末の作製と電磁波吸収特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 171-21-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 石島 知樹, 佐藤 光晴, 阿加 賽見, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭	4. 巻 MAG-23
2. 論文標題 Fe-Cr-Co系伸長合金粉末の電磁波吸収特性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 172-25-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saijian Ajia, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Satoshi Sugimoto	4. 巻 INTERMAG
2. 論文標題 Microwave absorption properties of Fe/Fe16N2 nanoparticles prepared from iron oxide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/INTERMAG50591.2023.10265088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saijian Ajia, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Satoshi Sugimoto	4. 巻 INTERMAG Short Papers
2. 論文標題 Microwave absorption properties of Fe/Fe16N2 nanoparticles prepared from iron oxide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Magnetic Conference	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/INTERMAGShortPapers58606.2023.10228395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saijian Ajia, Hirotaka Asa, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Nobuki Tezuka, Satoshi Sugimoto	4. 巻 564
2. 論文標題 Enhancement of microwave absorption properties using spinodally decomposed Fe-Cr-Co flakes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 170200-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmmm.2022.170200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saijian Ajia, Hirotaka Asa, Yuichiro Toyoda, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Nobuki Tezuka, Satoshi Sugimoto	4. 巻 903
2. 論文標題 Development of an alternative approach for electromagnetic wave absorbers using Fe-Cr-Co alloy powders	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 163920-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2022.163920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 豊田 雄一郎, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 遠藤 恭, 杉本 諭	4. 巻 142
2. 論文標題 扁平Fe粉末を用いた樹脂複合体の透磁率とノイズ抑制特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌)	6. 最初と最後の頁 45-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.142.45	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 豊田 雄一郎, 松浦 昌志, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 手束 展規, 遠藤 恭, 杉本 諭	4. 巻 MAG-21
2. 論文標題 扁平Fe粉末 - 樹脂複合シートにおける透磁率とノイズ抑制特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料 (MAG-21-134 ~ 143), MAG-21-137	6. 最初と最後の頁 15-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 麻 博隆, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭	4. 巻 68
2. 論文標題 -Fe/Co _{0.5} Fe _{2.5} O ₄ 混合粉末-樹脂複合体における電磁波吸収特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 粉体および粉末冶金	6. 最初と最後の頁 347-355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2497/jjspm.68.347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 杉本 諭	4. 巻 67
2. 論文標題 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 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 粉体および粉末冶金	6. 最初と最後の頁 659-665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2497/jjspm.67.659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 豊田 雄一郎, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭	4. 巻 MAG-20
2. 論文標題 Fe粉末における扁平化と高周波磁気特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料 (MAG-20-062 ~ 063・065 ~ 072)	6. 最初と最後の頁 35-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 渡邊 雅人, 川上 祥広, 荒井 賢一, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 杉本 諭, 沖田 和彦, 藪上 信
2. 発表標題 5Gミリ波帯において高ノイズ抑制効果を有するグラフェン複合エアロゾン・デポジッション膜
3. 学会等名 日本金属学会2024年春期大会 (第174回講演大会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉本 諭
2. 発表標題 Fe-Cr-Co系磁石から考える磁性材料 - Nd-Fe-B系HDDR磁石と電磁波吸収体 -
3. 学会等名 電気学会 マグネティックス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松 浦 昌志, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe ₃ O ₄ ナノ粒子の還元・窒化によるFe-Fe ₁₆ N ₂ 粉末の作製と電磁波吸収特性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石島 知樹, 佐藤 光晴, 阿加 寛見, 松 浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe-Cr-Co系伸長合金粉末の電磁波吸収特性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Saijian Ajia, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Satoshi Sugimoto
2. 発表標題 Electromagnetic microwave absorption properties of Fe/Fe ₁₆ N ₂ nanoparticles from iron oxide
3. 学会等名 The 7th Symposium for CRC-GP-MSSP2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yamaguchi Masahiro, Miyazawa Yasunori, Sugimoto Satoshi, Ashida Sosuke, Watanabe Koh, Sakai Ryota, Uehara Hiraku, Nagata Makoto
2. 発表標題 Electromagnetic noise suppression of 26-30 GHz range harmonics from switching semiconductor chips using spinodally decomposed Fe-Cr-Co flake composite
3. 学会等名 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 光晴, 石島 知樹, 阿加 寛見, 松浦 昌志, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe-Cr-Co/Coスピネルフェライトからなるコアシェル構造粉末の作製とその樹脂複合体における高周波特性
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 2023年度秋季大会(第132回講演大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松浦 昌志, 宮崎 修平, 石田 岳, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe ₃ B-Fe複相粉末を用いた電磁波吸収体の作製
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期講演大会(第173回講演大会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 光晴, 杉本 諭, 松浦 昌志
2. 発表標題 不要電波の高分解能計測・解析技術を用いたノイズ抑制技術の研究開発「基盤集積化ノイズ抑制技術の研究開発」
3. 学会等名 電波資源拡大のための研究開発, 第16回成果報告会(WTP2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Saijian Ajia, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Satoshi Sugimoto
2. 発表標題 Microwave absorption properties of Fe/Fe16N2 nanoparticles prepared from iron oxide
3. 学会等名 2023 IEEE International Magnetic Conference (INTERMAG)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 光晴, 阿加 貴見, 松浦 昌志, 杉本 諭, 五十嵐 利行, 茶谷 健一, 池田 昌
2. 発表標題 スピノーダル分解したFe-Cr-Co系磁石合金による高性能電磁波吸収体の開発
3. 学会等名 日本金属学会2023年春期第172回講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤 光晴, 阿加 貴見, 松浦 昌志, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe-Cr-Co系合金粉末を用いた新たなノイズ抑制材料の開発
3. 学会等名 マイクロウェーブ展2022 (MWE2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Saijian Ajia, Hiroataka Asa, Mitsuharu Sato, Masashi Matsuura, Nobuki Tezuka, Satoshi Sugimoto
2. 発表標題 Fabrication of high-performance microwave absorbers and noise suppression sheets using spinodal decomposed Fe-Cr-Co flakes
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2022年度秋季大会 (第130回講演大会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本 諭
2. 発表標題 永久磁石材料の電磁波吸収体への応用
3. 学会等名 電気学会 マグネティックス/リニアドライブ合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿加 寶見，麻 博隆，豊田 雄一郎，佐藤 光晴，松浦 昌志，手束 展規，杉本 諭
2. 発表標題 Fe-Cr-Co系合金粉末を用いた新たな電磁波吸収体の開発
3. 学会等名 日本金属学会2022年春期大会（第170回講演大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田 雄一郎，松浦 昌志，阿加 寶見，佐藤 光晴，手束 展規，遠藤 恭，杉本 諭
2. 発表標題 扁平Fe粉末-樹脂複合シートにおける透磁率とノイズ抑制特性
3. 学会等名 電気学会 マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邉 雅人，佐藤 光晴，松浦 昌志，杉本 諭
2. 発表標題 グラフェン複合 AD 膜の作製と近傍界ノイズ抑制効果
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期大会（第169回講演大会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 麻 博隆, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 -Fe/Co0.5Fe2.5O4混合粉末-樹脂複合体における電磁波吸収特性
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 2020年度秋季大会 (第126回講演大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 光晴, 豊田 雄一朗, 阿加 寛見, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe系粉末-樹脂複合体の高周波特性と電磁ノイズ抑制効果
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会 2020年度秋季大会 (第126回講演大会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 豊田 雄一朗, 阿加 寛見, 佐藤 光晴, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 Fe粉末における扁平化と高周波磁気特性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桐澤 一輝, 松浦 昌志, 手束 展規, 杉本 諭
2. 発表標題 Co-Si-B系粉末における結晶化と電磁波吸収特性
3. 学会等名 日本金属学会 2020年春期第166回講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本 諭
2. 発表標題 永久磁石材料の高性能化・多機能化に関する研究
3. 学会等名 日本磁気学会 第43回学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本 諭
2. 発表標題 永久磁石材料の微細構造制御と高性能化に関する研究
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2019年度秋季大会（第124回講演大会）（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 電磁波吸収ならびに電磁ノイズ抑制材料	発明者 杉本 諭	権利者 国立大学法人東北大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/023045	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 グラフェン複合材料およびその製造方法	発明者 渡邊雅人、杉本 諭	権利者 公益財団法人電磁材料研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-085742	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電磁波吸収体およびノイズ抑制シートとその製造方法	発明者 杉本 諭、佐藤 光晴	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、63/542,297	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

麻くん 粉協秋大会 優秀講演発表賞受賞!!
<https://sugimotolab-material-tohoku.jp/2020/jspm-award2020/>

5G移動通信システム対応の電波吸収材料を開発 レアアースフリーFe系磁石合金で高性能化を実現
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2023/03/press20230301-01-5g.html>
 日本経済新聞：東北大とトーキン、5G移動通信システム対応の電磁波吸収材料を開発
https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP650214_Y3A220C2000000/
 日刊工業新聞：東北大、5G用電波吸収材を開発 伝送減衰率最大95%
<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/665104>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松浦 昌志 (Matsuura Masashi) (00633942)	東北大学・工学研究科・講師 (11301)	
研究分担者	渡邊 雅人 (Watanabe Masato) (40249975)	公益財団法人電磁材料研究所・その他部局等・研究員 (71301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関