

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：25503
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2023
課題番号：20K05103
研究課題名（和文）マイクロ波・ミリ波帯高機能電磁環境対策材の実現を目指した金属粒子複合材料の研究

研究課題名（英文）Study on metal particle composites aiming to realize high-performance electromagnetic environmental countermeasure materials in the microwave and millimeter wave bands

研究代表者
笠置 映寛（kasagi, teruhiro）
山陽小野田市立山口東京理科大学・共通教育センター・教授

研究者番号：10310947
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高機能電磁環境対策材の実現を目指し、粒子の形状効果を活用した金属粒子複合材料の開発を行い、次のことを明らかにした。

(1)アスペクト比の異なる2種類の針状FeCoナノ粒子を含む複合材料の透磁率は、粒子の混合比で制御可能。(2)AgコートCu粒子複合材料はパーコレーション濃度以上で負の誘電率を示し、負の誘電率が得られる周波数領域は粒子の形状に依存する。(3)AgコートCu粒子複合材料はパーコレーション濃度以上で金属的な反射透過特性を示す。(4)メタルメッシュをAgコートCu粒子複合材料で挟む積層材の反射透過特性の理論的検討から、複合材料の粒子濃度の調整により、フィルタ効果、シールド効果が得られる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属粒子複合材料の電磁気特性は、分散粒子の種類や濃度に加え、粒子の形状にも依存する。本研究の特徴は、金属粒子複合材料における分散粒子の形状効果を活用することにより、その高周波電磁気特性の制御を試みるものであり、金属粒子複合材料を活用した応用の広がりにも寄与するものと考えられる。また、近年、金属周期配列材によるEMC関連技術の開発が積極的に行われている。金属周期配列材では、金属の形状、サイズ、間隔等により特性を制御するが、本研究ではこれに金属粒子複合材料を組み合わせることで、より高度な特性制御について探った。得られた知見は、EMC関連技術における設計の自由度を高めることに寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We aimed to achieve high-performance electromagnetic environmental countermeasure materials and developed metal particle composites using the effects of particle shapes. We clarified the following:

The permeability of composite materials containing two types of acicular FeCo nanoparticles with different aspect ratios can be controlled by the mixing ratio of the particles. (2) Ag-coated Cu particle composites show negative permittivity above the percolation threshold, and the frequency range where negative permittivity is obtained depends on particle shape. (3) Ag-coated Cu particle composites exhibit metallic reflection-transmission characteristics above the percolation threshold. (4) Theoretical examination of the reflection-transmission properties of laminated materials sandwiching metal meshes with Ag-coated Cu particle composites shows that adjusting the particle content of the composite achieves filter and shielding effects.

研究分野：固体物理学

キーワード：粒子分散複合材料 異方的形状粒子 負の誘電率 負の透磁率 反射透過特性 EMC

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 情報・通信分野の発展に伴い、電気通信技術の高効率・高機能化が求められている。
- (2) 電気通信技術で使用される周波数がミリ波帯にまで広がる傾向にあり、電波吸収体や電磁遮蔽材といった電磁環境対策材もそれに対応する必要がある。
- (3) 近年、金属線配列材や金属環配列材等の人工材料が積極的に検討され、一部実用化されている。

2. 研究の目的

- (1) Ag コート Cu 粒子複合材料、及び針状 FeCo ナノ粒子複合材料の電磁気特性 (比誘電率・比透磁率) と電磁波反射・透過特性を明らかにする。
- (2) Ag コート Cu 粒子複合材料、針状 FeCo ナノ粒子複合材料の電磁気特性、電磁波反射・透過特性について、それらの粒子形状効果を明らかにし、特性の制御法を確立する。
- (3) 高機能電磁環境対策材 (広帯域電波吸収体、周波数選択性電磁遮蔽材) の実現を目指し、金属粒子複合材料 (Ag コート Cu 粒子複合材料、針状 FeCo ナノ粒子複合材料) と人工材料 (金属線配列材) とを積層化した材料の電磁波反射・透過特性の測定・解析から、所望の特性を実現するための知見を得る。

3. 研究の方法

- (1) Ag コート Cu 粒子 (球状、樹枝状、扁平状粒子)、及び針状 FeCo ナノ粒子 (長さ 100nm, 45nm) を含む複合材料を作製し、2 端子法により交流電気抵抗率、同軸線路法により比誘電率・比透磁率測定を行う。測定結果をもとに、複合材料の比誘電率・比透磁率における粒子濃度依存性、分散粒子の形状効果について解析する。
- (2) Ag コート Cu 粒子、及び針状 FeCo ナノ粒子を含む金属粒子複合材料シートを作製し、自由空間法により比誘電率・比透磁率測定、及び電磁波の反射・透過特性測定を行い、解析する。
- (3) 金属粒子複合材料シートと人工材料 (金属線配列材) との積層化により、広帯域電波吸収体、周波数選択性遮蔽材の構成を検討する。その反射・透過特性の測定、解析から、高機能電磁環境対策材の実現に必要な知見を得る。

4. 研究成果

- (1) 粒子の長手方向の長さ d_1 とそれに垂直な方向の長さ d_2 の平均値が、それぞれ $d_1=101$ nm, $d_2=21.5$ nm で、寸法比が $m = d_1/d_2 = 4.93$ の市販の針状 FeCo ナノ粒子 (図 1(a)) を含む複合材料の電磁気特性について検討を行い、以下の結果を得た。

針状 FeCo ナノ粒子複合材料の比透磁率 μ_r は、10 GHz 付近の比較的高い周波数領域でスピン共鳴による周波数分散を示す (図 1(b))。

分散粒子濃度の低下とともに、 μ_r は減少し、透磁率分散を示す周波数は高周波へシフトする。

針状 FeCo ナノ粒子複合材料の μ_r と粒子濃度との関係について、粒子形状効果を考慮したマクスウェル-ガーネット近似 (MGA) を用いて解析した結果、低粒子濃度の針状 FeCo ナノ粒子複合材料の μ_r は MGA により表すことができること (図 1(c))、針状 FeCo ナノ粒子複合材料の μ_r では、分散粒子内に誘起する反磁界の影響が大きく、それによって μ_r が抑えられ、スピン共鳴周波数が高まる傾向がある。

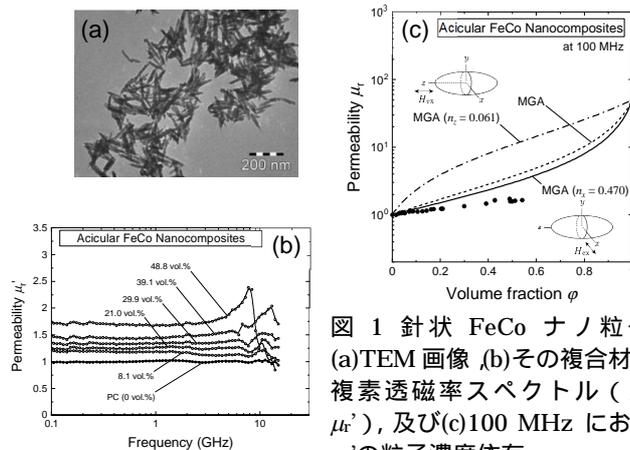


図 1 針状 FeCo ナノ粒子の (a)TEM 画像 (b)その複合材料の複素透磁率スペクトル (実部 μ_r')、及び(c)100 MHz における μ_r' の粒子濃度依存

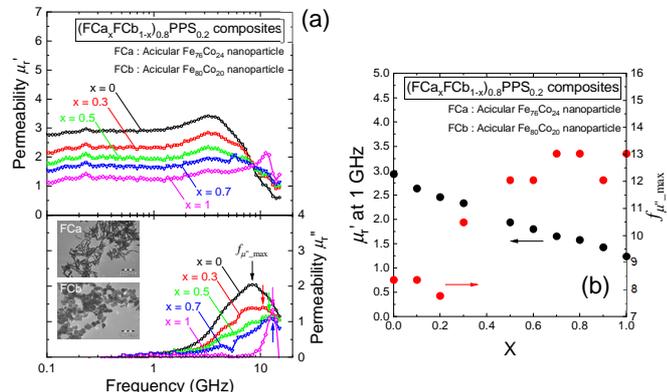


図 2 針状 FeCo ナノ粒子分散コンポジット $(FC_a x FC_{b1-x})_{0.8} PPS_{0.2}$ の (a)複素比透磁率、及び(b) μ_r' (1 GHz)、 $f_{\mu_r'_{max}}$ の FC_a 粒子濃度依存

(2) 金属磁性粒子複合材料の高周波透磁率の制御を目的に、アスペクト比 m の異なる 2 種類の針状 FeCo ナノ粒子 (針状 Fe₇₆Co₂₄ ナノ粒子 (長軸径 $d_z = 101.0$ nm, 短軸径 $d_x = 21.5$ nm, アスペクト比 $d_z/d_x = 4.9$, 以下 FCa), 及び針状 Fe₈₀Co₂₀ ナノ粒子 ($d_z = 41.6$ nm, $d_x = 25.5$ nm, $d_z/d_x = 1.6$, 以下 FCb)) を含む複合材料の複素比透磁率 (図 2(a)) について検討を行った。その結果, アスペクト比の大きい粒子 (FCa) の増加 (x の増加) に伴って低周波透磁率は減少し, 一方で, スピンの共鳴周波数は高くなった (図 2(b))。これらは, アスペクト比の大きい粒子 (FCa) の増加に伴って, 針状粒子内の反磁界の影響が大きくなることに起因する。

(3) Cu 粒子 (球状・扁平状・樹枝状 (それぞれ図 3(a), (b), (c))) 複合材料, 及び Ag コート Cu 粒子 (球状・扁平状・樹枝状) 複合材料を作製し, 導電率測定 (2 端子法), 比誘電率測定 (同軸線路法) を行い, これらの複合材料の電気特性, 比誘電率周波数分散特性について検討を行った。複合材料の電気特性について, 粒子形状が異方的なほど, 粒子同士の接触に伴う電気的パスが出現する粒子濃度 (パーコレーション濃度 ϕ_c) は低くなり (図 3(d)), 同じ粒子濃度でも粒子形状が異方的なほど導電性は高くなる傾向にあることが確認された。複合材料の比誘電率周波数分散特性について, ϕ_c 以上の複合材料において低周波プラズマ状態が実現し, 負の誘電率特性が観測された (図 3(e))。Drude モデルを用いた複素比誘電率スペクトルの解析から, プラズマ周波数は分散粒子の形状に依存し, 異方的なほど高周波側にシフトすることが明らかとなった。

Cu 粒子表面を Ag で被覆することで, パーコレーション濃度はより低くなり, 負の誘電率が得られる周波数領域はより高周波にまで広がることが分かった (図 4)。

(4) 針状 FeCo ナノ粒子, 扁平状 Cu 粒子, または扁平状 Ag コート Cu 粒子を含む複合材料シートを作成し, 反射・透過係数測定 (自由空間法) を行った。10 vol.% 以下の針状 FeCo ナノ粒子複合材料シート (厚み 1 mm) において, 10 GHz 以上でわずかな吸収が確認された (図 5)。扁平状 Ag コート Cu 粒子複合材料シート (厚み 1 mm) について, パーコレーション濃度 $\phi_c (=0.03)$ 以下の複合材料では, 粒子濃度の増加に伴って, 反射係数の絶対値 $|\Gamma|$ は増加, 透過係数の絶対値 $|T|$ は減少する傾向を示し (図 6(b)), ϕ_c を超える濃度の複合材料では, $|\Gamma|=1$, $|T|=0$ に近い値を示した (図 6(b))。扁平状 Ag コート Cu 粒子複合材料の $|\Gamma|$, $|T|$ の測定値 (黒丸) は, 伝送理論に基づく計算値の傾向とよく一致している。

扁平状 Cu 粒子複合材料シート (厚み 1 mm) の反射係数の絶対値 $|\Gamma|$, 及び透過係数の絶対値 $|T|$ の伝送理論に基づく計算値について, 3 vol.% 複合材料 ($< \phi_c$) では, 周波数の増加に伴い, $|\Gamma|$ は増加, $|T|$ は減少する傾向を示した (図 7(a))。10 vol.% 複合材料 ($> \phi_c$) については, $|\Gamma|$ は 1 に近い値, $|T|$ は 0 に近い値となった (図 7(b))。また, 特性周波数 f_0 の近傍で, $|\Gamma|$ は最小

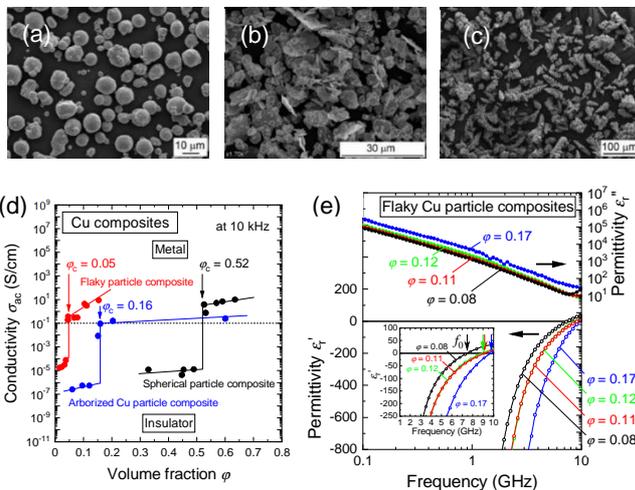


図 3 Cu 粒子 (球状・扁平状・樹枝状 (それぞれ (a), (b), (c))) の SEM 画像, (d) Cu 粒子複合材料の導電率 σ_{ac} (10 kHz), 及び (e) 扁平状 Cu 粒子複合材料の複素誘電率スペクトル

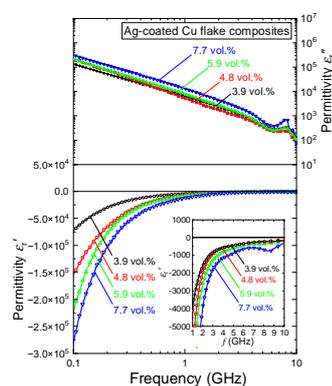


図 4 扁平状 Ag コート Cu 粒子複合材料の複素誘電率スペクトル

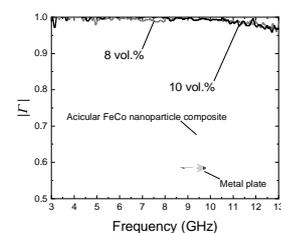


図 5 針状 FeCo ナノ粒子複合材料の反射特性

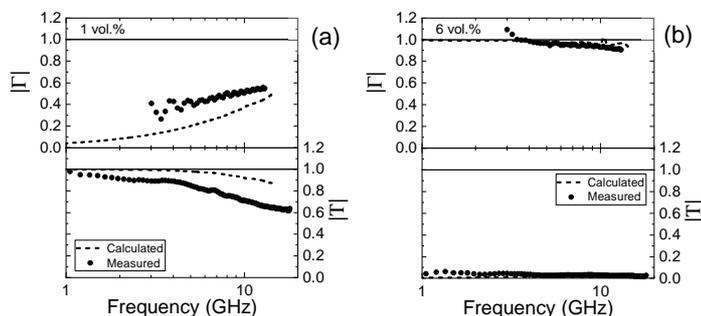


図 6 扁平状 Ag コート Cu 粒子複合材料の反射係数と透過係数 ((a) 1 vol.%, (b) 6 vol.%)

値, $|T|$ は最大値を示している。これは扁平状 Cu 粒子複合材料の比誘電率, 比透磁率について, f_0 近傍で $\epsilon_r' \approx \mu_r'$ となることに起因すると考えられる。一方で, 扁平状 Cu 粒子複合材料の $|\Gamma|$, $|T|$ の測定値 (黒丸) については, $|\Gamma|$, $|T|$ の計算値から乖離する傾向がある。これは, 扁平状 Cu 粒子表面の酸化が原因として考えられる。

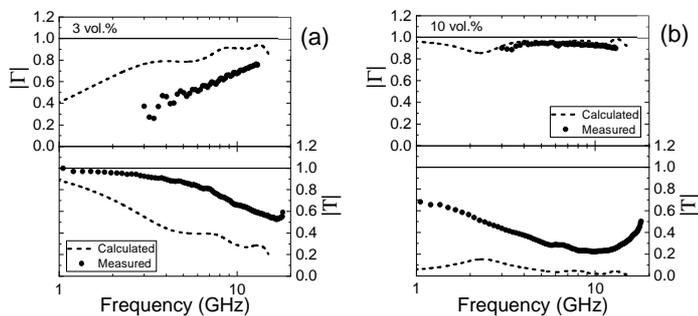


図 7 扁平状 Cu 粒子複合材料の反射係数と透過係数 ((a) 3 vol.%, (b) 10 vol.%)

(5) メタルメッシュを Ag コート Cu 粒子複合材料で挟む積層材の反射・透過特性について, 伝送線路理論に基づく計算により検討した。

複合材料の粒子濃度を制御することにより, パーコレーション濃度未満では吸収, 及びフィルタ効果が, パーコレーション濃度以上ではシールド効果が得られることがわかった。

厚み 1 mm のメタルメッシュ (図 8 (a)) を 2 枚の Ag コート Cu 粒子複合材料シート (入射側: 2 vol.% (厚み 1 mm), 透過側: 3 vol.% (厚み 1 mm)) で挟み, メタルメッシュと複合材料シート間に 2 mm の空気層を設けた積層材 (図 8 (b)) の反射・透過特性について検討を行った。6 GHz 付近で反射係数の絶対値 $|\Gamma|$ が最小, 透過係数の絶対値 $|T|$ が最大を示す特性が得られた。また, メタルメッシュの格子間隔効果として, 格子間隔 a が広がるのに伴い特性が高周波側へシフトすることが明らかとなった。

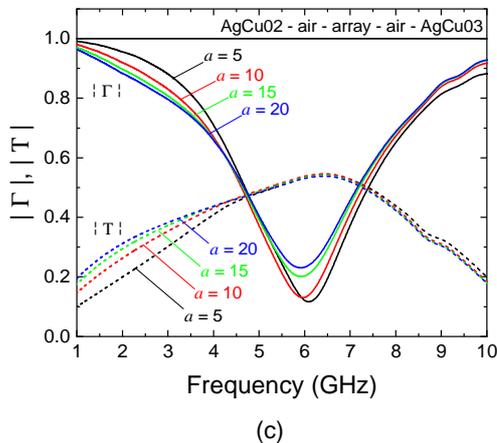
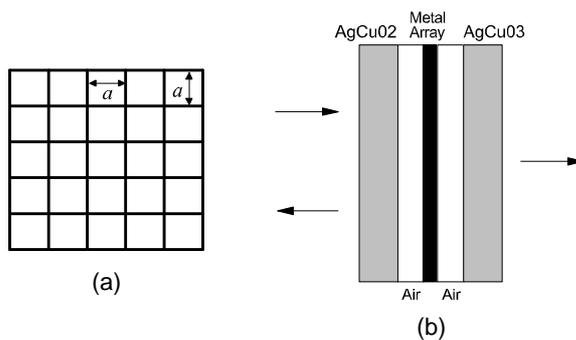


図 8 (a)メタルメッシュと(b)積層材の概略図, 及び(c)積層材の反射・透過特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 笠置 映寛, 合田 和矢, 山本 真一郎	4. 巻 6
2. 論文標題 異方的形状金属粒子を含む複合材料の電波反射・透過特性評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 67-72
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 Kasagi Teruhiro, Yamamoto Shinichiro	4. 巻 33
2. 論文標題 Effect of particle shape on electrical conductivity and negative permittivity spectra of Cu granular composite materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science: Materials in Electronics	6. 最初と最後の頁 4974 ~ 4983
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10854-021-07686-5	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 笠置 映寛, 合田 和矢, 山本 真一郎	4. 巻 4
2. 論文標題 針状FeCoナノ粒子分散複合材料の高周波透磁率	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 47-52
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 笠置 映寛, 合田 和矢, 山本 真一郎	4. 巻 7
2. 論文標題 扁平状金属粒子を含む複合材料の反射・透過特性	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 59-65
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 Teruhiro Kasagi, Kazuya Goda, and Shinichiro Yamamoto	4. 巻 WedAM2A
2. 論文標題 Effect of Particle Shape on Complex Permittivity Spectra of Percolated Ag-Coated Cu Composites	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of EMC Japan/APEMC Okinawa	6. 最初と最後の頁 287
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 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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 笠置映寛, 合田和矢, 山本真一郎
2. 発表標題 異方性FeCoナノ粒子分散コンポジットの高周波透磁率
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 笠置映寛, 合田和矢, 山本真一郎
2. 発表標題 異方性FeCoナノ粒子分散コンポジットの高周波透磁率
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笠置映寛, 合田和矢, 山本真一郎
2. 発表標題 異方性粒子を含む金属磁性粒子分散複合材料の高周波電磁気特性
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠置映寛, 山本真一郎
2. 発表標題 異方性粒子を含む金属磁性粒子分散複合材料の高周波電磁気特性
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 笠置 映寛, 合田 和矢, 山本 真一郎
2. 発表標題 針状金属磁性ナノ粒子分散コンポジットの高周波透磁率
3. 学会等名 日本物理学会 2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teruhiro Kasagi, Kazuya Goda, and Shinichiro Yamamoto
2. 発表標題 Effect of Particle Shape on Complex Permittivity Spectra of Percolated Ag-Coated Cu Composites
3. 学会等名 EMC Japan/APEMC Okinawa (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	山本 真一郎	兵庫県立大学・工学研究科・准教授	
	(Yamamoto Shinichiro)		
	(10514391)	(24506)	

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
---------	---------