

令和元年6月19日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06758

研究課題名(和文) 針状金属ナノ粒子と樹脂を複合化した左手系複合材料の開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of the left-handed composite materials containing the acicular metal nanoparticles

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・准教授

研究者番号：10310947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：左手系特性(負の透磁率と負の透電率)を有する複合材料の実現を目的として、針状金属粒子複合材料の電磁気特性について検討を行った。

針状FeCoナノ粒子複合材料において、スピン共鳴による負の透磁率が10GHz以上で得られた。偏平状Cu粒子複合材料では、マイクロ波領域において、比較的低濃度で負の誘電率が得られた。偏平状FeCo粒子と偏平状Cu粒子を同時に含む複合材料において、マイクロ波領域で左手系特性を実現可能であることが明らかとなった。針状FeCoナノ粒子複合材料を用いた単層型電波吸収体について、4～15GHzの領域(厚み約1～5mm)で反射係数が0.1以下となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マイクロ波領域における左手系特性は、主に金属素子の周期構造体により実現される。本研究の特徴は、負の透磁率・誘電率特性を、周期構造を必要としない粒子分散複合材料により実現することであり、これらの特性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。

近年、ミリ波等、より高周波に対応するために、負の透磁率・誘電率特性を活用したEMC技術の開発が行われている。針状FeCoナノ粒子複合材料は、10GHz以上で負の透磁率を示し、それは粒子の形状とサイズに起因することが分かった。負の誘電率も金属粒子の形状の制御により特性の高周波化が可能である。これらの知見は、EMC技術の高周波化に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The electromagnetic properties of the granular composites containing the acicular metal nanoparticles were investigated in order to realize the left-handed medium showing simultaneously negative permeability and negative permittivity.

In the acicular FeCo nanoparticle composites, the negative permeability spectrum caused by the spin resonance was observed above 10 GHz. In the flaky Cu particle composites, the low frequency plasmonic state was realized by the electrical percolation of dispersed Cu particles; the negative permittivity was obtained below the characteristic frequency. We found that the left-handed property can be realized in the microwave region by the hybrid composites containing flaky FeCo particles and flaky Cu ones.

The single-layer EM-absorber using the acicular FeCo nanoparticle composites was investigated. The acicular FeCo nanocomposites show the microwave absorption characteristics in the frequency range of 4 to 15 GHz with the thickness of about 1 to 5 mm.

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 ナノ粒子 負の誘電率 負の透磁率 左手系 EMC

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (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) 透磁率と誘電率が同時に負となる特性(左手系特性)を示す媒質では、自然界には見られない特異な電磁波伝搬現象が観測され、このような左手系特性の実現を目的に、金属素子の周期配列体等の人工的材料(左手系メタマテリアル)の開発が行われている。そして、左手系メタマテリアルによる電気通信技術の高効率・高機能化に向けた検討が行われている。
- (3) 周期構造を必要としない左手系特性を示す固体材料の研究も活発に行われている。

2. 研究の目的

- (1) 粒子分散複合材料について、分散させた磁性体の磁気共鳴による負の透磁率、及び金属粒子鎖を起源とする低周波プラズマ振動により実現される負の誘電率について、実験的・理論的解析を行う。
- (2) 透磁率と誘電率が同時に負を示す左手系特性を、針状金属ナノ粒子(異方的形状粒子)と樹脂を複合化した針状金属ナノ粒子複合材料(固体材料)により実現する。
- (3) 負の透磁率と負の誘電率を粒子分散複合材料により組み合わせることで実現される左手系電磁気特性の制御手法について検討を行う。
- (4) 針状金属ナノ粒子複合材料の応用として、超小型マイクロ波アンテナ、高機能電磁遮蔽材料の実現に向けた基礎的検討を行う。

3. 研究の方法

- (1) 針状金属ナノ粒子(異方的形状粒子)を含む複合材料を合成し、針状金属ナノ粒子の物性、粒子濃度及び粒子形状(異方性磁界)と透磁率周波数分散特性との関係を明らかにする。
- (2) 針状金属ナノ粒子、及び異方的形状粒子を含む複合材料を合成し、磁気共鳴による負の透磁率スペクトル、及び低周波プラズマ振動に伴う負の誘電率スペクトルについて実験的・理論的検討を行う。
- (3) 針状金属ナノ粒子、及び異方的形状粒子を含む左手系複合材料を合成し、粒子分散複合材料によるDNG特性の発現機構、及びその制御手法について検討する。
- (4) 電気通信技術への応用を視野に、左手系複合材料による空間インピーダンス、屈折率の検討を行い、左手系複合材料の応用として、超小型マイクロ波アンテナ、高機能電波吸収・シールド材料等への適用可能性について探る。

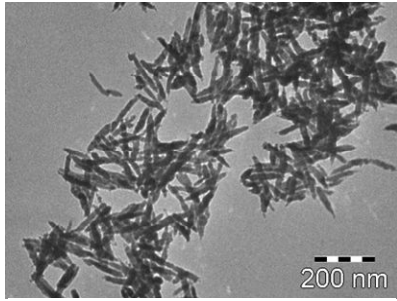
4. 研究成果

- (1) 長さ約100 nm、直径約20 nmの市販の針状 $\text{Fe}_{70}\text{Co}_{24}$ ナノ粒子(図1(a))を含む粒子分散複合材料(図1(b))を合成し、その電磁気特性について検討を行い、以下の結果を得た。

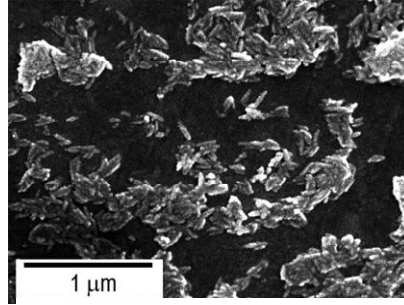
粒子濃度70 vol.%で分散粒子同士の接触に伴う導電率の急激な増加が見られたが、70 vol.%以上の複合材料の導電率は比較的低い(粒子表面の酸化による)。

負の誘電率スペクトルは観測されなかった。粒子表面の酸化に起因すると考えられる。

低周波透磁率は非常に小さいが、GHz領域まで渦電流による影響を受けることなく透磁率を保持し、高濃度複合材料において、10 GHz以上で負の透磁率スペクトルが観測された(図2)。



(a)



(b)

図1 針状 FeCo ナノ粒子の TEM 画像(a)と針状 FeCo ナノ粒子分散複合材料 (42 vol.%) の SEM 画像(b)

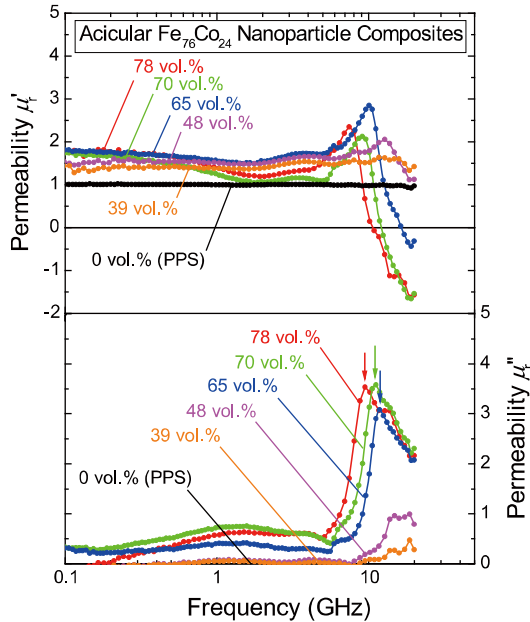


図2 針状 FeCo ナノ粒子複合材料の複素透磁率スペクトル

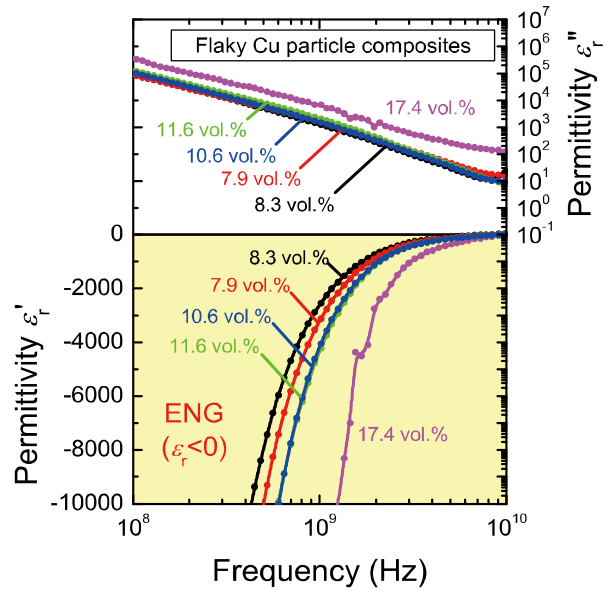


図3 偏平状 Cu 粒子複合材料の複素誘電率スペクトル

FeCo粒子表面の酸化膜, 及びスキンドープより小さい粒子サイズにより, 渦電流による影響を受けずに透磁率を保持できることが明らかとなった。

- (2) 磁壁共鳴とスピン共鳴の重ね合わせからなる透磁率分散式を用いて, 針状FeCoナノ粒子複合材料の透磁率スペクトルについて解析を行った。

針状FeCoナノ粒子複合材料の透磁率スペクトルは, 磁壁とスピン運動の重ね合わせにより定性的に表すことができる。

透磁率の周波数分散は, スピンの寄与が大きく, スピン共鳴により負の透磁率が得られる。

スピン共鳴における減衰定数は比較的小さく, 粒子の形状異方性, ナノ粒子間の磁氣的相互作用が寄与している可能性がある。

以上のように, 針状FeCoナノ粒子複合材料の透磁率においてはスピンの寄与が大きく, 形状異方性, 及び粒子間相互作用の効果により透磁率スペクトルは共鳴型周波数分散を示し, 10 GHz以上で負の値を示すことが明らかとなった。

- (3) 偏平状Cu粒子を含む複合材料を合成し, その電磁気特性について検討を行った。

粒子濃度4 vol.%で粒子同士の接触(パーコレート)に伴う導電率の急激な増加が見られ, このパーコレーション濃度以上で導電率は0.1 S/cm以上の値を示した。(金属的電気特性の発

現)

粒子濃度8 vol.%以上において、特性周波数(数GHz)以下で負の誘電率が観測された(図3)。

複合材料の導電性は、粒子濃度だけでなく、粒子の形状にも依存し、形状が異方的になるほど導電性が高まることが明らかとなった。

粒子濃度に加え、分散金属粒子の形状により複合材料の導電性を制御することができ、金属粒子濃度がパーコレーション濃度以上、導電率が0.1 S/cm以上において、負の誘電率特性が得られることが分かった。

- (4) 針状FeCoナノ粒子/偏平状Cu粒子ハイブリッド複合材料を合成し、その電磁気特性について検討を行った。FeCoナノ粒子が負の透磁率を示す周波数領域と、Cu粒子が負の誘電率を示す周波数領域が重ならないために、負の透磁率・誘電率特性(DNG特性)は観測されなかった。負の誘電率を担う金属粒子の形状を制御することにより、負の誘電率が得られる特性周波数を高周波にシフトさせることで負の透磁率・誘電率特性を実現できると考えられる。

- (5) 偏平状FeCo粒子/偏平状Cu粒子ハイブリッド複合材料($(\text{Cu}_x\text{FeCo}_{1-x})_{0.65}\text{PPS}_{0.35}$ PPS:樹脂)を合成し、その電磁気特性について検討を行った。

$x = 0.16$ から 0.22 のハイブリッド複合材料において、負の透磁率スペクトルが80 MHzから2.8 GHzの周波数領域で観測された。

$x = 0.12$ 以上のハイブリッド複合材料において、負の誘電率スペクトルが観測された。

負の誘電率が得られる周波数(特性周波数)は、Cu粒子の増加(導電率の増加)に伴い高周波へシフトすることが明らかとなった。

DNG特性が、78 MHzから2.4 GHzの周波数領域で観測された(図4)。

以上のように、偏平状粒子を含む磁性/金属粒子ハイブリッド複合材料によりDNG特性を実現することができる。DNG特性を示す周波数領域は、球状粒子を含むハイブリッド複合材料に比べ広帯域化することが明らかとなった。これは、粒子の形状効果に起因する。

- (6) 針状FeCoナノ粒子複合材料を用いた単層型電波吸収体の吸収特性について検討を行った。

65 vol.%複合材料の場合、約4~10 GHzの周波数領域で吸収特性を示し、1~4 mm程度の厚みに調整することで

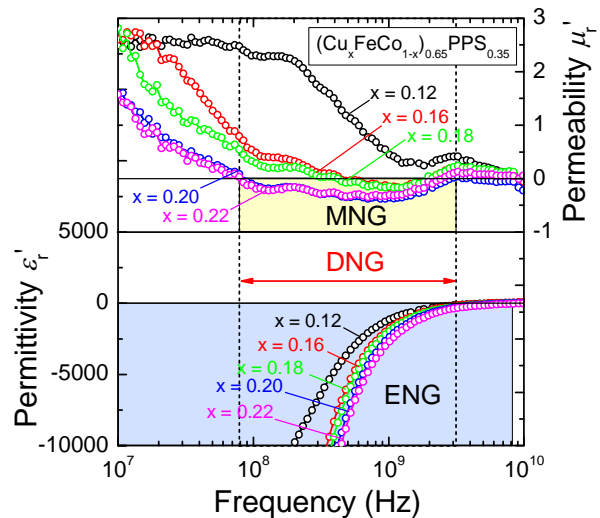


図4 偏平状 FeCo ナノ粒子/偏平状 Cu 粒子ハイブリッド複合材料の透磁率・誘電率スペクトル

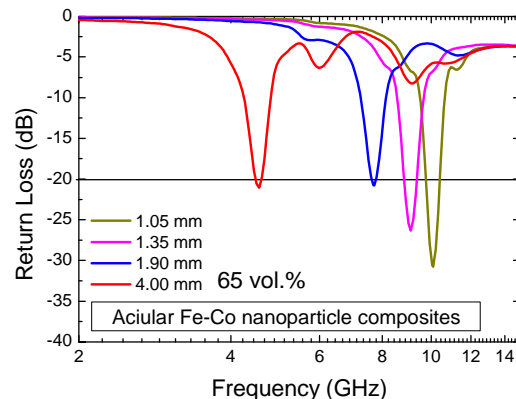


図5 針状 FeCo ナノ粒子分散複合材料を用いた単層型電波吸収体の電波吸収特性

反射係数が0.1以下（吸収量が20 dB以上）となった。

整合周波数は、粒子濃度の低下に伴って高周波側へシフトする傾向にある。

以上のように、針状FeCoナノ粒子複合材料は、GHz領域で比較的薄い電波吸収体を構成できる可能性があることが明らかとなった。また、粒子濃度、粒子配向方向の制御により10GHz以上で電波吸収体として利用できる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

T. Kasagi, K. Kono, T. Tsutaoka, S. Yamamoto, Analysis of Permeability Spectra of Acicular Fe-Co Nanoparticle Composite Materials, 査読有, Proceedings of EMC Sapporo & APEMC 2019, pp.11-14.

http://www.ieice.org/~emc2019/technical_program.html

T. Kasagi, K. Kono, T. Tsutaoka, S. Yamamoto, Electromagnetic Properties of Fe₅₀Co₅₀/Cu Granular Composite Materials Containing Flaky Particles, IEEE Trans. Magn., 査読有, vol. 55, 2018, pp.1-4.

DOI:10.1109/TMAG.2018.2869581

T. Kasagi, H. Massango, T. Tsutaoka, S. Yamamoto, K. Hatakeyama, Electromagnetic properties of Fe-Co granular composite materials containing acicular nanoparticles, Mater. Res. Exp., 査読有, vol. 5, 2018, pp. 036107-1 - 036107-12.

DOI:10.1088/2053-1591/aab4de

〔学会発表〕(計14件)

笠置映寛, 針状FeCoナノ粒子分散コンポジットの複素透磁率スペクトル, 日本物理学会第74回年次大会, 2019.

笠置映寛, 扁平状FeCo/Cu複合粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性, 日本物理学会2018年秋季大会, 2018.

笠置映寛, 針状FeCoナノ粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017.

T. Kasagi, Electromagnetic properties of acicular Fe-Co nanoparticle composite materials, 9th international conference on materials for advanced technology, 2017.

笠置映寛, 針状FeCoナノ粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性, 日本物理学会2016年秋季大会, 2016.

〔図書〕(計1件)

笠置映寛, シーエムシー出版, 機能材料(EMC設計/ノイズ対策技術・材料), 2018, pp.50-58.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 蔦岡 孝則

ローマ字氏名： Takanori Tsutaoka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。