

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2012

課題番号：21360340

研究課題名（和文）次世代 EMC 及び高機能アンテナの実現を目指した左手系複合材料の研究

研究課題名（英文）Investigations of the Left-Handed Composite Materials for the Next Generation EMC and Highly Functional Antenna

研究代表者

蔦岡 孝則 (TSUTAOKA TAKANORI)

広島大学・大学院教育学研究科・教授

研究者番号：10231432

研究成果の概要（和文）：次世代電磁環境保全技術(EMC)、及び高機能小型マイクロ波アンテナの実現を目指して、マイクロ波領域で負の透磁率(MNG)と負の誘電率(ENG)を有する左手系メタマテリアルの基礎的研究と、電波吸収体、電磁遮蔽材料への応用及びマイクロ波アンテナの小型に関する応用研究を推進した。マイクロ波領域に MNG 特性、及び ENG 特性を有する磁性微粒子複合材料、を有する複合 Cu 粒子分散複合材料を開発した。応用研究では、金属線配列材料を用いたマイクロ波用広帯域電波吸収体及び周波数選択遮蔽シートを開発し、さらに、MNG メタマテリアルを用いた空間整合により、パッチアンテナの共振周波数を低下させることが可能であることを実証した。

研究成果の概要（英文）：Aiming at the next generation EMC and highly functional antenna, the left-handed metamaterials having the negative permeability (MNG) and permittivity (ENG) in the microwave range have been investigated, and the application research for the electromagnetic wave absorber, shielding materials and the low frequency matching of microwave antennas have been conducted. The granular composites having the MNG and the ENG property were developed. For the EMC applications, a thin wideband electromagnetic wave absorber and frequency selective shielding sheets have been developed. Further, we have demonstrated that the matching frequency of a patch antenna can be reduced by the space matching effect of the MNG property of magnetic metamaterials.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能材料

キーワード：左手系材料、EMC・アンテナ材料

## 1. 研究開始当初の背景

近年、電磁波技術には高効率かつ低損失な信号伝送や電磁波放射を実現する高度な要求が増えている。アンテナの分野では小型軽

量、高感度、高帯域特性をもつ新しいアンテナが求められているが、小型になるほど低効率、狭帯域になるという問題がありマルチバンド化が困難である。また、安定した電磁環

境の確保や電子機器の電磁波特性の測定用には高度な EMC 技術が要求され、電波吸収体や電磁遮蔽材料の高機能化、軽量化、薄層化などが課題となっている。

これら課題に対するブレークスルーとして、伝送線路や金属繊維複合構造体等の人工材料において等価的に透磁率、誘電率が負になる特性(DNG: Double Negative)を用いた左手系材料(メタマテリアル)が注目されている。通常の物質は透磁率、誘電率が正であり、電磁波はこの媒質中を伝搬する。一方、たとえば金属や電離層に見られるように、透磁率は正であるが、特定の周波数以下で負の誘電特性を持つ媒質では、特性周波数以下の電磁波は伝搬できない。しかし、誘電率と同時に透磁率も負となる媒質中では電磁波が伝搬可能で、しかも伝搬特性が通常の物理現象を記述する右手系に対して鏡面对称性を持った左手系で記述される。このような媒質では、負の屈折率や負のインピーダンスなど特徴的な現象が見られ、それらを利用した新しいデバイスとして、マイクロ波レンズや負のインピーダンスを用いた超広帯域アンテナ、インピーダンス変換器などが実現できる可能性があり、近年、伝送線路を利用した左手系材料について、多くの研究がなされアンテナ等への応用も行われている。

フェライトや金属磁性体におけるスピン磁気モーメントの共鳴現象を用いて、マイクロ波領域で負の透磁率スペクトルが得られることが知られている。磁気共鳴現象は物質固有の特性であるため、小さな材料で、等方的な負の透磁率特性を得ることができる。一方、負の誘電率については、金属繊維の電場共振現象を利用して、金属繊維を規則配列させた2次元複合構造において磁気共鳴と同様な共鳴型誘電率スペクトルが観測され、負の誘電率が実現できる。しかしながら、磁性材料のゼロ磁場共鳴における負の透磁率スペクトル発現機構、及び金属繊維複合構造体における負の誘電率スペクトルと複合構造の関係には明かでない部分が多く、材料設計手法も確立されているとは言い難い。

微粒子強磁性体の磁気共鳴を支配する磁気的相互作用や磁気異方性においては、一般に超常磁性を示すナノスケール粒子は磁気異方性が小さいと考えられているが、100 nm程度の強磁性体では、表面効果による格子の収縮が磁気異方性の増強をもたらすと報告があり、ナノ粒子においてソフト磁性体が大きな磁気異方性を持つ可能性がある。また、強誘電体に静電場や応力を加えることにより、マイクロ波領域における緩和型誘電分散が共鳴型になることが報告されており、これらのことは、マイクロ波領域の強磁性共鳴を鋭くして大きな負の透磁率スペクトルを持つ磁性複合材料や、強誘電体のピエゾ効果、

分極壁共鳴などを用いた負の誘電率実現の可能性を示唆している。

以上のことから、マイクロ波領域で負の透磁率と誘電率を実現する左手系機能材料を実現するためには、磁性体、誘電体、及び金属材料とそれらの微粒子を用いた粒子分散型複合材料、及び金属線配列人工材料の高周波電磁気特性を詳細に研究する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、強磁性体、強誘電体の微粒子合成とそれらを用いた磁性・誘電複合材料に関する詳細な物性研究、及び金属繊維構造体を用いた非線形誘電率スペクトルの制御と構造体設計手法に関する研究により、負の透磁率、誘電率スペクトルを有する左手系複合材料に関する基礎的検討を行い、それらを元に次世代 EMC 技術及び高機能マイクロ波アンテナ技術への応用を目指して、電波吸収体・電磁遮蔽材などの EMC 材料、及び超小型・広帯域アンテナ材料の開発を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究は、磁性体、誘電体、金属とそれらの複合材料、及び金属繊維構造体を用いた左手系材料の基礎物性研究と、これらを用いた電波吸収体、電磁遮蔽材等の EMC 材料、マイクロ波アンテナ材料の応用研究に大別される。材料特性である負の透磁率、誘電率は MNG、ENG 等と略記する。図1に研究全体の構成を示す。基礎的研究では、フェライト系磁性体粒子の合成、金属粒子、金属繊維人工誘電体の材料調整とそれらを利用した左手系複合材料のマイクロ波透磁率・誘電率スペクトルを詳細に検討する。応用研究では、EMC 材料として電波吸収体、及び電磁遮蔽材料の高機能化について検討し、マイクロ波アンテナへの応用については、小型アンテナの構成、理論解析を行い、MNG 材料を用いた空間マッチ

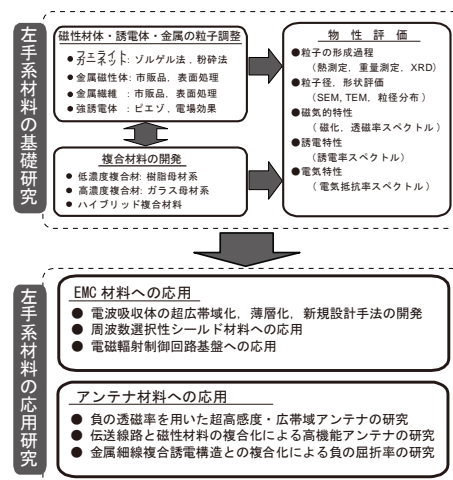


図1. 研究方法の概略図

ング効果による小型アンテナの実現可能性を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 負の透磁率・誘電率を持つ粒子分散型複合材料の開発

- ・フェライト系，金属系磁性体の微粒子を合成するための基礎的検討として，銀カルボニル等の熱分解挙動について検討し，分解メカニズムを解明した。
- ・サブミクロン Ni 複合材料の透磁率スペクトルに対する外部磁場の効果について検討した。その結果，Ni スピンの強磁性共鳴により，マイクロ波領域（2～15 GHz）において磁場下で負の透磁率が增強されることを見いだした。また，YIG（イットリウム鉄ガーネット）複合材料のマイクロ波透磁率について検討し，1 kOe 程度の外部磁場下において数 GHz に負の透磁率が得られることを示した。本材料では，磁場の大きさを変えることにより負の透磁率領域を制御できる（図 2）。

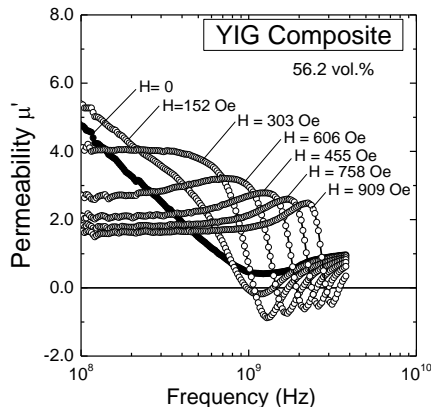


図 2. YIG 複合材料の透磁率スペクトル

- ・バリウムフェライト  $\text{BaFe}_{1-x}(\text{Ti}_{0.5}\text{Co}_{0.5})_x\text{O}_{19}$  の高周波透磁率について検討し，Fe の置換量  $x$  を増加させると  $x = 3$  付近で低周波領域の比透磁率が最大をとりその後低下すること，および置換によりスピン共鳴周波数は数 GHz にまで低下するが，波透磁率スペクトルにおけるスピン共鳴の寄与は小さく，磁壁共鳴が大きく寄与していることを明らかにした。そして  $x = 3$  の置換型バリウムフェライトにおいて，10 GHz 付近に負の透磁率が出現することを見いだした。

- ・負の透磁率を有する置換型 Ba フェライト粒子を用いた粒子分散型複合材料におけるマイクロ波透磁率の周波数分散特性を粒子分散系の混合則理論を用いて解析し，Maxwell-garnet 近似，Coherent Model 近似を用いて，透磁率の周波数分散パラメータを分散材である Ba フェライトのパラメータから理論的に予測可能であることを示した。本研究は，左手系材料を含む複合材料の材料設計において有用な知見を与える。

- ・樹状結合した銅粒子を分散材とした Cu 複合材料の高周波誘電特性について検討し，電気伝導におけるパーコレーション領域で，金属線配列構造体と同様な低周波プラズマ状態が実現できることを見いだした（図 3）。この結果は，マイクロ波領域に負の誘電率特性を有する固体材料が実現できる可能性を示している。

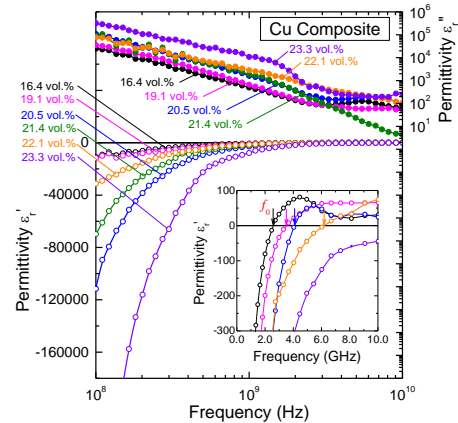


図 3. Cu 複合材料の誘電率スペクトル

##### (2) ENG 人工材料による電波吸収体の広帯域化と周波数選択遮蔽材の開発

- ・金属線配列構造を用いた電磁波遮蔽材料の検討を行い，短繊維配列構造における誘電率の共鳴分散を利用して，周波数選択電磁波遮蔽材料を構成できることを示した（図 4）。

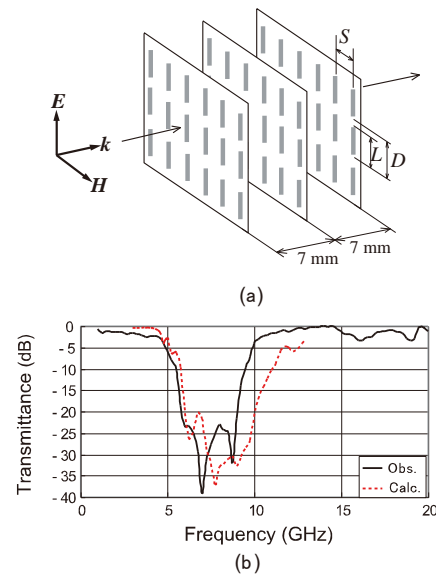
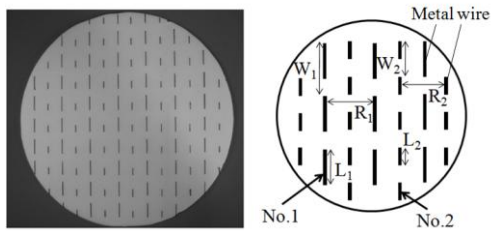


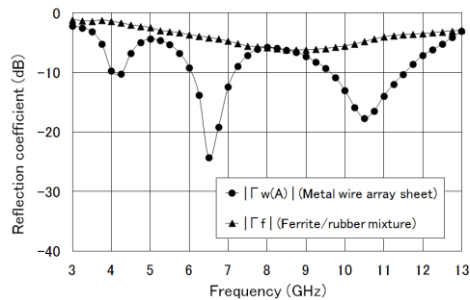
図 4. 金属線配列材を用いた周波数選択遮蔽

- ・金属短繊維配列構造体とフェライトゴム複合材料シートを用いて単層型電波吸収体を設計し，金属短繊維配列構造体の負の誘電率を利用することにより，電波吸収体を 2 つの周波数で整合させ -10 dB 以下の電波吸収特性を広帯域で実現することが可能であることを実証した（図 5）。





(a) 金属線配列構造体



(b) 金属線配列構造体の電波吸収特性

図5. 金属線配列材による広帯域電波吸収体

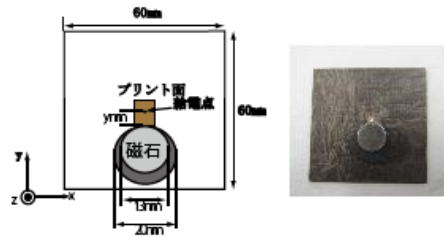
・金属短繊維配列複合構造体において、等方的な電磁遮へい特性を得ることを目的として、繊維の配列方向を変えたシートを多層化した複合構造体について検討し、遮へい特性が擬等方性を示すことを明らかにした。

(3) MNG 材料によるパッチアンテナの小型化

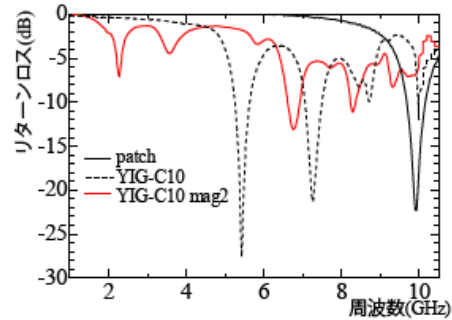
・YIG の磁場下の負性透磁率を用いて、10 GHz のパッチアンテナのリターンロス、およびインピーダンスについて検討し、数 GHz 付近で、パッチアンテナのリアクタンスが相殺され、リターンロスが低下することを見いだした。これは、アンテナの近傍界における空間の電磁特性を負の透磁率で相殺することによる空間マッチング効果であり、10 GHz 用パッチアンテナ(8 mm × 7 mm)に本材料を装加して永久磁石で外部磁場を印加することにより、2 ~ 3 GHz で-8dB 程度のリターンロスを実現した。また、放射パターン測定から本アンテナの動作を確認した(図6)。

(4) 総括と今後の展開

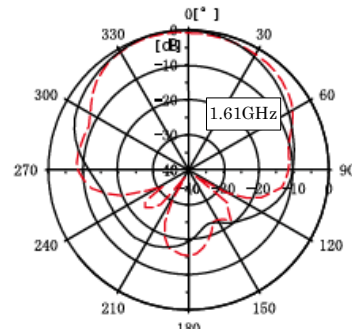
本研究により、酸化物及び金属磁性体を用いた MNG 複合材料、及び固体材料でマイクロ波領域に ENG 特性を有する金属粒子分散型複合材料を開発し、粒子分散型複合材料のマイクロ波領域における透磁率・誘電率の周波数分散特性と負の透磁率・誘電率特性の発現機構を明らかにした。また、金属線配列材を用いた負の誘電率スペクトル制御技術確立し、広帯域電波吸収体、及び周波数選択遮蔽材料を開発した。さらに、MNG 材料を用いたマイクロ波アンテナの小型化技術の可能性を実証した。中でも、ENG 特性を有する金属粒子複合材料が得られたことは重要であり、これによりこれまで実現されていないマイクロ波領域での左手系固体材料が実現で



(a) YIGパッチアンテナと磁石装加



(b) YIGパッチアンテナのリターンロス



(c) YIGパッチアンテナの放射パターン

図6. YIG を用いたアンテナの小型化

きる可能性がある。今後、ENG、及びMNG 複合材料を用いたリアル材料によるマイクロ波 MNG 材料の実現を目指してさらなる研究の推進を図る。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 30 件)

1. T. Tsutaoka, T. Kasagi, S. Yamamoto, K. Hatakeyama, Low frequency plasmonic state and negative permittivity spectra of coagulated Cu granular composite materials in the percolation threshold, *Applied Physics Letters*, Vol.102, 査読有り, 2013, pp. 181904-1 - 181904-4,
2. T. Tsutaoka, N. Koga, Magnetic phase transitions in substituted barium ferrites  $BaFe_{12-x}(Ti_{0.5}Co_{0.5})_xO_{19}$  ( $x=0-5$ ), *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.325, 査読有り, 2013, pp.36-41.
3. T. Tsutaoka, Electromagnetic Properties of Metal Granular Composite Materials for EMC Applications., *Proceedings of the 2012 IEEE*

*International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 査読有り, 2012, pp. 411-415

4. S. Yamamoto, K. Hatakeyama, Design Method of EM Absorber and Shielding Screen Using Wire Array Sheet, *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 査読有り, 2012, pp.416-421

5. N. Koga, Thermal dehydration of magnesium acetate tetrahydrate: Formation and in situ crystallization of anhydrous glass, *Journal of Physical Chemistry B*, Vol.116, 査読有り, 2012, pp.14477-14486

6. T. Tsutaoka, T. Ono, A. Tsurunaga, T. Kasagi, K. Hatakeyama, M. Y. Koledintseva, High Frequency Permeability of Fe-Al-Si Granular Composite Materials, *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 査読有り, 2011, pp. 78-83

7. M. Y. Koledintseva, A. G. Razmadze1, A. Y. Gafarov, V. V. Khilkevich, J. L. Drewniak, and T. Tsutaoka, Attenuation in Extended Structures Coated with Thin Magneto-dielectric Absorber Layer, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol.118, 査読有り, 2011, pp.441-459

8. T. Tsutaoka, T. Kasagi, and K. Hatakeyama, Permeability Spectra of YIG and its granular composite materials under dc magnetic field, *Journal of Applied Physics*, Vol.110, 査読有り, 2011, pp.053909-1 - 053909-12

9. N. Koga and Y. Sato, Formation and Transformation Kinetics of Amorphous Iron(III) Oxide during the Thermally Induced Transformation of Ferrous Oxalate Dihydrate in Air, *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol.115, 査読有り, 2011, pp.141-151

10. T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, An EM absorber and frequency selective shielding by use of metal fiber array composites, *IEICE Transaction on Communications*, Vol. E93-B, 査読有り, 2011, pp. 1858-1861

11. 畠山賢一, 葛岡孝則, 左手系材料を含む人工材料の開発と電磁波反射・透過制御材, 電子情報通信学会誌, 第93巻, 査読有り, 2010, pp.457-462

12. T. Kasagi, T. Tsutaoka, and K. Hatakeyama, Complex permeability spectra of Permeable composite materials, *Journal of Physics:Conference Series*, Vol. 200, 査読有り, 2010, pp. 082012-1 - 082012-4

13. 山本真一郎, 畠山賢一, マイクロ波帯における異方性電波吸収体の実用的評価法, 電子情報通信学会論文誌, 第J93-B巻, 査読有り, 2010, pp.1566-1569

14. 畠山賢一, 葛岡孝則, 兼本貴仁, 山本真一郎, 岩井 通, 金属格子の反射・透過特性と単層型電波吸収体裏地としての応用, 電子

情報通信学会論文誌, 第J93-B巻, 査読有り, 2010, pp. 101-111

15. T. Kasagi, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, Complex permeability spectra of Permeable composite materials, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.200, 査読有り, 2010, pp. 082012 -1 - 082012 -3

16. T. Kasagi, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, Dielectric Properties of Permalloy Granular Composite Materials, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.30, 査読有り, 2010, pp. 401-406

17. T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, T. Kasagi, Possibilities for the EM Absorber and Shielding by use of Metamaterials, *Proceeding of the 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 査読有り, 2009, pp.725-728

[学会発表] (計 49 件)

1. 笠置映寛, 鶴永愛子, 葛岡孝則, 畠山賢一, 扁平状Fe-Co粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性II, 日本物理学会第68回年次大会, 広島, 2013.3.26, 26aPS-28.

2. 葛岡孝則, 鶴永愛子, 樋口智紀, 木下英明, 笠置映寛, 山本真一郎, 畠山賢一, Cu-YIG 複合粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島, 2013.3.26, 26aPS-29.

3. 鶴永愛子, 葛岡孝則, 古賀信吉, 笠置映寛, 畠山賢一, 置換型Baフェライト粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性II, 日本物理学会 2012年秋季大会, 横浜, 2012.9.18, 18pPSA-40.

4. 笠置映寛, 鶴永愛子, 葛岡孝則, 畠山賢一, 扁平状Fe-Co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2012年秋季大会, 横浜, 2012.9.18, 18pPSA-51.

5. N. Koga, Extraction of Kinetic Information from a Single Thermoanalytical Curve of Thermal Decomposition of Solids by Nonlinear Least Squares Analysis, IUMRS-International Conference on Electric Materials (IUMRS-ICEM 2012), Yokohama, 2012. 9.24.

6. T. Tsutaoka, A. Tsurunaga, T. Kasagi, K. Hatakeyama, M.Y. Koledintseva, Electromagnetic Properties of Metal Granular Composite Materials for EMC Applications (Invited Presentation), 2012 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Pittsburgh, U.S.A., 2012.8.8, TC11-pm-1.

7. T. Kasagi, T. Tsutaoka, A. Tsurunaga, K. Hatakeyama, High frequency permeability of Fe-Co and Co granular composite materials, The 19th International Conference on Magnetism, Busan, Korea, 2012. 7. 10, QN02.

8. 笠置映寛, 鶴永愛子, 葛岡孝則, 畠山賢一, Co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 第67回年次大会, 関西学院大

- 学 (三宮), 2012.3.24., 24aPS-118.
9. 笠置映寛, 鶴永愛子, 葛岡孝則, 畠山賢一,  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ 粒子分散コンポジットの高周波透磁率スペクトルII, 日本物理学会 2011年秋季大会, 富山大学 (富山), 2011.9.21., 21aPS-127.
10. 鶴永愛子, 下村幸司, 葛岡孝則, 笠置映寛, 畠山賢一, サブミクロンNi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 2011年秋季大会, 富山大学 (富山), 2011.9.21., 21aPS-126.
11. T. Tsutaoka, T. Ono, A. Tsurunaga, T. Kasagi, K. Hatakeyama, M. Y. Koledintseva, High Frequency Permeability of Fe-Al-Si granular Composite Materials, 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Los Angeles, U.S.A., 2011.8.16.
12. S. Yamamoto, D. Ishihara, K. Hatakeyama, Design of Electromagnetic Wave Absorber by Use of Metal Wire Array Sheet, 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Los Angeles, U.S.A., 2011.8.16.
13. K. Umezu, T. Tsutaoka, T. Kasagi, K. Hatakeyama, High Frequency Permeability of Submicron Ni Granular Composite Materials, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, 2010.9.25.
14. T. Kasagi, K. Umezu, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, Electromagnetic Properties of Ferromagnetic Metal Granular Composite Materials and the Application to EM-Absorber (Invited Lecture), 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama, 2010.9.25.
15. 梅津健太郎, 葛岡孝則, 笠置映寛, 畠山賢一, サブミクロンNi粒子分散コンポジットの高周波透磁率スペクトル, 日本物理学会第65会年次大会, 岡山大学 (岡山), 2010.3.22., 22pPSA-64.
16. 葛岡孝則, 笠置映寛, 畠山賢一, YIG複合材料の高周波透磁率スペクトル, 日本物理学会 2009年秋季大会, 熊本大学 (熊本), 2009.9.27., 27pPSA-37.
17. 笠置映寛, 梅津健太郎, 葛岡孝則, 畠山賢一,  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ 粒子分散コンポジットの高周波電磁気特性II, 日本物理学会 2009年秋季大会, 熊本大学 (熊本), 2009.9.27., 27pPSA-49.
18. N. Koga, Y. Tanaka, T. Kimura, T. Tatsuoka, and S. Yamada, For Controlling Kinetic Behavior of Thermal Decomposition of Inorganic Solids (Invited Lecture), 19th Academic Symposium of MRS-Japan 2009, Yokohama, 2009.12.9.
19. T. Kasagi, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, Complex permeability spectra of Permeable composite materials, The International Conference on Magnetism 2009, Karlsruhe, Germany, 2009.7.27.
20. T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, T. Kasagi,

Possibilities for the EM Absorber and Shielding by use of Metamaterials, 2009 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Kyoto, 2009.7.24.

〔図書〕 (計 5 件)

1. 畠山賢一, 葛岡孝則, 三枝健二, 初めて学ぶ電磁遮へい講座, 科学技術出版, 2013年4月, 総頁数: 264頁 (pp.9-77, 95-180, 202-206, 210-230, 233-261), ISBN:978-4-904774-08-3
2. 葛岡孝則, 「エレクトロニクス用コンポジット材料の混練・コンパウンド技術と分散・界面制御」第8章 電磁波吸収・遮蔽コンポジット材料の混練・コンパウンド技術と条件設定 第8節 メタマテリアルによる電磁波吸収・遮へい複合材料の設計と分散技術, 技術情報協会, 2013年4月, pp. 615 - 624, 総頁数: 924頁, ISBN:978-4-86104-477-9
3. Nobuyoshi Koga, Jaroslav Sestak, Peter Simon, Chapter 1. Some fundamental and historical aspects of phenomenological kinetics in the solid state studied by thermal analysis. In *Thermal analysis of micro, nano- and non-crystalline materials*; Sestak, J., Simon, P., Eds.; Springer, 2013. 1; pp 1-28. ISBN: 978-90-481-3149-5.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

葛岡 孝則 (TSUTAOKA TAKANORI)  
広島大学・大学院教育学研究科・教授  
研究者番号: 10231432

##### (2) 研究分担者

古賀 信吉 (NOBUYOSHI KOGA)  
広島大学・大学院教育学研究科・教授  
研究者番号: 30240873

##### (3) 連携研究者

畠山 賢一 (HATAKEYAMA KENICHI)  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80305680

##### (3) 研究協力者

笠置 映寛 (KASAGI TERUHIRO)  
徳山工業高等専門学校・一般科目・准教授  
研究者番号: 10310947  
山本 真一郎 (YAMAMOTO SHINICHIRO)  
兵庫県立大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 10514391