

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24年 4月24日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360341

研究課題名（和文） 優れた発熱能と生体適合性を有する磁性材料の開発と作製法の確立

研究課題名（英文） Establishment of Preparation Method for Magnetic Materials Having High Heat Generation Ability and its Biocompatibility

研究代表者

青野 宏通 (AONO HIROMICHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00184052

研究成果の概要（和文）：

新しい癌の焼灼療法として磁性材料の交流磁場中での発熱を利用する交流磁場焼灼療法が期待されている。本研究により、(1)物理的にビーズミルを用いて粉碎混合したフェライトの発熱特性及び発熱機構、(2)新規イットリウムガーネット系 $Y_3Fe_5O_{12}$ についての発熱能及び発熱機構、(3)塞栓療法のためのスプレードライ法によるフェライトの球状化、などについて主に研究を行った。

研究成果の概要（英文）：

Magnetic materials having a high heat generation ability in an AC magnetic field have been studied for use in new thermal coagulation therapy for the local treatment of cancerous tissues. We mainly studied (1) Heat generation ability and heat generation mechanism for the ferrite materials obtained using physical beads milling, (2) Heat generation ability and heat generation mechanism for new $Y_3Fe_5O_{12}$ -based material having high heat generation ability, and (3) Preparation of microsphere materials using spray dryer for embolization therapy application.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：癌治療、交流磁場、発熱、磁性材料、フェライト

1. 研究開始当初の背景

交流磁場中で著しく発熱する材料は、癌の新しい焼灼療法（図1）への応用を目的として、発熱特性の優れたものが切望されている。これは、磁性材料を腫瘍部に留置し、交流磁場により焼灼するものである。そして、磁性材料を患部に留置する方法として3種が検討されている。

- ① 針状磁性材料を患部に穿刺し、焼灼後に抜き取る方法
- ② 球状磁性材料(20～30 μ m)をカテーテルにより患部の血管に塞栓させる方法
- ③ 微粒子磁性材料(50nm以下)を抗体付きリポソームに包埋しカテーテルを用いて選択的に患部に堆積させる究極の方法

である。この交流磁場焼灼法は、効果的に患部にダメージを与え、さら

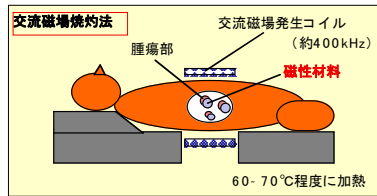


図1 交流磁場焼灼法

にヒートショックプロテイン (HSP) の発現により正常細胞の免疫機能を活性化させる。①の方法については、子宮頸部癌や乳癌といった磁性材料の穿刺が可能な表皮の癌をターゲットにしている。現在、愛媛大学医学部の倫理委員会を経て、ヒト子宮頸部癌の摘出臓器での6例の研究も終了し、実用化に向かって着実に進んでいる。申請者も、それに用いる複合針状材料の開発を研究代表者として「萌芽研究」(H19-21)にて進めている。②③の方法は、血管中からカテーテルにより選択的に患部に留置し、定期的(1週間に1〜2度)に交流磁場をかけることにより、局所的に高い温度(60〜70°C程度)で加熱治療させる。材料が医薬品と判断されるため、承認を得るためにはかなり期間を要すると考えられるが、発熱特性が優れた生体適合性の良い材料の設計は将来の実用化のためにきわめて重要である。②は癌により細った血管に物理的に塞栓させ堆積させる方法である。

③の方法を図2に示す。抗体付きのリポソームに薬と磁性材料を包埋し、ドラッグデリバリーシステム(DDS)により選択的に癌患部に堆積させ、交流磁場で発熱させることにより、局所的な薬物治療と焼灼効果、さらにはHSPの発現による自然治癒を目指すという究極の方法である。また、このような磁性材料はMRIの造影剤としての役割もあり、微小な癌の位置も特定できる上に、外科手術や他の焼灼法よりも患者への肉体的及び精神的負担が軽く、本方法に有望な磁性材料の設計は急務である。

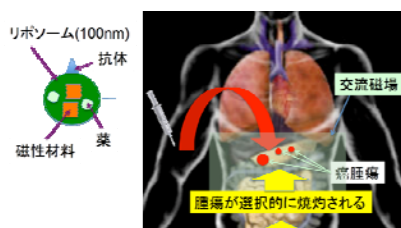


図2 DDSを用いる究極の癌治療法
さらに免疫システムが働き始める

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的

本申請研究は、1の「研究開始当初の背景」で述べた②③の方法に用いる粉末磁性材料の設計および作製に関するものであり、交流磁場中における単位質量当たりの発熱量が大きく、なおかつ生体適合性のある材料の探求である。申請者らはこれまでに、一般的に利用が検討されて来ているマグネタイト

(FeFe_2O_4)より優れた発熱を示す材料を報告してきている。図3にそれらの発熱結果の一例を示す。1.0gの粉末材料を空气中、 $1.77\text{kA}\cdot\text{m}^{-1}$ 、370kHzの条件で温度変化を調べた結果である。一般的に研究されているマグネタイトよりも、申請者らが見いだした MgFe_2O_4 や $\text{Mg}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 系の方が格段に高い発熱を示すことがわかる。また申請者らは、化学的合成法の技術だけでなく、ピーズミル粉碎により、物理的にフェライト材料を数ナノの結晶子サイズの微粒子材料を作成する技術も持っている。これより得られた単磁区微粒子は保持力の増大により発熱能力が高まることを確認している。本研究は、これまで得た知見を基に、研究材料を $\text{Mg}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ 系のみにとどめず、新規発熱材料についても磁気的特性

や生体適合性を明確にしつつ検討を行なう。さらに、収率の高い球状材料の作製法やナノ微粒子材料の作製法を確立

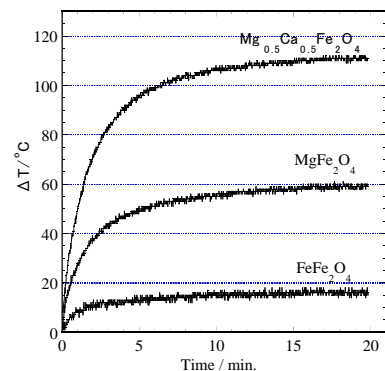


図3 磁性材料の発熱特性

する。また、企業と共同で効率の良いリポソームの包埋法について検討を行う。

以上により、材料工学的に交流磁場において強く発熱する材料の設計・開発を行うことはもちろんのこと、針状磁性材料に続く塞栓材料、さらには究極のナノ微粒子材料の実用化に必要な基礎的研究を行う。

(2) 独創的な点

本研究は、新規のフェライト材料をナノ微粒子化し、交流磁場中の発熱特性を高め、リポソームへの包埋を可能にするものであり、生体適合性の研究も合わせて進めるため、きわめて実用化に向けてのポテンシャルが高い。医療に関することであるため、実際のハードルは非常に高いと考えられるが、究極の癌治療法の実用化のためには必要不可欠な研究内容である。

申請者らは医学部と共同で実用化に具体的に近づきつつある針状材料も研究しており、これを踏まえての段階的な実用化を目指した本研究の遂行は、他の研究機関より有利である。本申請研究により、実用化への方向性が強く示されれば、他の研究機関も参入し、交流磁場焼灼療法が新しい医療として発展することが期待できる。

3. 研究の方法

研究開始時の知見を基準に研究の方法を述べ、「4. 研究成果」にて項目に対応した研究結果を述べる。

本申請研究は、研究期間内において交流磁場中で著しく発熱する磁性材料の開発指針を、材料工学的な立場から明確にし、候補材料の選定、作製方法の確立、生体適合性の確認など、この交流磁場焼灼法への実用化のために必要な基礎的物性の研究を行うものであった。この研究で得られる候補材料は、研究目的の②の「球状磁性材料(20~30 μ m)」と、③の「微粒子磁性材料(50nm以下)」のために用いられる。

(1) 塞栓用球状材料の作製法の確立

塞栓法は、患部の血管に材料を塞栓させて栄養分を断ち、さらに交流磁場にて加熱治療を行なうものである。塞栓法として熔融法で得た球状シリカを用いる放射線療法が実用化しており、癌患部に塞栓するためには20~30 μ m程度のサイズが適当であるとされている。申請者らは $MgFe_2O_4$ フェライトの球状化について検討を行ってきたが、球状フェライトを熔融により作製するためには5000 $^{\circ}C$ 以上の超高温中に材料を粉霧熔融する必要があり、企業に依頼して作製したところ20~30 μ mの球状フェライト(図4)の収率は原料からの1%にも満たず、また、高温焼成により材料の発熱能も著しく低下した。

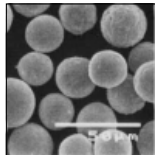


図4 作製した球状材料

当初計画していた球状化の方法を図5に示す。ビーズミル粉砕によりフェライトを微細化し、その懸濁液を試料として、ノズルから粉霧した液滴をチャンバ中で乾燥・球状化し、そのまま1100 $^{\circ}C$ 以下の温度とした電気炉に導き焼成すると球状焼結体が得られると考えられた(実際行なった実験では、電気炉による焼成部は用いなかった)。この方法によりかなりの収率で球状試料が得られるが、粒子径が3~5 μ mと小さい。今後、ノズルの形状と試料懸濁液の添加物による粘度調整を研究し粒子径の大きい球状材料を作製する必要がある。また、テトラエトキシシランを少量混合すると、表面が滑らかとなったことより、このような添加剤の影響についても検討を行った。

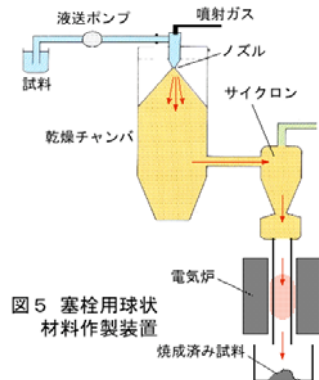


図5 塞栓用球状材料作製装置

(2) 新規発熱材料の開発

申請者らは、これまでに多くの発熱材料を発見してきた。その代表が $Mg_{1-x}Ca_xFe_2O_4$ 系であるが、このような優れた発熱を起こすためには、交流磁場中でのB-H特性におけるヒステリシス損失(これが熱に変わる)を増大させることにあり、その発熱特性の優れた材料の特徴としては: Mg^{2+} や Y^{3+} などの磁性をもたないイオンを含む複合酸化物磁性材料(この理由は不明確)

①相転移温度近辺で熱処理を行なうことにより結晶が歪んだ材料

②単磁区となる数nm~十数nmの結晶子径をもつ材料

であることなどが明らかになってきている。従って、以上の点を考慮しながら磁性材料の設計を進めることにより発熱能の優れた材料の開発が可能となるはずである。特に、最近、希土類と鉄を含む、いわゆるガーネット系の磁性複合酸化物材料において、ある焼成温度で熱処理することにより $Mg_{1-x}Ca_xFe_2O_4$ 系に匹敵する発熱特性を示すことを発見しており、これら新規材料の研究を行なった。

(3) 粉砕(物理的手法)による微粒子磁性材料の作製

申請者らは、これまでに逆共沈法や高分子化法などの化学的合成法により前駆体を作製し、低温焼成でフェライトの複合酸化物を合成し微粒子化を図ってきた。しかし、化学的合成により得た前駆体を、焼成による粒子成長を制御して発熱特性の優れたナノサイズの酸化物を設計することはこれまでできておらず、物理的粉砕による微粒子化の方が発熱特性の向上のための近道である。この微粒子化により、結晶が単磁区となり保持力が高まることに伴い、ヒステリシス損失が増大し、発熱能が向上することを明らかにしている。申請者らが所有するビーズミルは結晶子径が10nm以下までの粉砕が容易であるため、これらの研究が可能となる。ここでは、最も優れた結晶子径および粒子径をもつフェライト微粒子の作製およびキャラクタリゼーションを行なった。

(4) $Mg_{1-x}Ca_xFe_2O_4$ 系における生体適合性試験

「研究目的」で述べたように、申請者らにより $Mg_{1-x}Ca_xFe_2O_4$ 系において、きわめて優れた発熱特性が発見されてきており、交流磁場焼灼療法候補材料である $MgFe_2O_4$ と $Mg_{0.5}Ca_{0.5}Fe_2O_4$ の2種について、生体適合性試験として検査機関(秦野研究所)に依頼し、医療材料としての「急性毒性試験」「皮膚感作性試験」「皮内反応試験」「細胞毒性試験」の4種の試験を各1回行なってきている。その結果、 $Mg_{0.5}Ca_{0.5}Fe_2O_4$ については「皮内反応

試験」が陽性となっており、それ以外は全て陰性であった。これは、120°Cで1時間という生体では起こりえない最も過酷な抽出条件を選択したために、不純物として含まれるCaOが溶出し、抽出液のpHを上昇させ、皮膚の腫れ(ウサギ)により陽性となったためであり、粉末の洗浄条件なども含めて、検査の条件についても再検討を行う必要がある。そして、得られた条件による「皮内反応試験」の再検査を予定している。もし改善しても適合性が得られないならば、 $MgFe_2O_4$ フェライトや新規材料を中心に研究を行う。

(5) 磁気的特性の検討

磁性材料の発熱特性は、フェライトなどの絶縁体の場合の発熱はヒステリシス損失によるものであることを確認している。得られた材料の磁気的特性の検討のために、全ての試料について作製の度に詳細に測定を行いたい。しかし、測定可能な装置は京都産業技術センターにあるため、これまでの測定は数ヶ月に1度程度の頻度で行なっていた。やはり、試料を作製してその都度の測定を行なうことが望ましく、装置も古いものであり、測定できる最大の磁場が $500A \cdot m^{-1}$ であるため、発熱実験で用いる磁場(通常 $1.77kA \cdot m^{-1}$)よりはるかに小さく、必要な測定結果を十分得られないのが現状である。本申請では、より明確な磁気的性質を明らかにするためのB-Hアナライザーとパワーアンプの購入を行なう予定である。また、交流磁場による発熱特性の解析は、既存の汎用電磁場解析ソフトJMAG-studio ver. 9.1とCADを併用したコンピューターシミュレーションで解析を行なった。

4. 研究成果

(1) 塞栓用球状材料の作製法の確立

新しく発見した発熱物質である $Y_3Fe_5O_{12}$ の微粒子化は、市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ (高純度化学研究所製、粒子径 $2\sim3\mu m$ 99.9%)をビーズ径 $0.3mm\phi$, $0.1mm\phi$ でビーズミル粉碎し、乾燥させて作製した。 $Y_3Fe_5O_{12}$ フェライトマイクロ球体の作製は、純水(11.25ml)と微粒子化した $Y_3Fe_5O_{12}$ 粉末(4g)を混合し、スプレードライ法によって行なった。スプレードライ法によって回収した粉末を $32\mu m$ と $20\mu m$ のふるいを用い、 $20\sim32\mu m$ に分級した。各試料についての粉末X線回折、BET法による表面積測定による粒子径の決定、B-Hアナライザーによるヒステリシス損失の測定を行った。また、これらの試料2gを10mlの水中に分散させ交流磁場中での発熱実験により発熱能($W \cdot g^{-1}$)を算出した。テトラエトキシシランを混合すると表面が滑らかになるが、焼成して完全分解する必要があるため不要であるとの結論が得られた。

市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ 、それをビーズミル粉碎した粉末、ビーズミル粉碎した粉末をスプレードライした $20\sim30\mu m$ の粒径の粒子を含むマイクロ球体のそれぞれの交流磁場中の発熱を比較した。その結果、交流磁場中では市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ はまったく発熱しなかったが、 $0.1mm\phi$ で4時間粉碎することにより、結晶子径が約 $16nm$ となり最大の発熱がみられた。ビーズミル粉碎した $Y_3Fe_5O_{12}$ の発熱量Pは磁場強度H($kA \cdot m^{-1}$)の2乗及び周波数f(kHz)に比例し、 $P=3.5 \times 10^{-4} \cdot fH^2$ の関係があった。図6はスプレードライ後の分級前(a) $20\sim32\mu m$ に分級後(b)の $Y_3Fe_5O_{12}$ のSEM写真である。分級前は多くの粒子が混在しているが、分級後はそろったマイクロ球体が見られた。この $20\sim32\mu m$ 球状粒子の収率はスプレードライに入れた4gに対して約13%であった。

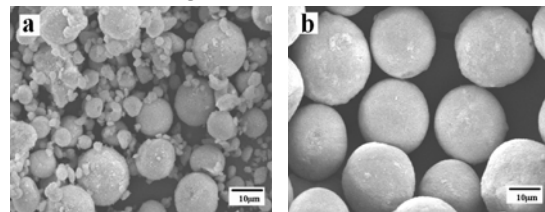


図6 作製した $Y_3Fe_5O_{12}$ 球状材料のSEM写真
(a)分級前 (b)分級後

(2) 新規発熱材料の開発

既に(1)で同材料の球状化について述べたが、希土類ガーネット系について優れた発熱特性を発見し報告している。その発熱能力について検証した。試料の作製は各金属硝酸塩の混合溶液を、 $6mol/l$ のNaOH水溶液中に滴下する逆共沈法により前駆体粉末を得た。得られた粉末を $1000^\circ C$ から $1200^\circ C$ まで $50^\circ C$ 刻みで各焼成温度での $Y_3Fe_5O_{12}$ 粉末材料を作製した。また、それぞれの試料について粉末X線回折、BET法による表面積値からの粒子径の算出、エポキシ樹脂で固化させた試料のB-Hアナライザーによるヒステリシス損失の測定を行った。純水10ml中にこれらの試料2gを投入し $370kHz$, $1.0\sim2.25kA \cdot m^{-1}$ の様々な磁場強度の交流磁場中で発熱実験を行い、開始後5分間の発熱速度から発熱量($J \cdot s^{-1} \cdot g^{-1} = W \cdot g^{-1}$)を求めた。また、周波数を変化させたときの発熱量も求めた。図7に焼成温度の異なる $Y_3Fe_5O_{12}$ 試料の交流磁場中での発熱量を示す。焼成温度が高くな

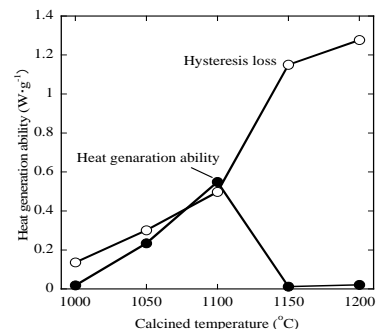


図7 焼成温度と発熱能の関係

ると発熱量は上昇し、1100℃での焼成を境に発熱量は減少した。1100℃焼成までの試料については発熱量とヒステリシス損失の値が一致したが、1150℃以上で焼成した試料については発熱量よりもヒステリシス損失の値の方がはるかに大きく、一致しなかった。これは、1150℃以上で焼成した粒径の大きい試料については、ヒステリシス損失の測定で磁場の収束を引き起こしてしまったためだと考えられる。

図8は磁場強度と発熱量の関係を示したもので、発熱量は磁場強度の3乗にほぼ比例することを示している。これはB-Hアナライザにより調べたところ磁性体粉末の保磁力が磁場強度(H)の2乗に依存するため、ヒステリシス損失がHの3乗に比例することによって考えられる。一方、発熱量は周波数(f)に比例することがわかった。これらのことを用いて発熱量 P ($W \cdot g^{-1}$) は比例定数 K を用いて $P=K \cdot f \cdot H^3$ で表され、実験結果より $K = 2.7 \times 10^{-4}$ となった。これにより発熱量は f と H がわかれば計算により求めることができる。(f=周波数[kHz], H=磁場強度[kA \cdot m $^{-1}$])

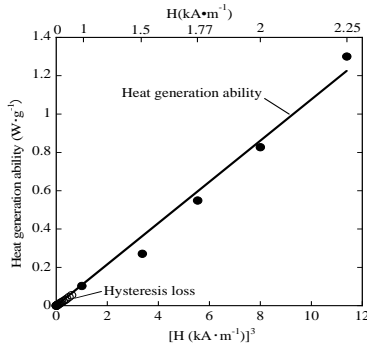


図8 磁場強度の3乗と発熱能の関係

(3) 粉碎 (物理的手法) による微粒子磁性材料の作製

市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ 粉末 (高純度化学研究所製、粒子径 $2 \sim 3 \mu m$ 、99.9%) のビーズミル粉碎を行い、ビーズ径 (0.3mm ϕ 、0.1mm ϕ 、0.05mm ϕ) 及び粉碎時間を変化させることで様々な粒子径の粉末を作製した。各試料について粉末 X 線回折 (XRD) 及び、BET 法による比表面積測定による粒子径の決定、B-H アナライザによるヒステリシス損失の測定を行った。また、交流磁場中での発熱測定は試料粉末 1.0g、周波数 370kHz、磁場強度 1.77kA/m に固定して行った。最も優れた発熱特性を示した試料について、粉末状態の試料とエポキシ系接着剤により固化した試料の水中 (10ml) における交流磁場中での発熱測定を行ない、温度上昇速度から発熱量 ($W \cdot g^{-1}$) を計算した。

粉碎を行った試料全てについて不純物のピークは見られず $Y_3Fe_5O_{12}$ の単相であった。市販粉末では全く発熱しなかったが粉碎に伴い、微粒子化が進み 0.1mm ϕ ビーズを用い

4時間粉碎した試料 (結晶子径 16nm) で最も優れた発熱特性が得られた。図9にその試料についての磁場強度 H の2乗と損失 (発熱量) の関係をプロットした。B-H アナライザによるヒステリシス損失と発熱特性の間に強い相関関係があり、ヒステリシス損失の外挿値、粉末及び固化試料の実測値がほぼ同じ直線上にのることがわかった。今回測定を行った 1.77 kA/m での発熱量は約 $0.4 W \cdot g^{-1}$ であり、発熱量は交流磁場の周波数 f (kHz) と比例関係にあることを確認しており： $P = 3.5 \times 10^{-4} f H^2$ の関係があることが明らかになった。従って、この関係を用いて、磁場強度と周波数を変化させた場合の発熱能を見積もることが可能となった。

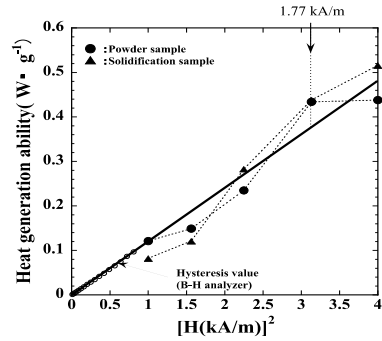


図9 磁場強度の2乗と発熱能の関係

(4) $Mg_{1-x}Ca_xFe_2O_4$ 系における生体適合性試験

皮内反応試験を行なった。これは、粉末材料について生理食塩水で抽出して得られた液をウサギの皮内に 0.2ml ずつ投与し、皮膚の損傷を観察するものである。この $Mg_{0.5}Ca_{0.5}Fe_2O_4$ について、抽出条件がマイルドになるよう改めて、再度試験行なったが同じ陽性の結果であった。この陽性は試料のアルカリ成分である Ca によるものであり、Ca を含むフェライトは生体適合性に問題がある。一方、 $Y_3Fe_5O_{12}$ については、全く問題はなかった。(2) で示したように、発熱特性も優れていることより、この $Y_3Fe_5O_{12}$ が将来の応用に適していると考えられる。

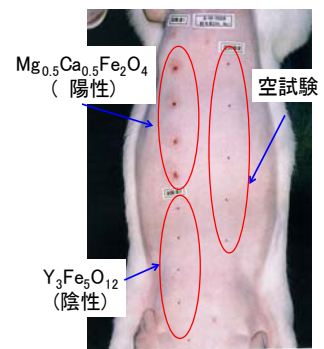


図10 皮内反応試験の結果

(5) 磁気的特性の検討

試料は、市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ (高純度化学製、粒子径約 $3 \mu m$) をビーズ径 0.3mm ϕ で2時間、さらに 0.1mm ϕ で2時間、0.05mm ϕ で10

時間、ビーズミルによる物理的粉碎の後、各焼成温度で焼成し作製した。さらに、同様の手順で市販の $Y_3Fe_5O_{12}$ 、 $Gd_3Fe_5O_{12}$ を化学量論比 5 : 1 で混合、焼成し作製した。これらの試料 2g を純水 10ml に分散させ、主に磁場強度 $1.77kA \cdot m^{-1}$ 、周波数 370kHz での温度測定を行い、発熱量 ($W \cdot g^{-1}$) は開始後 5 分間の温度勾配より求めた。粒子径については、BET 法を用いた表面積値から算出した。

図 1 1 に $Y_3Fe_5O_{12}$ の粒子径に対する発熱量のグラフを示す。ビーズミル粉碎を行った試料の粒子径は 21nm であった。焼成により粒子は成長し 700°C で焼成した試料が粒子径約 37nm となり発熱量のピーク $0.46W \cdot g^{-1}$ を示し、それ以上では減少した。図 1 2 に $Y_3Fe_5O_{12}$ の 600°C 焼成試料と 700°C 焼成試料における磁場強度と発熱量のグラフを示す。粒子径約 30nm の境界線を境に、600°C 以下で焼成した試料は磁場強度の二乗と発熱量の比例関係が、それよりも高い温度で焼成した試料については磁場強度の三乗と発熱量が比例することを確

認できた。これは、境界線を境に磁性が超常磁性からフェリ磁性へ変化したことを示唆する。また、粒子径約 100nm 以上では発熱特性が低いことがわかった。粒子成長を阻害する介在物として

$Gd_3Fe_5O_{12}$ を混合させた試料の場合、発熱特性の向上がみられた。

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 1 2 件)

- ① H. Aono, H. Ebara, R. Senba, T. Naohara, T.

Maehara, H. Hirazawa, and Y. Watanabe, High Heat Generation Ability in AC Magnetic Field for Nano-sized Magnetic $Y_3Fe_5O_{12}$ Powder Prepared by Bead Milling, *J. Magn. Mater.*, Vol. 324, No. 12, 2012, pp. 1985-1991.

- ② H. Aono, H. Ebara, R. Senba, T. Naohara, T. Maehara, H. Hirazawa, and Y. Watanabe, High heat generation ability in AC magnetic field for $Y_3Fe_5O_{12}$ powder prepared using bead milling, *J. Am. Ceram. Soc.*, 査読有, Vol. 94, No. 12, 2011, pp. 4116-4119. など

[学会発表] (計 2 6 件)

- ① 西森忠彦ら、イットリウム鉄ガーネット粉末の逆共沈法による合成と交流磁場中における発熱機構、日本セラミックス協会年会、2012年3月、京都. など

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: $Y_{3-x}Ln_xFe_5O_{12}$ 粉末材料及びその製造方法

発明者: 青野宏通、猶原 隆、前原常弘

権利者: 国立大学法人愛媛大学

種類: 特願

番号: 2009-213500

出願年月日: 平成 21 年 9 月 15 日

国内外の別: 国内

名称: $FeFe_2O_4$ 粉末材料及びその製造方法

発明者: 青野宏通、猶原 隆、前原常弘

権利者: 青野宏通、猶原 隆、前原常弘

種類: 特願

番号: 2009-213495

出願年月日: 平成 21 年 9 月 15 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青野 宏通 (AONO HIROMICHI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 00184052

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

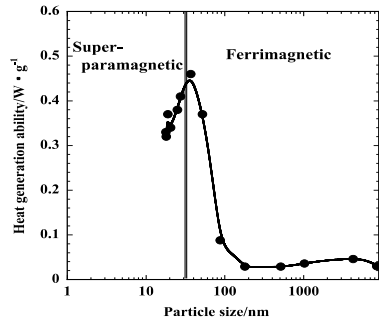


図 11 粒子径と発熱能の関係

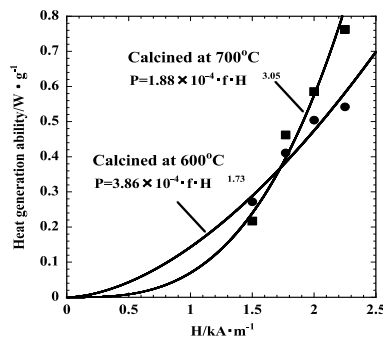


図 12 磁場強度と発熱能の関係