

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2005～2009

課題番号：17106009

研究課題名（和文） 革新的金属ナノ中空球および金属ナノチューブの創製と機能性解明

研究課題名（英文） Fabrication of Novel Nano-hollow Sphere Metals and Metallic Nano-tube and Elucidation of Physical Properties

研究代表者

中嶋 英雄 (NAKAJIMA HIDEO)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：30134042

研究成果の概要（和文）：ナノ微粒子およびナノワイヤーの被膜酸化層と金属構造体との相互拡散によって移動した空孔の集合体を利用して金属および酸化物のナノ中空球およびナノチューブを創製した。それらの熱安定性を調べると共に、中空化機構の解明を透過電子顕微鏡を用いて行った。さらに、酸化物ナノ中空球粒子の磁気および制振特性を評価した。

研究成果の概要（英文）：Nano-hollow sphere and nano-tube made of metals or oxides were fabricated by utilizing the nano-hollow spaces accumulated by vacancy migration through interdiffusion between oxide shell and metal core, the former of which was formed by surface oxidation. Their formation mechanism and the thermal stability were clarified by the transmission electron microscopy. Moreover, the magnetic and damping properties of hollow oxides nanoparticles were evaluated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	32,400,000	9,720,000	42,120,000
2006年度	24,700,000	7,410,000	32,110,000
2007年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
総計	85,200,000	25,560,000	110,760,000

研究分野：理工系・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：金属ナノチューブ，相互拡散，中空粒子，磁気特性，弾性

## 1. 研究開始当初の背景

最近、ポーラス金属、セル構造体、発泡金属などの多孔質金属の研究が基礎から応用開発に至るまで幅広く行われている。特に、本研究代表者らが開発したロータス型ポーラス金属は気孔が一方に直線的に成長したもので、多孔質でありながら強度を保持したユニークな材料として国内外から注目を浴びている。これらのポー

ラス金属の気孔はミクロンからミリメートルサイズで、マクロポーラス金属とも呼ばれている。このようなマクロポアの有用性をナノスケールにもたらしたならば、さらに革新的な機能性を発揮する新材料を開発できることが大いに期待される。2000年前後から、金属や酸化物などのナノポーラス材料やメソポーラス材料と呼ばれるナノサイズの気孔を有する材料の開発が活発に行われ

るようになった。

特に最近では、無機材料のナノ中空粒子やナノチューブなどのナノ中空構造体の開発が注目を集めている。これらの内部の孔には、物質の貯蔵および輸送機能の付与や、様々な物理的および化学的性質の変化をもたらすことが期待される。ナノ微粒子に異種物質をコーティングしたコア・シェル構造体から中心部の微粒子部分のみを選択的に化学エッチングによって除去しナノ中空構造体を作製する手法が採られてきた。一方、固相の相互拡散において、原子拡散の差異に起因するカーケンドール効果を利用した中空構造の作製方法が提案された。化学的エッチングとは異なる新しい方法として様々な材料の中空構造化へ適用するために、作製原理の確立が望まれている。また、ナノ中空粒子の物性評価は未開拓の研究領域である。

## 2. 研究の目的

本研究では、ナノサイズのコア・シェル構造体の相互拡散のカーケンドール効果を利用してナノポア(空孔の集合体)を生成させた金属ナノ中空球および金属ナノチューブを創製し、その中空化機構を解明することを第1の目的としている。さらに、創製された金属ナノ中空球やナノチューブは超巨大な比表面積を有するため、新規な物性が期待される。本研究の第2の目的は新規な物性を探索し、発現機構を解明すると共に新機能性材料としての用途の展開を図ることである。

## 3. 研究の方法

### (1)金属ナノ粒子およびナノワイヤーの作製

大阪大学超高压電子顕微鏡センターのHitachi H-800型TEMに装備された抵抗加熱蒸着装置および電子ビーム蒸着装置を用いて、Cu, Al, Znなどの金属ナノ粒子をアモルファスカーボンまたはアモルファスアルミナ支持膜上に作製した。また、Ni や Fe などのナノ粒子を、電子ビーム蒸着装置で支持膜上に作製した。

電解液中の金属イオンのカソード析出反応を利用して、Fe, Cu および Ni ナノワイヤーを作製した。陰極には、金属ナノワイヤーを堆積させるテンプレートとして、ニュクリアー・ポリカーボネート・トラックエッチ・メンブレンを用いた。陽極および参照電極には、作製する金属ナノワイヤーと同じ金属の板を用いた。所定の電解電圧を印加し、120~240 s, 金属イオンを析出させた。電析後、ジクロロメタンでメンブレンを溶解して金属ナノワイヤーを分離し、アモルファスアルミナ支持膜(Pt メッシュ)上に滴下した。

Au/PdやCu/Niなどのコア・シェル型ナノ粒子およびナノワイヤーを溶液還元法や電気化学的方法により作製し、支持膜上にのせた。

これらの試料を、所定の温度および時間において大気中あるいは真空中で加熱し相互拡散を行わせた。

## (2) 形態変化の評価

透過型電子顕微鏡を用いて、酸化反応または金属同士の相互拡散による形態変化の挙動を観察した。また、透過型電子顕微鏡内で酸化物中空粒子のその場加熱を行い、高温アニールにおける形態変化を調べた。

## (3) 酸化物ナノ中空粒子の磁化測定および共振特性の評価

4×4×1mm<sup>3</sup>の石英板上にアルミナ薄膜を蒸着したものを基板とし、Fe および Ni ナノ粒子を真空蒸着した。これを、大気中 400°Cで加熱し、酸化物中空粒子を作製した。SQUID により 5Kにおける磁化曲線の測定を行った。また、磁場冷却および無磁場冷却測定を行い、磁化の温度変化を測定した。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器に Cu ナノ粒子を酸化により中空化させた CuO ナノ粒子を充填し、充填前後での共振性の変化を容器全体の共振ピークの半価幅により評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 金属ナノ粒子の酸化による酸化物ナノ中空粒子の形成

図 1(a)~(d)に示すように、Cu, Al, Ni, Fe ナノ粒子を大気中で酸化させると酸化物中空ナノ粒子が得られた。これらの金属の酸化過程では、酸化層を通じての金属イオンの外方拡散によって酸化が進行する。この金属原子の拡散と逆方向に空孔の移動が起こり、集合化するため、最終的に原子空孔の集合体としての内部孔を有する中空酸化物が形成されることがわかった。対照的に、酸素イオンの内方拡散が支配的になって酸化が進む Pb ナノ粒子の酸化の場合には、中実酸化物が生成された。この結果により、金属イオンの外方拡散によって中空化が起こることが明確に示された。

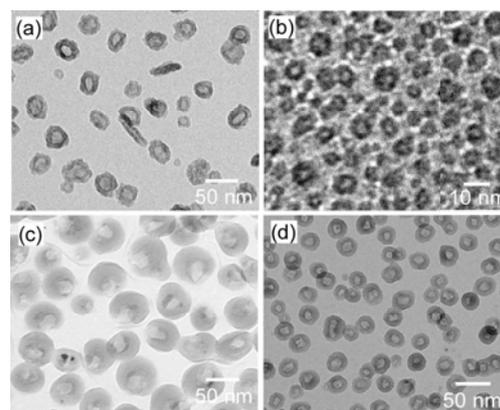


図 1. 金属ナノ粒子の酸化によって形成された酸化物ナノ中空粒子の TEM 像。(a)Cu→Cu<sub>2</sub>O, (b)Al→アモルファス Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (c)Ni→NiO, (d)Fe→Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

(2) 金属ナノワイヤーの酸化による酸化物ナノチューブの形成

Fe および Cu ナノワイヤーを酸化させると、均一な内径および外径を有する酸化物ナノチューブが形成された(図 2(a),(b)). 一方, Ni ナノワイヤーを酸化させると, 断片的な内部ボイドを有するポーラスNiO ナノワイヤーとなった(図 2(c)). 内部ボイドの原子論的な形成機構は, 前述の粒子の中空化と同様であるが, Ni ナノワイヤーの酸化によるボイドの断片化は, 酸化によって Ni 中に生成した原子空孔が, ボイドを粗大化させるのに十分な移動度を有することに起因すると考えられる。

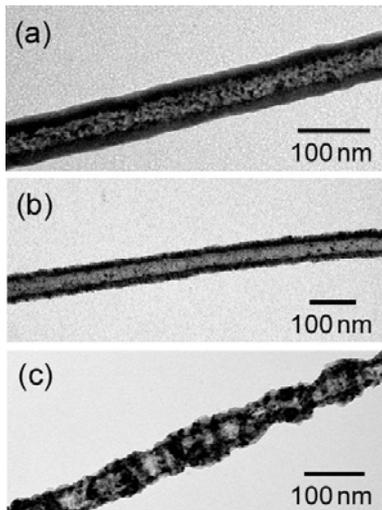


図 2. (a)Fe, (b)Cu および(c)Ni ナノワイヤーの酸化による酸化物ナノチューブおよびポーラスナノワイヤーの形成。

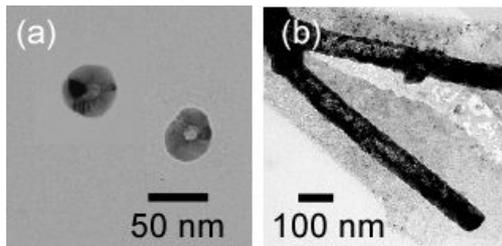


図 3. (a)Au/Pd コアシェルナノ粒子, (b)Cu/Ni コアシェル型ナノワイヤーのアニールによる中空構造化。

(3) コアシェル型金属ナノ粒子およびナノワイヤーの相互拡散に伴う中空構造化

Au ナノ粒子にPdをコーティングしたコアシェル型ナノ粒子および Cu ナノワイヤーを Ni でコーティングしたコアシェル型ナノワイヤーを真空中でアニールすると, 中空構造が得られた(図 3). コ

ア金属の Au および Cu に対して, シェル金属の Pd や Ni の自己拡散係数は数桁大きいため, 相互拡散過程では, コア側からシェル側への金属原子の外方拡散が支配的となる. 内部に原子空孔が流入して集合化し, 中空構造となる。

(4) 中空構造の構造安定性

中空構造は内部にも表面を有するため不安定な構造である. 高温でのアニールによって内部の孔は収縮し消滅することが理論的に予測されている. 中空構造の安定性を実験的に調べた。

Cu<sub>2</sub>O および NiO ナノ粒子を真空中でアニールすると, 酸化物から金属への還元反応が始まる温度において粒子の収縮が起こった. 還元の進行に伴い粒子の収縮が進行し, 最終的には孔のないCuおよびNiナノ中実粒子へ形態変化した。

CuO および NiO の中空粒子およびナノチューブを高温, 大気中でアニールすると, CuO および NiO の構造を維持したまま内部孔が収縮し, 消滅した. 一方, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空粒子およびナノチューブを大気中でアニールすると, 特異な形態変化が観察された. 図 4 に示すように, 単一の孔をもつ中空粒子は複数の気孔をもつポーラス粒子へと変化している(a). また, ナノチューブの酸化層内壁に沿って, 球状ボイドが形成している. 気孔の収縮過程で見られる酸化鉄特有の現象である. 内部孔の収縮は, 内部孔から解離した原子空孔が表面へ外方拡散し散逸する過程と考えられる. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空粒子およびナノチューブの高温アニールに伴う追加的なボイドの形成は, 外方拡散する原子空孔同士が再結合したものと推測される. ボイドの形成過程では, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> から

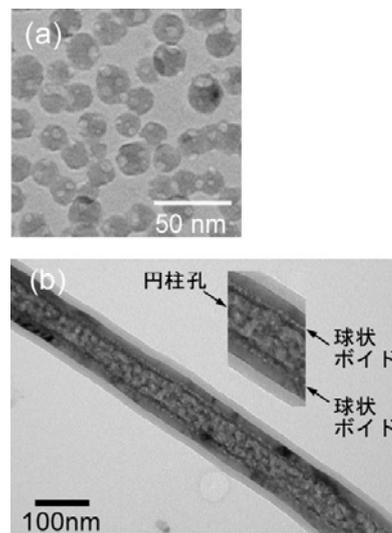


図 4. (a)Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空粒子, (b) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノチューブを大気中 500℃でアニールした後のTEM像。

$\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> への相転移が同時に起きており、ポイドの形成と相転移が関連している可能性がある。中空構造の収縮と相転移が同時に起こる条件が整うと、単一孔の中空構造から中空+ポイドの二重ポーラス構造への遷移が起こることが初めて見出された。

#### (5) 酸化物ナノ中空粒子の磁化特性

NiO および Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空粒子の 5K における磁化曲線を測定した。磁場の印加に伴って磁化が飽和へ向かう強磁性的な挙動が見られた(図 5)。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空ナノ粒子の磁場冷却測定を行ったところ、5K から 295K までの温度上昇に伴い、磁化は単調に減少した。一方、無磁場冷却下では、100K 付近まで磁化が上昇傾向を示し、その後ほぼ一定の値で推移した。100Oe の磁場を印加した場合、100K 付近に強磁性と超常磁性を分けるブロッキング温度が表れたと推測される。

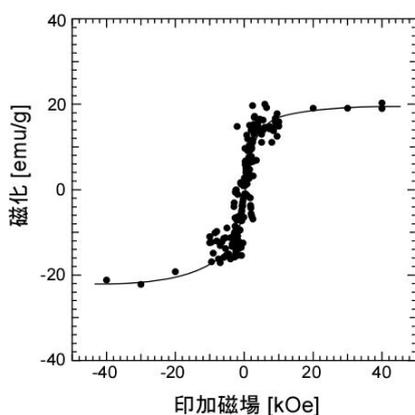


図 5. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 中空粒子の 5K における磁化曲線。

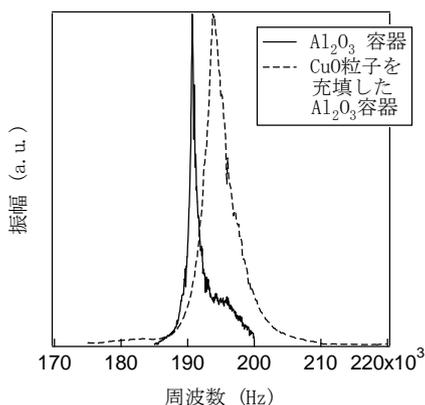


図 6. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器および CuO 中空粒子を充填した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器の共振ピーク測定。

#### (6) 酸化物ナノ中空粒子の制振特性

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器に Cu ナノ粒子および Cu ナノ粒子を酸化により中空化させた CuO ナノ粒子を充填

し、充填前後での制振性の変化を容器全体の共振ピークの半価幅により評価した。図 6 に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器と CuO ナノ粒子を充填した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器に振動を与えることにより共振させて得られた共振ピークを示す。CuO ナノ粒子を充填した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器の共振ピークの半価幅は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器の共振ピークの半価幅よりも大きく、CuO ナノ粒子の充填によって制振性が増加することがわかる。また、同様に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器に Cu ナノ粒子を充填した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 容器の共振ピークを測定した結果、CuO ナノ粒子の充填と同様に Cu ナノ粒子の充填によって制振性が増加することが明らかになった。

#### (7) まとめ

本研究によって固相拡散を利用したナノ中空球およびナノチューブの製法を確立することができた。また、酸化物ナノ中空粒子の磁気および制振特性を評価した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計19件)

- ① H. Nakajima, R. Nakamura, Fabrication of Hollow Nano Particles of Metallic Oxides Through Oxidation Process, Materials Science Forum, 査読有, Vol.638-642, 2010, pp.66-72.
- ② R. Nakamura, G. Matsubayashi, H. Tsuchiya, S. Fujimoto, H. Nakajima, Transition in the Nanoporous Structure of Iron Oxides during the Oxidation of Iron Nanoparticles and Nanowires, Acta Materialia, 査読有, Vol.57, No.14, 2009, pp.4261-4266.
- ③ H. Nakajima, R. Nakamura, Diffusion in Intermetallic Compounds and Fabrication of Hollow Nanoparticles through Kirkendall Effect, Journal of Nano Research, 査読有, Vol.7, 2009, pp.1-10.
- ④ R. Nakamura, G. Matsubayashi, H. Tsuchiya, S. Fujimoto, H. Nakajima, Formation of Oxide Nanotubes via Oxidation of Fe, Cu and Ni Nanowires and Their Structural Stability: Difference in Formation and Shrinkage Behavior of Interior Pores, Acta Materialia, 査読有, Vol. 5, No.17, 2009, pp.5046-5052.
- ⑤ R. Nakamura, H. Nakajima, H. Mori, Formation of a Nano-hole via Oxidation of Metal Nanoparticles, Defect and Diffusion Forum, 査読有, Vol. 289-292, 2009, pp.649-656.
- ⑥ R. Nakamura, H. Nakajima, H. Mori, Shrinkage of Hollow Nanoparticles of Oxides of Cu and Ni at High Temperatures, Defect and Diffusion Forum, 査読有, Vol. 289-292, 2009, pp.673-678.

- ⑦ R. Nakamura, H. Nakajima, Structural Stability of Hollow Oxide Nanoparticles at High Temperatures, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.165, 2009, p.012072.
- ⑧ 仲村龍介、松林玄、土谷博昭、藤本慎司、中嶋英雄, “銅ナノ粒子およびナノワイヤの酸化による中空構造の形成と構造安定性”, 銅と銅合金, 査読有, 48 巻, 1 号, 2009, pp.300-303.
- ⑨ R. Nakamura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Oxidation behaviour of Ni nanoparticles and formation process of hollow NiO, Philosophical Magazine, 査読有, Vol. 88, No.2, 2008, pp.257-264.
- ⑩ R. Nakamura, D. Tokozakura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Shrinking of hollow Cu<sub>2</sub>O and NiO nanoparticles at high temperatures, Acta Materialia, 査読有, Vol.56, No.18, 2008, pp.5276-5284.
- ⑪ J.-G. Lee, R. Nakamura, D. Tokozakura, H. Nakajima, H. Mori, J.H. Lee, Formation of Hollow Zinc Oxide by Oxidation and Subsequent Thermal Treatment, Solid State Phenomena, 査読有, Vo.135, 2008, pp.11-14.
- ⑫ R. Nakamura, D. Tokozakura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Formation of a Nano-pore during Oxidation of Metal Nanoparticles, Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam2007) (edited by L.P. Lefebvre, J. Banhart, D.C. Dunand, DEStech Publications, Inc.), 査読有, 2008, pp. 329-323.
- ⑬ 仲村龍介, 床桜大輔, 李正九, 森博太郎, 中嶋英雄, 金属ナノ粒子の酸化による中空構造体の形成, までりあ, Vol.47, No.7, 2008, pp.368-374. 査読有
- ⑭ R. Nakamura, J.-G. Lee, D. Tokozakura, H. Mori, H. Nakajima, “Hollow Oxide Formation via Oxidation of Al Nanoparticles at Low Temperatures”, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 544-545, 2007, pp.347-350.
- ⑮ R. Nakamura, J.-G. Lee, D. Tokozakura, H. Mori, H. Nakajima, Formation of hollow ZnO through low temperature oxidation of Zn nanoparticles, Materials Letters, 査読有, Vol.61, No.4-5, 2007, pp.1060-1063.
- ⑯ R. Nakamura, J.-G. Lee, D. Tokozakura, H. Mori, H. Nakajima, Hollow oxide formation by oxidation of Al and Cu nanoparticles, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 101, No.7, 2007, p.074303.
- ⑰ D. Tokozakura, R. Nakamura, H. Nakajima, J.-G. Lee, H. Mori, TEM observation of

oxide layer growth on Cu nanoparticles and formation process of hollow oxide particles, Journal of Materials Research, 査読有, Vol.22, No.10, 2007, pp.2930-2935.

- ⑱ R. Nakamura, D. Tokozakura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Oxidation Behavior of Cu Nanoparticles and Formation of Hollow Cu<sub>2</sub>O Spheres, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 561-565, 2007, pp.1703-1706.
- ⑲ 仲村龍介, 李正九, 森博太郎, 中嶋英雄, 酸化による金属ナノ粒子の中酸化, 触媒, Vol. 49, No.5, 2007, pp.344-349. 査読有

[学会発表](計 20 件)

- ① R. Nakamura, H. Nakajima, Formation of Hollow and Porous Nanostructures of Iron Oxides via Oxidation of Iron Nanoparticles and Nanowires, The 11th the International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), Jan. 9-12, 2010, Sakai, Japan.
- ② G. Matsubayashi, R. Nakamura, H. Tsuchiya, S. Fujimoto, H. Nakajima, Formation of Oxide Nanotubes and Bamboo-like Structures via Oxidation of Cu, Fe and Ni Nanowires, The 11th the International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), Jan. 9-12, 2010, Sakai, Japan.
- ③ 松林玄, 仲村龍介, 中嶋英雄, 土谷博昭, 藤本慎司, 金属ナノワイヤの酸化によって形成される酸化ナノチューブの構造安定性, 日本金属学会 2009 年秋期大会, 2009 年 9 月 15 日-17 日, 京都大学, 京都.
- ④ H. Nakajima, R. Nakamura, Formation of Hollow and Porous Oxides through Oxidation of Metal Nanoparticles, 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam2009), Sept. 1-4, 2009, Bratislava, Slovakia.
- ⑤ H. Nakajima, R. Nakamura, Fabrication of Hollow Nano Particles of Metallic Oxides Through Oxidation Process, International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS Processing, Fabrication, Properties, Applications (Thermec' 2009), Aug.25-29, 2009, Berlin, Germany.
- ⑥ 松林玄, 仲村龍介, 中嶋英雄, 土谷博昭, 藤本慎司, Cu, Ni および Fe ナノワイヤの酸化による酸化ナノチューブの形成, 日本金属学会 2009 年春期大会, 2009 年 3 月 28 日-30 日, 東京工業大学、

- 東京.
- ⑦ 仲村龍介、中嶋英雄、Fe および Ni ナノ粒子の酸化による酸化物中空粒子の形成とその構造安定性、日本鉄鋼協会 2009 年春季大会、2009 年 3 月 28 日-30 日、東京工業大学、東京.
- ⑧ 仲村龍介、松林玄、土谷博昭、藤本慎司、中嶋英雄、銅ナノ粒子およびナノワイヤの酸化による中空構造の形成と構造安定性、銅および銅合金技術研究会第 48 回講演大会、2008 年 11 月 22-23 日、芝浦工大、東京.
- ⑨ R. Nakamura, H. Nakajima, Structural Stability of Hollow Oxide Nanoparticles at High Temperatures, International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, Nov. 10-12, 2008, Osaka, Japan.
- ⑩ K. Taniguchi, R. Nakamura, H. Nakajima, Morphology Change of Core-Shell Type Metal Nanoparticles through Heat Treatment, International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, Nov. 10-12, 2008, Osaka, Japan.
- ⑪ R. Nakamura, H. Nakajima, H. Mori, Formation of a Nano-hole via Oxidation of Metal Nanoparticles, 7th International Conference on Diffusion in Materials (DIMAT2008), Oct. 28-31, 2008, Canary Islands, Spain.
- ⑫ R. Nakamura, H. Nakajima, H. Mori, Shrinkage of Hollow Nanoparticles of Oxides of Cu and Ni at High Temperatures, 7th International Conference on Diffusion in Materials (DIMAT2008), Oct. 28-31, 2008, Canary Islands, Spain.
- ⑬ 仲村龍介、中嶋英雄、Fe ナノ粒子の酸化によるポーラス構造の形成、日本金属学会 2008 年秋期大会、2008 年 9 月 23 日-25 日、熊本大学、熊本.
- ⑭ 谷口恒太、仲村龍介、中嶋英雄、堀史説、コア/シェル型 Au/Pd ナノ粒子におけるカーケンドールボイドの形成、日本金属学会 2008 年秋期大会、2008 年 9 月 23 日-25 日、熊本大学、熊本.
- ⑮ 谷口恒太、仲村龍介、中嶋英雄、堀史説、コア/シェル型金属ナノ粒子の相平衡と形態変化、日本金属学会 2008 年秋期大会、2008 年 9 月 23 日-25 日、熊本大学、熊本.
- ⑯ H. Nakajima, R. Nakamura, Diffusion in Intermetallic Compounds and Fabrication of Hollow Nano-particle through Kirkendall Effect, 4th International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, July 9-11, 2008, Barcelona, Spain.
- ⑰ 仲村龍介、中嶋英雄、森博太郎、真空アニ

ールによる NiO 中空ナノ粒子の収縮、日本金属学会 2008 年春期大会、2008 年 3 月 26 日-28 日、武蔵工業大学、東京.

- ⑱ R. Nakamura, D. Tokozakura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Oxidation Behavior of Cu Nanoparticles and Formation of Hollow Cu<sub>2</sub>O Spheres, The Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM6), Nov. 6-9, 2007, Jeju, Korea.
- ⑲ 仲村龍介、中嶋英雄、森博太郎、中空状酸化物粒子の高温酸化と構造安定性、日本金属学会 2007 年秋期大会、2007 年 9 月 19 日-21 日、岐阜大学、岐阜.
- ⑳ R. Nakamura, D. Tokozakura, J.-G. Lee, H. Mori, H. Nakajima, Formation of a Nano-pore during Oxidation of Metal Nanoparticles, 5th International Conference of Porous Metals and Metallic Foams (MetFoam2007), Sept. 5-7, 2007, Montreal, Canada.

[その他]

ホームページ等

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/mmp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

中嶋 英雄 (NAKAJIMA HIDEO)  
大阪大学・産業科学研究所・教授  
研究者番号:30134042

### (2)研究分担者

仲村 龍介 (NAKAMURA RYUSUKE)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号:70396513

多根 正和 (TANE MASAKAZU)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号:80379099

鈴木 進補 (SUZUKI SHINSUKE)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号:10437345

2006 年 4 月～2009 年 3 月

上野 俊吉 (UENO SHUNKICHI)  
大阪大学・産業科学研究所・特任准教授  
研究者番号:60339801

2006 年 4 月～2009 年 3 月

金 相烈 (KIM SANG-YOUL)  
大阪大学・産業科学研究所・特任研究員  
研究者番号:50448015

2007 年 4 月～2008 年 8 月

玄 丞均 (HYUN SOONG-KEUN)  
大阪大学・産業科学研究所・特任准教授  
研究者番号:50346178

2005 年 4 月～2007 年 3 月