

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360302

研究課題名（和文） 水溶液科学に立脚した階層的集積化ナノセラミックスの合成と界面機能分野への応用

研究課題名（英文） Preparation of hierarchically structured nano-ceramics based on aqueous solution science and exploration of their function originating from interfacial properties.

研究代表者

今井 宏明 (IMAI HIROAKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70255595

研究成果の概要（和文）：

本研究では、水溶液系における金属イオンと有機分子やマトリクスとの相互作用を活用し、酸化物系およびリン酸塩系材料においてバイオミネラルに類似した階層的集積化ナノ結晶の構築法を検討するとともに、それらの電気化学・光触媒・生体適合性などの機能の調査をおこなった。マトリクスを利用した結晶成長により合成したマンガン系およびスズ系酸化物の階層的集積化ナノ結晶では、合成条件によって多様な酸化状態の化合物の作製が可能であり、Li イオン二次電池の正極および負極活物質としてサイクル特性・レート特性に優れた機能を有することを見出した。また、中間体を経由した合成ルートを用いることでナノロッドやナノシートから構成された水酸アパタイトの階層的集積化ナノ結晶が得られ、細胞との適合性について検討をおこなった。その結果、水酸アパタイトのナノ構造が各種の細胞の接着性や増殖性に影響を及ぼし、その活性をコントロールできることが示唆された。原料や反応条件を制御して水溶液から析出させた二酸化チタンの階層的集積化ナノ結晶では、酸化・還元反応の選択性をもつ光触媒活性を付与することが可能であった。以上のように、多様な機能性材料において階層的集積化ナノ結晶の作製手法を開発するとともに、それらの優れた機能性を実証することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, synthesis of biomimetic hierarchical architectures of inorganic materials was investigated for application of the specific nanostructure to various functional materials including electrodes, catalysts, and bioactive devices. The hierarchical crystals of oxides and phosphates, such as manganese oxides, tin oxides, titanium dioxide, and hydroxyapatite, were successfully prepared through crystal growth with specific interaction between metal ions and organic molecules in aqueous solution systems. These materials were found to exhibit excellent performance as electrodes of lithium-ion secondary battery, reaction-selective photocatalysts, and cell-selective scaffolds. These results indicate that the hierarchical structures consisting of tailored nanocrystals have high potential in a wide variety of application fields.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：無機材料

キーワード：結晶成長、ソフトプロセス、生体材料、エネルギー材料、バイオミネラル

### 1. 研究開始当初の背景

骨・歯・貝殻などがつくられるバイオミネラル化は、常温・常圧・水溶液中の無機材料合成プロセスであり、セラミックスの新しい合成法のヒントとして着目されている。これまでに、金属酸化物を析出させる水溶液プロセスは盛んに研究されているが、低温・常圧で合成可能であること以外に大きなメリットが認識されておらず、高品質な機能セラミックスを合成できる気相法などの既存の材料プロセスを代替するには至っていない。また、バイオミネラルを模倣した自己組織化を用いた研究では、ナノシート、ワイヤ、多孔質などの多様な形態の無機材料が得られているが、形態観察と形成メカニズムの解明に留まっており、機能性発現へのアプローチはあまり見られない。すなわち、水溶液プロセスは、省エネルギーやナノスケール形態制御などの高いポテンシャルを有するにもかかわらず、特有な機能性の追及が不十分であるため実用的な展開はほとんど進められていなかった。

バイオミネラルで見られるような階層的集積化ナノ構造（結晶方位がそろっている場合はメソクリスタルと呼ばれる）は、既存プロセスでは実現し得ない特異的な形態であり、その構築には、有機分子との相互作用による自己組織化を利用した水溶液プロセスの特徴が最大限に発揮できる。また、階層的集積化ナノ構造は、単純な多結晶の集積体とは異なり、多孔質で高比表面積であるばかりでなく、結晶の連結による機械的強度の増大や有機分子による柔軟性の付与、方位が揃った特異結晶面の活用や電子移動度の増大などの効果が期待される。したがって、階層的ナノセラミックスでは、これまでに実現しえなかった高い機能性を提供できることが予想される。

### 2. 研究の目的

本研究では、水溶液系における金属イオンと有機分子やマトリクスとの相互作用を活用し、界面機能発現に適したセラミックス系においてバイオミネラルに類似した階層的集積化ナノ結晶を構築するとともに、それらの優れた機能の実証を目的とする。階層的集積化ナノ結晶では、ナノサイズによる高い比表面積、配向構造による特異結晶面の制御、多孔質構造による物質移動の制御、連結結晶構造による高い電子移動度や機械的強度などが期待され、無機イオンや有機分子などの物質移動をともなう界面反応において高い機能を発揮することが見込まれる。

### 3. 研究の方法

ここでは、図1に示すように、物質交換と吸着・反応が重要な要素である界面機能として、電気化学的機能、触媒機能、生体機能の3分野を取り上げて機能セラミックスを選択し、それぞれ、リチウム電池電極材料（酸化マンガン、酸化スズ）、光触媒材料（酸化チタン）、生体活性材料（水酸アパタイト）を研究対象とした。酸化物半導体および生体関連セラミックスにおいて階層的集積化ナノ結晶を作製する方法論を確立するとともに、リチウムイオンの移動・挿入をともなう電極反応（電気化学的機能）、有機分子の移動・吸着と酸化・還元をおこなう光触媒反応、生体分子の吸着をともなう細胞接着に関して検討をおこなった。

ナノサイズの結晶形成には、研究代表者が、これまでの研究で見出した、水溶液中の有機分子と金属イオンの“強い相互作用”に基づく準安定前駆体の形成、および、有機ゲルなどの“弱い相互作用”に基づくマトリクス効果を活用した。対象とするセラミックスと有機分子の相互作用を理解し、これらの2つの手法のコンビネーションによって実用的な機能性をもつ階層的集積化ナノ結晶構造の合成に適したプロセスの確立を目指した。

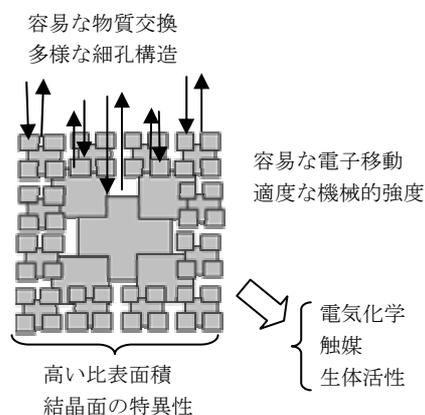


図1 階層的集積化ナノ結晶の概念図

### 4. 研究成果

(1) ゲルマトリクスを利用した酸化物系およびリン酸塩系階層的集積化ナノ結晶の合成と電気化学的特性の評価（論文(13),(17)）

本研究では、寒天ゲルを用いて  $\text{MnCO}_3$  メソクリスタルを合成、これを前駆体に適切な処理を行うことで多様なマンガン酸化物の階層的集積化ナノ結晶を作製するとともに、リチウムイオン二次電池電極活物質としての電気化学的特性評価を行った。

バイオミネラルに類似した 50~300 nm 程度

の菱面体ナノ構造をもつ  $\text{MnCO}_3$  メソクリスタルは、 $\text{Mn}^{2+}$ 含有寒天ゲルに $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ を加えることで析出させた(図 2(a,c))。この $\text{MnCO}_3$ を前駆体として還元雰囲気下で焼成することにより $\text{MnO}$ 、大気中で焼成し $\text{Mn}_2\text{O}_3$ および $\text{Mn}_3\text{O}_8$ を作製した。Liとの反応により様々な組成のマング酸リチウムの階層的集積化ナノ結晶(図 2(b,d))を合成した。 $\text{MnO}$ や $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ は、50~200 nm程度の結晶方位を揃えたナノ結晶が連結した構造であり、水熱反応を用いた場合には結晶が方位をそろえたメソクリスタルであった。

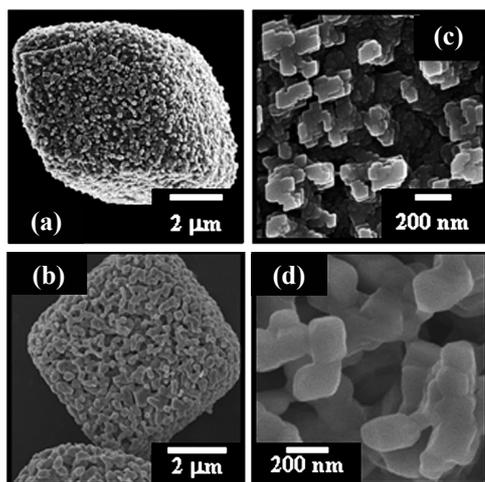


図2  $\text{MnCO}_3$ および $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ の階層的集積化ナノ結晶のSEM像

また、前駆体にCoを固溶させることにより、Coドーブ $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ および $\text{MnO}$ -金属Co複合体による階層的集積化ナノ結晶の合成に成功した。これらのリチウムイオン二次電池正極および負極活物質としての電気化学的特性を評価したところ、優れたレート特性とサイクル特性をもつことが明らかとなった(図3)。

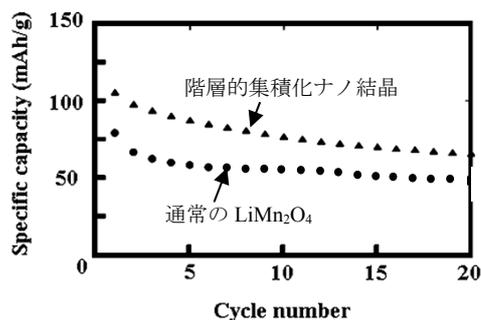


図3 Liイオン脱挿入反応のサイクル特性(階層的集積化結晶では劣化が少ない)

(2) 中間体を利用した $\text{SnO}$ 階層的集積化ナノ結晶の合成と電池応用・光電流特性(論文(6),(12),(20))

ここでは、中間体を利用する多段階プロセスによる $\text{SnO}$ ナノ構造体の作製を検討した。高過飽和水溶液中において生成する中間体 $\text{Sn}_6\text{O}_4(\text{OH})_4$ の溶解速度を制御することで、特異的なメッシュ状ナノ構造を有する $\text{SnO}$ 結晶(図 4(a,b))を成長させることに成功した。さらに、このような $\text{SnO}$ ナノ構造体のリチウム二次電池負極への応用について調査し、結晶性および多孔性に優れたメッシュ状の $\text{SnO}$ 結晶は、リチウム二次電池負極特性の評価において平滑なプレート状の $\text{SnO}$ 電極に比べて高い耐久性を示すことを見出した(図 4(c,d))。

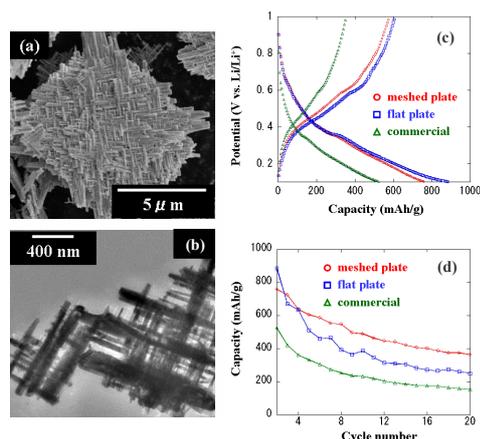


図4 メッシュ状 $\text{SnO}$ 階層的集積化ナノ結晶のSEM像(a,b)とそのLiイオン電極負極活物質としての充放電特性(c)とサイクル特性(d)(メッシュ構造は、市販品および平滑な結晶よりも劣化しにくい)

また、 $\text{SnO}$ ナノシート集積体ではバルクでは見られない直接遷移による吸収が顕在化し、電子・正孔対による光電流が観察された。さらに、カーボンナノファイバーとの複合化によりLi二次電池負極としての優れたサイクル特性も認められた。

(3) 中間体を利用した水酸アパタイト 合成と生体応用(論文(2),(15))

水酸アパタイト(HA)は天然骨の主成分であり、生体適合性が高いため生体材料として臨床的に用いられている。ここでは、リン酸カルシウム無水物(DCP)を中間体として様々な形態をもつHA階層的集積化ナノ結晶の作製に成功した。このHAナノ構造が細胞に与える影響について調査し、細胞活性のコントロールの可能性を検討した。

中間体であるDCPのペレットを異なる条件で処理することで、図5に示すような、直径30~100 nm程度の繊維状HA結晶、直径20~25 nmの微結晶が束になった針状HA結晶、厚さ25 nm幅260 nm程度のフレーク状HA結晶集積体をペレット表面に合成した。このナノ構造を有するHAペレットに骨芽細胞を

播種した結果、ペレットを構成している HA 結晶の一次粒子サイズが低下するほど、その上に接着した細胞の機能が抑制されること、粒子サイズが 100 nm 以下では骨芽細胞はアポトーシスに陥ることが判明した。線維芽細胞は、30 nm 以下の結晶上では線維芽細胞は骨芽細胞同様の活性低下を示したが、50-100 nm の結晶上では緻密な HA 上に比べ線維芽細胞の初期接着性や増殖性が向上することが判明した。以上の結果は、細胞の活性を HA 階層的集積化ナノ結晶の構造により制御可能であることを示唆しており、新規な人工骨や細胞培養用足場材料の基礎的知見として有用である。

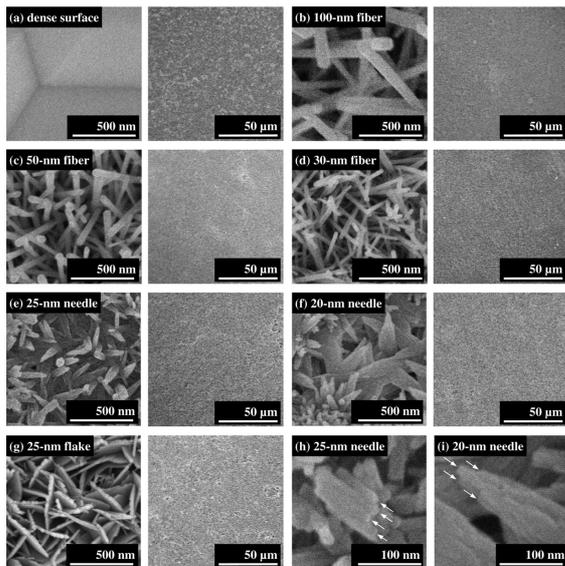


図 5 HA 階層的集積化ナノ結晶の SEM 像

(4) TiO<sub>2</sub> 階層的集積化ナノ結晶の合成と光触媒応用 (論文(8))

二酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) の光触媒作用は、非選択的な有機物の分解に応用されているが、反応選択性が要求される水分解や有機合成に関しては研究段階にある。これは、アナターゼ型 TiO<sub>2</sub> において光励起された電子正孔対は反応性が高く、選択性を付与することが困難なためである。本研究では、ルチル型 TiO<sub>2</sub> の結晶面特異性に着目し、ナノスケールの細孔構造を利用して選択的な光触媒反応について検討をおこなった。

水溶性チタン化合物の水溶液において、pH・濃度・温度を調整することで形態・サイズの異なるルチル型 TiO<sub>2</sub> 階層的集積化ナノ結晶が得られた。条件により結晶形、形態、サイズの制御が可能であり、ここでは、TiOSO<sub>4</sub> および TiCl<sub>3</sub> 水溶液を用い、図 6 に示すような、直径約 5 nm の c 軸方向に伸長した針状ナノ結晶が方位を揃えた集積体、および、ランダムに凝集した直径約 20 nm の階層的集積化針状ナノ結晶、あるいは、シート状階層的集積化ナノ結晶を得た。

紫外光照射による水溶液中の Cr<sup>6+</sup> の還元、酢酸の酸化、メチレンブルーの光触媒反応等によって、ルチル階層的集積化ナノ結晶は、アナターゼ結晶では認められない反応選択性はもち、ナノスケールの形態と集積構造を最適化することで、様々な有機物の反応の選択性を付与することが期待された。

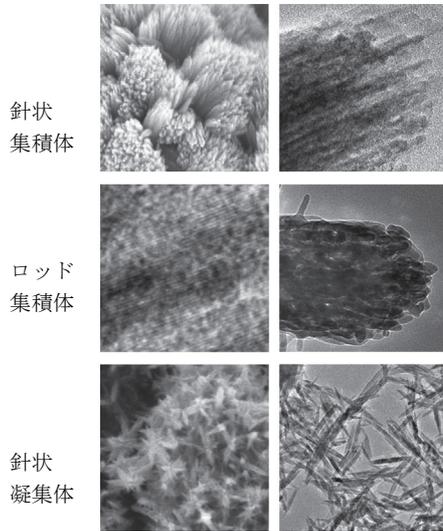


図 6 TiO<sub>2</sub> 階層的集積化ナノ結晶の SEM 像

(5) 成果のまとめ

上記および関連の研究を通して、有機分子およびマトリクスとの相互作用を用いることで、さまざまな酸化物およびリン酸塩からなる階層的集積化ナノ結晶の作製手法および多様な新規構造体の開発に成功した。さらに、界面の機能が関与する電気化学・触媒・生体材料の分野において、階層的集積化ナノ結晶が特異で優れた性能を有することを実証した。

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 20 件)

- (1) T. Kawano, H. Imai, “Nanoscale morphological Design of ZnO Crystals Grown in Aqueous Solutions”, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 査読有, **118**, 2010, 969-976
- (2) S. Okada, A. Nagai, Y. Oaki, J. Komotori, H. Imai, “Control of Cellular Activity of Fibroblasts on Size-Tuned Fibrous Hydroxyapatite Nanocrystals”, *Acta Biomaterialia*, 査読有, **7**, 2010, 1290-1297
- (3) 今井宏明, “バイオミネラルに学ぶメソクリスタルの合成と応用”, *触媒*, 査読有, **53**, 2010, 44-48
- (4) M. Ohba, Y. Oaki, H. Imai, “A Microbial-Mineralization-Inspired Approach for Synthesis of Manganese Oxide Nanostructures with

Controlled Oxidation States and Morphologies”, *Advanced Functional Materials*, 査読有, **20**, 2010, 4279-4286

(5) Y. Oaki, T. Anzai, H. Imai, “Homogeneous and Disordered Assembly of Densely-Packed Nanocrystals”, *Advanced Functional Materials*, 査読有, **20**, 2010, 4127-4132

(6) K. Sakaushi, Y. Oaki, H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, “Aqueous Solution Synthesis of SnO Nanostructures with Tuned Optical Absorption Behavior and Photoelectrochemical Properties through Morphological Evolution”, *Nanoscale*, 査読有, **2**, 2010, 2424-2430

(7) D. Tanaka, Y. Oaki, H. Imai, “Enhanced photocatalytic activity of quantum-confined tungsten trioxide nanoparticles in mesoporous silica”, *Chemical Communications*, 査読有, **46**, 2010, 5286-5288

(8) Y. Tokunaga, H. Uchiyama, Y. Oaki, H. Imai, “Specific Photocatalytic Performance of Nanostructured Rutile-Type TiO<sub>2</sub>: Selective Oxidation of Thiazin Dye with a Bundled Architecture consisting of Oriented Nanoneedles”, *Science of Advanced Materials*, 査読有, **2**, 2010, 69-73

(9) S. Hirakura, T. Kobayashi, S. Ono, Y. Oaki, H. Imai, “Fibrous nanocrystals of hydroxyapatite loaded with TiO<sub>2</sub> nanoparticles for the capture and photocatalytic decomposition of specific proteins”, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 査読有, **79**, 2010, 131-135

(10) H. Uchiyama, H. Imai, “Preparation of LiFePO<sub>4</sub> Mesocrystals Consisting of Nanorods through Organic-Mediated Parallel Growth from a Precursor Phase”, *Crystal Growth and Design*, 査読有, **10**, 2010, 1777-1781

(11) H. Imai, Y. Oaki, “Emergence of helical morphologies with crystals: twisted growth under diffusion-limited conditions and chirality control with molecular recognition”, *Crystal Engineering Communications*, 査読有, **12**, 2010, 1679-1687

(12) K. Sakaushi, Y. Oaki, H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, “Aqueous solution synthesis of SnO nanosheets and their photoelectrochemical and electrochemical properties”, *Small*, 査読有, **6**, 2010, 776-781

(13) T. Kokubu, H. Uchiyama, Y. Oaki, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, “Biomimetic synthesis of metal ion-doped hierarchical crystals using a gel matrix: formation of cobalt-doped LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> via cobalt-doped MnCO<sub>3</sub> precursor and the improved electrochemical properties”, *Chemistry - An Asian Journal*, 査読有, **5**, 2010, 792-798

(14) H. Imai, Y. Oaki, “Bioinspired Hierarchical Crystals”, *Materials Research Bulletin*, 査読有,

**35**, 2009, 138-144

(15) S. Okada, H. Ito, A. Nagai, J. Komotori, H. Imai, “Adhesion of osteoblast-like cells on nanostructured hydroxyapatite”, *Acta Biomaterialia*, 査読有, **6**, 2009, 591-597

(16) 今井宏明, バイオミネラル類似ナノ結晶集積体の合成”, *セラミックス*, 査読無, **44**, 2009, 626-629

(17) H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, “Three-dimensional architectures of spinel-type LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> prepared from biomimetic porous carbonates and their application to a cathode for lithium-ion batteries”, *Journal of Materials Chemistry*, 査読有, **19**, 2009, 4012-4016

(18) H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, H. Imai, “Lithium insertion into nanometer-sized rutile-type Ti<sub>x</sub>Sn<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> solid solutions”, *Solid State Ionics*, 査読有, **180**, 2009, 956-960

(19) Y. Oaki, H. Imai, “Photochemical reactions in nanoscopic organic domains generated from oriented crystals with polymers: nanocrystalline mosaics as a new family of host materials”, *The Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 査読有, **82**, 2009, 613-617

(20) H. Uchiyama, H. Imai, “Matrix-mediated formation of hierarchically structured SnO crystals as intermediates between single crystals and polycrystalline aggregates”, *Langmuir*, 査読有, **24**, 2008, 9038-9042,

[学会発表] (計 30 件)

(1) 都築太郎, 岡田伸之介, 緒明佑哉, 今井宏明, “炭酸含有水酸アパタイトのナノ形態制御と生体親和性の評価”, 第 14 回生体関連セラミックス討論会, 2010 年 12 月 3 日, 京都

(2) S. Okada, A. Nagai, Y. Oaki, J. Komotori, and H. Imai, “Activities of Osteoblast and Fibroblast on Nanostructured Hydroxyapatite Surfaces”, Pacificchem 2010, December 18, 2010, Honolulu, USA

(3) H. Watanabe, K. Fujikata, Y. Oaki, and H. Imai, “Solvent-Free Syntheses of Super-microporous Silica Templated by Short-Chain Surfactants”, 3rd International Congress on Ceramics, November 16, 2010, Osaka, Japan, 他 5 件

(4) K. Fujikata, H. Watanabe, Y. Oaki, and H. Imai, “Solvent-free syntheses of super-microporous silica using short-chain surfactant template”, 2nd Japan-Korea Joint Forum on Sol-Gel Science and Technology, June 28, 2010, Osaka, Japan

(5) K. Ukigaya, Y. Oaki, M. Yamaguchi, H. Nakayama, and H. Imai, “Ultralow Refractive Index Coating Consisting of Mesoporous Silica Nanoparticles and Their Modification with Organic Groups”, 2nd Japan-Korea Joint Forum

on Sol-Gel Science and Technology, June 28, 2010, Osaka, Japan

(6) H. Imai, "Preparation of Mesoporous Silica Nanoparticles and Its Application to Ultralow Refractive Index Coatings", 2nd Japan-Korea Joint Forum on Sol-Gel Science and Technology, June 28, 2010, Osaka, Japan

(7) H. Imai, "Formation of Hierarchically Structured Crystals through Bio-inspired Processing", International Conferences on Modern Materials & Technologies, 2010/6/10, Montecatini Terme, Tuscany, Italy

(8) 坂牛健, 緒明佑哉, 内山弘章, 細野英司, 周豪慎, 今井宏明, "SnOナノシートの水溶液合成と光電気化学特性", 日本セラミックス協会2010年会, 2010年3月24日, 東京農工大学・東京, 他4件

(9) 小林徹, 岡田伸之介, 緒明佑哉, 今井宏明, "特定結晶面を露出した水酸アパタイトの合成と特性評価", 第48回セラミックス基礎科学討論会, 2010年1月12日, 沖縄コンベンションセンター・沖縄, 他1件

(10) 今井宏明, "バイオミネラル類似ナノ結晶集積体の合成と応用 (招待講演)", 第62回コロイドおよび界面化学討論会, 2009年9月17日, 岡山理科大学・岡山

(11) 坂牛健, 今井宏明, 細野英司, 周豪慎, "水溶液プロセスによる階層的ナノ結晶SnOの合成", 第22回秋季シンポジウム, 2009年9月17日, 愛媛大学・松山

(12) H. Imai, Y. Oaki, T. Terada, A. Kotachi, Y. Nishino, "Hierarchical structured CaCO<sub>3</sub>: from biominerals to biomimetic composites prepared with organic and inorganic electrolytes", European Congress on Advanced Materials and Processes, 2009年9月10日, The Scottish Exhibition and Conference Centre, Glasgow, UK

(13) H. Imai, H. Uchiyama, Y. Oaki, A. Kotachi, T. Kawano, K. Furuichi, T. Kobayashi, R. Ise, "Formation of hierarchical structured crystals through parallel and/or segmented growth," European Congress on Advanced Materials and Processes (Invited)", European Congress on Advanced Materials and Processes, 2009年9月7日, The Scottish Exhibition and Conference Centre, Glasgow, UK

(14) H. Imai, "Formation of Hierarchical Architectures through Self-Directed Crystal Growth in Organic-Inorganic Combined Systems (Invited)", Joint U.S.-Japan Workshop on Future Trends in Organic/Inorganic Nanocomposite Hybrid Materials, 2009年5月15日, ダイセル化学研修センター・姫路

(15) H. Imai, "Formation of Hierarchical Architectures through Self-Directed Crystal Growth in Organic-Inorganic Combined Systems (Invited)", Materials Research Society Spring

Meeting, 2009年4月15日, Marriott, San Francisco USA

(16) 平倉将治, 小林徹, 今井宏明, "水酸アパタイトナノ結晶におけるタンパク質吸着と成長制御", 第47回セラミックス基礎科学討論会, 2009年1月8日, 大阪国際会議場

(17) H. Imai, H. Uchiyama, E. Hosono, H. Zhou, I. Honma, "Mesocrystals formed via segmented crystal growth as a classical yet new type of inorganic nanomaterials and their application to electrodes", The IUMRS International Conference in Asia 2008, 2008年12月10日, 名古屋国際会議場

(18) 内山弘章, 國分貴雄, 細野英司, 周豪慎, 本間格, "中間体を用いた水溶液プロセスによるLiFePO<sub>4</sub>の形態制御およびLiイオン二次電池正極への応用", 日本セラミックス協会第21回秋季シンポジウム, 2008年9月19日, 北九州国際会議場, 他5件

〔図書〕(計1件)

今井宏明 (分担執筆), テクノプラザ, "セラミックデータブック バイオミネラルのナノ構造に学ぶ材料の開発 2010/11", 2010, 68-72

〔産業財産権〕

○出願状況 (計2件)

名称: 炭酸カルシウム・有機高分子・機能分子複合材料とその製造方法

発明者: 今井宏明・緒明佑哉

権利者: 慶應義塾大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-064149

出願年月日: 2010年3月19日

国内外の別: 国内

名称: 複合体微粒子及びその製造方法

発明者: 今井宏明・緒明佑哉

権利者: 慶應義塾大学

種類: 特許

番号: 特願 2010-177326

出願年月日: 2010年8月6日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

今井 宏明 (IMAI HIROAKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 70255595

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし