

## 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 4 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20111005

研究課題名（和文） 遷移金属酸化物ナノ構造体における階層を越えたプログラム自己創発化学

研究課題名（英文） Programmed emergence phenomena in oxide nanostructures

研究代表者

川合 知二 (KAWAI TOMOJI)

大阪大学・産業科学研究所・特任教授（常勤）

研究者番号：20092546

研究成果の概要（和文）：無機材料である遷移金属酸化物を創発化学の概念のもとに外場環境に対して自在に変化する動的非平衡プロセスを介して三次元ナノ構造化するメカニズムを解明し、従来は困難であった階層を越えた高次ナノ構造体を実現した。①金属触媒を介した VLS 反応法を用いて、遷移金属酸化物一次元ナノ構造体を作製する動的非平衡メカニズムを解明した。②階層を越えた高次ナノ構造体を作製する逐次 VLS 反応法を構築し、金属触媒の空間位置制御を可能とする動的メカニズムを解明した。③上記動的非平衡メカニズムを利用して、所望の位置に所望の機能を有する遷移金属酸化物材料を位置制御するプロセスを構築し、マクロな機能性を抽出した。具体的には、生体分子が行っている制限ナノ空間におけるシグナルをマクロな情報量として取り出す動的プロセス及びナノ構造を無機化学材料ナノ構造体において実現した。

研究成果の概要（英文）：Three dimensional nanomechanism of structure formation through dynamic nonequilibrium process was elucidated based on a concept of the emergence chemistry for transition metal oxide and realized the high level nano structures. (1)Using the VLS reaction method through the metal catalyst, we elucidated dynamic nonequilibrium mechanism to make one dimension of transition metal oxide nanostructure. (2)We applied the sequential VLS reaction method to make the highly advanced nanostructure beyond the hierarchy and elucidated dynamic mechanism to enable the space positioning of the metal catalyst. (3)Using the dynamic nonequilibrium mechanism mentioned above, we built a process to perform positioning of the transition metal oxide materials which has a desired function at the desired position and extracted the functionality. Specifically, we realized a dynamic process in the limited nano-space where biological molecules pass through.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2009年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2010年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2011年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2012年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
総計	77,600,000	23,280,000	100,880,000

研究分野：多機能調和人工生体情報材料の創成、DNAナノテクノロジー

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ材料・ナノバイオサイエンス、材料化学、機能材料・デバイス

キーワード：遷移金属酸化物、ナノワイヤ構造、創発化学、高次ナノ構造、気液固反応法

### 1. 研究開始当初の背景

我々はこれまでに多彩な物性を有する遷移金属酸化物の複合構造体に着目し、積層型薄膜構造体を利用して自然界に存在し得ない複合構造体を人工的に創製し、その界面における原子間相互作用に着目した研究を行ってきた。(Nature 349, 200 (1991), Science 267, 71 (1995), Science 280, 1064 (1998)) これらの構造は基板と垂直方向においてのみナノ構造制御されており、従来の静的平衡プロセスを用いた手法では、高次ナノ構造へと展開するには原理的な限界が存在する。

### 2. 研究の目的

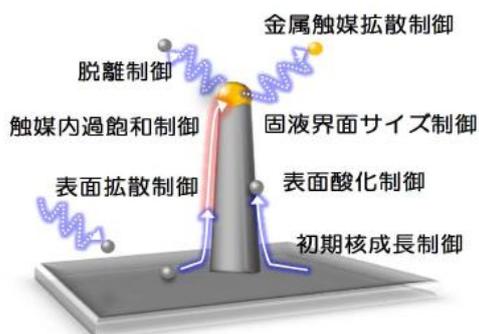
本研究は、外場環境に対して自在に変化する動的非平衡プロセスを介して無機化学材料である遷移金属酸化物の階層を越えた高次ナノ構造と機能を創発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

動的非平衡プロセスである気-液-固相 (VLS) 反応法における外場環境揺らぎを規定することにより、従来技術では困難であった階層構造を有する遷移金属酸化物高次ナノ構造体を創発する。本研究目的を達成する為に、以下に示す遷移金属酸化物の動的非平衡プロセスにおける学理を研究期間内に明らかにする。

1. 金属触媒を介した VLS 反応法を用いて、遷移金属酸化物一次元ナノ構造体の作製を可能とする動的非平衡メカニズムを創発化学の観点から解明する。
2. 階層を越えた高次ナノ構造体を作製する逐次 VLS 反応法を構築し、高次ナノ構造体の構造制御を可能とする動的非平衡プロセスの原理を解明する。
3. 上記動的非平衡メカニズムを利用して、所望の位置に所望の機能を有する遷移金属酸化物材料を位置制御するプロセスを構築し、高次ナノ構造体を創製する。具体的には、生体分子が行っている制限ナノ空間における

#### VLS 動的非平衡プロセス



シグナルをマクロな情報量として取り出す動的プロセス及びナノ構造を無機化学材料ナノ構造体において実現する。

### 4. 研究成果

(1) H20 年度：金属触媒を介した VLS 反応法を用いて金属酸化物一次元ナノ構造体を作製した。構造形成は気相レーザ MBE 法を用いて行った。本合成プロセスは本質的に多種の因子が絡み合った動的非平衡プロセスであり、その制御性の困難さが現在大きな問題となっている。そこで、本研究ではこれらの影響因子（温度、雰囲気圧力、金属触媒量、動的な操作因子等）を創発化学の観点で検討することで、気相-液相-固相に跨る物質移動の動的な非平衡メカニズムの本質に迫ることを試みた。金属触媒を介した気-液-固相 (VLS) 反応法による酸化物一次元ナノ構造体の創製を行った。影響因子（温度、雰囲気圧力、金属触媒量、動的な操作因子等）を詳細に検討し、気相-液相-固相に跨る物質移動の動的な非平衡メカニズムを解明した。その結果、基板表面上のアドアトム拡散が上記 VLS 成長に著しい影響を与えることを明らかにした。アドアトム表面拡散を制御する為に、雰囲気温度、全圧、酸素分圧等を系統的に変化させることによりそのメカニズムを明らかにした。これら一連の結果から、VLS ナノワイヤ成長と VS 結晶成長が常に競合しており、ランダムウォークしているアドアトムが選択的に金属触媒に取り込まれる過程が非平衡状態にあることを明らかにした。これらの結果を更に、本領域内の理論班（九州大 甲斐研究室）との協調により上記動的な相関相互作用力を LJ モデルに基づく MD 計算によりアプローチした。

(2) H21 年度：気体・液体・固体 (VLS) 反応法を用いて作製される酸化物ナノワイヤ形成における創発現象を探索した。本年度は、酸化錫ナノワイヤ VLS 形成プロセスにおけるアンチモン不純物ドーピングの効果を検証した。その結果、以下の事項が明らかとなった。第一に不純物ドーパント量が低濃度の場合、ナノワイヤ中に取り込まれる不純物濃度と相関した電気伝導度が観察された。ここで重要な点は、その不純物ドーピング過程が強い動力学特性を示したことにある。具体的には、供給原料中の不純物濃度を増加させてもナノワイヤ中に取り込まれる不純物濃度には上限が存在することを明らかにした。従来は、供給原料中の濃度がナノワイヤ中へ取り込まれる不純物濃度と相関することを仮定して議論が行われてきたが、本結果は VLS 過程における強い動力学特性を考慮する必要性を示した。第二に、供給原料中の不純物濃度を過剰に設定した場合に、

長周期 (200nm) のアーチ状のメソ構造が発現することを明らかにした。この発現したメソ構造が雰囲気中に存在する不純物がナノワイヤ構造中に取り込まれて起こる熱力学的安定構造に起因するのではなく、VLS成長中の固液界面近傍に不純物が存在することに関係していることを、詳細な構造・組成分析 (HRTEM、STEM等) の結果から明らかにした。これらの結果は、観察されたメソ構造が固液結晶界面の不安定性に起因する創発現象に由来することを明らかにするものである。

(3) H22 年度 : 気 - 液 - 固相 (Vapor-Liquid-Solid: VLS) 反応法を用いて階層構造を有する金属酸化物一次元ナノ構造体を作製した。着目するのは三相に跨る物質移動現象の動的非平衡プロセス (非平衡定常状態) であり、プロセスにおいて意図的に外部刺激を加えることによって結晶成長面である固液界面に揺らぎを導入し階層構造を創発することを試みた。具体的にはVLS結晶成長過程において外部刺激として不純物ドーピング、雰囲気圧変調、温度変調等を導入し、その刺激に対する階層構造への影響を検討した。構造評価を電子顕微鏡及び4軸X線回折により行った。材料系として酸化錫ナノワイヤへSb及びTa等のドナーを不純物ドーパントとして導入した系を取り上げた。更に、領域内の理論班 (九州大学 甲斐研) と共同で発現する創発現象を分子動力学理論計算により原子レベルから解明することを試みた。その結果、理論が定性的に予測するように不純物ドーパントの蒸気圧に対応してナノワイヤ中の不純物ドーパント空間分布が系統的に変化することを見出した。具体的には、不純物ドーパントの蒸気圧がナノワイヤ構成原子よりも著しく低い場合、ナノワイヤ表面に選択的に分布するナノ構造体を自発的に形成する。また均一な不純物ドーピングを実現するためには、ナノワイヤ構成原子と不純物ドーパント原子の蒸気圧を同程度に設計することが本質である。これらの結果は、従来は完全に経験的に探索されていたVLSナノワイヤへの不純物ドーピングプロセスに普遍的な材料設計指針を与える極めて重要な知見であり、今後は更にこれらの相互作用の背後に潜む創発メカニズムを理論班との共同研究を介して理論的・実験的に解明することが鍵となる。このように実験的な検証に理論的な考察を加味することにより、現在、VLS結晶成長過程における創発現象を体系的に解明しつつある。

(4) H23 年度 : 自然界で生命体・生体分子が織り成す階層的な自己組織化高次ナノ構造体では、僅かな外場環境変化に対して巧みに反応し、三次元的に自ら組みあがり、動き出し、機能するナノ構造体を作製する洗練された

動的非平衡プロセスが存在し、そのプロセスの精密さは圧巻である。この“創発”的な動的非平衡プロセスは、一義的な従来材料プロセスとは原理的に異なり、現状でナノ無機材料研究が根本的に抱える諸問題を打破する一つの手法として極めて重要である。一方、無機化学材料の分野において機能材料の創製・探索は、原子層制御や界面制御等に見られるように“精密に規定されたプロセス”で無機化学材料構造体を創製することによって進歩発展してきた。今後、生体系に倣った“創発”的な動的非平衡プロセスを無機化学材料に適用し、従来困難であった空間的に構造制御されたナノ構造体を自発的に創製することは極めて重要である。本新学術領域では理論・実験Grの共同研究により“1次元ナノワイヤ構造化する創発メカニズム”の本質・原理を解明し、従来完全に経験則と勘に頼っていたナノワイヤ構造化を創発理論メカニズムに基づいて物質設計することを目的としている。本年度は、1) 理論計算と実験との比較検討による酸化物ナノワイヤ構造形成における普遍的な原理の追及と2) 従来作製が不可能であった機能性酸化物材料のナノワイヤ構造化を行った。この創発メカニズムをより一般的に無機ナノワイヤ形成に適用し、従来法の枠組みでは作製が不可能であった多種多様な機能性金属酸化物ナノワイヤ群を創製することに成功した。本結果は、従来は完全に経験的・職人的に探索されていたVLSナノワイヤ形成に普遍的な材料設計指針を与える極めて重要な知見である。

(5) H24 年度 : “動的非平衡プロセスである気-液-固相 (Vapor-Liquid-Solid: VLS) 反応法”に着目し、遷移金属酸化物を創発的に低次元ナノ構造化するメカニズムを解明し、従来困難であった階層を越えた遷移金属酸化物の高次ナノ構造体を実現した。最終年度である本年度はこれまでに行ってきた新学術領域研究の総仕上げとして、九大・甲斐班との連携を介した理論・実験の比較検討により1次元ナノワイヤ形成における普遍的な原理の追及と、その原理に基づいて従来技術では不可能であった機能性材料のナノワイヤ構造化を実証した。これまでに構築したナノワイヤ成長に関わる分子動力学計算結果と実験結果のより定量的な比較検討を行った。これに伴いこれまでは勘と経験に頼っていた1次元ナノワイヤ形成における基礎科学に基づく普遍的な材料設計指針を与えた。このように見出された1次元ナノワイヤ構造を形成する創発原理に基づき、従来技術の枠組みでは形成不可能であった機能性ナノワイヤ化を実現した。その代表として機能性酸化物材料の代表格であるペロブスカイト結晶形の材料群をナノワイヤ化した。創発原理において重要なパラメータとなる蒸気

圧・触媒融点等を勘案することにより新しい機能性ナノワイヤを具現化した。加えて、形成された機能性ナノワイヤの微細構造・物性を評価するために、基板上に配置制御されたナノワイヤに対して走査電子顕微鏡観察を行った。さらに、基板上に形成されたナノ構造の三次元的トポグラフ情報を原子分子レベルの分解能で得ることができる原子間力顕微鏡も適応する。原子間力顕微鏡には、走査型電子顕微鏡では行うことのできない電流電圧特性計測もできる。以上のように、創発原理に基づき従来技術では達成しえなかった階層を超えた新奇ナノ構造体の構造・物性を実証しつつある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計21件)

- ①Y. He 他 12 名(ラストオーサー), Crystal Plane Dependence of Critical Concentration for Nucleation on Hydrothermal ZnO Nanowires, 査読有, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 1197-1203 (2013), DOI:10.1021/jp3113232
- ② G. Meng 他 11 名(ラストオーサー), Pressure-Induced Evaporation Dynamics of Gold Nanoparticles on Oxide Substrate, 査読有, *Phys. Rev. E*, **87**, 012405 (2013), DOI:10.1103/PhysRevE.87.012405
- ③K. Oka 他 7 名(ラストオーサー), Dual Defects of Cation and Anion on Memristive Nonvolatile Memory of Metal Oxides, 査読有, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 2535-2538 (2012), DOI:10.1021/ja2114344
- ④G. Meng 他 13 名(ラストオーサー), Facile and Scalable Methodology for Sublithographic Scale Uniform Nanowires by Ultra-Thin AAO Free-Standing Membrane, 査読有, *RSC Adv.*, **2**, 10618-10623 (2012), DOI:10.1039/C2RA21643D
- ⑤K. Nagashima 他 11 名(ラストオーサー), Switching Properties of Titanium Dioxide Nanowire Memristor, 査読有, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51**, 11PE09 (2012), DOI:10.1143/JJAP.51.11PE09
- ⑥K. Nagashima 他 12 名(ラストオーサー), Prominent Thermodynamical Interaction with Surroundings on Nanoscale Memristive Switching of Metal Oxides, 査読有, *Nano Lett.*, **12**, 5684-5690 (2012), DOI:10.1021/nl302880a
- ⑦F. Zhuge 他 14 名(ラストオーサー), Fundamental Strategy for Creating VLS Grown TiO<sub>2</sub> Single Crystalline Nanowires, 査読有, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 24367-24372 (2012), DOI:10.1021/jp308945b
- ⑧Hiro. Tanaka 他 5 名(ラストオーサー), Molecular Rotation in Self-Assembled Multidecker

- Porphyrin Complexes, 査読有, *ACS Nano*, **5**, 9575-9582 (2011), DOI:10.1021/nn203773p
- ⑨A. Klamchuen 他 11 名(ラストオーサー), Study on transport pathway in oxide nanowire growth by using spacing-controlled regular array, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 193105(1-3) (2011), DOI:10.1063/1.3660246
  - ⑩M. Suzuki 他 6 名(6 番目), Essential Role of Catalyst in Vapor-Liquid-Solid Growth of Compounds, 査読有, *Phys. Rev. E*, **83**, 061606(1-4) (2011), DOI:10.1103/PhysRevE.83.061606
  - ⑪ K. Oka 他 6 名(5 番目), Spatial Nonuniformity in Resistive-Switching Memory Effects of NiO, 査読有, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 12482-12485 (2011), DOI:10.1021/ja206063m
  - ⑫K. Nagashima 他 7 件(ラストオーサー), Intrinsic Mechanisms of Memristive Switching, 査読有, *Nano Lett.*, **11**, 2114-2118 (2011), DOI:10.1021/nl200707n
  - ⑬A. Klamchuen 他 9 名(ラストオーサー), Dopant homogeneity and transport properties of impurity-doped oxide nanowires, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 053107(1-3) (2011), DOI:10.1063/1.3549703
  - ⑭ K. Nagashima 他 6 名(ラストオーサー), Interfacial Effect on Metal/Oxide Nanowire Junctions, 査読有, *Applied Physics Letters*, **96**, 073110(1-3) (2010), DOI:10.1063/1.3318257
  - ⑮A. Klamchuen 他 6 名(ラストオーサー), Crucial Role of Doping Dynamics on Transport Properties of Sb-doped SnO<sub>2</sub> Nanowires, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 053105(1-3) (2009), DOI:10.1063/1.3318257
  - ⑯K. Oka 他 8 名(ラストオーサー), Specific Surface Effect on Transport Properties of MgO/NiO Heterostructured Nanowires, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 133110(1-3) (2009), DOI:10.1063/1.3237176
  - ⑰K. Oka 他 4 名(ラストオーサー), Non-volatile Bipolar Resistive Memory Switching in Single Crystalline NiO Heterostructured Nanowires, 査読有, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 3434-3435 (2009), DOI:10.1021/ja8089922
  - ⑱ M. Kitta, Hiro. Tanaka, T. Kawai, Rapid fabrication of Teflon micropores for artificial lipid bilayer formation, 査読有, *Biosensors and Bioelectronics*, **4**, 518-522 (2009), DOI:10.1016/j.bios.2009.08.021
  - ⑲A. Klamchuen 他 6 名(ラストオーサー), Crucial Role of Doping Dynamics on Transport Properties of Sb-doped SnO<sub>2</sub> Nanowires, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 053105(1-3) (2009), DOI:10.1063/1.3186080

⑫K. Oka 他 7 名 (ラストオーサー), Specific Surface Effect on Transport Properties of MgO/NiO Heterostructured Nanowires, 査読有, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 133110(1-3) (2009), DOI:10.1063/1.3237176

⑬T. Yanagida 他 7 名 (ラストオーサー), Enhancement of Oxide VLS Growth by Carbon on Substrate Surface, 査読有, *J. Phys. Chem. C*, **112**, 18923-18926 (2008), DOI:10.1021/jp8073893

[学会発表] (計 4 6 件)

① T. Kawai, Mechanism of Bipolar and Unipolar Resistive Switching on Metal Oxide Nanowires, 2nd International Workshop on Resistive RAM, 2012.10.09, Stanford University (Stanford, CA, USA)

②T. Kawai, Hetero-structured Metal Oxide Nanowires for Nanoelectronics, MFM-7, 2012.8.7, Gamboa Rainforest Resort (Panama City, Panama)

③ A. Klamchuen, General Strategy for Impurity Doping in VLS Growth of Semiconductor Metal Oxide Nanowires, 2012 MRS Spring Meeting, 2012.4.10, Moscone West Convention Center/Marriott Marquis (San Francisco, California, USA)

④柳田剛, 創発原理に基づく新奇無機ナノワイヤ構造の創成, 分子ナノシステムの創発化学 第3回公開シンポジウム, 2012.2.3, 大阪科学技術センター (大阪府)

⑤ T. Yanagida, Ionic Transport Induced Nonvolatile Memory in a Single Oxide Nanowire, ICE2011, 2011.12.14, the University of New South Wales (Sydney, Australia)

⑥ T. Kawai, Atomically controlled processing for Oxide Thin Films and Nanowires, ICE2011, 2011.12.13, the University of New South Wales (Sydney, Australia)

⑦T. Kawai, NANOWIRED ReRAM, ICAMD 2011, 2011.12.8, Ramada Plaza Jeju Hotel (Jeju, Korea) (招待講演)

⑧ T. Kawai, Atomically controlled processing for Oxide Thin Films and Nanowires, ICAE 2011, 2011.11.8, Ramada Plaza Jeju Hotel (Jeju, Korea) (招待講演)

⑨長島一樹, Pt/TiO<sub>2</sub>/Pt 極微メモリスタ素子特性の基底状態依存性, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011.9.1, 山形大学小白川キャンパス (山形県)

⑩岡敬祐, ナノ制限空間を利用した不揮発性抵抗変化メモリ現象の動作メカニズム解析, 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2011.9.1, 山形大学小白川キャンパス (山形県)

⑪長島一樹, メモリスタの物理起源, 2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2011.8.30, 山形大学小白川キャンパス (山

形県)

⑫T. Kawai, NANOWIRED ReRAM for ADVANCED NANO-ELECTRONICS, NANO KOREA 2011, The 9th International Nanotech Exhibition in Korea, 2011.8.25, KINTEX (Goyang-si, Korea) (招待講演)

⑬ K. Nagashima, Intrinsic nature of nonvolatile resistive switching extracted by a single oxide nanowire, ISSP 2011, 2011.7.8, KRP (Kyoto)

⑭A. Klamchuen, Crucial role of impurity doping dynamics on transport properties of VLS grown SnO<sub>2</sub> nanowires, ISSP 2011, 2011.7.6, KRP (Kyoto)

⑮T. Yanagida, Resistive Switching in a Single Oxide Nanowire, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science Seminar, 2011.5.27, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science (Hefei, China)

⑯T. Kawai, Nanotechnology for advanced devices---Thin film formation, nanofabrication and device application in electronics and biotechnology---, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science Seminar, 2011.5.27, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science (Hefei, China)

⑰ T. Kawai, Fabrication and magnetic properties of one and two dimensional metal oxides, 11th Joint MMM-Intermag, 2010.1.22, Washington Marriott Wardman Park (Columbia, USA) (Invited Talk)

⑱ K. Nagashima, Extraction of Localized Non-volatile Memory Switching using MgO/Cobalt Oxide Heterostructured Nanowire, The 13th SANKEN International Symposium 2009 / The 8th SANKEN Nanotechnology Symposium / The 3rd SANKEN MSTEC Symposium / The 2nd SANKEN Alliance Symposium, 2010.1.18-19, 関西空港国際会議場 (Osaka)

⑲K. Oka, Redox Reactions of Non-volatile Bipolar Resistive Memory Switching in Single Crystalline NiO Heterostructured Nanowire, The 13th SANKEN International Symposium 2009 / The 8th SANKEN Nanotechnology Symposium / The 3rd SANKEN MSTEC Symposium / The 2nd SANKEN Alliance Symposium, 2010.1.18-19, 関西空港国際会議場 (Osaka)

⑳ A. Klamchuen, Impurity induced mesostructures of Sb doped SnO<sub>2</sub> Nanowires, The 13th SANKEN International Symposium 2009 / The 8th SANKEN Nanotechnology Symposium / The 3rd SANKEN MSTEC Symposium / The 2nd SANKEN Alliance Symposium, 2010.1.18-19, 関西空港国際会議場 (Osaka)

- ⑳ K. Nagashima, Non-volatile Memory Switching using Atomically Controlled MgO/Co304 Heterostructured Nanowires, Second International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2009. 11. 26, Osaka University Nakanoshima Center (Osaka)
- ㉑ T. Yanagida, Non-Volatile Resistive Switching Memory Effects In Single Oxide Nanowire, WCU International Conference on Quantum Phases and Devices, 2009. 10. 28-30, Konkuk University (Seoul, Korea) (*Invited Talk*)
- ㉒ T. Yanagida, Self-Assembling Oxide Nanowires: Growth Mechanisms and the Impact on Transport Properties of Impurity-Doped Nanowires, 16th International Workshop on Oxide Electronics, 2009. 10. 5-6, Palau Firal i de Congressos de Tarragona (Catalonia, Spain)
- ㉓ K. Nagashima, Resistive Switching Phenomena in MgO/CO4 Core/shell Nanowires, 16th International Workshop on Oxide Electronics, 2009. 10. 5-6, Palau Firal i de Congressos de Tarragona (Catalonia, Spain)
- ㉔ K. Oka, Non-volatile Resistive Switching in Individual MgO/NiO Heterostructured Nanowire, 16th International Workshop on Oxide Electronics, 2009. 10. 5-6, Palau Firal i de Congressos de Tarragona (Catalonia, Spain)
- ㉕ 川合知二, 今後の展開, 2009年秋季第70回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 9, University of Toyama (Toyama)
- ㉖ K. Nagashima, Mechanism of Nonvolatile Bipolar Resistive Memory Switching in MgO/Co304 Nanowire and Multi-storage Memory Application, 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2009. 9. 2, Osaka University (Osaka)
- ㉗ T. Yanagida, Crucial Role of Doping Dynamics on Transport Properties of Sb-Doped SnO2 Nanowires, 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2009. 9. 2, Osaka University (Osaka)
- ㉘ K. Oka, Non-Volatile Resistive Memory Switching in Individual MgO/NiO Heterostructured Nanowire, 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology, International Symposium, 2009. 9. 2, Osaka University (Osaka)
- ㉙ K. Nagashima, Non-volatile Unipolar Memory Switching in TiO2 Heteronanowire, ISSP 2009, 2009. 7. 10, 金沢国際ホテル (Kanazawa)
- ㉚ K. Oka, Non-volatile Bipolar Resistive

Memory Switching in Single Crystalline NiO Heterostructured Nanowire, ISSP 2009, 2009. 7. 10, 金沢国際ホテル (Kanazawa)

㉛ T. Yanagida, Metal Oxide Nanowires: Synthesis, Nano-properties and Device Applications, ISSP 2009, 2009. 7. 10, 金沢国際ホテル (Kanazawa)

㉜ T. Yanagida, Metal Oxide Nanowires: Synthesis, Nano-properties and Non-volatile Memory Applications, The 8th France-Japan Workshop on Nanomaterials, 2009. 6. 17, NIMS (Tsukuba) (*Invited Talk*)

㉝ K. Nagashima, Nonvolatile Memory Effect in Heterostructured Nanowires of Metal Oxides, The 8th France-Japan Workshop on Nanomaterials, 2009. 6. 17, NIMS (Tsukuba) (*Invited Talk*)

㉞ T. Kawai, Composite Nanostructures using Transition Metal Oxide Nanowires, ICCS15, 2009. 6. 15, FEUP (Porto, Portugal)

㉟ T. Kawai, Heterostructured Oxide Nanowires and Their Interface Properties, MRS Spring Meeting, 2009. 4. 15, San Francisco Marriott (California, USA) (*Invited Talk*)

㊱ T. Kawai, Heterostructured Oxide Nanowires and Their Interface Properties, MRS 2009 Spring Meeting, 2009. 4. 15, Moscone West, San Francisco Marriott (San Francisco, USA)

他 9 件

[その他]

ホームページ等

[http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/jp/organization/da/da\\_02.html](http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/jp/organization/da/da_02.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川合 知二 (KAWAI TOMOJI)  
大阪大学・産業科学研究所・  
特任教授 (常勤)  
研究者番号: 20092546

### (2) 研究分担者

田中 裕行 (TANAKA HIROYUKI)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号: 20314429

### (3) 連携研究者

柳田 剛 (YANAGIDA TAKESHI)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号: 50420419  
(平成 20 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日)  
谷口正輝 (TANIGUCHI MASATERU)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
(平成 23 年 10 月 1 日から教授)  
研究者番号: 40362628  
(平成 20 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日)