

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01831

研究課題名(和文) 高堅牢性分子指紋ナノワイヤの創成及び革新的分子識別法の開発

研究課題名(英文) Development of Molecular Discrimination Method by Synthesizing Robust Molecularly Fingerprinted Nanowires

研究代表者

長島 一樹 (Nagashima, Kazuki)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：10585988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、単結晶金属酸化物ナノワイヤ表面上に熱・化学的に安定な多点分子認識空間(=分子指紋)を表面元素ドーピング技術を駆使して創製し、分子指紋の構造・化学特性に基づく分子吸着識別機能、および分子指紋と標的分子の化学的結合力に基づく分子脱離識別機能を実証すると共にその設計指針の構築に成功した。また、分子指紋ナノワイヤ・センサ統合デバイス上でこれら2つの識別機能を融合し、従来の化学センサ技術では実現困難であった混合揮発性分子群中における標的分子の電流検出・識別に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来分子センサの技術限界により実現困難であった10ppb以下の極低濃度分子の電気的検出、及び同種官能基を有する分子群の識別を本質的に打破することに成功した。揮発性分子は自然界に数十万種類存在することから、これらを検出・識別・データ化する小型携帯センサデバイスが本研究で提案する方法論により実現すれば、従来センサによる「物理情報」を遥かに凌駕した膨大な「化学情報」による精緻なデータ分析が可能となり、既存のデータ科学・データ産業を革新する新たな社会基盤形成に繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we synthesized the thermally and chemically robust molecular recognition interface, i.e. molecular fingerprint, on single crystalline metal oxide nanowire surface via surface elemental doping method, and successfully demonstrated its molecular discrimination features on the adsorption and desorption events together with establishing the design concept. Furthermore, by combining these molecular discrimination features on a newly-developed nanowire-sensor hybrid system, we have successfully demonstrated the electrical detection and discrimination of target molecule among volatile compound mixture, which had been difficult in the conventional chemical sensor device.

研究分野：ナノ材料科学

キーワード：酸化物ナノワイヤ 分子識別 分子識別界面

### 1. 研究開始当初の背景

近年、ナノテクノロジーやIoT関連技術の発展を背景に、疾病の呼気診断や毒物・環境負荷物質のモニタリング等に向けて、気相中の揮発性分子を検出・識別する分子認識技術が注目を集めている (Trillion Sensors ロードマップ 2015)。現在、分子識別にはガスクロマトグラフ質量分析計 (GCMS) のような大規模な装置が必要であるが、携帯端末によって分子識別が可能なセンサが実現すれば社会に与える影響は極めて大きいと予想されており、現在、センサの高性能化・小型化を目指す研究開発が世界中で激化している。

揮発性分子は自然界に数十万種類存在するとされ、光や熱、力などの‘物理情報’を遥かに超える膨大な‘化学情報’のソースとなることから、来たる“トリリオン・センサ社会”(2012年にアメリカの J. Bryzek が提唱した全世界で毎年1兆個のセンサを活用する未来社会像)において、分子識別センサはその中核技術として近年最も注目を集めている。しかしながら、既存のセンサ原理では構造・化学特性が類似した分子種の識別は困難であり、分子識別センサ開発の本質的な技術障壁となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、巨大表面及び高熱伝導性を有する単結晶無機酸化物ナノワイヤ表面に熱・化学的に堅牢な多点分子認識空間 (=分子指紋) を形成し、①分子指紋を介した化学特性・分子形状識別機能と②分子結合強度を利用した新たな分子識別法により、従来の識別限界を遥かに凌駕する革新的分子センサデバイスを創成することを目的とした。

### 3. 研究の方法

申請者が独自技術で作製する単結晶酸化亜鉛 (ZnO) ナノワイヤ上で、標的分子 (ノナナル、ベンズアルデヒド、ノナンなど) と金属アルコキシドの混合物によるゾルゲル反応を介して金属酸化物を低温合成 (>200°C) し、その後高温焼成 (>400°C) により標的分子を除去することで多点分子認識空間 (=分子指紋) を構築する。ナノワイヤ界面に導入した拡散層の原子拡散効果を利用して分子指紋層への化学ドーピングを行い、分子指紋の熱・化学的安定性、及び標的分子に対する分子認識機能との相関性を検証した。得られた分子指紋ナノワイヤを用いて、微量標的分子の濃縮効果、及び混合分子群中における標的分子の選択的吸着効果を検証した。また、放射光を利用した微細構造評価 (X線吸収微細構造評価)、X線光電子分光、赤外分光、ガスクロマトグラフ質量分析により分子指紋形成メカニズムに関する検討を行った。分子識別の識別能を下げる要因である指紋部以外への分子吸着や部分認識による類似分子の‘誤’吸着の問題を本質的に打破するために、分子指紋-分子の化学的結合力に基づく分子脱離識別技術の可能性を検討した。ナノワイヤの瞬時加熱現象を利用した吸着分子群の脱離現象を加熱時間が与える分子識別能への影響とともに詳細に検討し、標的分子の単離可能性を検討した。また、上記で構築した分子指紋ナノワイヤをセンサと統合した集積化センサデバイスを構築し、微量標的分子の電流検出、及び混合分子系における標的分子の電流識別機能を検証した。

### 4. 研究成果

#### 高堅牢性分子指紋ナノワイヤの創製と評価 (図1)

標的分子と金属アルコキシドの混合物によるゾルゲル反応を介して金属酸化物合成することにより、金属酸化物ナノワイヤ表面に分子の化学特性・形状を記憶させた分子指紋を構築した。気相吸着脱離試験により分子指紋ナノワイヤ表面における分子吸着特性を評価した結果、本手法によって標的分子 (揮発性アルデヒド) に対する吸着特性が著しく向上することを明らかとした。分子指紋ナノワイヤの耐熱性の検証実験として、各焼成温度条件における混合分子中からの標的分子の捕捉性能評価を行った所、焼成温度 500°C において最も高い分子捕捉選択性が得られ、繰り返し熱負荷では 600 回までその捕捉性能が維持されたことから、

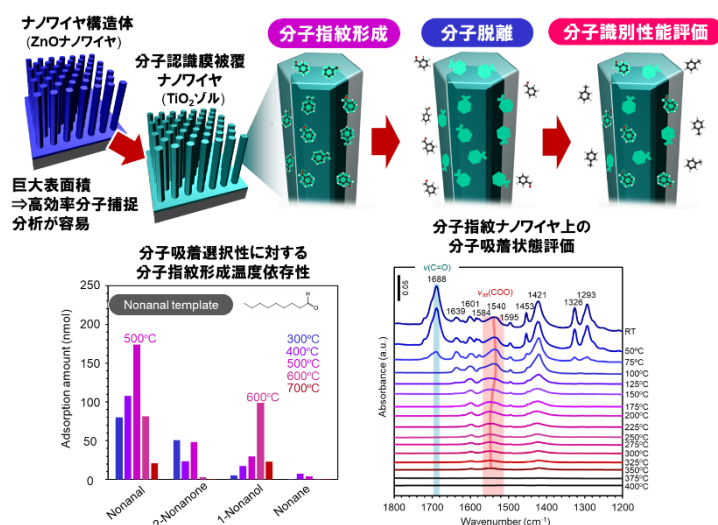


図1 分子指紋ナノワイヤ形成プロセス・混合分子系における分子識別性能・分子吸着状態評価結果

当該分子指紋ナノワイヤは既存の分子インプリント材料(シリカや高分子)と比較して極めて高い耐熱性を有することが明らかとなった。分子指紋形成メカニズムを探索するために、分子指紋ナノワイヤの構造・組成を電子顕微鏡、X線光電子分光、赤外分光により評価した結果、分子指紋がオール金属酸化物で構成され、原子拡散により分子指紋層への元素ドーピングが生じていることが確認された。また更なる検証の結果、元素ドーピング量に応じて系統的に標的分子の吸着性能、構造安定性が変化することが明らかとなった。分子指紋形成時の脱離成分及びプレート分子の吸着状態を各焼成温度条件で詳細に分析した所、ドーパントの存在によって官能基が材料中にアンカリングされることで、金属酸化物の合成時に効果的な分子指紋形成が可能となることが明らかとなった。分子指紋ナノワイヤを用いて混合分子中からの標的分子の選択的吸着性能を評価し、分子内にドーパントとアンカリング可能な官能基を有する分子をプレートトとした場合においては、その官能基のみならず、分子形状の僅かな差異をも認識する選択的分子吸着性能が得られることを実証した。一方で、その様な官能基を持たない分子をプレートトとした場合においては、選択的な分子吸着効果は観測されなかった。以上の結果は、堅牢な分子識別機能を有する分子指紋に対する明確な設計指針を与えるものである。

### 分子-表面間の化学的結合に基づく分子脱離識別技術開発

金属酸化物ナノワイヤ表面上に吸着した分子群の脱離プロセスをヒーター加熱により制御し、固体表面-分子間の結合力の差異を利用して標的分子を選択的に脱離させることを目指した。呼吸肺がんマーカーであるノナナル (C9アルデヒド) とその二量体である(E)-2-ヘプチル-2-ウンデセナールをモデル分子として、実験及び表面吸着エネルギー及びエントロピーを考慮した理論計算によるアプローチを行った。その結果、高温条件になるほど分子識別にはより高速且つ精密な温度制御が必要となることが明らかとなった。

次いで理論計算の結果に基づいて、パルス加熱・連続加熱による分子識別能の実験的な比較を行った。その結果、連続加熱では(E)-2-ヘプチル-2-ウンデセナールが低温から脱離し始めるために、脱離温度の最適化のみでは識別が困難となるといった、理論計算と一致する結果が得られたが、一方で1秒程度のパルス加熱では、脱離温度の制御によりノナナルと(E)-2-ヘプチル-2-ウンデセナールを明確に識別可能であることを実証し、加熱時間制御による分子識別の可能性を見出した。本研究では固体表面との相互作用が大きく異なる分子を用いて検証を行ったが、多種多様な分子群に対しても同様のアナロジーが本質的に適用可能である。

### 分子指紋ナノワイヤ-センサ統合デバイスの創製と機能実証 (図2)

堅牢な分子識別機能を備えた分子指紋ナノワイヤとケモレジスタセンサを小型回路基板上に実装することにより、分子指紋ナノワイヤ-センサ統合デバイスを構築した。ナノワイヤ直下に設けたマイクロヒーターにより瞬時加熱を行い、分子識別センシングの原理実証を行った。分子指紋表面上への分子吸着の選択性に基づき混合分子群中から標的分子を含む化学的特性・構造が類似した分子を優先的にナノワイヤ表面で捕捉し、さらに分子-表面間の結合力の差異に基づく分子脱離の選択性を利用して標的分子を選択的にセンサへ輸送することで目的とする分子識別センシングの原理実証に成功した。更に、ナノワイヤの巨大表面による分子濃縮効果を利用して呼吸中肺がんマーカー分子を従来検出限界を遥かに凌ぐ1ppb以下の極低濃度領域で検出することに成功した。これら一連の成果は、本研究で提案する分子指紋ナノワイヤ-センサ統合デバイスアプローチが、従来センサを遥かに凌駕する分子識別機能を実現するのみならず、従来センサの検出限界を打破する高感度分子センシング機能実現へ向けた重要な技術であることを示している。

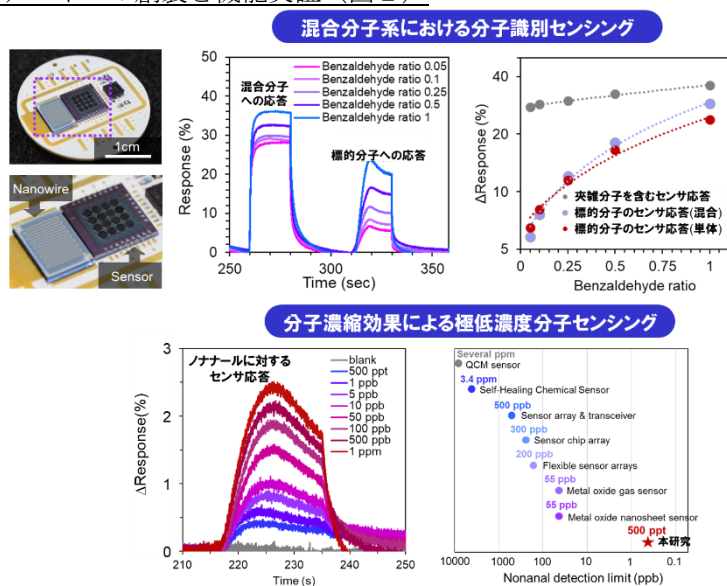


図2 分子指紋ナノワイヤ-センサ統合デバイスによる分子識別センシング特性・極低濃度分子センシング特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 20件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Zhuge Fuwei, Takahashi Tsunaki, Kanai Masaki, Nagashima Kazuki, Fukata Naoki, Uchida Ken, Yanagida Takeshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Thermal conductivity of Si nanowires with $\mu$ -modulated dopant distribution by self-heated 3 method and its length dependence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065105 ~ 065105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5039988	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Anzai Hiroshi, Takahashi Tsunaki, Suzuki Masaru, Kanai Masaki, Zhang Guozhu, Hosomi Takuro, Seki Takehito, Nagashima Kazuki, Shibata Naoya, Yanagida Takeshi	4. 巻 19
2. 論文標題 Unusual Oxygen Partial Pressure Dependence of Electrical Transport of Single-Crystalline Metal Oxide Nanowires Grown by the Vapor-Liquid-Solid Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 1675 ~ 1681
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b04668	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Wang Chen, Hosomi Takuro, Nagashima Kazuki, Takahashi Tsunaki, Zhang Guozhu, Kanai Masaki, Zeng Hao, Mizukami Wataru, Shioya Nobutaka, Shimoaka Takafumi, Tamaoka Takehiro, Yoshida Hideto, Takeda Seiji, Yasui Takao, Baba Yoshinobu, Aoki Yuriko, Terao Jun, Hasegawa Takeshi, Yanagida Takeshi	4. 巻 19
2. 論文標題 Rational Method of Monitoring Molecular Transformations on Metal-Oxide Nanowire Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 2443 ~ 2449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b05180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 長島 一樹, 高橋 綱己, 柳田 剛	4. 巻 53
2. 論文標題 単結晶酸化物ナノワイヤの界面選択的結晶成長に基づく構造・組成・機能制御とデバイス展開	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 セラミックス	6. 最初と最後の頁 411~416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Koga, K. Nagashima, Y. Huang, G. Zhang, C. Wang, T. Takahashi, A. Inoue, H. Yan, M. Kanai, Y. He, K. Uetani, M. Nogi and T. Yanagida	4. 巻 11
2. 論文標題 Paper-Based Disposable Molecular Sensor Constructed from Oxide Nanowires, Cellulose Nanofibers, and Pencil-Drawn Electrodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 15044-15050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b01287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Akihiro, K. Nagashima, T. Hosomi, M. Kanai, H. Anzai, T. Takahashi, G. Zhang, T. Yasui, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 4
2. 論文標題 Water-Organic Cosolvent Effect on Nucleation of Solution-Synthesized ZnO Nanowires	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 8299-8304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b00945	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Sakai, K. Nagashima, H. Yoshida, M. Kanai, Y. He, G. Zhang, X. Zhao, T. Takahashi, T. Yasui, T. Hosomi, Y. Uchida, S. Takeda, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 9
2. 論文標題 Substantial Narrowing on the Width of "Concentration Window" of Hydrothermal ZnO Nanowires via Ammonia Addition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 14160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-50641-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Nakamura, T. Takahashi, T. Hosomi, T. Seki, M. Kanai, G. Zhang, K. Nagashima, N. Shibata and T. Yanagida	4. 巻 11
2. 論文標題 Redox-Inactive CO <sub>2</sub> Determines Atmospheric Stability of Electrical Properties of ZnO Nanowire Devices through a Room-Temperature Surface Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 40260-40266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.9b13231	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 X. Zhao, K. Nagashima, G. Zhang, T. Hosomi, H. Yoshida, Y. Akihiro, M. Kanai, W. Mizukami, Z. Zhu, T. Takahashi, M. Suzuki, B. Samransuksamer, G. Meng, T. Yasui, Y. Aoki, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 20
2. 論文標題 Synthesis of Monodispersedly Sized ZnO Nanowires from Randomly Sized Seeds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 599-605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.9b04367	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 G. Zhang, C. Wang, W. Mizukami, T. Hosomi, K. Nagashima, H. Yoshida, K. Nakamura, T. Takahashi, M. Kanai, T. Yasui, Y. Aoki, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 Monovalent Sulfur Oxoanions Enable Millimeter-Long Single Crystalline h-WO3 Nanowire Synthesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 9058-9066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C9NR10565D	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Yan, T. Takahashi, M. Kanai, T. Hosomi, G. Zhang, K. Nagashima and T. Yanagida	4. 巻 2
2. 論文標題 Unusual Sequential Annealing Effect in Achieving High Thermal Stability of Conductive Al-Doped ZnO Nanofilms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2064-2070
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Liu, K. Nagashima, H. Yoshida, T. Hosomi, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, Y. He and T. Yanagida	4. 巻 49
2. 論文標題 Facile Synthesis of Zinc Titanate Nanotubes via Reaction-byproduct Etching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemistry Letters 1220	6. 最初と最後の頁 1220-1223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/cl.200480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Liu, K. Nagashima, H. Yamashita, W. Mizukami, J. Uzuhashi, T. Hosomi, M. Kanai, X. Zhao, Y. Miura, G. Zhang, T. Takahashi, M. Suzuki, D. Sakai, B. Samransuksamer, Y. He, T. Ohkubo, T. Yasui, Y. Aoki, J. C. Ho, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 1
2. 論文標題 Face-selective tungstate ions drive zinc oxide nanowire growth direction and dopant incorporation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications Materials	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43246-020-00063-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, H. Yoshida and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 Phosphonic Acid Modified ZnO Nanowire Sensors: Directing Reaction Pathway of Volatile Carbonyl Compounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 44265-44272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c10332	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Nekita, K. Nagashima, G. Zhang, Q. Wang, M. Kanai, T. Takahashi, T. Hosomi, K. Nakamura, T. Okuyama and T. Yanagida	4. 巻 3
2. 論文標題 Face-Selective Crystal Growth of Hydrothermal Tungsten Oxide Nanowires for Sensing Volatile Molecules	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 10252-10260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsanm.0c02194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Zeng, T. Takahashi, T. Seki, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, K. Nagashima, N. Shibata and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 Oxygen-Induced Reversible Sn-Dopant Deactivation between Indium Tin Oxide and Single-Crystalline Oxide Nanowire Leading to Interfacial Switching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 52929-52936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.0c16108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 R. Yan, T. Takahashi, H. Zeng, T. Hosomi, M. Kanai, G. Zhang, K. Nagashima and T. Yanagida	4. 巻 3
2. 論文標題 Enhancement of pH Tolerance in Conductive Al-Doped ZnO Nanofilms via Sequential Annealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 955-962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c01052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 J. Liu, K. Nagashima, Y. Nagamatsu, T. Hosomi, H. Saito, C. Wang, W. Mizukami, G. Zhang, B. Samransuksamer, T. Takahashi, M. Kanai, T. Yasui, Y. Baba and T. Yanagida	4. 巻 12
2. 論文標題 The impact of surface Cu <sup>2+</sup> of ZnO/(Cu <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> )O heterostructured nanowires on the adsorption and chemical transformation of carbonyl compounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 5073-5081
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1sc00729g	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Kamei, T. Hosomi, E. Kanao, M. Kanai, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, T. Yasui, J. Terao, K. Otsuka, Y. Baba, T. Kubo and T. Yanagida	4. 巻 13
2. 論文標題 Rational Strategy for Space-Confined Seeded Growth of ZnO Nanowires in Meter-Long Microtubes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 16812-16819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaami.0c22709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 柳田 剛	4. 巻 20
2. 論文標題 「次世代のセンシング材料」ー堅牢な分子認識界面の創製ー	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 月刊MATERIAL STAGE	6. 最初と最後の頁 78-83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -



1. 著者名 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 柳田 剛	4. 巻 71
2. 論文標題 分子認識エレクトロニクスへ向けたナノ界面エンジニアリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 518-524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Zeng, G. Zhang, K. Nagashima, T. Takahashi, T. Hosomi and T. Yanagida	4. 巻 9
2. 論文標題 Metal-Oxide Nanowires Molecular Sensors and Their Promises	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemosensors	6. 最初と最後の頁 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/chemosensors9020041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計40件(うち招待講演 5件/うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Guozhu Zhang, 長島 一樹, 吉田 秀人, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 金井 真樹, 竹田 精治, 柳田 剛
2. 発表標題 Flexible Textile Chemical Sensor Based on Millimeter-Long Tungsten Oxide Nanowires
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大貴, 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶ZnOナノワイヤ水熱合成においてW添加が及ぼす結晶成長・不純物ドーピングへの影響
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chen Wang, 細見 拓郎, 長島 一樹, 高橋 綱己, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 ZnOナノワイヤ上に吸着した長鎖アルデヒドの化学反応挙動の解明
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zetao Zhu, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 長島 一樹, 柳田 剛
2. 発表標題 酸化物VLS結晶成長における空間均一な不純物ドーピングの設計指針
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安西 宇宙, 鈴木 将, 高橋 綱己, 金井 真樹, Guozhu Zhang, 細見 拓郎, 長島 一樹, 柳田 剛
2. 発表標題 供給酸素分圧による単結晶金属酸化物ナノワイヤの導電性・結晶成長界面の変調効果
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiangyang Liu, Kazuki Nagashima, Wenjun Li, Takuro Hosomi, Yong He, Mizuki Matsui, Guozhu Zhang, Tsunaki Takahashi, Hideto Yoshida, Masaki Kanai, Seiji Takeda, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Thermal Discrimination of Volatile Organic Molecules by Molecularly Fingerprinted Metal Oxide Nanowires
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chen Wang, Kazuki Nagashima, Takuro Hosomi, Guozhu Zhang, Tsunaki Takahashi, Hideto Yoshida, Masaki Kanai, Seiji Takeda, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Chemical Interaction of Volatile Aldehyde Molecules on ZnO Nanowire Surface
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zetao Zhu, Kazuki Nagashima, Tsunaki Takahashi, Masaru Suzuki, Hiroshi Anzai, Takuro Hosomi, Guozhu Zhang, Masaki Kanai, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Dual Impacts of Sb Doping on Crystal Growth Interface and Electrical Homogeneity of SnO <sub>2</sub> Nanowires Grown by Vapor-Liquid-Solid Process
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xixi Zhao, Kazuki Nagashima, Guozhu Zhang, Zetao Zhu, Tsunaki Takahashi, Takuro Hosomi, Hideto Yoshida, Masaki Kanai, Seiji Takeda, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Synthesis of Ultra Uniform Sized ZnO Nanowires by Post-growth Homogenization of Growth Interface
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroki Yamashita, Kazuki Nagashima, Tsunaki Takahashi, Takuro Hosomi, Guozhu Zhang, Masaki Kanai, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Crucial Role of Tungstate Ions on Elemental Doping of Hydrothermal ZnO Nanowires
3. 学会等名 第37回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細見 拓郎, Wang Chen, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 水上 涉, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 玉岡 武泰, 吉田 秀人, 竹田 精治, 安井 隆雄, 馬場嘉信, 青木 百合子, 寺尾 潤, 長谷川 健, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶ナノワイヤ表面に対する分光分析を用いた酸化物表面におけるアルデヒドの化学変換経路の解明
3. 学会等名 統合物質創製化学研究推進機構第4回国内シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細見 拓郎, Wang Chen, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 水上 涉, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 玉岡 武泰, 吉田 秀人, 竹田 精治, 安井 隆雄, 馬場嘉信, 青木 百合子, 寺尾 潤, 長谷川 健, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶酸化物ナノワイヤに対する分光的測定を用いたZnO上でのアルデヒドの分子変換メカニズムの解明
3. 学会等名 9th 分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋廣 侑哉, 長島 一樹, 細見 拓郎, 高橋 綱己, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 単結晶酸化亜鉛ナノワイヤ合成における有機分子添加効果
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 異種酸化物導入によるZnOナノワイヤ表面上のアルデヒド分子の化学反応制御
2. 発表標題 永松 佑基, 長島 一樹, 細見 拓郎, 山下 大貴, 高橋 綱己, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋廣 侑哉, 長島 一樹, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 水熱合成ZnOナノワイヤ結晶成長における油水混合溶媒の役割
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Zetao Zhu, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 長島 一樹, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 VLS 結晶成長界面に基づいたSb-SnO <sub>2</sub> ナノワイヤの電気伝導度制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安西 宇宙, 高橋 綱己, 細見 拓郎, 金井 真樹, Guozhu Zhang, 長島 一樹, 柳田 剛
2. 発表標題 VLS法ナノワイヤ結晶成長界面設計による単結晶金属酸化物ナノ構造体の表面特性制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細見 拓郎, 井上 暉英, 長島 一樹, 高橋 綱己, 張 国柱, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 ZnO 単結晶ナノワイヤを用いた長鎖脂肪族ケトンの位置選択的酸化
3. 学会等名 日本化学会第99春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashima
2. 発表標題 Functional Inorganic and Organic Nanofiber Materials from Earth-Abundant Resources and Their Application
3. 学会等名 International Conference on Science and Technology of Emersing Materials 2018 (STEMa2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Z. Zhu, T. Takahashi, K. Nagashima, M. Kanai, G. Zhang, H. Anzai and T. Yanagida
2. 発表標題 Dual Impact of Impurity on Crystal Growth Interface and Electrical Homogeneity of Metal Oxide Nanowires in Vapor-Liquid-Solid Process
3. 学会等名 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 G. Zhang, K. Nagashima, W. Mizukami, M. Kanai, T. Takahashi and T. Yanagida
2. 発表標題 Synthesis of Millimeter-Long Tungsten Oxide Nanowires for Flexible Molecule Sensor
3. 学会等名 The Americas International Meeting on Electrochemistry and Solid State Science (AiMES 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Liu, K. Nagashima and T. Yanagida
2. 発表標題 Molecular Imprinted Oxide Coated ZnO Nanowire Pre-concentrator for Separating Nonanal from Volatile Organic Compounds
3. 学会等名 4th International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, H. Zeng and T. Yanagida
2 . 発表標題 Spectroscopic analysis on single crystalline nanowire surface reveals chemical transformation pathways of aldehyde on ZnO
3 . 学会等名 The 20th Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST20) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 X. Zhao, K. Nagashima, G. Zhang, Z. Zhu, T. Takahashi, T. Hosomi, M. Kanai and T. Yanagida
2 . 発表標題 Ultra-Uniform Sized Zinc Oxide Nanowires From Random Sized Seed Crystals
3 . 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference (Asian-APC) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 C. Wang, T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, G. Zhang, M. Kanai, Z. Hao, W. Mizukami, Y. Aoki and T. Yanagida
2 . 発表標題 Spectroscopic Analysis on Single Crystalline Nanowire Surface Reveals Chemical Transformation Pathways of an Aldehyde on ZnO
3 . 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference (Asian-APC) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 J. Liu, K. Nagashima, T. Hosomi, G. Zhang, T. Takahashi, M. Kanai and T. Yanagida
2 . 発表標題 Thermally robust molecularly imprinting on oxide nanowires discriminate nonanal from volatile organic compounds mixture
3 . 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference (Asian-APC) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年



1 . 発表者名 Z. Zhu, K. Nagashima, T. Takahashi, M. Suzuki, M. Kanai, G. Zhang, T. Hosomi, H. Anzai and T. Yanagida
2 . 発表標題 Dual Impact of Impurity on Crystal Growth Interface and Electrical Homogeneity of Metal Oxide Nanowires in Vapor-Liquid-Solid Process
3 . 学会等名 The 3rd Asian Applied Physics Conference (Asian-APC) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Hosomi, K. Nagashima, T. Takahashi, N. Shioya, T. Shimoaka, G. Zhang, M. Kanai, T. Hasegawa and T. Yanagida
2 . 発表標題 Regioselective oxidation of aliphatic ketones on ZnO single-crystal nanowires
3 . 学会等名 Integrated Research Consortium on Chemical Sciences (IRCCS) The 2nd International Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagashima, J. Liu, T. Hosomi, G. Zhang, T. Takahashi, M. Kanai and T. Yanagida
2 . 発表標題 Thermally Robust Molecular Fingerprint on Metal Oxide Nanowires Towards Volatile Biomolecular Analysis
3 . 学会等名 The Second International Workshop by the 174th Committee JSPS “Symbiosis of Biology and Nanodevices” (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kazuki Nagashima, Hirotsugu Koga, Guozhu Zhang, Tsunaki Takahashi, Masaya Nogi, Takeshi Yanagida
2 . 発表標題 Paper-based Disposable Molecular Sensor Constructed from Oxide Nanowires, Cellulose Nanofibers, and Pencil-drawn Electrodes
3 . 学会等名 第38回電子材料シンポジウム
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Nagashima, Yuya Akihiro, Takuro Hosomi, Masaki Kanai, Tsunaki Takahashi, Guozhu Zhang, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Water-Organic Cosolvent Effect on Nucleation of Solution-Synthesized ZnO Nanowires
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早田 翔士郎, 長島 一樹, Jiangyang Liu, 細見 拓郎, 高橋 綱己, Guozhu Zhang, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 分子認識無機表面 “分子指紋” の形成における分子テンプレート量の影響
3. 学会等名 第5回ナノ分析化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長島 一樹
2. 発表標題 インクルーシブナノワイヤ科学
3. 学会等名 新潟大学自然科学研究科物性コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長島 一樹, Jiangyang Liu, 細見 拓郎, 守法 篤, 中尾 厚夫, 高橋 綱己, 金井 真樹, 柳田 剛
2. 発表標題 高堅牢性分子指紋ナノワイヤによる革新的分子認識センシング Water-Organic Cosolvent Effect on Nucleation of Solution-Synthesized ZnO Nanowires (4/
3. 学会等名 日本化学会第100春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nagashima, T. Hosomi, T. Takahashi and T. Yanagida
2. 発表標題 Metal Oxide Nanowire Surface for Molecular Recognition
3. 学会等名 The 2nd Material Research Society of Thailand International Conference (MRS-Thailand 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nagashima
2. 発表標題 Metal Oxide Nanowire Based Robust Molecular Recognition Electronics
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Frontier Technology Innovation (ICFTI-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Zhao, K. Nagashima, G. Zhang, T. Hosomi, Y. Akihiro, M. Kanai, T. Takahashi, M. Suzuki, B. Samransuksamer and T. Yanagida
2. 発表標題 Post-Seed Engineering for Synthesizing Monodispersely Sized ZnO Nanowires
3. 学会等名 International School and Symposium on Nanoscale Transport and phoTonics 2019 (ISNTT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長島一樹, 高橋綱己, 細見拓郎, 柳田 剛
2. 発表標題 堅牢なナノ界面と分子認識エレクトロニクス
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jiangyang Liu, Kazuki Nagashima, Hiroki Yamashita, Jun Uzuhashi, Takuro Hosomi, Tsunaki Takahashi, Guozhu Zhang, Tadakatsu Ohkubo, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Face-selective tungstate ions drive zinc oxide nanowire growth direction and dopant incorporation
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xixi Zhao, Kazuki Nagashima, Guozhu Zhang, Takuro Hosomi, Hideto Yoshida, Masaki Kanai, Tsunaki Takahashi, Takeshi Yanagida
2. 発表標題 Synthesis of Monodispersedly Sized ZnO Nanowires from Randomly Sized Seeds
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap <a href="https://researchmap.jp/nagashima0402">https://researchmap.jp/nagashima0402</a>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	柳田 剛  (Yanagida Takeshi)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 綱己  (Takahashi Tsunaki)		
研究協力者	細見 拓郎  (Hosomi Takuro)		
研究協力者	吉田 秀人  (Yoshida Hideto)		
研究協力者	斉藤 光  (Saito Hikaru)		
研究協力者	安井 隆雄  (Yasui Takao)		
研究協力者	大久保 忠勝  (Ohkubo Tadakatsu)		
研究協力者	埋橋 淳  (Uzuhashi Jun)		
研究協力者	古賀 大尚  (Koga Hirotaka)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	水上 渉  (Mizukami Wataru)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	中国科学院	重慶大学	