

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02437

研究課題名（和文）高選択性pptレベルマイクロガスセンサのための材料設計構築

研究課題名（英文）Material designs of micro gas sensors for selective detection in ppt level.

研究代表者

島ノ江 憲剛（Shimano, Kengo）

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：10274531

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、n型半導体表面上に異なる機能を持つレセプターを二種類担持することにより、ガス選択性に優れた高感度ガスセンサを見出すことを目的とし、レセプターによるガス選択的検知の評価、MEMS型ガスセンサへの適用、金属酸化物へのダブルナノレセプター担持を評価した。その結果、レセプターを担持しなくても、MEMS素子の駆動方法を変化させることにより、ガスの選択的検知が可能であること、Pdレセプター担持酸化スズクラスターMEMSのトルエン検出極限値が7pptまで向上したこと、酸化モリブデンレセプターによりエタノールとメタノールの選択性を200倍向上できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、pptからサブppbレベルの超極微量ガスを高い選択性をもって検知する半導体ガスセンサおよびそのシステムを材料設計を示したものである。これまで半導体ガスセンサの材料設計は申請者が世界を牽引し、世界最高感度およびマイクロ化を達成しており、本研究はこれに高いガス選択性を導入する設計を提示したもので、高い独創性と創造性を有した世界無二のガスセンサと云える。本研究は、工業的なガス検知、生活環境の保全、癌細胞由来のバイオマーカー、新型コロナウイルス感染症由来の呼気、農産物の検疫に関連する極微量ガスなど、様々な応用展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we tried to design a superior high sensitivity and selectivity gas sensor by loading two kinds of receptors which had a different function on the n-type semiconductor surface. We evaluated the gas selective detection due to the receptor, the application to a MEMS-type gas sensor, and a double nano receptor to metal oxide. As a result, we clarified that MEMS-type gas sensor showed selective gas detection by special pulse drive method even if non-receptor loading, the MEMS-type gas sensor of Pd-loaded tin oxide cluster could detect 7ppt of toluene as the world's best sensitivity, and the molybdenum oxide receptor could improve with selectivity of ethanol and methanol with sensitivity difference of 200 times.

研究分野：ガスセンサ

キーワード：ガスセンサ 酸化物半導体 高感度 高選択性 ナノ粒子 レセプター MEMS パルス駆動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々は、半導体ガスセンサの材料設計指針として三つの重要な因子として、ガス検知の本質となるレセプター機能、感度増幅の本質となるトランスデューサ機能と利用効率の設計を提案し、それら因子を理論的かつ実験的に証明してきた。これらの因子は、半導体ガスセンサのほとんどの研究者に認められ、実際に研究に幅広く活用されている(国際会議のアブストラクトの例にも使用された)。申請者は、さらにこれら三つの因子を融合した“レセプター担持クラスター粒子”の設計指針を提案し、実際にガス検知が難しいとされるトルエンについて ppb レベルの検知に 2014 年に世界で初めて成功した。さらに、バイオマーカーなどの検知が医療の呼気分析の観点から重要視されていることから、さらなる高感度化に取り組み、レセプター担持クラスター粒子をマイクロデバイスである MEMS チップと組み合わせたパルス加熱マイクロガスセンサを提案し(図 1)、2018 年に Ultra-High-Sensitive (UHS) ガスセンサとして ppt レベルのトルエン検知に成功し、世界最高感度を更新した。本成果は、日本経済新聞や医療系ニュースなどで報道されるとともに、本研究論文のコンセプトは米国化学雑誌の Analytical Chemistry (IF:6.042) の Suppl. cover に採択された。これまでの研究により、超高感度化に向けた材料設計は ppt レベルに到達した。しかし、ガス選択性の高性能化については未だサブ ppm レベルに留まっている。

レセプター機能には高感度化と選択性の二つの因子が含まれ、高感度化のためのいくつかの指針(化学的増幅、電子的増幅(p-n 接合やコンタクトポテンシャル))はすでに我々らにより提案されている。ガス選択性を大きく向上させるには、まずは水蒸気の影響を抑制しなければならないという大きな課題があり、申請者はこれまで“共存する水蒸気がなぜガス感度を低下させるか”、“どのようにすればその感度低下を抑制できるか”について検討し、水蒸気が存在すると吸着酸素が 2 価から 1 価に変化し、反応する電子数を減少させる“酸素吸着種の影響”、3nm 以下の Pd レセプターを担持すると水蒸気の影響が低減する“レセプターサイズ効果”などの重要な項目を見出している。しかし、ガス選択性を更に向上させるためには、上記の結果を踏まえた「特殊な反応場」を構築する必要があり、我々はその反応場として本研究で行う「制御結晶面」と「ダブルナノレセプター」の組み合わせを提案している。制御結晶面とは、水蒸気の影響を受け難く、2 価の酸素吸着種を保有する結晶面であり、ダブルナノレセプターとは被検ガスと相互作用をもつレセプターと酸素吸着特性に優れたレセプターをナノサイズで組み合わせたものであり、「制御結晶面」や「ダブルナノレセプター」をレセプター機能として導入できれば、ガス選択性が飛躍的に高い ppt ガスセンサが構築できると考えている。

### 2. 研究の目的

本研究は、極めて高い選択性を有する Ultra-High-Sensitive (UHS) ppt ガスセンサを構築するための材料設計指針を構築することを目的としている。本材料設計により、呼気中に含まれているバイオマーカーを検知する小型ガスセンサシステムの構築が可能となり、IoT と連動して早期医療や地域医療に大いに貢献できると考えている。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の観点で高選択性の材料設計を行った。

- MEMS ガスセンサのパルス駆動による選択的ガス検知
- ベース材料である金属酸化物(特に  $\text{SnO}_2$ ) ナノ粒子における結晶面制御
- Pd ナノレセプター担持  $\text{SnO}_2$  の MEMS ガスセンサへの適用とシングル ppt 検知
- 金属酸化物への酸素放出系ナノレセプターの担持
- 金属酸化物への検知ガス吸着系ナノレセプターの担持

### 4. 研究成果

#### 4 - 1. MEMS ガスセンサのパルス駆動による選択的ガス検知

$\text{SnO}_2$  ナノ粒子(粒子径 15nm)を用いた MEMS ガスセンサを作製し、図 1 に示すパルス駆動を行い、3 つの観点からガス感度と選択性を評価した。一つはこれまで用いていた、パルス駆動開始 50ms 後のガス中電気抵抗値と数分後の空气中電気抵抗値との比 ( $S_i$ ) である。二つ目はパルス駆動開始数分後に安定した、ガス中電気抵抗値と空气中電気抵抗値との比 ( $S_e$ ) である。三つ目は、ガス中の電気抵抗のみ着目し、パルス駆動開始 50ms 後と数分後の比 ( $S_p$ ) である。これらの値を用いて、水素、CO、トルエンのセンサ応答を比較すると図 2 に示すように、 $S_i$  は

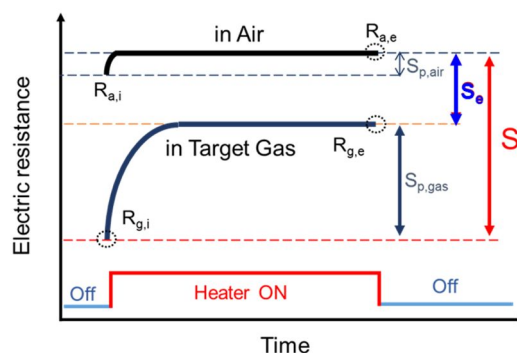


図 1 MEMS 型ガスセンサの駆動方法

低温において高い感度を示すが、Se と Sp を作動温度を基に比較するとガス選択性を議論できることが明らかになった。このような特性は、検知ガス吸着系ナノレセプターにおいて大きく異なることから、駆動方法とセンサ特性の評価法が高感度かつ高選択性に有用であることがわかった。本報告は、ACS Appl. Electron. Mater., 2(9), 2913-2920 (2020)に掲載され、モデル図が表紙に採用されている。

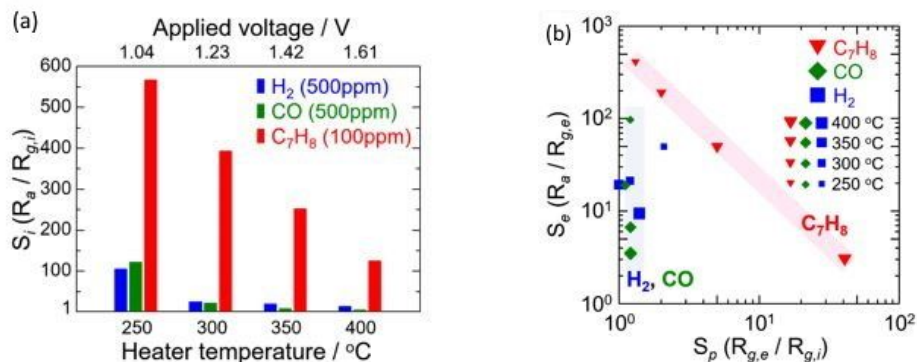


図2 MEMS型SnO<sub>2</sub>センサのガス応答特性  
(左：Siガス検知特性、右：SeとSpのガス検知特性比較)

#### 4 - 2 . ベース材料である金属酸化物 (特に SnO<sub>2</sub>) ナノ粒子における結晶面制御

SnCl<sub>4</sub>・5H<sub>2</sub>O を出発原料として加水分解法によりスズ酸ゲルを合成、得られたゲルの pH を制御し、添加剤の有無により異方性を制御した。なお、pH はテトラメチルアンモニウムヒドロキシド (TMAH) を用いて調整しており、添加剤としてエチレンジアミン (EDA) を添加した。TMAH による pH 調整のみで得られた SnO<sub>2</sub> を SnO<sub>2</sub>-TMAH、EDA を添加して得られた SnO<sub>2</sub> を SnO<sub>2</sub>-EDA とした。焼成後の TEM 観察を図 3 に示すが、いずれの場合も結晶子サイズは volume depletion を形成する 20nm 以下であり、EDA を添加しない場合はロッド状 SnO<sub>2</sub> が得られることがわかった。

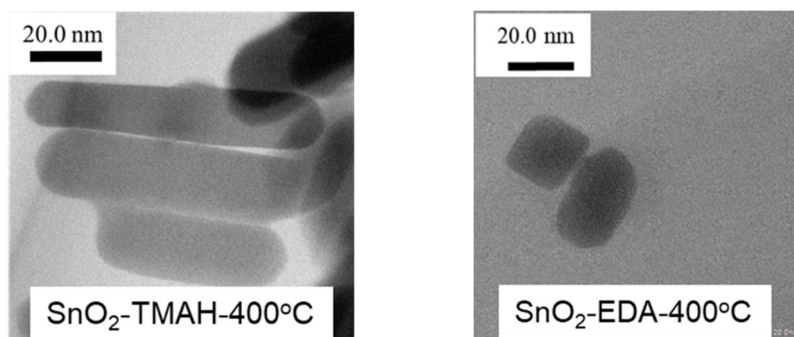


図3 結晶成長を制御したSnO<sub>2</sub>ナノ粒子  
(左：TMAHのみによる水熱処理、右：EDA添加水熱処理)

各粒子の 200ppm 水素および 20 ppm エタノールに対するセンサ応答を評価したところ、それぞれのガスに特異的な応答が見られた (図 4)。これらの結果から、結晶面へのガス吸着性を設計することにより、選択性が大いに向上できることが伺える。

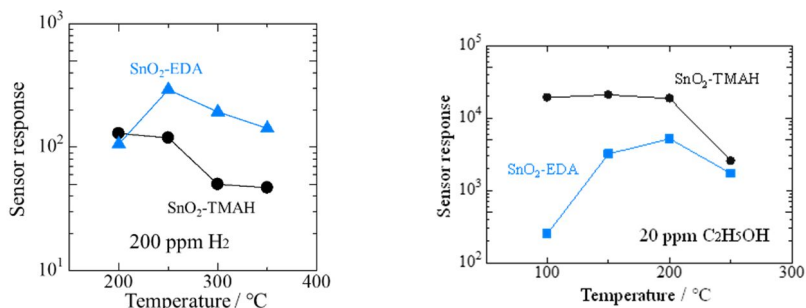


図4 結晶成長を制御したSnO<sub>2</sub>ナノ粒子のガスセンサ応答  
(左：200ppm水素に対する応答、右：20ppmエタノールに対する応答)

#### 4 - 3 . Pd ナノレセプター担持 SnO<sub>2</sub> の MEMS ガスセンサへの適用とシングル ppt 検知

3nm 以下の Pd レセプターを担持した SnO<sub>2</sub> クラスタを用いて、MEMS ガスセンサの駆動方法と検知感度の関係を明らかにした。本研究では、パルス駆動の前に酸素吸着を促進する予備加熱パルスを導入し、トルエンの検知下限を厳密に検討した結果、図 5 に示すように 7ppt の検知能力があることを明らかにした。また、本センサは、一桁のガス濃度変化に対して電気抵抗が 3 倍以上変化する優れた特性を示している。この検知特性は、これまで我々が示してきた世界最高感度である検知下限 100ppt を大きく更新したものである。なお、本報告の検知機構は、ACS Applied Electronic Materials, 2 (12), 4122-4126 (2020) の表紙に採択されている。

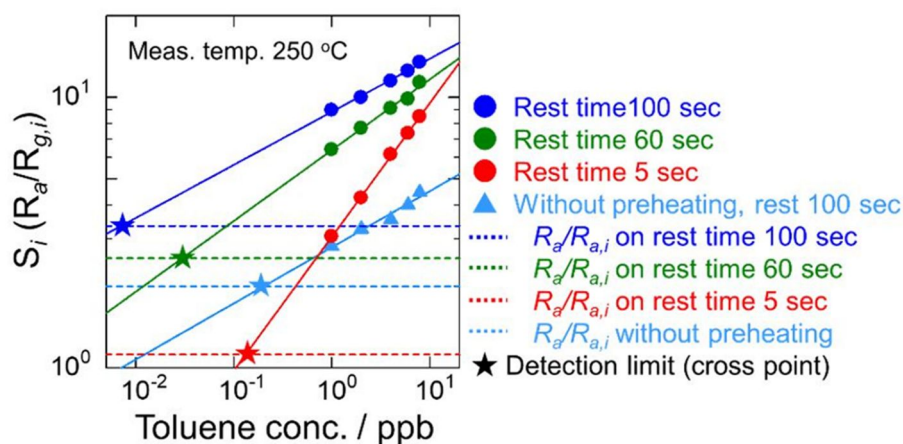


図 5 Pd ナノレセプター担持 SnO<sub>2</sub> の MEMS ガスセンサのトルエン検知特性

#### 4 - 4 . 金属酸化物への酸素放出系ナノレセプターの担持

MEMS 型センサ素子のパルス加熱駆動により、ヒーター-off 時にガスをセンサ膜内部に拡散し、ヒーター-on 時にセンサ膜内部に蓄積したガスを SnO<sub>2</sub> 上の吸着酸素により酸化させることで更なる高感度化を実現している。しかしながら、ガス種によっては SnO<sub>2</sub> の表面上のみでは不完全燃焼または部分酸化反応を引き起こし、センサ膜内部に副生成物が蓄積することがあり、酸素吸着が不十分となり、連続したガス検知が妨げられると考えられる。そこで、我々はパルス駆動による加熱特性を利用し、温度変化による酸素吸脱着特性を持つペロブスカイト型酸化物を添加することで、継続的に SnO<sub>2</sub> 表面に酸素を供給する新規ガス検知手法を提案した。図 6 にペロブスカイト型酸化物 Ba<sub>0.95</sub>La<sub>0.05</sub>FeO<sub>3-x</sub> (BLF) を混合した SnO<sub>2</sub> の MEMS ガスセンサについて、予備加熱温度に対する 1ppm エタノールのセンサ感度 ( $S_i$ ) を示す。なお、測定温度は 250 °C である。BLF から酸素を大量に放出する 400 °C に予備加熱温度を設定することにより、SnO<sub>2</sub> 表面に多くの酸素が吸着し、センサ感度が著しく上昇することがわかる。1ppm エタノールに対するこのようなセンサ感度は ppb レベルの検知を意味し、これまでに例のないセンサである。

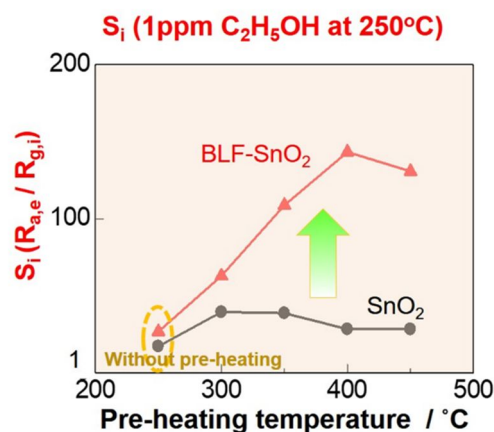


図 6 ペロブスカイト型酸化物 (BLB) 混合 SnO<sub>2</sub> の MEMS ガスセンサのエタノール検知特性

#### 4 - 5 . 金属酸化物への検知ガス吸着系ナノレセプターの担持

金属酸化物を用いた半導体ガスセンサではベース材料へのレセプター粒子担持による、ガス選択性の付与が広く検討されている。レセプター粒子の効果は二つに大別される。一つ目は、被検ガスの燃焼反応をレセプターが促進する化学的相互作用であり、レセプター粒子の触媒作用がセンサ特性に寄与する。二つ目は、p-n 接合の形成などによる空乏層増大や n-n 接合における酸化物微粒子の酸素吸着に基づくコンタクトポテンシャル形成などの電子的相互作用で、トランジューサー機能をもつ効果を持っている。我々は、前者の触媒作用に注目し、レセプター担持による VOC ガスの酸化過程の反応経路制御に着目し、レセプター粒子添加効果を検証した。本研究では、酸性酸化物によるレセプター効果の化学的増感効果を実験的に検証・モデル化するために、SnO<sub>2</sub> より酸性度の高く、負電荷吸着酸素が生じないレセプター粒子として MoO<sub>3</sub> を選定し

た。そこで、 $\text{SnO}_2$  及び  $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  を合成し、VOCs 応答特性への影響やその応答メカニズムについて検討した。 $\text{MoO}_3$  を  $\text{SnO}_2$  表面のレセプター粒子とした場合、アルコールの酸化反応における反応経路制御が可能である。代表的なアルコールであるエタノールの場合、酸性酸化物表面である  $\text{MoO}_3$  上ではエチレン生成反応を経由して酸化反応が進行する。また、 $\text{MoO}_3$  より酸性度の低い  $\text{SnO}_2$  上ではアセトアルデヒド生成反応を経由して酸化反応が進行する傾向を示す。一方、メタノールの場合、反応経路でアルケンの生成が困難であり、ホルムアルデヒド生成を経由する反応が生じやすい。このような中間生成物の違いによる最適反応温度の差異を利用することで、エタノールのメタノールに対する選択的検出が期待できる。さらに、低温で粒子表面にガスを吸着し、吸着ガスの瞬間的燃焼反応を利用した半導体ガスセンサであるパルス加熱駆動型ガスセンサにより、従来の定温加熱型半導体ガスセンサに比べて実行的なガス濃度を増大でき、高い感度とガス選択性の両立が可能となる。ここでは、 $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  をパルス加熱駆動型半導体ガスセンサに適用し、エタノールに対する選択性と高感度の両立を図ることを目的とした。

図7に  $\text{SnO}_2$  および  $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  MEMS ガスセンサの  $S_p$  と  $S_e$  特性を示す。 $\text{SnO}_2$  では  $S_e$ 、 $S_p$  共にガス種による顕著な差は見られなかったが、 $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  では  $S_e$ 、 $S_p$  共にエタノールに対して大きな値を示した。また、我々は  $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  でエタノールを検出する場合、エチレン生成を経由した際のセンサ感度が、アセトアルデヒド生成を経由した際のセンサ感度より高い値を示すことを報告している。これらのことから、レセプター粒子として  $\text{MoO}_3$  を担持し、パルス加熱駆動を行うことで、 $S_p$  と  $S_e$  の増大およびエタノールの選択的検出が達成できたと考えられる。これは  $\text{MoO}_3$  によりヒーター-off 時のガス吸着促進と、ヒーター-on 時のエチレン生成反応促進の両方が機能したことによると推測される。

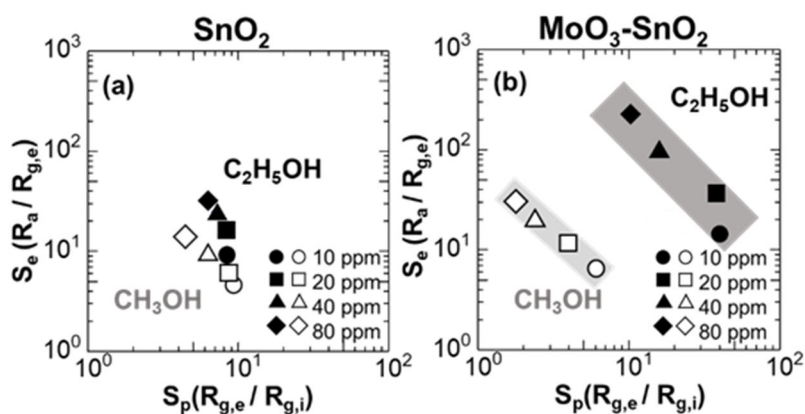


図7  $\text{SnO}_2$  および  $\text{MoO}_3$  担持  $\text{SnO}_2$  MEMS ガスセンサの  $S_p$  と  $S_e$  特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件/うち国際共著 11件/うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Suematsu Koichi, Oyama Tokiharu, Mizukami Wataru, Hiroshima Yuki, Watanabe Ken, Shimano Kengo	4. 巻 2
2. 論文標題 Selective Detection of Toluene Using Pulse-Driven SnO <sub>2</sub> Micro Gas Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 2913 ~ 2920
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00547	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 Suematsu Koichi, Hiroshima Yuki, Harano Wataru, Mizukami Wataru, Watanabe Ken, Shimano Kengo	4. 巻 5
2. 論文標題 Double-Step Modulation of the Pulse-Driven Mode for a High-Performance SnO <sub>2</sub> Micro Gas Sensor: Designing the Particle Surface via a Rapid Preheating Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 3449 ~ 3456
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.0c01365	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 Suematsu Koichi, Harano Wataru, Yamasaki Shigeto, Watanabe Ken, Shimano Kengo	4. 巻 2
2. 論文標題 One-Trillionth Level Toluene Detection Using a Dual-Designed Semiconductor Gas Sensor: Material and Sensor-Driven Designs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Applied Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 4122 ~ 4126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsaem.0c00902	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 Yang Jiaqi, Han Wenjiang, Ma Jian, Wang Chong, Shimano Kengo, Zhang Sumei, Sun Yanfeng, Cheng Pengfei, Wang Yinglin, Zhang Hong, Lu Geyu	4. 巻 340
2. 論文標題 Sn doping effect on NiO hollow nanofibers based gas sensors about the humidity dependence for triethylamine detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 129971 ~ 129971
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.129971	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 Zhou Chaoge, Meng Fanqi, Chen Ke, Yang Xueli, Wang Tianshuang, Sun Peng, Liu Fangmeng, Yan Xu, Shimanoe Kengo, Lu Geyu	4. 巻 339
2. 論文標題 High sensitivity and low detection limit of acetone sensor based on NiO/Zn <sub>2</sub> SnO <sub>4</sub> p-n heterojunction octahedrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 129912 ~ 129912
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.129912	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 Wang Hongtao, Li Yueyue, Wang Chenchang, Li Yuan, Bai Jihao, Liu Yueying, Zhou Linsheng, Liu Fengmin, Shimanoe Kengo, Lu Geyu	4. 巻 339
2. 論文標題 N-pentanol sensor based on ZnO nanorods functionalized with Au catalysts	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 129888 ~ 129888
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.129888	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 Liu Ao, Lv Siyuan, Jiang Li, Liu Fangmeng, Zhao Lianjing, Wang Jing, Hu Xiaolong, Yang Zijie, He Junming, Wang Chenguang, Yan Xu, Sun Peng, Shimanoe Kengo, Lu Geyu	4. 巻 332
2. 論文標題 The gas sensor utilizing polyaniline/ MoS <sub>2</sub> nanosheets/ SnO <sub>2</sub> nanotubes for the room temperature detection of ammonia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 129444 ~ 129444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2021.129444	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 Saito Noriko, Haneda Hajime, Watanabe Ken, Shimanoe Kengo, Sakaguchi Isao	4. 巻 326
2. 論文標題 Highly sensitive isoprene gas sensor using Au-loaded pyramid-shaped ZnO particles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 128999 ~ 128999
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2020.128999	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 Kou Xueying, Meng Fanqi, Chen Ke, Wang Tianshuang, Sun Peng, Liu Fangmeng, Yan Xu, Sun Yanfeng, Liu Fengmin, Shimano Kengo, Lu Geyu	4. 巻 320
2. 論文標題 High-performance acetone gas sensor based on Ru-doped SnO <sub>2</sub> nanofibers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators B: Chemical	6. 最初と最後の頁 128292 ~ 128292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.snb.2020.128292	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 Sun Yongjiao, Zhao Zhengting, Suematsu Koichi, Li Pengwei, Yu Zhichao, Zhang Wendong, Hu Jie, Shimano Kengo	4. 巻 5
2. 論文標題 Rapid and Stable Detection of Carbon Monoxide in Changing Humidity Atmospheres Using Clustered In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CuO Nanospheres	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Sensors	6. 最初と最後の頁 1040 ~ 1049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.9b02557	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. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-Heating of MEMS-Type Oxide Semiconductor Gas Sensor: (1) Detection of Toluene in Ppt Level	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 237th ECS Meeting with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020)	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Shimano, Y. Hiroyama, K. Suematsu, and K. Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-Heating of MEMS-Type Oxide Semiconductor Gas Sensor: (2) Detection of Ethanol in Ppb Level By Introducing Oxygen Supplier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 237th ECS Meeting with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020)	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Yongjiao Sun, Zhenting Zhao, Koichi Suematsu, Pengwei Li, Zhichao Yu, Wendong Zhang, Jie Hu, Kengo Shimano	4. 巻 5
2. 論文標題 Rapid and Stably Detection of Carbon Monoxide in Humidity Changed Atmospheres using Clustered In2O3/CuO Nanospheres	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS sensors	6. 最初と最後の頁 1040-1049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssensors.9b02557	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 Koichi Suematsu, Wataru Harano, Tokiharu Oyama, Nan Ma, Ken Watanabe, Kengo Shimano	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultra-High Sensitive Gas Detection Using Pulse-Driven MEMS Sensor Based on Tin Dioxide	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISOEN.2019.8823211	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13件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Kengo Shimano, Koichi Suematsu, Ken Watanabe
2. 発表標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-Heating of MEMS-Type Oxide Semiconductor Gas Sensor: (1) Detection of Toluene in Ppt Level
3. 学会等名 The Electrochemical Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kengo Shimano, Koichi Suematsu, Ken Watanabe
2. 発表標題 Design of Ultra-High-Sensitive Gas Sensors By Combination of Metal Oxides Semiconductor and MEMS
3. 学会等名 PRIME 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kengo Shimano, Koichi Suematsu, Ken Watanabe
2 . 発表標題 MEMS-type gas sensor toward ultra-high-detection in ppt level
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Functional Materials (ISFM 2020) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2 . 発表標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-Heating of MEMS-Type Oxide Semiconductor Gas Sensor: (1) Detection of Toluene in Ppt Level
3 . 学会等名 237th ECS Meeting with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020 (国際学会))
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Shimano, Y. Hiroyama, K. Suematsu, and K. Watanabe
2 . 発表標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-Heating of MEMS-Type Oxide Semiconductor Gas Sensor: (2) Detection of Ethanol in Ppb Level By Introducing Oxygen Supplier
3 . 学会等名 237th ECS Meeting with the 18th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2020 (国際学会))
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Koichi Suematsu, Wataru Harano, Tokiharu Oyama, Nan Ma, Ken Watanabe, Kengo Shimano
2 . 発表標題 Ultra-High Sensitive Gas Detection Using Pulse-Driven MEMS Sensor Based on Tin Dioxide
3 . 学会等名 2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Suematsu, Wataru Harano, Yuki Hiroshima, Ken Watanabe, Kengo Shimano
2. 発表標題 Ultra-High Sensitive (Ppt) Gas Sensor Based on the Pulse Heating Using MEMS Technique
3. 学会等名 the 8th GOSPEL Workshop. Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxides (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kengo Shimano, Takaharu Mizukami, Koichi Suematsu, Ken Watanabe
2. 発表標題 Consideration for Oxygen Adsorption Species on SnO <sub>2</sub> Semiconductor Gas Sensors
3. 学会等名 the 8th GOSPEL Workshop. Gas Sensors Based on Semiconducting Metal Oxides (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2. 発表標題 Ultra-high sensitive gas sensor using MEMS device
3. 学会等名 2019 The Korean Ceramic Society Spring Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2. 発表標題 High performance MEMS-type gas sensors
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Solid State Ionics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2. 発表標題 Ultra-High-Sensitive Gas Detection Using Pulse-heating of MEMS-Type Pd-SnO <sub>2</sub> Sensor
3. 学会等名 The 5th International Conference on Advanced Electromaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2. 発表標題 Ultra-High-Sensitive Detection Using Pulse-heating of MEMS-Type Gas Sensor
3. 学会等名 中国電子学会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimano, K. Suematsu, K. Watanabe
2. 発表標題 MEMS -Type Gas Sensor of Pd-Loaded SnO <sub>2</sub> for Ultra-High-Sensitive Detection in ppt Level
3. 学会等名 2019 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 Noboru Yamazoe, Kengo Shimano	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Elsevier Ltd.	5. 総ページ数 497
3. 書名 Semiconductor Gas Sensors (Second Edition)	

1. 著者名 島ノ江憲剛、末松昂一、渡邊 賢	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 1570
3. 書名 薄膜作製応用ハンドブック	

1. 著者名 島ノ江憲剛、末松昂一、渡邊 賢	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 543
3. 書名 におけるセンシング、分析とその可視化、数値化	

1. 著者名 Noboru Yamazoe, Kengo Shimanoe	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 510
3. 書名 Semiconductor Gas Sensors	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ガス検出装置	発明者 末松昂一、渡邊 賢、島ノ江憲剛	権利者 フィガロ技研
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-074548	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

九州大学プレスリリース  
[https://www.kyushu-u.ac.jp/f/34011/18\\_08\\_29.pdf](https://www.kyushu-u.ac.jp/f/34011/18_08_29.pdf)

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
研究分担者	渡邊 賢  (Watanabe Ken)  (90552480)	九州大学・総合理工学研究院・准教授   (17102)	
研究分担者	末松 昂一  (Suematsu Koichi)  (90637555)	九州大学・総合理工学研究院・助教   (17102)	

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
---------	---------