

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：82108

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20554

研究課題名（和文）ニオイの直接音声周波数展開による直感的ニオイ認識技術体系の創出

研究課題名（英文）Development of an Intuitive Odor Recognition Technology System through Direct Audio Frequency Expansion of Odors

研究代表者

吉川 元起（Yoshikawa, Genki）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・高分子・バイオ材料研究センター・グループリーダー

研究者番号：70401172

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ニオイを音声データに変換する新たな嗅覚センサシステムの開発を目的とした。まず有限要素解析と試作実験に基づいて、ガス制御-音声測定システムを確立した。これを用いて各種ガスを周波数領域と時間領域のそれぞれに着目した測定を行った。得られたデータからガス種や濃度の識別が可能となり、高い線形性と測定精度を確認した。さらにこの手法を最適化することで、ppmレベルのガス測定が可能であることを示し、簡易デバイスによる実証にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この音響計測法は、市販のイヤホンとマイクがあれば実現可能な手法であり、再現性の高い測定を実施可能である。また、物理的な測定方法であるため、化学センサのような検体の残留やセンサの被毒などの問題が発生しない。本手法は、特に高精度なガス濃度計測に有用であるが、さらに時系列データを解析することでガス種の識別も可能となる。以上のように、本研究で確立した新たな音響ガス計測法によって、簡易デバイスによる高精度ガス濃度の迅速分析が実現し、多様な応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is to develop a new olfactory sensor system that converts odors into sound data. First, based on finite element analysis and prototype experiments, a gas-sound measurement system was established. Using this system, various gases were measured focusing on the frequency domain and time domain, respectively. The obtained data enabled identification of gas species and concentrations, and confirmed high linearity and measurement accuracy. Furthermore, by optimizing this method, the ppm level measurements were successfully demonstrated even with a simple device.

研究分野：センサ開発

キーワード：ガス ニオイ 音声 センサ データ解析 周波数 デバイス

1. 研究開始当初の背景

ニオイを測定する嗅覚センサは、1982年の最初の報告以来、40年近くの研究開発にもかかわらず、依然として有効な社会実装が進んでいない。これには以下の4つの問題があると考えられる：

【問題1】 ニオイという複雑な混合ガスを測定する際に、センサ素子の応答出力として0次元～1次元に情報が落ちてしまい、ほとんどの情報が失われてしまっている。

【問題2】 各種嗅覚センサのシグナルが独自フォーマットとなっており、測定・解析方法が確立していない。

【問題3】 嗅覚センサから得られる情報が、数値や専門用語、化合物名など、理解が困難なものが多く、「結局どういふニオイなのか?」という直感的認識ができない。

【問題4】 ニオイはほぼ無限の組み合わせがあり、さらに時間的にも空間的にも揺らぎ続けるにもかかわらず、事前に学習されたニオイにしか有効な結果を提示できない。

これらの問題を解決する新たなニオイ測定手法の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、「ニオイを音声に直接変換」することにより、従来の嗅覚センサとは全く異なる新たな測定・解析方法を確立することを目的とする。本研究では、ニオイを音声に変換することで、上記問題の解決を試みる。まず、ニオイと音声を1つのチャンネルで同時に取得可能な新しいセンサ素子「ニオイ・音声同時測定センサ」を作製し、ニオイを音声の周波数応答特性の変化として測定する。これによって、通常の嗅覚センサでは1チャンネル当たり0次元～1次元の情報(センサ応答強度(0次元)あるいはその経時変化(1次元))しか得られなかったのに対し、1チャンネル当たり～20,000次元の情報(20 Hz～20,000 Hz程度までの周波数応答の経時変化)を取得可能にする(上記【問題1】を解決)。この場合に取得されるデータは、基本的に音声データフォーマットとなるため、音声に関連する膨大なハードウェア・ソフトウェア技術をそのまま利用することが可能となる(上記【問題2】を解決)。これらの、ニオイから変換された音声データは、フーリエ変換などを介して任意に合成・分離・加工することが可能であるため、嗅覚で認識される直感的感覚に近づくことが可能となる(上記【問題3】を解決)。この方法では、アナログレベルでニオイを音の変化として記録しているため、原理的にどのようなニオイに対しても、リアルタイムで対応する音声を記録・再生することが可能である(上記【問題4】を解決)。こうして「聴覚を介したニオイの直感的認識」という新たな分野を開拓する。

3. 研究の方法

実験は、主に2つのマスフローコントローラ(MFC)で構成されたガス流路を用いて実施した。一方のMFC(MFC1)は液体サンプルを含むガラスバイアルに接続されており、MFC1からキャリアガスとして窒素がテフロンチューブを通してバイアルのヘッドスペースに供給され、液体サンプルから揮発したガス分子がヘッドスペースからテフロンチューブを通過して混合チャンバーに押し出される。ここで、もう一方のMFC(MFC2)を介して供給される純粋な窒素ガスで希釈され、0リングで密閉されたステンレス製の音響共振測定チャンバーに導入される。実験全体を通じてMFC1とMFC2の総流量は100 sccmに維持され、ガスの濃度($C = \text{MFC 1} / (\text{MFC 1} + \text{MFC 2}) \times 100\%$)はMFC1の流量を5～100%の範囲で変えることで調整した。音響共振測定チャンバーは円筒形($\phi = 6$ [mm])の内部構造を有しており、有限要素解析により定在波音響共振モードの音圧分布を確認し、MEMSマイクロフォン(ここでは、SPH8878LR5H-1, Knowles and SparkFun Analog MEMS Microphone Breakout - SPH8878LR5H-1を使用した)とスピーカ(ここでは、ZNS-0111-BE1Y, Boesklenn)を測定しやすい位置に取り付けた。バイアルと音響共振測定チャンバーはすべてインキュベーター内に収められており、実験全体を通じて一定の温度(25℃)に維持した。PXI 5406 (NI Corporation)とPXI 5922 (NI Corporation)を用いて、それぞれスピーカに電圧(V_s)と周波数(f)を供給し、MEMSマイクロフォンの応答(V)を測定した。すべての実験は、自作のLabVIEWプログラム(バージョン2021, NI Corporation)を用いて行った。周波数領域の測定は、市販されている高解像度オーディオシステムでカバー可能な領域である200 kHzのサンプリングレートで行った。時間領域の測定にはヘッドスペース分子放出の動的応答をより詳細に捉えるために、20 kサンプル毎のデータ取得を行うことで10 Hzのサンプリングレートで測定を行った。

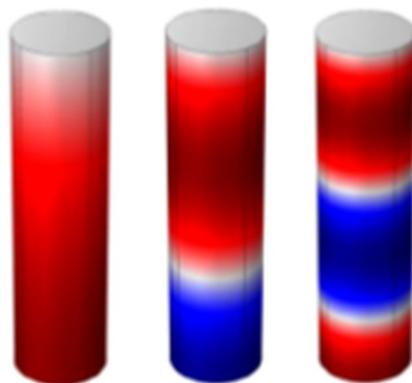


図1：有限要素解析を用いて得られた、 $n=1, 3, 5$ に対応する最初の3つの定在波音響共振モードの音響共振測定チャンバー内の音圧分布。

4. 研究成果

本手法を使うことで、各ガスの様々な情報が得られることが確認された。まず、図2に示したとおり、特定の周波数(この場合6.9 kHzに固定)の時系列変化を測定すると、各ガス種でそれぞれ異なる出力が得られることが確認できる(文献)。これは、各ガスが音響共振測定チャンパー内に導入される際に、気体の揮発速度やガス流路への吸脱着挙動が異なるため、チャンパー内の気体濃度と、それに伴う音速や気体密度が連続的に変化するためである。この時系列データから、立ち上がりや立ち下りの大きさや時間を特徴量として抽出することにより、各ガス種を明確に識別する事が可能である(図3)(文献)。

この測定方法は、より簡単なデバイスでの測定も可能である。図4はその一例で、ガラスバイアルに取り付けて密閉することにより、ヘッドスペースガスの測定が可能な簡易測定モジュールである。この測定では、ガスが揮発してヘッドスペースに充満していく様子を時系列で測定することも可能であり、その時系列データから、やはりガス種を識別する事も可能である(文献)。さらにこのシステムを用いることで、各ガスを音声信号に変換することも可能となる。例として、各ガスが導入された際にピンクノイズが変化の様子を音声や画像(周波数解析図)で示した(文献)。これにより、各ガスを他の感覚(この場合、聴覚と視覚)によって、より直感的に理解しやすい形式に変換できることを実証した。

さらにこの手法は、スイープ信号を用いることによって、低濃度ガスの測定も可能となる。実証例として吉草酸、ノナノール、オクタノール、および、ドデカン、テトラデカン、ヘキサデカンなどのガスの測定を行ったところ、いずれも5-10 ppmレベルまで測定可能であることが確認された。

このように、本研究では、ガスを音声情報に変換することに成功しただけでなく、市販のイヤホンとマイクという簡単な汎用音響機器でも実証することに成功した。この音響測定法は、物理的な測定方法であるため、化学センサのような検体の残留やセンサの被毒などの問題が発生せず、再現性の高い測定を実施可能である。

以上のように、本研究では当初の4つの問題のうち、3つの問題に対して解決策を与える事に成功した。具体的には、【問題2】については市販のイヤホンとマイクでガス測定を実現し、【問題3】については、音声や画像への変換を実証し、さらに【問題4】についてはリアルタイムでの時系列測定を実証した。一方で、【問題1】については、本手法が物理的な測定であることから、物理的に想定される信号(ガス密度の変化による音速や共振周波数の変化など)しか情報として得ることができず、それほど多くの次元の情報を得ることができなかった。これに関しては新たな手法を現在検証中であり、後日報告予定である。

以上、本研究で確立した新たな音響ガス計測法によって、簡易デバイスによる高精度ガス濃度の迅速分析が実現し、多様な応用が期待される。

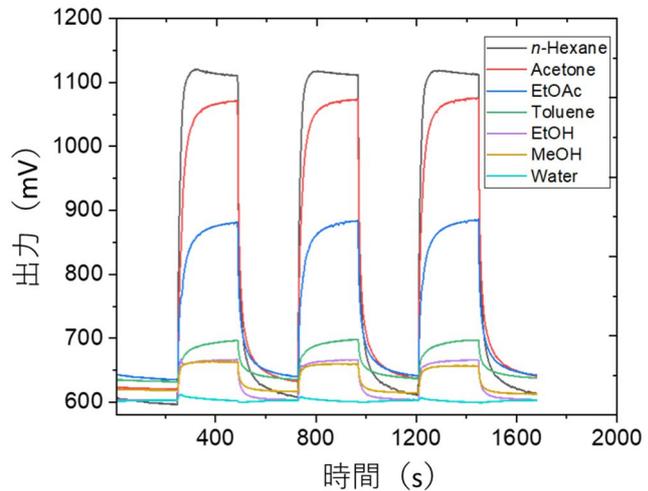


図2：各ガス種に対するマイクからの出力電圧。

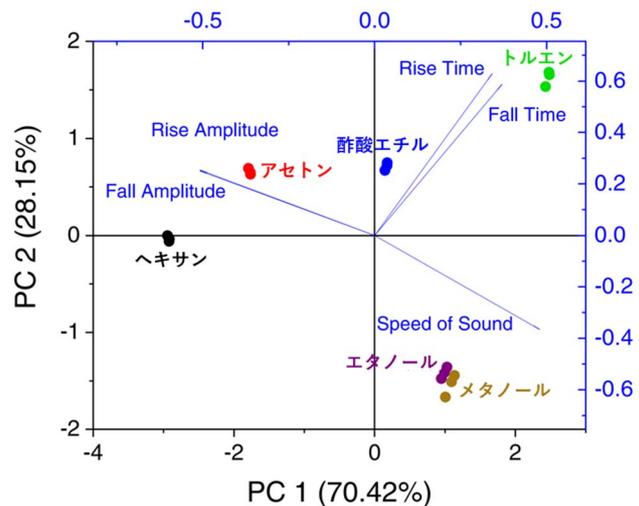


図3：図2の時間領域測定データから抽出した各特徴量の主成分分析結果。

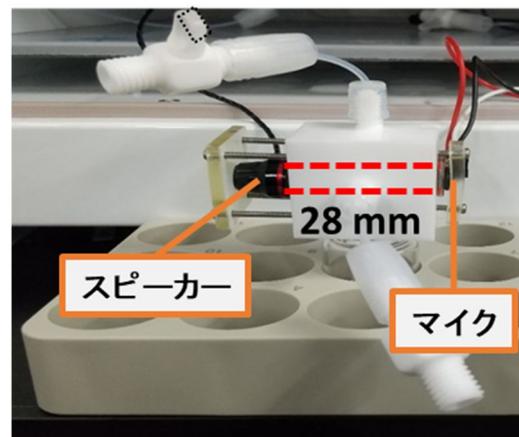


図4：バイアルに取り付けるだけで測定可能な簡易測定モジュールの例。

<引用文献>

T. Yildirim, M.-Q. Feng, T. A. Ngo, K. Shiba, K. Minami, and G. Yoshikawa, "Dual domain acoustic olfactory discriminator," *Sensors and Actuators A: Physical* **350**, 114102 (2023).

T. Yildirim, M.-Q. Feng, K. Shiba, K. Minami, and G. Yoshikawa, "A portable audible-range acoustical approach for determining headspace vapour-phase properties," *Sensors and Actuators A: Physical* **358**, 114438 (2023).

T. Yildirim, M.-Q. Feng, K. Shiba, K. Minami, and G. Yoshikawa, "Audible sensing of low-ppm concentration gases," *Sensors and Actuators A: Physical* **370**, 115215 (2024).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Yildirim Tanju, Feng Meng-Qun, Ngo Thuc Anh, Shiba Kota, Minami Kosuke, Yoshikawa Genki	4. 巻 350
2. 論文標題 Dual domain acoustic olfactory discriminator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 114102 ~ 114102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2022.114102	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 Zhuang Chao, Minami Kosuke, Shiba Kota, Yoshikawa Genki	4. 巻 1
2. 論文標題 Linear Stiffness Tuning in MEMS Devices via Prestress Introduced by TiN Thin Films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 1213 ~ 1219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsaenm.3c00034	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 Minami Kosuke, Kobayashi Hisami, Matoba Masaaki, Kamiya Yuko, Maji Subrata, Nemoto Takahiro, Tohno Masanori, Nakakubo Ryoh, Yoshikawa Genki	4. 巻 13
2. 論文標題 Measurement of Volatile Fatty Acids in Silage through Odors with Nanomechanical Sensors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biosensors	6. 最初と最後の頁 152 ~ 152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/bios13020152	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 Murata Tomohiro, Minami Kosuke, Yamazaki Tomohiko, Yoshikawa Genki, Ariga Katsuhiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Detection of Trace Amounts of Water in Organic Solvents by DNA-Based Nanomechanical Sensors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biosensors	6. 最初と最後の頁 1103 ~ 1103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/bios12121103	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 Minami Kosuke, Imamura Gaku, Tamura Ryo, Shiba Kota, Yoshikawa Genki	4. 巻 12
2. 論文標題 Recent Advances in Nanomechanical Membrane-Type Surface Stress Sensors towards Artificial Olfaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Biosensors	6. 最初と最後の頁 762 ~ 762
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/bios12090762	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. Shiba G. Imamura G. Yoshikawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Odor-Based Nanomechanical Discrimination of Fuel Oils Using a Single Type of Designed Nanoparticles with Nonlinear Viscoelasticity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 23389-23398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c03270	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. Minami K. Shiba G. Yoshikawa	4. 巻 129
2. 論文標題 Sorption-induced static mode nanomechanical sensing with viscoelastic receptor layers for multistep injection-purge cycles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 124503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0039045	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. Inada H. Kojima Y. Cho-Isoda R. Tamura G. Imamura K. Minami T. Nemoto G. Yoshikawa	4. 巻 21
2. 論文標題 Statistical Evaluation of Total Expiratory Breath Samples Collected throughout a Year: Reproducibility and Applicability toward Olfactory Sensor-Based Breath Diagnostics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors (Basel)	6. 最初と最後の頁 4742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21144742	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 M. Nishikawa T. Murata S. Ishihara K. Shiba L. K. Shrestha G. Yoshikawa K. Minami K. Ariga	4. 巻 94
2. 論文標題 Discrimination of Methanol from Ethanol in Gasoline Using Membrane-Type Surface Stress Sensor Coated with Copper(I) Complex	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bulletin of the Chemical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 648-654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1246/bcsj.20200347	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27件 (うち招待講演 26件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 MSS嗅覚センサシステムの研究・開発・実証・実装
3. 学会等名 R041委員会 第2回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサの歴史と現状、およびMSS嗅覚センサの研究開発と最新状況
3. 学会等名 技術情報協会セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 五感センサ最後のフロンティア「嗅覚センサ」への挑戦
3. 学会等名 第24回 産業ときめきフェア「分析化学の最前線」 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 農業・医療応用に向けたAI嗅覚センサによる生体ガス測定
3. 学会等名 NIMS WEEK 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサシステムの研究・開発・実証・実装
3. 学会等名 第12回 CSJ化学フェスタ2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサシステムの研究・開発・実証・実装
3. 学会等名 第6回 感覚フロンティア研究シンポジウム -異分野融合が拓くミライの感覚- (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサの原理と歴史・研究と開発・実証と実装
3. 学会等名 新化学技術推進協会 電子情報技術部会 マイクロナノシステムと材料・加工分科会 勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサの研究・開発・実証・実装
3. 学会等名 第83回 応用物理学会秋季学術講演会 シンポジウム「人工嗅覚エレクトロニクス・インフォマティクスの研究最前線と展望」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚IoTセンサーと機械学習でニオイの世界を再構成する
3. 学会等名 シュレディンガーの水曜日(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサによるニオイの計測およびその評価と解析方法
3. 学会等名 R&D支援センターセミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサシステムの基礎と応用
3. 学会等名 日本テクノセンターセミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 Olfactory Sensors based on Nanomechanical Sensors (MSS) / Functional Materials / Machine Learning
3. 学会等名 Chemical Nanosensors Australia (CNA) Summit 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサの社会実装に向けた総合的研究開発
3. 学会等名 JEITAスマートセンシング・デバイス融合技術分科会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 Development of Olfactory Sensor Systems
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Biomedical Engineering (ISBE2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 Olfactory Sensor System with MSS & AI
3. 学会等名 The 5th International Workshop on MEMS and Sensor System 2021 (IWMS 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 MSS嗅覚センサの研究開発
3. 学会等名 技術情報協会セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 情報計測による嗅覚センサの高度化
3. 学会等名 情報計測オンラインセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 MSS towards Artificial Olfaction
3. 学会等名 10th International Conference on Advanced Materials Science and Nanotechnology - IWAMSN 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 五感センサ最後のフロンティア「嗅覚センサ」 - その歴史・現状・展望
3. 学会等名 Smart Sensing 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 『嗅覚のセンシング技術 ～正しく測定するための基礎からニオイを定量化・可視化する技術まで～』
3. 学会等名 TH企画セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサMSSによるニオイの測定と解析
3. 学会等名 応用脳科学アカデミーアドバンスコース「五感・情動・記憶・意志決定・コミュニケーション」第1回（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 「嗅覚センサ実現のための技術要素、課題とその研究開発動向」～なぜ製品化が難しいのか、どうしたら上手くいくのか～
3. 学会等名 技術情報協会セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 「嗅覚センサ」－五感センサ最後のフロンティア－ ニオイを測る嗅覚センサの歴史・現状・展望
3. 学会等名 Smart Sensing Online（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサの総合的研究開発
3. 学会等名 第30回マイクロシステム融合研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 五感センサ最後のフロンティア「嗅覚センサ」に挑む
3. 学会等名 第15回日本分子イメージング学会学術集会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚センサ研究開発の現状と課題
3. 学会等名 2021年度第1回 香り・におい・ガスセンサー研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Yoshikawa
2. 発表標題 嗅覚とは？匂いをデジタル化する嗅覚センサとは？
3. 学会等名 嗅覚に切り込むアートセミナー～何が「香り」を「芸術」たらしめるのか？（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 音響測定によるガスの特性抽出方法およびそのための装置	発明者 ユルドゥルムタン ジュ、吉川元起	権利者 物質・材料研究 機構
産業財産権の種類、番号 特許、2022-166570	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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

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