

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289120

研究課題名(和文) 嗅覚受容体センサアレイを用いた香りの記録再生と要素臭探索

研究課題名(英文) Odor reproduction using olfactory receptor sensor array and exploration of odor components

研究代表者

中本 高道 (Nakamoto, Takamichi)

東京工業大学・精密工学研究所・教授

研究者番号：20198261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：匂い検出素子として、キイロショウジョウバエの嗅覚受容体を、共受容体およびカルシウム感受性蛍光タンパク質(GCaMP)と共発現させ、Sf21細胞系統を作出し、改変した発現ベクターとGCaMP6sを用いることで、SN良く匂い応答を示す細胞系統へと改良した。また、細胞からの蛍光を検出するために小型の蛍光測定装置及び匂いを供給するフロー測定系を構築した。測定系を最適化し、ロックイン計測法を導入し外乱光存在下で3桁検出下限を改善できた。また、複数種類の嗅覚受容体によりセンサアレイを構成する基礎実験を行った。最後に水晶振動子に細胞を吸着させ高湿度下で応答測定を行い、低濃度で気相測定できる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：For odorant sensor elements, we introduced *Drosophila* odorant receptor (Or) gene along with co-receptor (Orco) gene and calcium indicator fluorescence protein (GCaMP) gene into Sf21 cell to establish the cell lines. The use of modified Or-Orco expression vector and GCaMP6s led to higher SN ratio in the cell lines.

We developed a fluorescent measurement system with portable size and constructed a flow measurement system. We optimized the measurement system and introduced the lock-in measurement method and found that the detection limit became three orders of magnitude lower than that using the conventional method. Then, we did the fundamental experiment on measuring the responses of the cells with different ORs to make a sensor array. Finally, we performed the experiment of Quartz Crystal Microbalance sensor coated with cells expressing ORs in the vapor phase with high humidity. The experimental result suggests the possibility of the measurement in the vapor phase.

研究分野：計測システム

キーワード：バイオセンサ 嗅覚受容体 蛍光測定 フロー測定系 ロックイン計測 センサアレイ 画像処理

### 1. 研究開始当初の背景

近年、視聴覚情報の記録再生技術の発達はめざましいが、視覚と聴覚だけでは伝えることができない情報が存在する。そこで、香りに関する記憶再生技術が期待されている。特別な訓練を受けた人以外は、香りを言葉で表すことが難しく実際に香りを再現して嗅いでもらうことが最良の方法である。

我々の身の回りには、食品、飲料、化粧品、アロマグッズ等の香りに関係した商品が多数存在し、商品開発、品質管理、商品ディスプレイに匂いの記録再生システムは有用である。この匂いを記録を行うためには優れた感度と選択性を有するセンサが必要であるが、既存のセンサでは不十分な性能であった。

### 2. 研究の目的

匂いの記録再生システムではセンシングした香りを記録して再現を行う。生物に匹敵するセンシング性能を得るには生体の嗅覚受容体を直接センサ素子に用いるのがよい。本研究では、嗅覚受容体をセンサ素子に用いた匂いの記録再生システムの研究を行う。脊椎動物に比べて仕組みが簡素な昆虫の嗅覚受容体を用いて特性が異なるセンサを実現し、センサアレイを構成して匂いの記録再生システムを実現する。匂いの記録再生システムの性能は嗅覚受容体センサの導入で飛躍的に高まりその汎用性を大きく向上できる。本研究では、匂いの記録に十分な性能を持つ匂いバイオセンサを実現する。

### 3. 研究の方法

(1) 昆虫の嗅覚受容体を発現した細胞の実現  
昆虫の嗅覚受容体は、共受容体である Orco (Olfactory receptor co-receptor) とともに複合体を形成し、匂い物質作動性のイオンチャンネルとして機能する。匂い検出素子として使用するためには、培養細胞等のタンパク質発現系を利用し、機能的な嗅覚受容体を発現させる必要がある。分担者神崎らは、カイコガの性フェロモン受容体を、Orco およびカルシウム感受性蛍光タンパク質 (GCaMP3) とともに Sf21 細胞に遺伝子導入することで、導入した受容体の匂い選択性に従い、蛍光強度変化量として、匂い物質を検出できる Sf21 細胞システムの作出技術を確認している。本研究ではキイロショウジョウバエの一般臭を受容する嗅覚受容体を対象に、様々な一般臭に対して蛍光応答を示す Sf21 細胞システムの作出を試みた。まず、嗅覚受容体遺伝子と Orco 遺伝子は、キイロショウジョウバエの触角 cDNA から単離し、2 遺伝子を同時に発現できるデュアル発現ベクターを構築した。GCaMP 遺伝子は、別の発現ベクターを構築した。ここでは、GCaMP として、GCaMP3 遺伝子および GCaMP6s 遺伝子を使用した。構築した 2 種類の発現ベクターをリポフェクション法により Sf21 細胞に遺伝子導入し、抗生物質を用いた選抜により細胞システムを作出した。

作出した細胞システムの匂い物質に対する蛍光応答は、蛍光顕微鏡を用いたカルシウムイ

メージング法および蛍光プレートリーダーにより取得した。カルシウムイメージングでは、計測チャンバに作出した細胞システムを接着させ、ペリスタポンプにより測定用バッファ液を灌流した。匂い刺激は、測定用バッファ液で希釈して作製し、灌流系に添加することで、細胞へと供給した。細胞の蛍光応答は、480nm で励起し 510nm の蛍光画像を蛍光顕微鏡および高感度冷却 CCD カメラを用いて取得した。蛍光プレートリーダーでは 96 ウェルプレートに細胞を播種し、各ウェルに匂い物質を滴下することで蛍光強度変化量を取得した。以上の手法により、作出した細胞システムの匂い物質に対する応答性および濃度応答を測定することで匂い検出素子としての検出性能を評価した。

### (2) 測定系の構築

匂い受容に伴い細胞内  $Ca^{2+}$  の濃度が上昇し蛍光強度が増加する。その蛍光強度変化を測定するシステムを試作した。励起光源としてはレーザーダイオード(出力 22mW)を用いた。

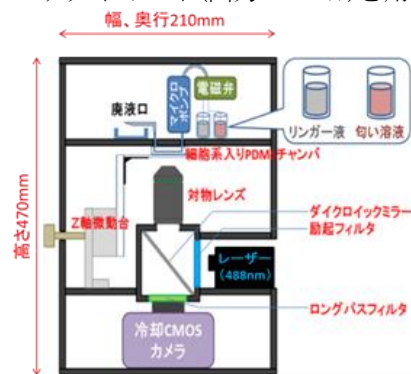


図1. 光学測定系

その光学測定系を図1に示す。レーザーダイオードからの励起光がダイクロックミラーを介してセンサチャンバを照射する。チャンバ内の細胞は励起光を受けて蛍光を発生させ、その蛍光は再びダイクロックミラーを通過して冷却 CMOS カメラで計測する。この計測システムを製作し基本動作を確かめた。

次にポンプによりサンプル溶液を流し、4個のサンプルを電磁弁により切り替えてチャンバ内の細胞に匂い溶液を供給するフローシステムを試作した。(図2)

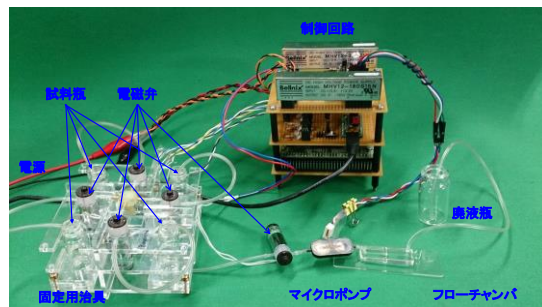


図2. フロー測定システムの写真

また、細胞の入る部屋の上部が空いているデッドボリュームの大きなチャンバ (A タイプ) と細胞の入る部屋の上部は塞がれておりデッドボリュームの小さなチャンバ (B タイ

プ)である。これらのチャンバの比較検討を行った。

### (3) ロックイン計測法

蛍光は大変微弱なので外乱光の影響を受けやすい。そこで、外乱光の影響にロバストな計測方法として、ロックイン計測法を用いた。ロックイン計測法は励起光に変調をかけて、それと同期する蛍光成分のみを検出する方法で、励起光変化に無関係な光を除去し S/N 比を高める働きがある。まずオフラインで動作させて検討を行い、次に FPGA 内で多数回路を並列動作させる方法も検討した。

### (4) 複数種類細胞の画像取得

単一嗅覚受容体からセンサアレイに発展させるためには、複数種類の細胞の画像を得る必要がある。そこで、異なる嗅覚受容体発現細胞を別のチャンバに入れて同時に画像を得る方法と異なる種類の細胞を同時に吸着させて画像をセンサアレイとみなす方法を検討した。

(5) 水晶振動子を用いた匂いバイオセンサ水晶振動子上に嗅覚受容体発現細胞を吸着させ、匂い物質受容に伴う共振周波数変化を高湿度下で計測した。

## 4. 研究成果

(1) 昆虫の嗅覚受容体を発現させた Sf21 細胞系統の作出と匂い検出性能評価

一般臭を検出する匂い検出素子を作成するため、キイロショウジョウバエの成虫触角で機能発現する一般臭嗅覚受容体を対象に、触角 cDNA から嗅覚受容体遺伝子を単離し、Orco 遺伝子とともに、デュアル発現ベクターを構築した。同時に、GCaMP3 遺伝子を挿入した発現ベクターを構築し、デュアル発現ベクターとともに遺伝子導入することで、Sf21 細胞系統の作出を行った。カルシウムイメージングにより匂い検出性能を評価した結果、これら細胞系統は、一部の細胞は応答を示すものの、応答する細胞の割合や蛍光強度変化量が小さいことが分かってきた。そこで、まず細胞系統の高感度化技術の確立を行い、応答する細胞の割合が多く、SN 比良く応答が検出できる細胞系統の作出を試みた。

細胞系統は、嗅覚受容体-Orco デュアル発現ベクターと GCaMP 発現ベクターを遺伝子導入し、作出している。そのため、細胞系統の検出性能は、主に嗅覚受容体-Orco の発現量、および GCaMP の蛍光強度変化量によって影響を受ける。そこで、嗅覚受容体-Orco についてはデュアル発現ベクターの改変を、GCaMP については GCaMP の種類の選定を実施することで、細胞系統の応答性の改良を試みた。GCaMP は、実験開始当初 GCaMP3 を使用していたが、Sf21 細胞でより大きな蛍光強度変化を示す GCaMP6s に変更した。改良前後の結果を図 3 に示す。改良前は、高濃度 (1mM) の匂い物質に対して応答する細胞の割合は 10% 程度であったが、改良後はより低濃度 (10 $\mu$ M) に対しても 50%以上の細胞が応答することが分かった。また、改良後の細胞系統は、

300nM-30 $\mu$ M の濃度域で濃度依存的に蛍光応答を示した。以上から、改良した細胞系統は、応答する細胞の割合が高く、SN 比良く匂い物質を検出できることが分かった。

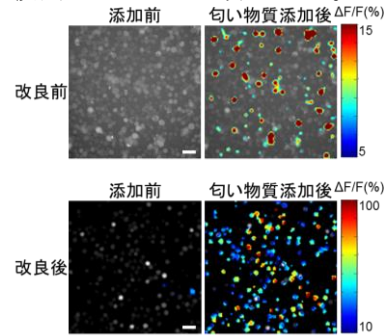


図3 改良前後の細胞系統の匂い物質に対する蛍光応答。Or13aを導入した細胞系統の応答を例に示す。匂い物質(改良前: 1mM、改良後: 10 $\mu$ M)を添加した際の蛍光強度変化を疑似カラーで表示した。カラーバーは蛍光強度変化量を表し、 $\Delta F/F(\text{蛍光強度変化量})/F(\text{刺激前の蛍光強度}) \times 100(\%)$ の値を表す。スケールバーは50 $\mu$ mを表す。

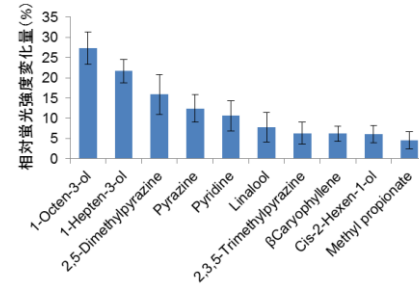


図4 改良した細胞系統の様々な匂い物質に対する蛍光応答。各匂い物質は30 $\mu$ Mで刺激した。N=4; エラーバー $\pm$ SEM。

そして、作出した細胞系統の様々な匂い物質に対する検出性能を評価するため、化学構造の異なる多様な匂い物質に対する蛍光応答を蛍光顕微鏡及び蛍光プレートリーダーにより測定した (図 4)。その結果、改良した細胞系統は、複数の匂い物質に対して蛍光応答を示し、異なる匂い物質を異なる蛍光強度変化量として検出できることが分かった。

以上の結果から、一般臭嗅覚受容体、Orco および GCaMP6s を発現させた Sf21 細胞系統は、広範囲の一般臭を蛍光強度変化量として検出できる匂い検出素子として利用できることを示した。現在までに、2 種類の細胞系統を作出している。

### (2) 測定系の構築

まず、図 1 の測定系を用いて sf21 細胞の蛍光変化を計測できることを確認した。レーザダイオードの強度が高いため、蛍光顕微鏡よりも微弱な蛍光を捉えることが可能である。また、蛍光画像の中で蛍光変化があるところのみの領域抽出を行い、その部分の輝度変化を積算する画像処理ソフトウェアを作成した。ヒストグラムを作成して閾値を決定し、閾値以下の輝度変化を 0 とする。さらに差分処理により生じる雑音を除去するメディアンプィルタを使用した、その結果、画像処理により S/N 比の向上が図れることがわかった。

それから、ポンプの種類とチャンバの形状の検討を行った。ポンプとしては、小型のマ

マイクロポンプ（ダイヤフラム方式）と大型の市販シリンジポンプの2種類を用い、チャンバの形状としては前節の2種類を用いた。ポンプに関しては、マイクロポンプより流量安定性に優れているシリンジポンプの方が応答バラツキが小さかった。また、チャンバに関してはデッドボリュームがあるが高密度に細胞を実装できるチャンバ（Aタイプ）の方がデッドスペースは小さいが流路から細胞を導入するために細胞密度が低いチャンバ（Bタイプ）を比較した結果、前者の方がデータ安定が優れていることがわかった。

### (3) ロックイン計測法

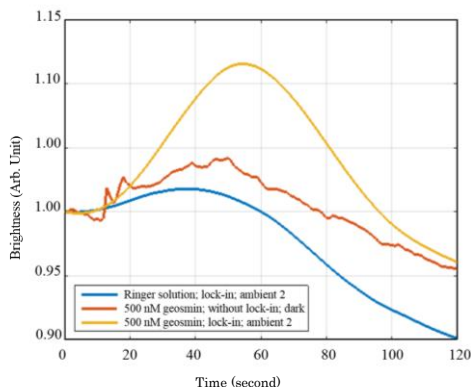


図5. ジオスミンに対するOR56a発現細胞の応答 青線：リング溶液、赤線：ロックイン法無し、オレンジ線：ロックイン法使用

外乱光存在下でカビ臭の一つであるジオスミン(500nM)に対するOR56a発現細胞の応答を計測した。外乱光(1030lux)存在下の結果を図5に示す。ロックイン計測を用いない場合は、リング液のみの場合と応答レベルがほぼ同じであるが、ロックイン計測を用いることにより明瞭に応答を計測できた。

さらにジオスミンとカビ臭の一つである1-octen-3-olの低濃度サンプルに関する実験を行い、外乱光存在下では検出下限100μMだったのがロックイン法を適用すると、100nM(ジオスミン)、50nM(1-octen-3-ol)の検出下限を得ることに成功した。

### (4) 複数種類細胞の画像取得

まず、2つの流路を有するマイクロチャンバを用いて光学系のレンズの倍率を下げることで、2種類の細胞輝度を同時に測定することができた。しかし、細胞導入用の穴をチャンバ上部にあけると流路の中心の細胞密度が減少し、センサ応答の取得が困難であった。そこで、複数種類の細胞の混合溶液を導入してランダムにチャンバに吸着させて、その後画像処理により細胞位置を特定する方法を検討した。嗅覚受容体としてはBmOR3とOR13aを用いた。Bombikalと1-octen-3-olの応答からBmOR3とOR13発現細胞の位置をハフ変換で細胞の形状を認識して求めた結果を図6に示す。同図のように画像処理により細胞位置が特定できていることがわかる。この方法は大規模細胞センサアレイを構成するには有望である。

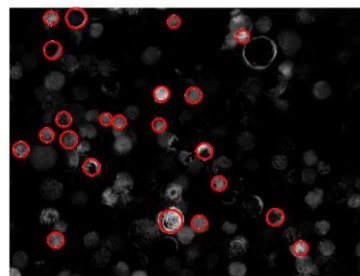


図6. ハフ変換により匂い物質供給前後の差分画像から細胞位置の抽出を行った例(赤丸はOR56a発現細胞)

(5) 水晶振動子を用いた匂いバイオセンサフロー測定系で、湿度を75%RHに保ちOR56a発現細胞を吸着させた水晶振動子を用いて気相測定を行った。50ppbのジオスミン、ブタノール、イソブチル酸、ブチルアセテート、メタノールを準備して測定を行い、ジオスミンのみに大きなセンサ応答が得られ、高湿度に保てば気相中でも嗅覚受容体発現細胞の応答が得られる可能性を示した。

### 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11件)

- ① Jiri Janata, T. Nakamoto, Vision of new olfactory sensing array, IEEJ Transaction, 査読無, Vol. 11, 2016, 261-267
- ② 中本高道, ロバスト匂いセンシングシステム, 計測自動制御学会誌, 査読無, Vol. 55, 2016年, 245-251
- ③ 祐川侑司, T. Mujiono, 中本高道, 光野秀文, 中島裕子, 神崎亮平, 三澤宣雄, 嗅覚受容体発現細胞を利用した匂いセンサ用自動フロー測定系の開発, 電気学会センサ・マイクロマシン部門論文誌, 査読有, 掲載決定, 2016年
- ④ Y. Harada, K. Tomoki, R. Kanzaki, T. Nakamoto, Response prediction of an insect's olfactory receptor neuron by using structural parameters of odorant and Self-Organizing Map, IEEE Sensors Journal, 査読有, Vol. 16, 2016, 580-585
- ⑤ T. Mujiono, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, Y. Nakajima, R. Kanzaki and N. Misawa, Lock-in measurement technique in fluorescent instrumentation system for cell-based odor sensor, Trans. IEEJ, 査読有, Vol. 136, 2016, 83-89
- ⑥ T. Mujiono, Y. Sukegawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, N. Misawa, Odor sensing method using olfactory receptors and fluorescent instrumentation, Proceedings of The 10th Asian Control Conference 2015, 査読有, Vol. 1, 2015
- ⑦ Y. Harada, T. Nakamoto, Analysis of insect's olfactory receptor neuron response by using NMF method for odor

- approximation, *Sensors & Materials*, 査読有, Vol.26, 2014, 181-187
- ⑧B. Wyszynski, D. Kim, T. Nakamoto, Stabilization of coating for QCM odor sensors with liquid GC materials supported by lipopolymers and lipids, *Sensors and Actuators B*, 査読有, Vol.179, 2013, 81-86
- ⑨T. Nakamoto, Y. Nihei, Improvement method of odor approximation using mass spectrometry, *IEEE Sensors Journal*, 査読有, Vol.13, 2013, 4305-4311
- ⑩原田祐希, 本田克弥, 中本高道, 非負値行列因子分解(NMF)法を用いた近似臭作成方法における距離尺度の検討, *日本味と匂い学会誌*, 査読有, Vol.20, 2013, 411-414
- ⑪中本高道, 嗅覚センサシステムの研究, *応用物理*, 査読有, Vol.83, 2013, 12-17 [学会発表] (計 33 件)
- ①N. Nimsuk, T. Mujiono, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, M. Termtanasombat, R. Kanzaki, N. Misawa, Feature Extraction Method in Multiple-ORs-based Odor Biosensing System, APCOT 2016, 2016年6月27日, Kanazawa
- ②Y. Sukekawa, T. Mujiono, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, Spatially parallelized lock-in measurement technique for cell-based odor biosensor, *International Symposium on Olfaction and Taste 2016*, 2016年6月8日, Yokohama
- ③T. Nakamoto, Human olfactory interfaces, *International Symposium on Olfaction and Taste 2016* (招待講演), 2016年6月7日, Yokohama
- ④Y. Sukekawa, T. Mujiono, T. Nakamoto, H. Mitsuno, Y. Nakajima, R. Kanzaki, N. Misawa, Automated flow measurement for cell-based odor sensing system, *Biosensors 2016*, 2016年5月27日, Gothenburg, Sweden
- ⑤T. Nakamoto, Robust odor sensing system, *ImpACT International Symposium on InSeCT 2016*, 2016年4月26日, Nagoya
- ⑥T. Mujiono, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, M. Termtanasombat, R. Kanzaki and N. Misawa, Detection limit of OR-based odor sensor using lock-in fluorescent instrumentation, *Annual meeting of IEEJ*, 2015年3月17日, 東北大学, 宮城県
- ⑦祐川侑司, T. Mujiono, 中本高道, 光野秀文, 中島裕子, 神崎亮平, 三澤宣雄, 空間分割並列ロックイン計測による匂いバイオセンサ測定システム, *電気学会全国大会*, 2015年3月17日, 東北大学, 宮城県
- ⑧中本高道, ロバスト匂いセンシングシステム, 第31回先端技術講演会(招待講演), 2016年3月2日, マイクロマシン
- センター新テクノサロン, 東京都
- ⑨T. Mujiono, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, N. Misawa, A Cell-Based Odor Sensing System Using Fluorescent Technique and Lock-in Measurement Robust Against Disturbance, *IEEE Sensors 2015*, 2015年11月2日, Busan, Korea
- ⑩T. Nakamoto and T. Inuma, Odor preconcentrator Using SAW Device and QCM in Liquid Phase for Odor Measurement, *MFI2015*, 2015年9月14日, San Diego State University, USA
- ⑪M. Totok, Y. Sukekawa, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, N. Misawa, Odorsensing method using olfactory receptors and fluorescent instrumentation, *The 10th Asian Control Conference 2015*, 2015年5月30日, Kota Kinabalu, Malaysia
- ⑫光野秀文, 三澤宣雄, 櫻井健志, 神崎亮平, 昆虫の嗅覚受容体を用いた細胞利用型匂いセンサの開発, *生体医工学会(招待講演)*, 2015年5月7日, 名古屋国際会議場, 愛知県
- ⑬中本高道, 嗅覚インタフェースの現状と今後の展望, *電気学会全国大会シンポジウム*, 2015年3月24日, 東京都市大学, 東京都
- ⑭T. Mujiono, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, Lock-in measurement technique in optical measurement system for olfactory receptor-based odor sensor, *電気学会全国大会*, 2015年3月24日, 東京都市大学, 東京都
- ⑮原田祐希, 加沢知毅, 神崎亮平, 中本高道, 自己組織化写像と香気物質の構造パラメータを用いた嗅覚受容神経細胞の応答予測, *電気学会全国大会*, 2015年3月24日, 東京都市大学, 東京都
- ⑯中本高道, ヒューマン嗅覚インタフェース, 匂いメディア研究集団第2回ワークショップ(招待講演), 2015年2月23日, 京都大学, 京都府
- ⑰中本高道, 匂いセンサと嗅覚ディスプレイ, *産総研ヒューマンストレス研究会(招待講演)*, 2015年1月20日, 千里ライフサイエンスセンター, 大阪府
- ⑱中本高道, ヒューマン嗅覚インタフェース, *九州大学分子デバイスシステムセミナー(招待講演)*, 2014年12月12日, 九州大学伊都キャンパス, 福岡県
- ⑲H. Mitsuno, T. Sakurai, T. Iwamatsu, Y. Nakajima, R. Kanzaki, Development of novel cell-based odorant sensor elements based on insect odorant receptors, *2nd Digital Olfaction Society World Congress*, 2014年12月8日, 東京工業大学, 東京都
- ⑳B. Wyszynski, T. Nakamoto, H. Mitsuno

- R. Kanzaki, QCM SENSORS WITH LIPOPOLYMERS AND OLFACTORY RECEPTOR-EXPRESSING CELLS FOR ODOR SENSING IN GAS/VAPOR PHASE, 2nd Digital Olfaction Society World Congress, 2014年12月8日, 東京工業大学, 東京都
- ②1 T. Nakamoto, Human Olfactory Interface-Odor sensing system and olfactory display-, Korea Sensor Conference (招待講演), 2014年11月14日, Kangwon National University, Korea
- ②2 中本高道, ヒューマン嗅覚インタフェース-匂いセンサと嗅覚ディスプレイ-, 産業技術研究所センシング技術コンソシアム 第7回講演会(招待講演), 2014年11月12日, 愛知県産業労働センター, 愛知県、
- ②3 Y. Harada, T. Kazawa, R. Kanzaki, T. Nakamoto, Response prediction of an insect's olfactory receptor neuron by using structural parameters of odorant and Self-Organizing Map, IEEE Sensors 2014, 2014年11月3日, Spain
- ②4 T. Nakamoto, M. Kakizaki, Y. Suzuki, H. Mitsuno and R. Kanzaki, Response Analysis of Odor Sensor Based Upon Insect Olfactory Receptors Using Image Processing Method, IEEE Sensors 2014, 2014年11月3日, Spain
- ②5 光野秀文, 櫻井健志, 神崎亮平, 昆虫に学ぶ匂いバイオセンサの開発, 日本学会会議公開シンポジウム (招待講演), 2014年7月26日, 日本学会会議講堂, 東京都
- ②6 光野秀文, 櫻井健志, 岩松琢磨, 田中亜紀子, 並木重宏, 神崎亮平, 昆虫の嗅覚受容体を利用した細胞利用型匂いセンサ素子の性能評価, 日本農芸化学会2014年度大会(招待講演), 2014年3月30日, 明治大学, 東京都
- ②7 B. Wyszynski, T. Inuma, T. Nakamoto, H. Mitsuno, R. Kanzaki, QCM sensors with lipopolymers and olfactory receptor-expressing cells for odor sensing in liquid phase, センサ・マイクログラフとその応用システムシンポジウム, 2013年11月5日, 宮城県
- ②8 H. Mitsuno, T. Sakurai, S. Namiki, R. Kanzaki, Performance evaluation of Sf21 cell lines expressing insect odorant receptors as odorant sensor elements, Bio4Apps 2013, 2013年10月31日, 東京医科歯科大, 東京都
- ②9 原田祐希, 本田克弥, 中本高道, 非負値行列因子分解(NMF)法を用いた近似臭作成方法における距離尺度の検討, 日本味と匂い学会, 2013年9月6日, 宮城県
- ③0 H. Mitsuno, T. Sakurai, S. Namiki, H. Mitsuhashi, R. Kanzaki, Development of a novel cell-based odorant sensor based on insect odorant receptors, International Chemical Ecology Conference (招待講演), 2013年8月22日, Melbourne, Australia
- ③1 原田祐希, 本田克弥, 中本高道, 質量分析器データを用いた匂い近似における距離尺度の検討, 電気学会E部門総合研究会, 2013年8月9日, 東京都
- ③2 Y. Harada, T. Nakamoto, Analysis of insect's olfactory receptor neuron response by using NMF method for odor approximation, ISOEN2013, 2013年7月2日, Daegu, Korea
- ③3 T. Nakamoto, Odor recorder and reproducer: The way toward the remote olfaction, Digital Olfaction Society 2013(招待講演), 2013年4月11日, Berlin, Germany  
[図書] (計6件)
- ① T. Nakamoto, Ed., Essentials of machine olfaction and taste, Wiley, 2016, 315
- ② T. Nakamoto, Olfactory Interfaces, Eds., James L. Szalma, Mark Scerbo, Raja Parasuraman, Peter A. Hancock, and Robert R. Hoffman, The Handbook of applied perception research, Cambridge University Press, 2015, 408-423
- ③ 中本高道, 嗅覚デバイスの要求・制約事項, 感覚デバイス開発, エヌティーエス, 2014, 147-155
- ④ T. Nakamoto and B. Wyszynski, BIOMIMETIC SENSING AND MULTIVARIATE APPROACH FOR OBTAINING SENSORY QUANTITIES IN ODOR SENSING SYSTEM, Esmail Jabbari, Ali Khademhosseini, Deok-Ho Kim, Amir Ghaemmaghami, Eds., Handbook of Biomimetics and Bioinspiration, World Scientific Publishing, 2014, 475-507
- ⑤ B. Wyszynski, 中本高道, 匂いセンシングシステムの開発, 嗅覚と匂い・香りの産業利用最前線, NTS, 2013, 225-236
- ⑥ T. Nakamoto, Odor recorder and olfactory display, K. Toko Ed., Pan Stanford Publishing Pte Ltd, 2013, 285-304  
[その他]  
ホームページ等  
<http://silvia.mn.ee.titech.ac.jp/System4.html>
6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
中本 高道 (NAKAMOTO TAKAMICHI)  
東京工業大学・精密工学研究所・教授  
研究者番号: 20198261  
(2) 研究分担者  
神崎 亮平 (KANZAKI RYOHEI)  
東京大学・先端科学技術研究センター・教授  
研究者番号: 40221907