

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21806

研究課題名（和文）所望の香りを生成するスマート嗅覚ディスプレイ

研究課題名（英文）Smart olfactory display to generate intended scents

研究代表者

中本 高道（Nakamoto, Takamichi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・教授

研究者番号：20198261

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、嗅覚を高度情報化社会に取り込みデジタル嗅覚を実現するため、香り印象の言語表現から実際の香りを生成することを目指す。本研究ではアンバランスな学習データを用いて、質量分析器データから匂い記述子を予測する方法を提案した。さらに自己組織化マップを使用して、匂い記述子から質量分析器データを予測する方法を示し、官能検査で得られた質量分析器データが妥当であることを示した。それから、香りを提示する嗅覚ディスプレイについて、マイクロディスペンサ駆動方法を工夫して調合比のダイナミックレンジを高く維持できることを示し、言語情報から香りを自動生成する基礎技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代は高度情報化社会と言われているが、すべての感覚情報をコンピュータで扱うことができるわけではない。本研究では嗅覚情報を高度情報化社会に取り込みデジタル嗅覚を実現する。そのために香り印象の言語表現から実際の香りを自動生成する技術を研究する。この技術が実現されると専門的知識を持たなくても香りを作り出すことが可能になり、世の中に嗅覚を取り込んだデジタルコンテンツを普及させていくことができるようになる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to make an actual scent from linguistic expression of the scent impression so that olfaction can be put into highly sophisticated information society and the digital olfaction can be realized. First, we proposed the prediction method of odor descriptors from mass spectrum using unbalanced data. Then, we showed the backward method to predict a mass spectrum from the odor descriptors using self-organizing map and demonstrated the consistency of the predicted result with sensory test one. Moreover, we showed the method to maintain high dynamic range of the blending ratio in the olfactory display by improving the drive method of micro dispensers. Finally, we established the fundamental technology of making scents automatically from linguistic information.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：嗅覚ディスプレイ 自然言語処理 質量分析器 深層学習 自己組織化マップ マイクロディスペンサ 弾性表面波デバイス 精油

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。

### 1. 研究開始当初の背景

視覚や聴覚の分野では、ヒューマンインタフェースは充実して、ユーザは手軽に視聴覚情報をコンピュータ上で扱うことができるのに対して、嗅覚は簡単にコンピュータ上でその情報が扱えるわけではない。現代は高度情報化社会と言われているが、まだ扱える感覚情報の範囲は限られている。本研究では、嗅覚を高度情報化社会に取り込みデジタル嗅覚を実現する方法を研究する。嗅覚は感性に与える影響は大きく情緒面の情報を担っている。日常生活で香りを嗅ぐ機会も多く、嗅覚情報を扱えると情報化社会で扱える情報が大きく増大する。

### 2. 研究の目的

近年、化学物質の属性からその香りの印象を予測する研究が盛んである。数千の分子構造パラメータから香りの印象を予測したり、嗅球（嗅覚神経系の入り口）マップの画像から香り印象を予測する方法が提案されている。しかし、香りを自由自在にコンピュータで扱えるようにするには、香り印象の言語表現から実際の香りを生成できるようにする必要がある。得られた香りをもとにして”もっと甘く”とか”もっとフレッシュに”という命令をコンピュータに出して所望の香りを生成するスマート嗅覚ディスプレイを本研究で研究する。言語表現から香りを自動生成する研究はまだこれまでに報告されたことはない。

### 3. 研究の方法

申請者らの提案した香りの印象予測の手法は、質量分析器から得られた高次元（200次元程度）のマスペクトルデータから深層学習により官能検査のデータ空間に写像することにより行う（図1(a)）。質量分析器は安定で多様なパターンを持つ多次元データが得られ、データベースも存在するので使用した。

本研究では、図1(a)と逆の過程で香り生成を行う。すなわち、複数の香り記述子から対応するマスペクトルを推定し、そのマスペクトルに対応する香りを生成する。しかし、十分な言語情報がないと1対1対応にならず複数の香りに対応する場合も考えられ、その場合はニューラルネットにより直接写像しても解が求まらない。そこで、図1(b)のようにマスペクトルを逐次変化させながら図1(a)の写像により最も当てはまる言語表現を評価指標をもとに探索し、最良な言語表現に対応するマスペクトルを解とする逆問題解法を考える。いった

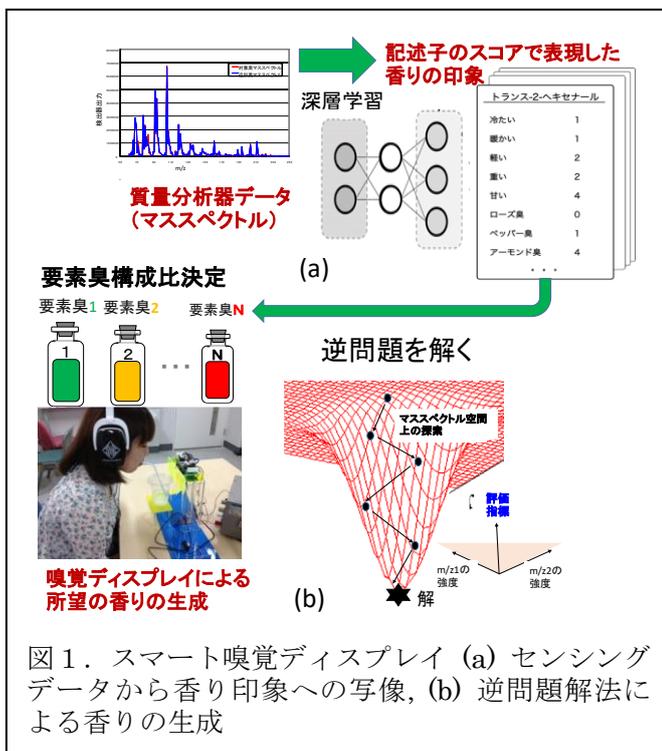


図1. スマート嗅覚ディスプレイ (a) センシングデータから香り印象への写像, (b) 逆問題解法による香りの生成

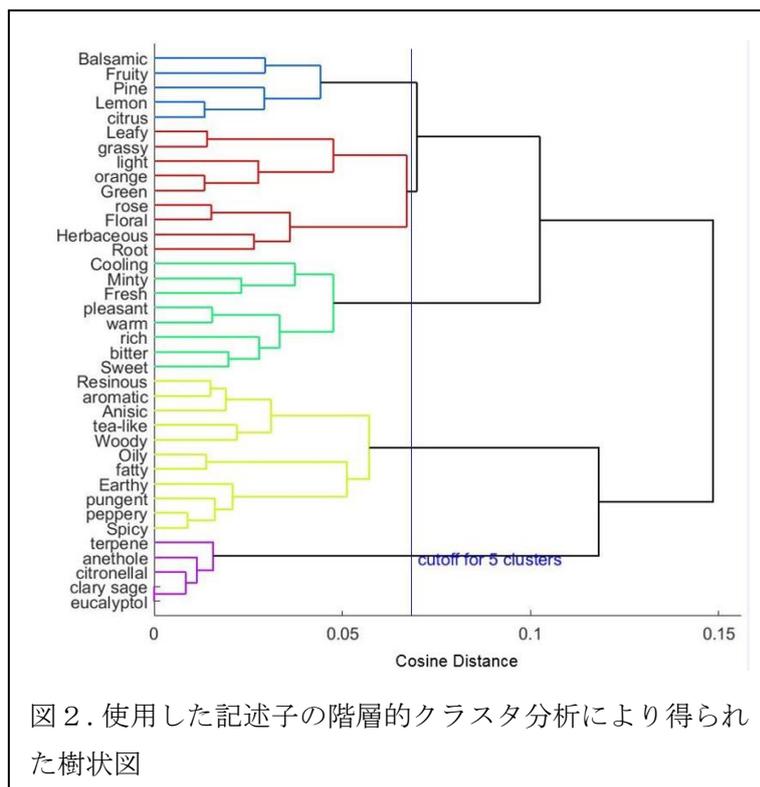


図2. 使用した記述子の階層的クラスタ分析により得られた樹状図

ん対応マススペクトルが得られれば、それを得るための要素臭構成比を得ることができる。我々のグループはマススペクトルを要素臭と呼ぶ少数の香りのマススペクトルで近似する手法を既に開発している。そこで、対応するマススペクトルから要素臭の構成比を算出し、この構成比を嗅覚ディスプレイに与えて香りを発生する。香りを嗅ぎながらインタラクティブに“甘い”か“フルーティな”というような香りの印象をユーザがコンピュータに与えて所望の香りをインタラクティブに生成する技術を開発する。嗅覚ディスプレイや要素臭はこれまでに開発した技術をベースにして研究を進める。

#### 4. 研究成果

##### ①匂い印象予測

まず、精油に関して、質量分析器データからDNN (Deep Neural Network) を介して匂い印象予測を行うモデルを構築した。データベースには匂い印象に当てはまる香り記述子のみが記載されているので、その匂いの印象の記述子の有無のみが記された2値データとなる。この場合、類似した香り記述子が相互排他的に表れるために香り記述子間の相関が消えてしまう問題があった。そこで、類似度の高い匂い印象を表す記述子は自然言語処理 (FAST TEXT) を用いて、クラスタリングして香り記述子グループを作成した。FAST TEXTでは英語版ウィキペディアをコーパスとして学習させた。各記述子の類似性を階層的クラスタ分析にして得たデンドログラムを図2に示す。

次にオートエンコーダで201次元から20次元に次元圧縮したデータを4層の多層パーセプトロンにより各記述子の有無を推定する分類の問題に適応した。記述子のクラスタ数と識別率の関係を調べた。しかし、positiveなサンプル数とnegativeなサンプル数に大きなアンバランスが存在し、positiveなサンプルの学習データが十分に確保できないという問題があった。ここで、true positiveとは出力すべき値が1の場合（該当する記述子が存在する場合）で、true negativeとは出力すべき値が0の場合（該当する記述子が存在しない場合）のことを言う。本研究ではそのアンバランスをSMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) で補正した。SMOTEは少数サンプルのクラスについて、サンプルとその最近傍サンプルの間にランダムに人工データを発生させて学習データを増やし、少数サンプルのクラスの予測能力を向上させる手法である。96種類の精油についてマススペクトルを測定し、上述の手法を用いた結果、図3に示すように精油の香りの匂い印象の予測精度をある程度向上できることがわかった。

それから、精油を混合したときの匂い印象をマススペクトルから予測した。この予測にはマススペクトルをオートエンコーダで次元圧縮して、その結果を多層パーセプトロンに入力して匂い記述子に関するスコアの予測を行った。レモンとシナモンリーフを1:1で混合して記述子“Sweet”のスコアがどう変わるかを推定した結果を図4に示す。混合精油の甘さはレモンと変わらずシ

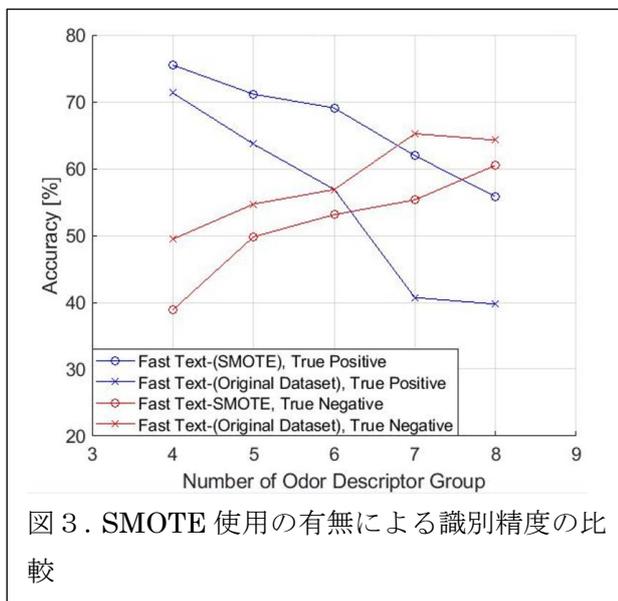


図3. SMOTE使用の有無による識別精度の比較

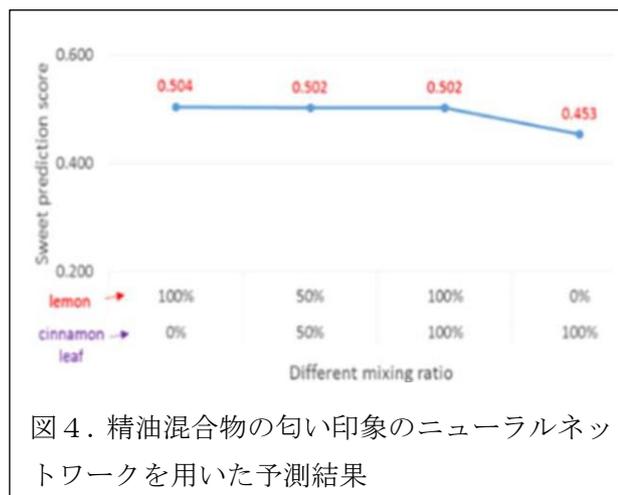


図4. 精油混合物の匂い印象のニューラルネットワークを用いた予測結果

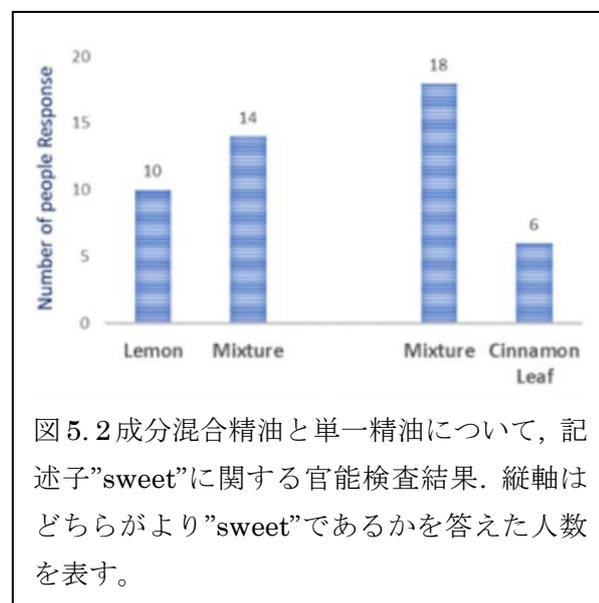


図5. 2成分混合精油と単一精油について、記述子“sweet”に関する官能検査結果. 縦軸はどちらがより“sweet”であるかを答えた人数を表す。

ナモンリーフより甘いという推定結果が得られた。また、24 人の被験者に対して官能検査(2-Alternative Forced choice method)を行い、混合物と単一精油のどちらが”sweet”に感じられるかを調べた結果を図5に示す。このデータを検定した結果、混合物が単一シナモンリーフより”sweet”であるという結果が得られた。この結果は匂い印象予測結果と一致し、精油混合物に関して、単一精油から匂い印象を予測できることがわかった。これまでに単一香気分子の匂い印象予測の報告はあったが、このように香りを混合したときの印象変化の予測は報告されておらず、本研究において初めて示すことができた。

#### ② 匂い印象からセンシングデータの予測

次に言語表現から匂い印象予測を行うことができるのかを検討した。マスペクトルデータをオートエンコーダで次元圧縮し、その結果を自己組織化マップにより2次元マップに変換する。そして、マップの各格子には各匂い記述子のラベル付けをしておく。格子作成には2345種類の単一香気分子を用いて学習させた。2345種類の単一香気分子の匂い記述子はLeffingwellの市販データベースに記述されてマスペクトルデータも有するものを使用した。これは連続値データではなく記述子の有無のみの情報から成る2値データである。匂い記述子の数は96である。自己組織化マップのサイズは、様々なマップサイズについて量子化誤差を検討した結果、30x20とした。オートエンコーダは5層のニューラルネットワークを用い、最適化の結果隠れ中央層のニューロン数は50とした。

まず、単一の香り記述子について調べた。記述子としては”peach”を用いて、同一格子に存在する香気分子を調べた結果、ある格子に12個の化合物が存在した。この12個の香気分子のマスペクトルを調べた結果、これらは類似したマスペクトルとなっていることがわかった。さらにこれらの香気物質に対応する匂い記述子をピックアップして自然言語処理(FAST TEXT)でベクトル化し主成分分析で観察した結果、頻繁に表れる記述子間の類似性が高いことがわかった。したがって、類似した言語情報を有する化合物がマスペクトルとしても高い類似性を持つことがわかった。

さらに2つの香り記述子の場合について調べた。ここでは、記述子”spicy”及び”warm”について調べた。136分子が”spicy”、19分子が”warm”の記述子を有し、両方の記述子を有するのは15分子であった。そして、”spicy”かつ”warm”を有する格子と”spicy”のみを有する隣り合った格子を抽出し、それらに属する香気分子のマスペクトル空間、また言語空間上の位置を主成分分析で調べた。その結果、2つの隣接した格子内の香気分子がいずれの空間でもお互いに集まること確認された。さらに官能検査によって格子位置と香りの類似性の関係が確認された。そのほか、”cooling”かつ”mint”、”pineapple”かつ”strawberry”でも同様の関係が得られた。これらの結果より与えられた香り記述子に対応するマスペクトルを抽出可能であることが示された。これらの結果は現在論文投稿中である。

#### ③ 要素臭に関する研究

それから、香りを表す要素臭については、185種類の精油を測定し非負値行列因子分解法で20の基底ベクトルを抽出し、各基底ベクトルに相当する要素臭を作成した。また、香水に関して無臭の保留材を取り除く検討を行った。保留材は無臭であってもマスペクトルを有するので、その影響を取り除く必要がある。独立成分分析を行った結果、保留材の影響を取り除いた精油のマスペクトルを取り出すことができたことがわかった。

#### ④ 嗅覚ディスプレイ

嗅覚ディスプレイの研究では、図6に示すようにマイクロディスペンサで射出した香料を弾性表面波デバイスにより霧化して香り提示を行う。調合比は各チャンネルの駆動周波数(射出頻度)で決まる。マイクロディスペンサはナノリットルオーダーの体積の液滴を射出する。気泡の影響を受けずに安定に射出できるように小型で低流量の電気浸透流ポンプを組み込み香料をマイクロディスペンサに供給できるようにした。その結果、香り提示の安定性が大きく向上したので、嗅覚ディスプレイの各チャンネルに電気浸透流ポンプを組みこんだ。

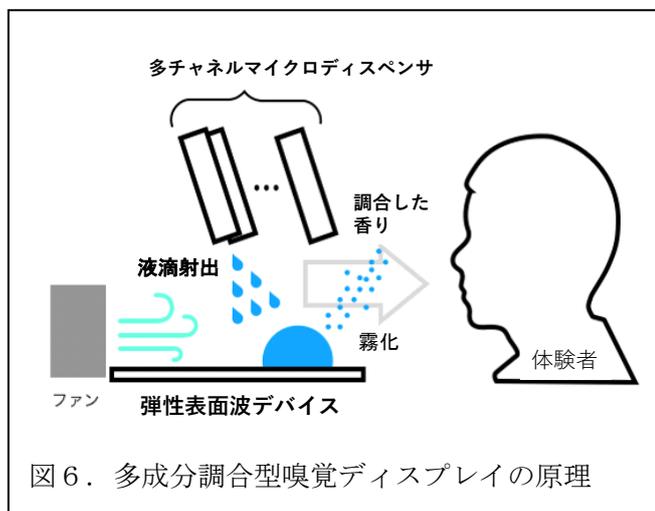


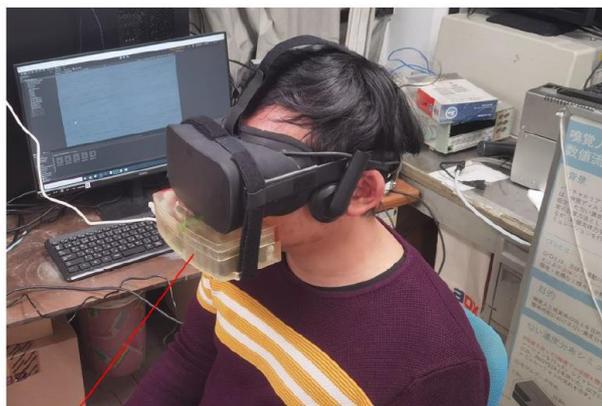
図6. 多成分調合型嗅覚ディスプレイの原理

また、ウェアブル型嗅覚ディスプレイの検討を行った。ウェアブル嗅覚ディスプレイでは図7に示すように HMD (Head Mount Display) の下部に嗅覚ディスプレイを装着して体験者の鼻元で香りを発生させる。マイクロディスペンサの発熱を抑え低消費電力で駆動するためにh型駆動回路を製作した。マイクロディスペンサは通常 24V 印加するが、h型駆動回路では最初に 24V 印加しすぐに 5V に切り替えるような印加電圧パルスを使用する。

さらに電気浸透流ポンプを用いマイクロディスペンサに香料を安定に供給できるようにして液滴射出条件を最適化した。電気浸透流ポンプは香料をマイクロディスペンサに導くために必要である。しかし、液滴の射出頻度が少なくなるとマイクロディスペンサ内部の圧力が高まり、1滴の液滴サイズが大きくなり、その結果液滴射出量のダイナミックレンジが狭められるという問題が発生した。そこで、液滴射出頻度に合わせてマイクロディスペンサに印加するパルス幅及び電気浸透流ポンプに印加するパルスの duty 比を変化させるようにした。最適化した後の結果を図8に示す。同図の縦軸は1滴当たりの射出量であり、マイクロディスペンサの駆動周波数にかかわらずに安定した体積の液滴(1滴当たり 3nL)を射出することに成功した。

その後このウェアブル嗅覚ディスプレイを用いて、実時間で動作する CFD(Computational Fluid Dynamics)シミュレータと組み合わせることで大気中の不規則な濃度変動を体験者に提示する実験を行い、体験者が VR 空間上でどの方向から匂いが来るのかを知覚できることを確認した。

このように、本研究では、マススペクトルから匂い印象を予測する際の予測精度の向上を達成し、匂い印象から対応するマススペクトルを予測できることを示した。また、多成分調合型嗅覚ディスプレイの調合比のダイナミックレンジを高く保つための方法を示し、ウェアブル嗅覚ディスプレイに実装した。これらの成果と要素臭を使用した香り調合を組み合わせれば、指定した香り印象の匂いを嗅覚ディスプレイで実際に発生させることが可能である。今後、実際に香りを発生させて官能検査で所望の印象が得られているかを確認する実験を行いたい。



Wearable olfactory display device

図7、HMD 下部に装着したウェアブル嗅覚ディスプレイ

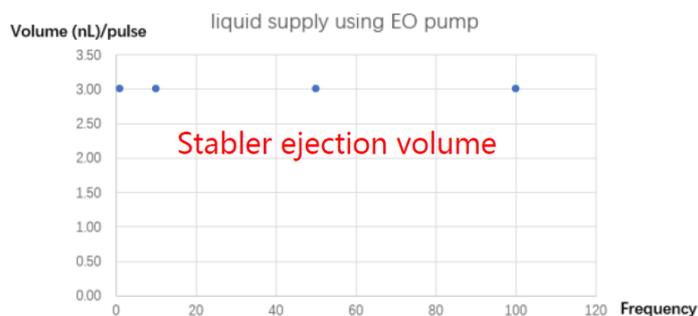


図8. マイクロディスペンサ駆動周波数と1滴当たりの射出量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Debnath Tanoy, Nakamoto Takamichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Predicting human odor perception represented by continuous values from mass spectra of essential oils resembling chemical mixtures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0234688	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 中本 高道	4. 巻 93
2. 論文標題 深層学習を用いた化学データの解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 質量分析器データの解析による香り印象の予測— 色材協会	6. 最初と最後の頁 353-359
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 Tanoy Debnath, Dani Prasetyawan, Takamichi Nakamoto	4. 巻 168
2. 論文標題 Predicting Odor Perception of Mixed Scent 1 from Mass Spectrometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of electrochemical society	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） 10.1149/1945-7111/ac33e0	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9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小内 彩椰, 伊関 方晶, 中本 高道, Nathan Cohen
2. 発表標題 香りによる情景想起の基礎的研究
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Prasetyawan,, T. Nakamoto
2. 発表標題 Odor Exploration with Independent Component Analysis
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤 慶祐, 中本 高道
2. 発表標題 大規模官能検査データを用いた深層オートエンコーダにおける復元精度の検討
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Debnath and T. Nakamoto
2. 発表標題 Predicting Odor Perception of Mixed Scent from Mass Spectrometry Using Machine Learning
3. 学会等名 IMCS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中本高道
2. 発表標題 香りの再現と印象予測を行う嗅覚IT技術
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 Takamichi Nakamoto
2. 発表標題 Wearable olfactory display and its application
3. 学会等名 Mini workshop with RWTH Aachen University (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木海都、Aiheng Liu, 中本高道
2. 発表標題 実時間数値流体シミュレーションを用いた嗅覚VRの研究
3. 学会等名 日本VR学会、香り・味と生体情報研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Aiheng LIU, 中本高道
2. 発表標題 Design of wearable olfactory display using solenoid valves and electroosmotic pumps
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中本高道
2. 発表標題 嗅覚ディスプレイで広がる香りの世界
3. 学会等名 いばらき子ども大学 (招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 中本 高道	4. 発行年 2020年
2. 出版社 CMC出版	5. 総ページ数 289
3. 書名 要素臭を用いた香りの再現、匂いのセンシング技術 中本高道監修	

1. 著者名 中本 高道	4. 発行年 2022年
2. 出版社 株式会社情報機構	5. 総ページ数 146-151
3. 書名 専門書【におい分析評価/対策事例と頻出Q&A集】第1章嗅覚ディスプレイの最新動向とは	

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------