

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01713

研究課題名(和文) 匂いの質と空間の可視化センシング

研究課題名(英文) Visualization of odor quality and space

研究代表者

林 健司 (HAYASHI, Kenshi)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：50202263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：計測，モデル化，解析が難しい匂いをデジタル情報として扱うために、匂いイメージセンサの基盤技術と匂いの質の解析技術の開発に取り組んだ。匂い分子に対して選択的に応答するホスト分子として受容性ペプチド合成、匂い物質の選択的抽出技術と病期診断応用、匂いの流れや痕跡をマルチスペクトル画像として可視化する蛍光色素可視化フィルムと匂い構成成分の分析、分子鑄型ポリマによる匂い可視化フィルム開発、匂いの質を脳内匂いマップにより特徴づける技術、分子パラメータにより匂いの質を機械学習により予測する技術、匂いの質を関係性により直感的にグラフ提示する技術の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to treat odors which are difficult to measure, model and analyze as digital information, we have researched on development of basic technology of odor image sensor and analysis technology of odor quality. Following results are successfully attained; host molecules which selectively responding to odor molecules, acceptor peptide synthesis, selective extraction technology of odorants and medical applications, visualization of odor flow and traces as multispectral images, fluorescence probe visualization film and odor composition analysis of ingredients, development of odor visualization film by molecular imprinting polymer, technology to characterize odor quality by olfactory odor map on olfactory bulb, technology to predict odor quality by machine learning by molecular parameter, and intuitive odor quality presentation methods by relationship graphs.

研究分野：感性科学

キーワード：匂いセンサ イメージング 分子認識 可視化画像解析 匂いマップ センサ 匂い予測 二次元化学センサ

1. 研究開始当初の背景

匂いの質と空間を可視化する匂いイメージセンサは研究代表者らの研究成果として産み出したものである。本研究はこの匂い可視化センシングを基盤研究、応用展開の両面から深化・高度化させ、匂い情報をコーディングするナノレポータ粒子開発と匂いイメージセンサ開発に基づき、匂い可視化情報と匂い感性情報を出力する実空間インタフェースに展開可能な研究を実施する。

匂いの質的な表現は生物の嗅覚に基づくセンシング技術が必要となる。多種多様な化学物質が混在する複雑な対象を受容・認識する嗅覚では、質的な感覚が支配的となる。この質的な感覚は嗅球では匂いクラスタマップとして表現され、匂い分子構成の圧縮情報となっている。その表現が匂いコードである。

生物の嗅覚は膨大な種類の化学物質情報を高速に読み取り、事物を識別する優れた化学センサであり、外界の化学物質からもたらされる微かな変化を鋭敏に検知できる。しかし、優れた化学感覚である嗅覚であっても匂いの空間を見ることはできない。優れた嗅覚を持つ犬も、匂いの跡を辿るには鼻と体を動かして空間をスキャンする。匂い可視化情報を計測・解析し、実空間の匂いを提示する匂い可視化インタフェース技術が実現できれば、人がこれまで手にしたことが無い新しい化学物質情報と匂い感覚情報の画像情報創出に基づいた新たな情報発見を可能とする。

匂いの可視化センシング技術では、このような背景のもと、匂いの質の可視化と空間の可視化という二つの側面から研究を行う。

2. 研究の目的

生物の嗅覚は膨大な種類の化学物質の組合せ情報を高速に読み取り、微かな匂いの揺らぎを鋭敏に検知できる優れた感覚である。しかし、匂いは曖昧で複雑な情報・事象であるとされ、計測、モデル化、解析が難しく、匂いはデジタル情報として扱うことができない感覚量である。本研究は匂い情報の脳内表現である匂いクラスタマップに基づく匂い情報コーディング、および匂い空間を可視化する匂いイメージセンサにより、匂いの質と空間をデジタル化し、人が手にしたことが無い新しい可視化された匂い情報を創出することを目的とした。本研究により匂いの質と空間を計測・解析・理解し、処理可能な情報とする可視化技術が実現すれば、我々を取り囲む化学物質に満ち溢れた世界に関する新しい匂い空間化学情報に基づいた、新しい情報の応用展開が可能となる。本研究では新しい空間化学情報を創造するために、匂い分子情報を選択的に認識・検知するナノスケールの材料領域から匂い空間画像を理解する感覚情報領域までをカバーした匂いイメージセンサ技術開発を目指した。

3. 研究の方法

本研究で行った基盤技術研究開発は次の3つのレイヤ、すなわちレイヤ1: 匂い応答性ホスト分子の開発、レイヤ2: 匂い可視化フィルムと分光イメージング、レイヤ3: 匂い空間と感性情報解析と匂い空間提示技術を軸に研究を進めた。レイヤ1では匂い分子の特徴に応じた分子認識層の開発、特に光学的に検知可能な分子認識技術を重点的に研究開発した。レイヤ2では匂い可視化フィルム開発。粒子ごとに異なる光学的な特性を持つように蛍光プローブの種類や金属ナノ粒子の材料・サイズ・形状を制御された多種類の匂いナノレポータ粒子を混合した匂い可視化フィルム作成技術を開発した。また、匂い応答性ホスト分子の特性を反映させたハイパースペクトルイメージングを実施した。レイヤ3では分子サイズや極性など分子情報と匂いクラスタマップの関係を調べ匂いコード情報にまとめあげ、さらに匂いクラスタマップから匂い感性情報への変換を試み、ナノレポータが認識すべき分子情報を明確化する研究を行う。また、匂い情報を直感的に理解できる提示技術を開発、匂いの質を匂い分子情報や匂いクラスタマップから予測する技術を開発した。

4. 研究成果

4.1 匂い応答性ホスト分子の開発

バニロイド化合物は、バニラエッセンスの香気成分(バニリン)や辛み物質(カプサイシン)として我々の生活と密接に関連している。本研究ではこのようなバニロイド化合物の分子センシング、および蛍光イメージングを意図し、バニロイドを認識して選択的に結合する人工レセプターの分子設計と合成、および分子センシング・イメージングのための蛍光性物質の探索研究を行った。

1. バニロイド人工レセプターの設計と合成

カプサイシン結合性イオンチャネルであるTRPV1のアミノ酸配列と、その受容モデルを参考にして、図1に示すペプチドレセプターを合成した。文献によれば、トリプトファン(W)

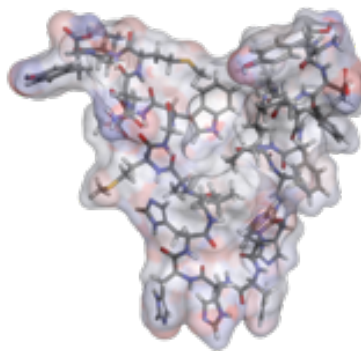


図1 ペプチドレセプター
立体構造例 (S3HS4)

が主としてバニリン基と結合し、下線で示したメチオニン(M)、トレオニン(T)、さらにはチロシン(Y)が補助的に作用するとされている。またヒスチジン6量体(HHHHHH)を導入したHS4、

およびS3HS4が合成できたことで、ニッケル錯体との架橋反応を利用したトランスデューサー表面固定化が可能となった。その結果、水晶振動子を利用してバニリン、及びカプサ

イシンのバイオセンシングに成功した。関連して、ペルオキシダーゼ活性を持つ最小のペプチド酵素であるマイクロペルオキシダーゼ-11の完全合成に成功し、バニリンの酵素的酸化反応の可能性を明らかにした。

2. 分子センシング・イメージングのための蛍光性物質の探索研究

カーボン量子ドット (CQD) は、最も新しく発見された蛍光性ナノ粒子として注目されている。我々は、ペプチドレセプターとターゲット分子との相互作用の読み出しに応用するために種々検討した。具体的には、マイクロ波加熱法と組み合わせた水熱合成法について検討し、粒径や蛍光特性などの面で再現性良くカーボン量子ドットを得ることができる合成方法を確立した。また、ペプチドレセプターとのコンジュゲート化についても、簡単なオリゴペプチドではあるもののモデル実験に成功している。その過程で、CQDが過シュウ酸エステル化学発光反応における蛍光物質になり得ることを発見し、過酸化水素の分析法を世界に先駆けて提案した。研究期間後期には過シュウ酸エステル構造に誘導体したCQDについて、単体で利用するための自発光性素子化の目途が付き、過酸化水素の発光センシングにも着手した。

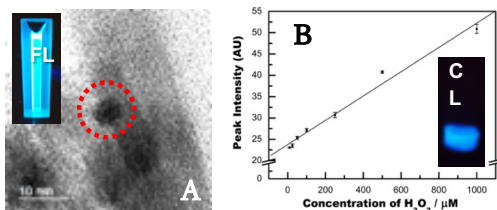


図2 カーボン量子ドットの高分解能電子顕微鏡写真(左)と化学発光強度の過酸化水素濃度依存性(右)。図中の写真は蛍光発光 (FL) と化学発光 (CL) の様子。

次に、匂い応答機構を基盤とした応用技術を開発した。がんの早期発見は、発病の初期段階での効果的治療に欠かせない最も重要なイシューであり、これまで血液中の腫瘍マーカーであるCEA, SCC, NSE, CYFRA21-1, ProGRP, SLXなどのある種のタンパク質や抗体が臨床の現場で用いられている。しかしながら、これらのマーカーは肺がん特異的ではなく、測定するためには採血が必要であるといった侵襲的な診断技術であり、被験者に対して苦痛を与えない非侵襲かつ簡便な診断技術が望まれている。一方、生体の内因性代謝物の総体を意味するメタボロームが、ゲノム、プロテオームに次ぐ第三のオミックスとして注目を集めている。がんなどによって生体内に何らかの欠損が生じた場合、代謝物の濃度が変化するか、新しい代謝物が生成される (E. Jellum ら, Anal. Chem. 1973) という先駆的研究が45年前に実施されている。

本研究では人体からの揮発性有機化合物 (VOC) の代謝プロファイリングによって疾患の存在を簡単に調べるための方法論を提案することを目的とした。研究期間中では、ZSM-5ゼオライトとポリ (ジメチルシロキサン) (PDMS) を

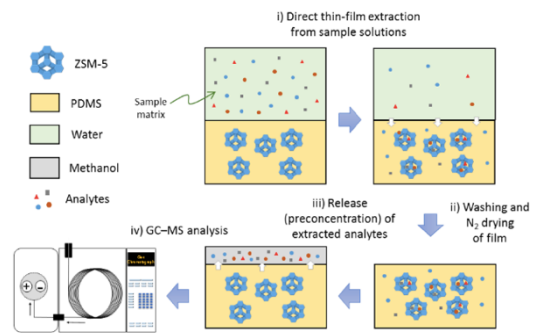


図3 ZSM-5/PDMS GC分析

(Lee et al., J. Chromatogr. B 1041 (2017) 133-140)

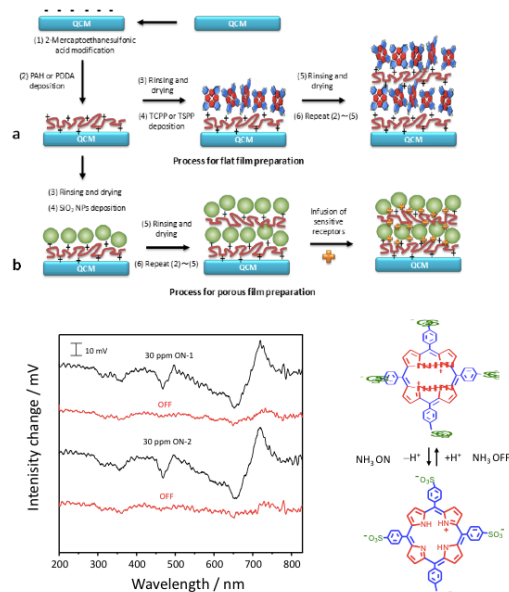


図4 QCM電極への固定(上)、ポルフィリン膜によるアンモニアの光学的検知(下) (Lee et al., Sensors 2015, 15, 18834-18850, Lee et al., Optics and Laser Technology 101 (2018) 1-10)

複合したハイブリッド薄膜を開発し、ガスクロマトグラフィー - 質量分析と組み合わせた効率的な薄膜マイクロ抽出 (TFME) による水中の有機揮発性物質の分析を試みた。一連の脂肪族及び芳香族化合物の抽出効率は、ZSM-5ゼオライトの存在により著しく改善できることを見出した。各検体の検出限界および定量限界は、それぞれ0.0034~0.049ppbおよび0.010~0.15ppbを実現しており、現在、医療機関からの実サンプルの提供を受け、口腔がんの高い疾患相関を示す12種類の新しいバイオマーカーの発見に至っている。

アンモニアは、化学産業において最も広く使われている窒素源となる化合物であり、重要な疾患マーカーでもある。人体においてアンモニアは、主にタンパク質の分解によって腸管や腎臓から血液中に代謝され、肝臓で尿素に変わって尿に排出される。アンモニアから尿素への体内の尿素回路を担う肝臓などの器官に異常が生じると血液中のアンモニア濃度が増加し、肺胞でのガス交換を通じて呼気中のアンモニア濃度が増加する。生理的に正常な人間の呼気中には約1 ppm以下のアンモニアが含まれる。一方、1 ppmを超えるアンモニアが検出される場合は、腎不全、肝不全など

の病気が疑われる。本研究では、人の呼気中の VOC を含む揮発性の小分子代謝成分の検知に、水晶振動子または光ファイバーをデバイスとするセンサ開発を試み、実環境中においてサブ ppm 以下の検出を可能にしている。この成果をもとに医療用匂いセンサシステム試作にも取り組んだ。

4.2 匂い可視化フィルム

匂いイメージングについては、局在プラズモン共鳴 (LSPR) と分子認識膜を組み合わせた分子選択性を有する人に関連する匂い物質の可視化、および複合蛍光色素を用いたポリマフィルム、および蛍光性分子鑄型マイクロビーズを用いた検知プローブの開発を行い、光学的な匂いの流れや痕跡の可視化を可能とした。

LSPR は周囲の誘電率変化にตอบสนองするためガス分子雰囲気により共鳴特性 (光の透過率やスペクトル) が変化する。また、高速で高感度な応答性を持ち、従来のガスセンサの欠点であるセンサの応答速度が大幅に改善する。本研究では匂い分子選択性を持つ LSPR ガスセンサを、金ナノ粒子を固定化したガラス基板上に分子認識層である分子鑄型 (MI) 技術を用いた MI ゼルゲル (MISG) マトリクスを形成することにより実現した。マトリクス材料は tetrabutoxy titanium を重合した酸化チタン骨格 SG である。機能性モノマーとして trimethoxy-phenyl silane (TMP), tri methoxy (2-phenylethyl) silane (TM2P), benzyltriethoxysilane (BTE) などを用い、検知対象ガスとして人の体臭に関係する脂肪酸類を選び、MISG を重合した。MISG 層は LSPR 基板上にスピコートで作製し、MISG 層への体臭物質を LSPR で検出した。また、金ナノ粒子とカップリングする金コロイドを MISG 中に配置し、LSPR 増強により感度を向上に成功した。

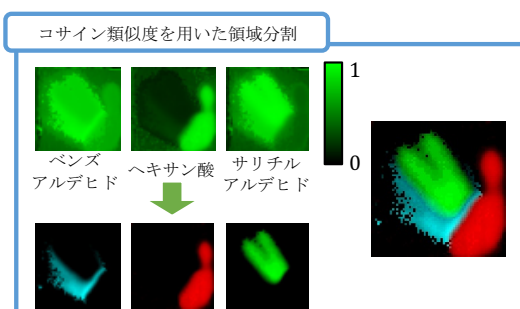


図5 掌の匂い痕跡分布の領域分割

複合蛍光色素を用いた匂い可視化フィルム開発では、従来、アガロースゲル中に分散させていた匂い応答性蛍光色素のマトリクス材料をポリマー (ポリ塩化ビニル; PVC) とすることで再利用可能な匂い可視化フィルムの開発に成功した。その際、色素を分散させる可塑剤としてイオン液体を候補とした選定、マトリクス中で蛍光性と匂い応答性を保持した蛍光色素材料の選定、さらに匂い情報を増加させる適切な FRET 相互作用を行う混合濃度を

設定した。

さらに、蛍光性 MI ナノビーズを合成し、応答速度が速く、色素間の相互作用が生じない匂い検知プローブの開発も行った。植物 VOC や体臭物質を測定対象物質として、匂いへの応答、匂いの流れの可視化などに成功した。

匂い可視化フィルムを用い、可視化された匂い応答の処理技術としてハイパースペクトル情報を用いた匂い物質の識別、二次元上に広がった匂い物質の濃度推定、匂い痕跡分布の領域分割、匂い応答性の高速なキャリブレーション技術の開発に成功した。キャリブレーション技術は匂いイメージセンサが二次元センサであることに着目し、2次元のウェルに多数の基準溶液を準備し、それらへの応答を一度に光学的に行うことで達成した。この成果は実用化が遅れている化学センサの欠点を克服する技術となり得る。

4.3 匂い感性情報の解析

分子生物学の進歩により、匂い物質分子の構造的特徴と哺乳類の嗅球の糸球体層の活性パターンとの間に密接な関係があることが明らかになった。この関係を分析することで、哺乳類の嗅覚が匂い分子のどのような特徴を捉えているのかがわかる可能性がある。

Johnson らによって、嗅球の球体層の活性パターンイメージ (匂いマップ) のデータベースが web 上で公開されている (<http://gara.bio.uci.edu/>)。このデータベースは、匂いマップの他に、その匂いマップを撮影したときラットに嗅がせた物質の、物質名、濃度、分類 (chemical classifier)、分子パラメタなどの情報も付随している。Falasconi らは、このデータベースを利用して、匂い物質の集合全体に渡って類似した応答パターンを有するピクセルのクラスタを発見し、各クラスタに特有の分子的特徴を明らかにした。彼らの手法は、異なる画像でも同じ座標の画素には同じ性質の糸球体が映っているという考えに基づいている。しかし、被験体のラットの個体差に起因する嗅球の形や大きさの違い、あるいは、嗅球を (観測装置に) 取り付ける際のずれに起因するマップの不整合がある。したがって、大きなクラスタ数でクラスタリングする (すなわち、細かいクラスタに分解する) ことは困難である。

我々は、観測されたマップ画像の系列を生成する統計モデルを設計した。このモデルでは、観測画像の歪みに対処するために、観測画像の画素から歪みがない画像 (理想画像) の画素への単射を導入している。各理想画像の各画素はその位置に応じたクラスタが確率的に割り当てられる。画像 m の画素 p の輝度は、 p が対応する理想画像上の画素 p' に割り当てられたクラスタを t とすると、 (m, t) に依存して確率的に決まる。各理想画像の各画素に割り当てられたクラスタ、および、各画像の各画素が対応する理想画像上の画素は観測されない潜在変数であり、Gibbs Sampling を利

用して推定する。このモデルを用いることにより、観測画像の画素の歪みを補正しつつ、画素をクラスタリングすることができる。

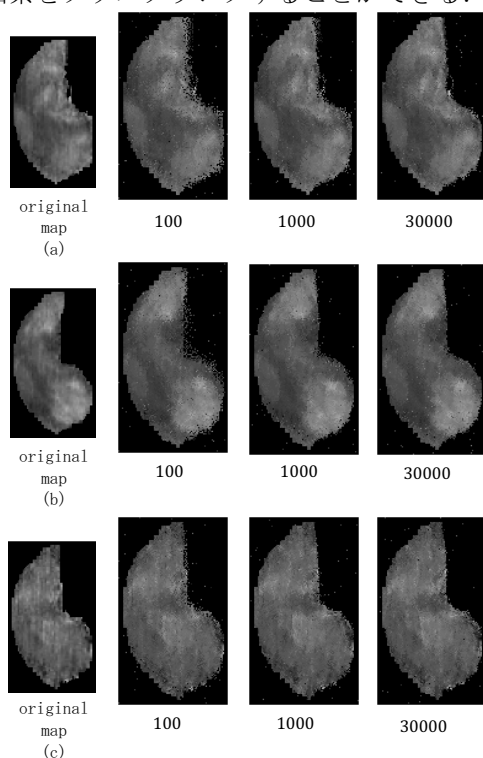


図6 掌の匂い痕跡分布の領域分割

<http://gara.bio.uci.edu/> で公開されている匂いマップデータ (526 画像) を用いて画素のクラスタリング実験を行った。図 1 は観測画像, Gibbs Sampling 100 回目, 1000 回目, 30000 回目よりの推定された理想画像を示している。観測画像ではかなり形状が異なる 3 つのマップが Gibbs Sampling を繰り返すにしたがって補正され, 最終的に同じ形状になっていることが確認できる。また, 図 2 にクラスタリング結果を示す。背景画素を含めクラスタ数は 40 で実験を行った結果である。Falasconi らのクラスタリングに比べ非常に詳細なクラスタリングができています。哺乳類の脳は左右の半球が対になっている。嗅球も半球が対になっているので, クラスタリング結果も 2 つの領域が対になっているはずである。クラスタ 1, 5, 13, 14, 35, 38 以外は上下 2 つの領域に同じ ID のクラスタがある。また, クラスタは各画像におけるそのクラスタの画素の輝度 (平均輝度) で特徴付けられる。これに基づいて類似度を定義し, 各クラスタ間の類似度を求めたところ, クラスタ 13 と 14, 13 と 38, 14 と 38 が最も類似しており, 次に, 29 と 35, 1 と 5 が類似していた。ここまでを同じクラスタと考えるならば, 図 2 の破線付近が半球の境界で, すべてのクラスタが上下で完全に対になっている。画像の生成モデルにはこのような対を成すという性質 (制約) は表現されていないにも関わらず, このような結果が得られることはクラスタリング手法の妥当性を示していると考えられる。

さらに, 匂い物質の分子パラメータから匂い

の感性表現用語の予測を機械学習により実現し, 匂い嗅ぎ GC などの官能検査サポート, 将来的には人を介さない匂いの質の計測の自動化につながる成果を得た。また, 機械学習で明らかとなった重要な分子パラメータを用いた関係性グラフにより匂いの質の視覚的な表現を行い, 未知の匂い物質の匂いを直感的に提示する手法を開発した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 51 件)

- ① J. Tanabe, K. Nakano, R. Hirata, T. Himeno, R. Ishimatsu, T. Imato, H. Okabe, N. Matsuda, Totally Synthetic Microperoxidase-11, *R. Soc. Open Sci.*, 5, 2018, 172311-172320.
<http://dx.doi.org/10.1098/rsos.172311>
- ② K. Nakano, T. Honda, K. Yamasaki, Y. Tanaka, K. Taniguchi, R. Ishimatsu, T. Imato, Carbon Quantum Dots as Fluorescent Component in Peroxyoxalate Chemiluminescence for Hydrogen Peroxide Determination, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, <https://doi.org/10.1246/bcsj.20180095>
- ③ Shang Liang, Liu Chuanjun, Chen Bin, Hayashi Kenshi, Development of molecular imprinted sol-gel based LSPR sensor for detection of volatile cis-jasmone in plant, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 260, 2018, 617-626.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.123>
- ④ S.-W. Lee, R. Selyanchyn, S. Wakamatsu, K. Hayashi, Nano-Assembled Thin Film-Coated Quartz Crystal Microbalance Odor Sensors for Environmental and Human Breath Ammonia Assessments, *Sensors and Materials*, 30, 2018, 1133-1144.
<https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1734>
- ⑤ Liu Chuanjun, Shang Liang, Yoshioka Hiro-Taka, Chen Bin, Hayashi Kenshi, Preparation of molecularly imprinted polymer nanobeads for selective sensing of carboxylic acid vapors, *Analytica Chimica Acta*, 1010, 2018, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.01.004>
- ⑥ 上野 翔太, 吉岡 大貴, 佐々 文洋, 林 健司, マルチ蛍光プローブポリマーフィルムを用いた匂いの可視化, *信学技報*, 117, 2018, 25-27
- ⑦ 森元 章悟, 商 亮, 佐々 文洋, 林 健司, 分子パラメータ解析による匂い情報の直感的視覚表現, *信学技報*, 117, 2018, 29-32.
- ⑧ Shang Liang, Liu Chuanjun, Tomimura Yoichi, Hayashi Kenshi, Odorant clustering based on molecular parameter-feature extraction and imaging analysis of olfactory bulb odor maps, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 2018, 508-518.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.08.024>
- ⑨ K. Nakano, J. Tanabe, R. Ishimatsu, T.

IMATO, Monolithic Peptide-Nucleic Acid Hybrid Functioning as an Artificial Microperoxidase, Bioconjugate. Chem., 28, 2017, 2031-2034.

<https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.7b00216>

⑩ Shang Liang, Liu Chuanjun, Watanabe Masashi, Chen Bin, Hayashi Kenshi, LSPR sensor array based on molecularly imprinted sol-gels for pattern recognition of volatile

organic acids, Sensors and Actuators B: Chemical, 249, 2017, 14-21.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.048>

⑪ Yoshioka Hiro-Taka, Ueno Shota, Fumihiro Sassa, Hayashi Kenshi, Odorants measurement using hyperspectral imaging and PVC film including multi fluorescent probes, IEEE proceedings, 2017, 1-3.

⑫ Shang Liang, Liu Chuanjun, Tomiura Yoichi, Hayashi Kenshi, Machine-Learning-Based Olfactometer: Prediction of Odor Perception from Physicochemical Features of Odorant Molecules, Analytical Chemistry, 89, 2017, 11999-12005.

<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b02389>

⑬ 緒方 勇斗, 古閑 智貴, 吉岡 大貴, 劉 傳軍, 林 健司, 匂い源形状と濃度推定のための画像解析, 電気学会センサ・マイクロマシン部門誌 (E 部門誌), 2015, CHS-15-028.

⑭ 荒木 聡, 渡辺 真司, 劉 傳軍, 林 健司, SERSによるガスセンシング用の金ナノ粒子の堆積構造, 第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2015, 29pm3-ps-89.

⑮ Hirota Yoshioka, Chuanjun Liu, Kenshi Hayashi, Odor Source Shape Visualization by Multispectral Fluorescence Sensing, IEEE SENSORS 2015, 2015, 58-61.

⑯ Tomoki Koga, Hirota Yoshioka, Chuanjun Liu, Kenshi Hayashi, Gas Visualization Based on Localized Surface Plasmon Resonance of Gold Nanoparticle Films, IEEE SENSORS 2015, 2015, 72-75.

[学会発表] (計 58 件)

① Yoshioka Hiro-Taka, Ueno Shota, Fumihiro Sassa, Hayashi Kenshi, Odorants measurement using hyperspectral imaging and PVC film including multi fluorescent probes, IEEE SENSORS 2017, 2017.

② Shang Liang, Liu Chuanjun, Hayashi Kenshi, Localized surface plasmon resonance modified with molecularly imprinted sol-gel sensor for cis-jasmone vapor detection, IEEE SENSORS 2017, 2017.

③ Liang Shang, Chuanjun Liu, Yoichi Tomiura, Kenshi Hayashi, Statistical Clustering of Odorant Molecules Based on

Both Molecular Profile Feature Extraction and Olfactory Bulb Odor Map Imaging Analysis, 3rd World Congress of Digital Olfaction Society 2016(DOS2016), 2016.

④ Liang Shang, Chuanjun Liu, Kenshi Hayashi, Molecularly Imprinted Sol-gel Based on LSPR Sensor for Fatty Acid Vapor Detection, The 16th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS2016), 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

有機電子デバイス研究室

<http://o.ed.kyushu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 健司 (HAYASHI, Kenshi)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 50202263

(2) 研究分担者

中野 幸二 (NAKANO, Koji)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号: 10180324

富浦 洋一 (TOMIURA, Yoichi)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 10217523

李 丞祐 (TOMIURA, Yoichi)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号: 60326460

内田 誠一 (UCHIDA, Seiichi)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 70315125

(3) 連携研究者

佐々 文洋 (SASSA, Fumihiro)

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号: 30722681

(4) 研究協力者

劉 傳軍 (LIU, Chuanjun)

(株)ユー・エス・イー・主幹研究員