

気体が玉虫色に「見える」

～構造色を利用した気体識別用感圧デバイスを開発～

配布日時：2022年11月28日14時

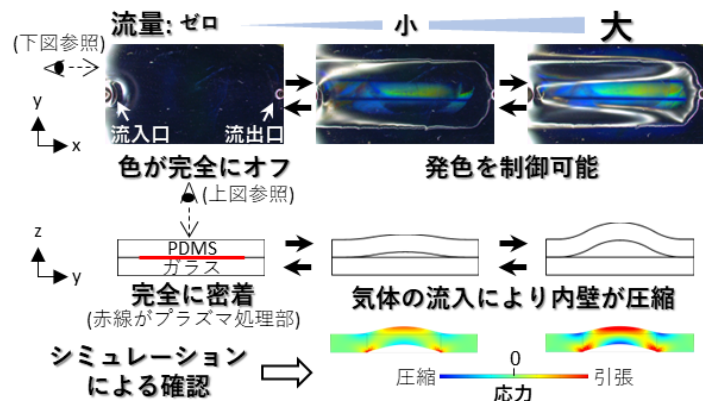
国立研究開発法人物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）は、ハーバード大学およびコネティカット大学と共同で、気体を流入させるとその性質に応じて発色する簡易デバイスを設計・作製し、気体を色によって識別できることを実証しました。本成果は、気体流入に伴う圧力を利用し構造色を発現させることで、きわめて手軽にあらゆる気体を可視化・識別するための新たな手法を提供するものであり、気体計測がカバーする、環境、安全、ヘルスケアなどの諸分野への展開が期待されます。

2. 気体の可視化は基礎研究のみならず応用面においても重要な課題ですが、我々を取り巻く空気がそうであるように、ほぼ全ての気体は無色透明であり、目に見えません。これまで可視化は、主に自由空間における気流を対象に、ごく限られた手段によって達成されていました。例えば、赤外線カメラを用いた温度変化に基づく方法や、トレーサー粒子と呼ばれる微粒子を気中に分散させる方法などですが、いずれも特殊な装置を必要とします。「任意の」気体を一様に可視化することはもとより、可視化した画像から気体特性の分析などを行うことは困難でした。気体の種類を選ばずに可視化し、分析までできる簡易な手法は、ビジュアルベースの各種計測技術など、多様な展開につながると考えられます。

3. 今回、研究チームはポリジメチルシロキサン（PDMS）という柔軟な材料を板状に成形し、片面の一部をアルゴンプラズマ処理し、その面をガラス基板と密着させるだけという簡易な方法により、多様な色（構造色）に基づく気体可視化・識別デバイスを作製しました。このPDMSのプラズマ処理部分には、圧縮によってひだ状の微細構造が形成します。そのため、右図に示すように、PDMSとガラスの接着面をこじ開けるように気体を流し込むと、プラズマ処理部が圧力により圧縮され、構造色が誘起されるのです。この原理



気体流入に伴うデバイス発色の様子と原理

上段：俯瞰図、中下段：断面図

は、あらゆる気体の可視化・識別に適用可能です。また、気体の流入を止めると、色は完全に消失します。この構造変化は気体の流量、粘度、密度に依存します。特に全ての気体は固有の粘度と密度を有するため、一定流量下での発色は気体種に特有となり、これにより気体の識別・分析が可能となります。

4. 今後は、環境ガスや生体試料の識別などを究極的な目標に据え、デバイスの感度向上・最適化に取り組みたいと考えています。また、画像認識や機械学習と組み合わせた識別手法の確立や、CCDなどを用いた簡易構成の小型デバイス作製についても検討していく予定です。

5. 本研究は、NIMS 機能性材料研究拠点 嗅覚センサグループの柴弘太主任研究員とハーバード大学の David A. Weitz 教授、コネティカット大学の Luyi Sun 教授らからなる研究チームによって行われました。

6. 本研究成果は、Advanced Science 誌オンライン版に2022年11月17日（現地時間）に掲載されました。

研究の背景

空気に囲まれて生きている我々は、一部の有色気体を除き、気体を視認することができません。これは、ほとんどの気体が無色であることに加え、異なる気体であってもその屈折率が各々非常に近い値をとるため、認識可能な光の屈折が起こらないことに起因します。この屈折率の微小な差異を見分け、自由空間における気流を可視化するための手法も存在しますが、高価で特殊な装置が必要となります。他にも、赤外線カメラを用いることで温度変化に基づいて気流を可視化したり、トレーサー粒子と呼ばれる微粒子を気体に分散させて気流を可視化したりすることが可能ですが、やはり特殊な装置や前処理が必要となります。こうした物理的な手法以外にも、化学的な発光現象を利用した方法も報告されています。しかし、化学的な相互作用に依存するという原理的な制約から、発光により可視化できる対象は限られているのが現状です。このように、元々見ることのできない気体やその流れを見えるようにすること自体が困難であり、これを任意の気体に対して行った上でその分析まで達成できる手法を開発するのは、きわめて挑戦的な課題と言えます。こうした手法を高価で複雑なセットアップを用いず、簡易なものとして開発できれば、気体を画像化して分析する各種計測技術をはじめ、これまでになく応用など様々な可能性が拓けるものと考えます。

研究内容と成果

今回研究チームは、ポリジメチルシロキサン (PDMS) ⁽¹⁾ という柔軟な材料を薄い板状に成形し、その片面の一部をアルゴンプラズマ処理した後、ガラス基板上に貼りつけるだけという簡易な方法により、構造色 ⁽²⁾ に基づく気体可視化・識別デバイスが作製できることを示しました。上記プラズマ処理は PDMS 内部の架橋を促進するため、その最表面には、未処理の PDMS と比較して数百倍以上も硬い膜が形成します。この上下に硬さの大きく異なる二層構造に圧縮力が印加されると最表面が特異的に変形し、周期的なひだ状の構造を形成します。この周期長が可視光の波長 (380~780 nm) に近い値 (数百 nm~数 μm) をとるため、構造色が発現するのです (図 1)。

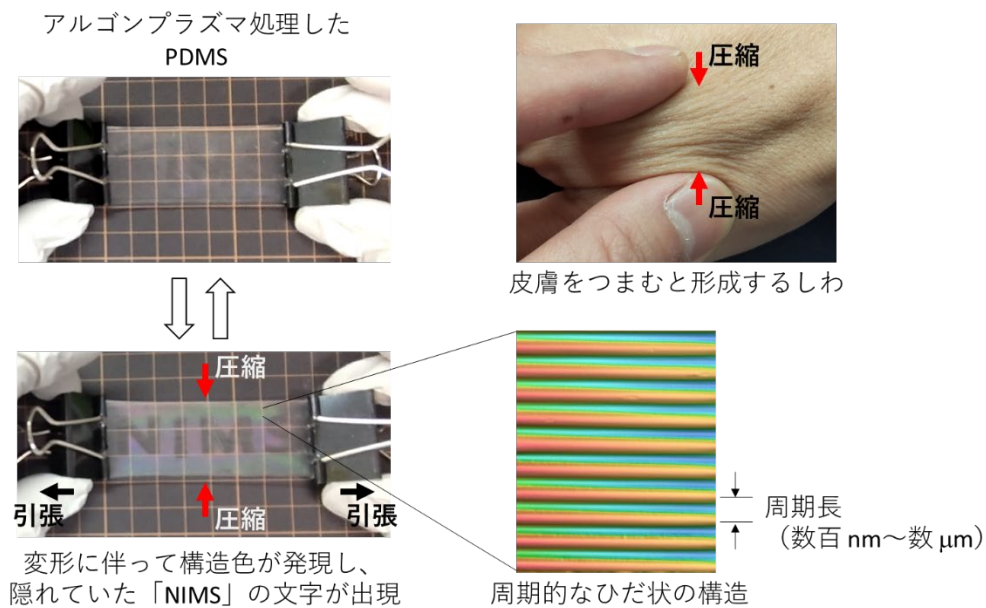


図 1 アルゴンプラズマ処理した PDMS の引張試験の様子 (左) と、それによって PDMS 表面に形成したひだ状構造の写真 (右下) を示しています。PDMS を左右方向に引っ張ることにより上下方向に圧縮力が発生し、周期的なひだ状の構造が形成していることが分かります。これに伴い構造色が発現していることも分かります。また、ここでは、PDMS をアルゴンプラズマ処理する際に「NIMS」の文字をかたどったマスクを用いてプラズマ照射されない部分を設けることにより、構造色の発現に伴ってこれらの文字が透明な部分として浮き出るようにしています。このようなひだ構造の形成は、右上に示す皮膚をつまむことでしわが形成することと類似しています。

今回のデバイスは、気体の流入によって構造色を発現させるために、ある工夫をしています。アルゴンプラズマ処理したPDMSの表面とガラス基板を完全に密着させておき、そこをこじ開けるようにして気体を流入させたときに気体の通過部分のみが変形（圧縮）するように設計しています。より具体的には、アルゴンプラズマで処理した部分以外を全て不可逆にガラスと接着することで、流入させた気体がアルゴンプラズマ処理部分のみを最大限に変形させ（つまり、処理部分のPDMSの外壁側は伸張するので、内壁側は圧縮される）、これに伴って構造色を発現させるという仕組みです（図2）。この変形は、温度一定という条件では、流れ由来の圧力という物理現象に依存するため、いかなる気体が通過しても生じます。したがって、原理的にはあらゆる気体の識別が可能となります。また、気体の流入を止めればPDMSは元通りガラスと密着して色が完全に消えるため、オンオフ可能なディスプレイ技術へ応用できる可能性もあります（図3）。

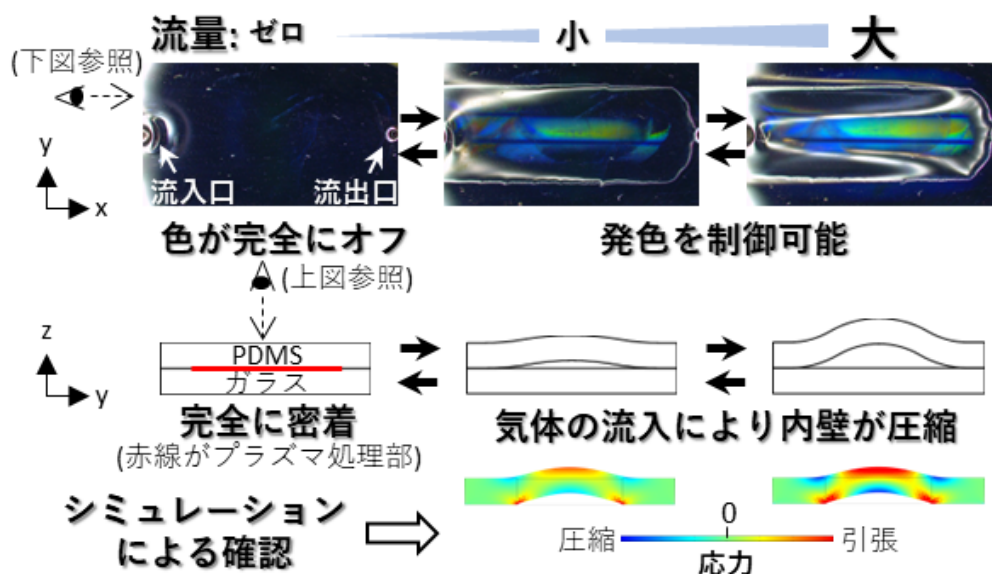


図2 気体流入に伴うデバイス発色の様子と原理を示す図です。上段はデバイスを上から見た俯瞰図、中段は断面図（流れの方向に対して直交する面）、下段は気体流入下で中段に示したPDMSに作用する応力分布を示しています。

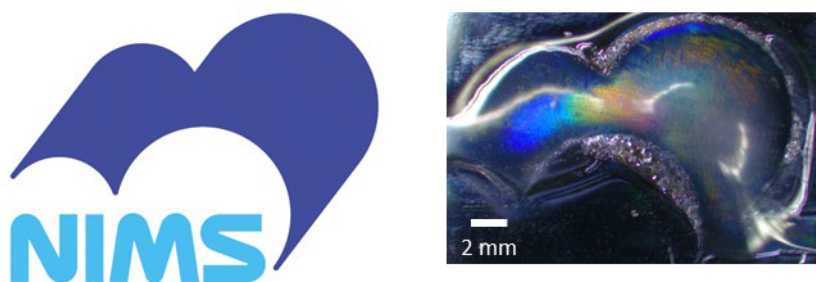


図3 NIMSのロゴ（左）と、気体を一定流量で流すことによってロゴの形状に発色させたデバイスの写真（右）、を示しています。この構造色は気体が流れている間のみ発現し、気体の供給を止めると消失します。

詳細な検討の結果、今回の構造色は気体の流量、粘度、密度に依存することが分かりました（図4）。つまり、気体の種類が既知であれば流量計として利用できます。一方、構造色が粘度と密度の両方に依存するので、その複雑な依存性を利用した識別が可能です。具体的には、流量を一定にして複数の気体を順次流せば、各気体の特性（粘度、密度）に応じて固有の色が発現するため、気体の識別に利用できます。これは、例えば密度の値が同じ複数の気体でも、それぞれの粘度の値は異なるためです（逆も然りです）。これを利用し、事前にこれらを独立変数として多数の気体を測定することで「学習データ」を取得しておき、未知の気体の定性・定量につなげるというアプローチが考えられます。画像認識や機械学習など最先端の解析手法と組み合わせることで、本デバイスを利用した気体識別には様々な展開が見えてくると考えてい

ます。また、上述の複雑な依存性は流体力学の基礎理論（ベルヌーイの式⁽³⁾）により説明されます、**図 4 (c)** を見ると実験結果と理論に基づいて見積もった値（解析解）がよく一致していることが分かります。

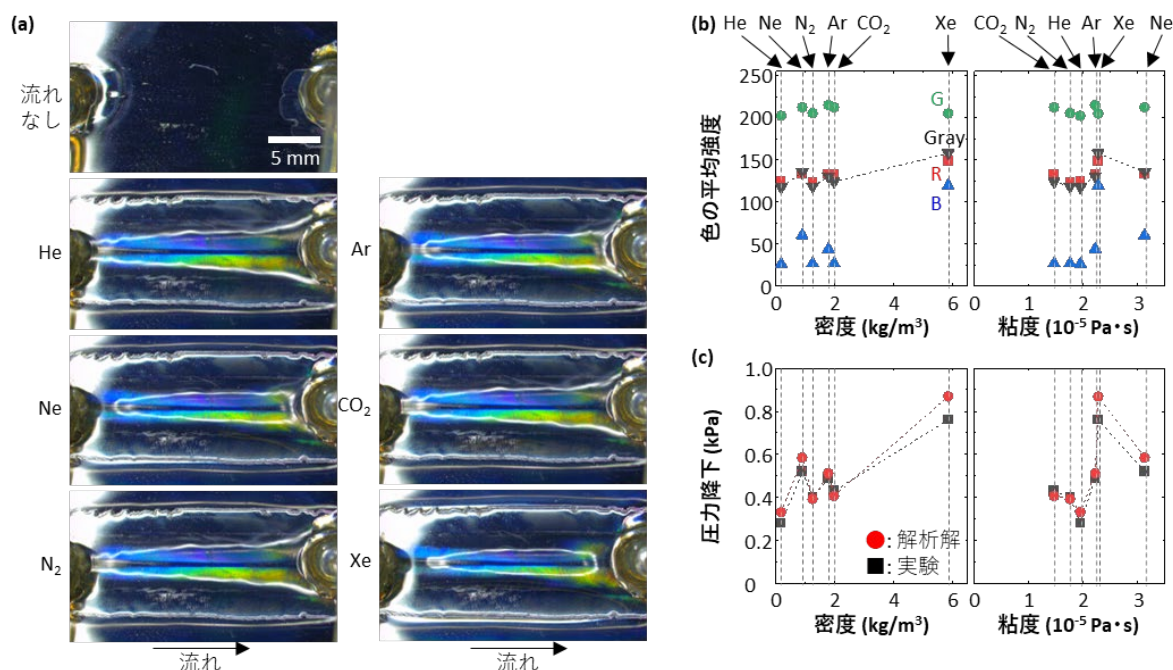


図 4 (a) 6 種類の気体（ヘリウム (He)、ネオン (Ne)、窒素 (N₂)、アルゴン (Ar)、二酸化炭素 (CO₂) およびキセノン (Xe)；密度順）を一定流量でデバイスに流入させた際に発現した構造色を示す写真を示しています。(b) (a) に示した写真から気体ごとに構造色の色強度を算出し、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) およびグレー (Gray) のそれぞれについて、密度 (左) あるいは粘度 (右) に対してプロットした図を示しています (RGB 各々が密度あるいは粘度に対して異なる依存性を示すのは、構造色が角度依存性を有していることと関係しています)。Gray は RGB の平均強度です。なお、これらの色強度は、(a) の各写真における中央付近の緑に発色している領域を横切る形で線を引き、そこにおける強度を平均することで算出しています。(c) (a) の発色時の各デバイスにおける圧力降下（流入口と流出口の圧力差）を、密度 (左) あるいは粘度 (右) に対してプロットした図を示しています。実験と解析解から求めた値は非常によく一致しています。また、(b) に示した各気体間の非線形に上下する傾向と同様の傾向を示します。

今後の展開

今後は、環境ガスや生体試料など近年関心の高まる測定対象の識別を究極的な目標に据え、それに向けたデバイスの感度向上・最適化に取り組みたいと考えています。また、画像認識や機械学習などの解析手法と組み合わせた識別技術の確立や、CCD などを用いた簡易構成の小型デバイス作製についても検討していく予定です。

本研究は、JSPS 科研費 国際共同研究強化(B) (課題番号:JP19KK0141)、基盤研究(B) (課題番号:21H01971)、挑戦的研究(萌芽) (課題番号:21K18859)、基盤研究(A) (課題番号:18H04168)、および内閣府 官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) の一環として行われました。また、特許出願済み (出願番号 2022-167263) です。

掲載論文

題目: Visualization of flow-induced strain using structural color in channel-free PDMS devices

著者: Kota Shiba, Chao Zhuang, Kosuke Minami, Gaku Imamura, Ryo Tamura, Sadaki Samitsu, Takumi Idei, Genki Yoshikawa, Luyi Sun, David A. Weitz

雑誌: Advanced Science (DOI: 10.1002/advs.202204310)

掲載日時：2022年11月17日（現地時間）

用語解説

(1) ポリジメチルシロキサン（PDMS）

高い柔軟性や可視光に対する透明性などを有する材料です。主剤と硬化剤を混合し、加温しながら反応させることで作製することができます。DIY 用途にも利用でき、通販サイトなどでも比較的容易に入手可能です。主剤と硬化剤の混合比や反応時間・温度を変化させることにより、最終生成物の硬さなどを調節することができるという特徴をもっています。

(2) 構造色

見る角度によって多様に変化して見える色です。このような色を呈する物質を顕微鏡などで詳細に観察すると、可視光の波長と同程度の間隔で整然と配列した構造を見ることができます。この周期構造が角度依存性のある発色の原因となっています。自然界では、モルフォ蝶や玉虫、オパールなどに見られます。

(3) ベルヌーイの式

流体内のエネルギー保存を表す式です。非圧縮性流体の場合、運動エネルギーと位置エネルギーと圧力の総和が一定となることを示しています。本研究では、粘性流体を記述するための粘性項を含めることで、実験結果の解釈につなげています。

本件に関するお問い合わせ先

（研究内容に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点嗅覚センサグループ

主任研究員 柴 弘太（しば こうた）

E-mail: SHIBA.Kota@nims.go.jp

TEL: 029-860-4603

URL: https://samurai.nims.go.jp/profiles/shiba_kota?locale=ja

<https://weitzlab.seas.harvard.edu/kota-shiba>

（報道・広報に関すること）

国立研究開発法人物質・材料研究機構 経営企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp