

## トロトロも、そよそよも、トロそよも数値で見分ける

～液体から気体まで切れ目無くカバーする粘度測定法の開発に成功～

配布日時：2021年6月14日14時

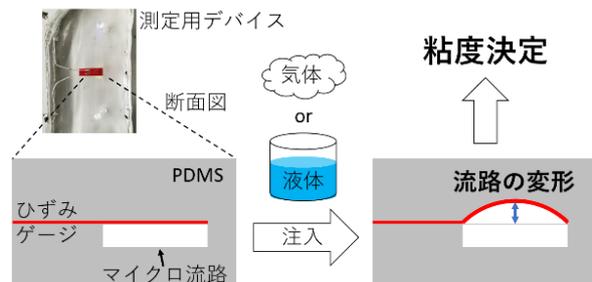
国立研究開発法人物質・材料研究機構

### 概要

1. NIMS は、ハーバード大学と共同で、単一のデバイスによって流体（液体および気体）の粘度を測定可能な画期的な手法を開発しました。液体と気体の粘度は文字通り桁違いに異なるため、単一の測定手法によって両者をカバーすることは困難でした。本成果により粘度に基づいて任意の流体が識別可能となるため、一つの小型デバイスを用いた、呼吸や血液などの生体試料に基づく健康モニタリングやヘルスチェックなどへの展開が見込まれます。基礎科学的な視点では、気液が共存する状態やその遷移過程に迫る知見の獲得も期待されます。

2. 私たちは、水がサラサラであり、はちみつがトロトロであることを知っています。この「粘度」は液体のみならず、実はそよそよとした気体でも見られる特性です。このように、粘度は全ての流体を特徴付けるパラメータであるため、流体に関わるあらゆる分野・産業において、その計測技術は大変重要です。液体の粘度測定には既に各種粘度計が標準的な手法として使われており、気体についても、まだ研究レベルではあるものの多様な手法が提案されています。しかし、液体と気体という本質的に異なる2種類の流体の粘度をカバーできる手法は確立していません。近年、小型の簡易デバイスによる液体や気体の測定・識別技術に対する関心が高まっており、ウェアラブルな血圧計や携帯型のおいチェッカーなどの開発が加速しています。そうした観点からも、従来にない測定レンジ・対象を有する新規流体粘度測定法には様々な期待がもたれています。

3. 今回、研究チームはポリジメチルシロキサン（PDMS）という柔軟な材料によって作製された微小な流路（マイクロ流路：図）を流体が通過する際に生じる流路壁の変形と流体粘度に相関（粘度に比例して膨らむ）があることに着目し、この変形が液体・気体を問わず生じることを実証しました。これにより、任意の流体に適用できる本手法が実現しました。本デバイスは、市販のひずみゲージ（流路変形測定用）が流路上に埋め込まただけのシンプルな構造で、流体の粘度をリアルタイムで測定することができます。また、ひずみゲージの配置場所を工夫することで、高い測定感度が実現しました。



図：本手法による粘度決定までの大まかな流れ。

4. 今後は、生体試料の分析や識別を視野に入れ、呼吸を含む各種生体ガス、唾液、尿、血液などの粘度測定に取り組み、健康モニタリングやヘルスチェックなどへと展開していきたいと考えています。さらには、気体から液体（あるいはその逆）への中間的な状態や、気液が様々な形で共存する状態（便宜的に、トロトロとそよそよの間として「トロそよ」）の粘度に関する基礎科学的な知見獲得も目指します。

5. 本研究は、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の柴弘太主任研究員とハーバード大学の David A. Weitz 教授らからなる研究チームによって行われました。また、本研究は、JSPS 科研費 国際共同研究強化（B）（課題番号：JP19KK0141）、電気通信普及財団 長期海外研究援助、丸文財団 交流研究助成の一環として行われました。

6. 本研究成果は、Lab on a Chip 誌オンライン版に2021年6月9日（現地時間）に掲載されました。また、特許アメリカ仮出願済み（出願番号 63/195894）です。

## 研究の背景

粘度は、流体が有する代表的な特性の一つです。そして、私たちにとって非常になじみ深いものでもあります。例えば、水はサラサラであり、はちみつはトロトロであることを、私たちは日常生活のレベルで日々体感しています。このように粘度は、流体を特徴付けるパラメータとなっているのです。普段はあまり意識しませんが、気体も流体の一種です。しかし、私たちが日常的にそよそよとした気体の粘度を体感することはありません。これは、液体と比較して、気体の粘度が非常に小さいためです。具体的には、液体の粘度は  $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  付近から  $10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  程度の値をとるのに対し、気体の粘度は  $10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s} \sim 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  付近にとどまります。液体と気体という2種類の流体の本質的な違いを反映するように、両者の粘度には文字通り桁違いの差があるのです。

液体・気体に関わらず、流体が関与する分野・産業はきわめて多岐にわたるため、流体の種類に応じた様々な粘度計測の手法が開発されてきました。例えば、液体の粘度は上述のように広範囲にわたりますが、その大部分は標準技術として確立された各種粘度計によって測定することが可能です。一方、気体の粘度の測定には、粘度計のような汎用的な測定手法は確立しておらず、研究レベルで様々な手法が提案されています。しかし、液体と気体という本質的に異なる流体の粘度を単一の測定手法によってカバーすることは、技術的に困難でした。

冒頭で述べたように、粘度は流体を特徴付けるものであり、各物質には固有の粘度があります。そのため、粘度を測定することにより、流体の識別が可能となります。近年、小型の簡易デバイスによる液体や気体の測定・識別技術には大きな関心が集まっており、ウェアラブルな血圧計や携帯型のおいチェッカーなどの開発が加速しています。そうした観点からも、従来にない測定レンジと測定対象を有する新規流体粘度測定の新規技術開発には様々な期待がもたれています。

## 研究内容と成果

今回研究チームは、気体および液体の粘度を単一のデバイスによって測定可能な、新規技術の開発に成功しました。研究チームは、ポリジメチルシロキサン (PDMS) という柔軟な材料によって作製された微小な流路 (マイクロ流路<sup>1)</sup>; 図1) 内を流体が通過する際に生じる流路壁の変形に着目し、この変形と流体粘度の相関について実験およびシミュレーションによる多角的な検討を行いました。

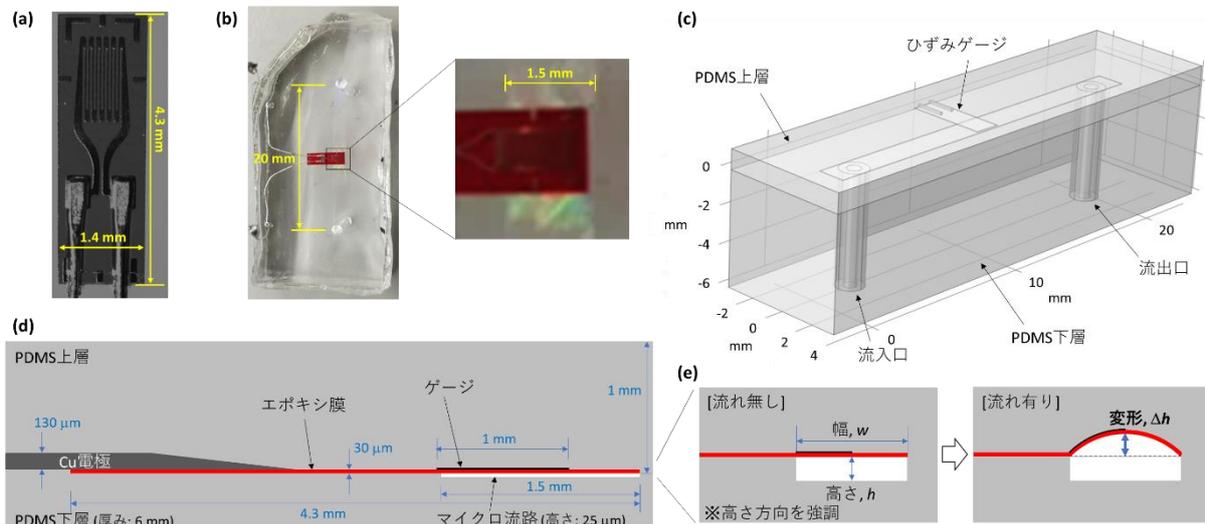


図1 (a) 本研究で用いたひずみゲージの光学顕微鏡写真。(b) PDMS で作製したマイクロ流路の写真、およびその部分拡大写真。右側に示す部分拡大写真は、流路直上に埋め込まれたひずみゲージを示している。(c) マイクロ流路 (b) に示すものと同寸法) の3D 構造図。(d, e) マイクロ流路の直上に、流路に直交する形で配置されたひずみゲージの断面図。(e) に示す部分拡大断面図は、流れが無い場合 (左側) および流れがある場合 (右側) のマイクロ流路の様子を示している。

マイクロ流路という閉じた空間に流体を供給し、それに伴う物理的な変形を測定するという本手法の性格上、液体・気体を問わずに適用可能であることが予想され、実際にいくつかの気体 (図 2) と液体 (図 3) を測定することによってこれを実証しました。

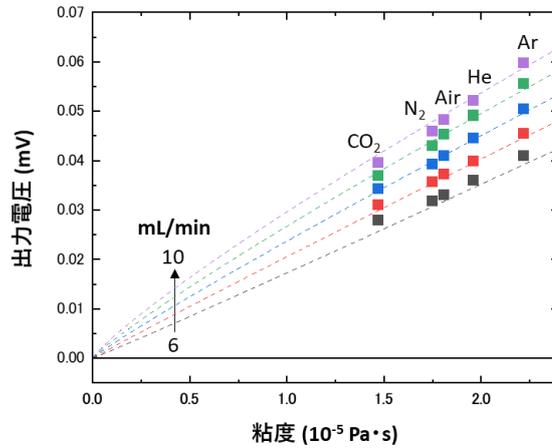


図 2 5 種類の気体を測定した際のひずみゲージの出力電圧と粘度の相関。5 種類の気体として、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、窒素 (N<sub>2</sub>)、空気 (Air)、ヘリウム (He) およびアルゴン (Ar) を用いた。破線は、実験と同じ環境条件に設定した有限要素シミュレーションにより得たものである。四角で示した各データ点は、実験値である。破線およびデータ点の色は流量に対応する (6 mL/min : ■、7 mL/min : ■、8 mL/min : ■、9 mL/min : ■、10 mL/min : ■)。

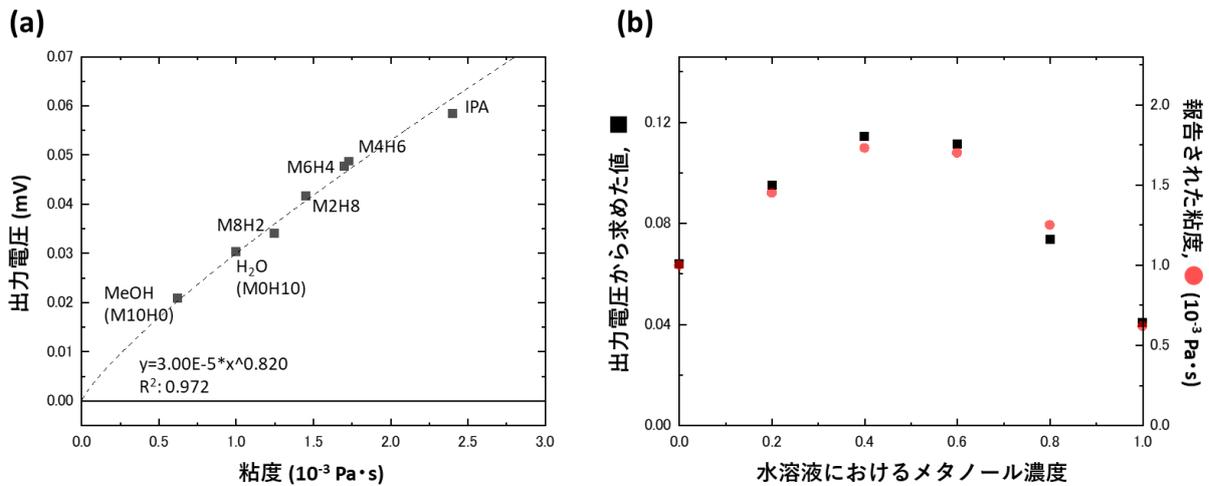


図 3 (a) 一定の流量 (0.25 mL/min) で 7 種類の液体を流した際の、ひずみゲージからの出力電圧と粘度の相関。7 種類の液体として、メタノール (MeOH)、水 (H<sub>2</sub>O)、イソプロピルアルコール (IPA) および 4 通りの異なる濃度の MeOH 水溶液を用いた。なお、MeOH 濃度は 20、40、60 および 80% とし、図中ではこれらを M2H8、M4H6、M6H4 および M8H2 と略記している (MeOH は M10H0、H<sub>2</sub>O は M0H10 も併記)。(b) MeOH 濃度に対して、左軸にはひずみゲージの出力電圧に基づく計算値の変化 (■) を、右軸には報告されている粘度の値 (●) を、それぞれプロットした図。両者はよく一致していることが分かる。

粘度の値としては、 $10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  付近の気体と、 $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  付近の液体が測定可能であることを確認しており、これにより、気体から液体にかけて、途切れることなくカバーできることが示されました。

本手法は化学的な相互作用には頼らないため、基本的にいかなる流体でも測定可能です。また、流体の流れを連続的に測定できるため、粘度のリアルタイムな変化を追跡することもできます。流路の変形の測定には市販のひずみゲージ (数百円/枚; 図 1) を使用しており、測定部の作製は容易です。さらには、マ

マイクロ流路の直上に、流路に直交する形でひずみゲージを配置することで、粘度に依存した流路の変形を高感度に検出することが可能であることも見出しており、測定レンジ、測定対象、リアルタイム性、デバイス構造のシンプルさ、感度など、様々な点で注目すべき特長を備えています。

## 今後の展開

今後は、近年需要の高まる生体試料の分析・識別を視野に入れ、呼気を含む各種生体ガス、唾液、尿、血液などの粘度測定に取り組み、それらの粘度に基づく健康モニタリングやヘルスチェックなどへと展開していきたいと考えております。また、基礎科学的な展開として、気体から液体（あるいはその逆）へと相が変化する際の粘度や、気体と液体が様々な形で共存する気液二相系の流れの粘度など、単相の流体と比較してまだ研究すべき点が多く残る複雑な流体系を対象に、掘り下げた研究を推進していきます。

## 掲載論文

題目：Microchannel measurements of viscosity for both gases and liquids

著者：Kota Shiba, Guangming Li, Emmanuel Viro, Genki Yoshikawa, David A. Weitz

雑誌：Lab on a Chip

掲載日時：2021年6月9日（現地時間）

## 用語解説

### (1) マイクロ流路

マイクロメートルスケールの寸法（主に流路幅と流路高さ）を有する流路の総称。微細加工技術などとの組み合わせによって、任意の構造を設計・作製することが可能。

## 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://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](mailto:pressrelease@ml.nims.go.jp)