

プログラム可能な光学特性を有する 流体「メタフルイド」とは

サリー・コール・ジョンソン

光学特性、圧縮性、粘性が調整可能で、さらにニュートン流体と非ニュートン流体の状態間を遷移できる「メタフルイド」は、実現できるのだろうか。



米ハーバード大ジョン・A・ポールソン工学・応用科学スクール (Harvard John A. Paulson School of Engineering & Applied Sciences : SEAS) の研究チームは、小さなエラストマー球 (50 ~ 500 μm) の懸濁液を用いた、世界初のメタフルイドを開発した。このエラストマー球は圧力下で座屈し、流体の特性を劇的に変化させる (図1)。

その魅力は何だろうか。同研究チームのメタフルイドが、ロボットをプログラミングする油圧アクチュエータ、(衝撃の強さに応じて) エネルギーを散逸させるインテリジェントなショックアブソーバ、透明状態から不透明状態に遷移する光学デバイスなど、さまざまな用途に利用できる点にある。

メタマテリアル (組成ではなく構造によって特性が決まる、人工的に設計された材料) は、すでにさまざまな用途で幅広く使用されている。ハーバード大SEASのフェデリコ・カパッソ氏 (Federico Capasso) が率いる研究チームが開発したメタレンズなど、メタマテリアルのほとんどは固体である。しかし、固体のメタマテリアルとは異なり、メタフルイドの優れた点は、流動性があり容器の形状に適應できることである。

メタフルイド

すべては4年前、SEASで材料科学と機械工学を研究するアデル・ジェルーリ氏 (Adel Djellouli) が、同僚のベン・ゴリッセン氏 (Ben Gorissen) とコーヒーを飲みながら材料について話した際にひらめきを得たことから始まった。メタマテリアルの研究では、流体に関しては大きな未開拓分野があることに気づいた。過去20年間の進歩のほとんどは、固体メタマテリアルの研究で達成されており、メタフルイ

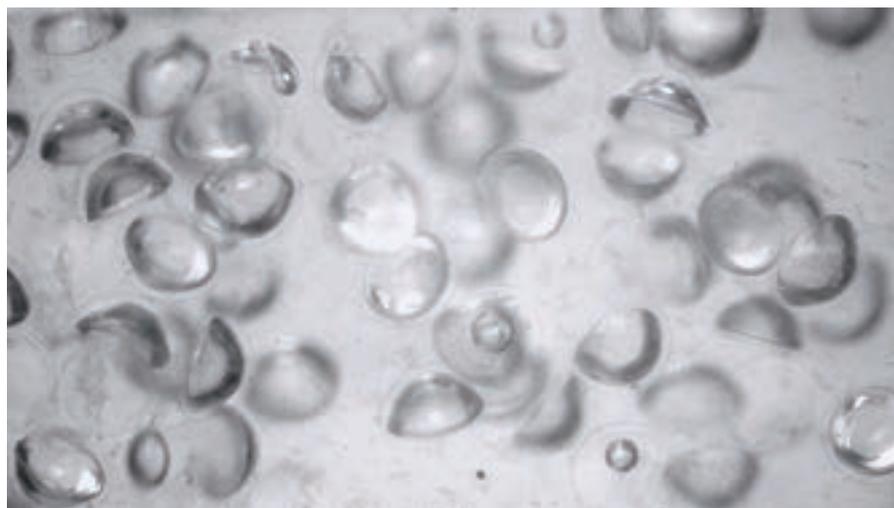


図1 本研究チームの「座屈」シェルは圧力でスナップ (瞬時に変形) し、メタフルイドの特性を変化させる (画像提供:ハーバード大SEAS)

ドに関する研究例は文献上でもごくわずかしか存在しない。

「当チームが開発したメタフルイドの基本構成要素は、非常に変形しやすい中空シェルである。これは私が博士課程で人工マイクロスイマーを研究していた際に詳しく調査した系で、その集団的挙動を常に探求したいと思っていた」とジェルーリ氏は言う。「この系がこれほど豊かなものを秘めているとは、当初は想像もつかなかった」。

そこでジェルーリ氏のチームは、粘性、圧縮性、光学的特性をプログラム可能なプラットフォームとなるメタフルイドの開発に着手した。

「当チームのメタフルイドは、気体を充填した弾性カプセルの懸濁液を含む従来の液体だ (図2)」とジェルーリ氏は説明する。「このシェルを組み込むと、液体にプログラム可能な圧縮性を付与できる。さらに、シェルがスナップ (瞬時に変形) する際に弾性相転移が起こり、その結果、あるしきい値の圧力でプラトー (平坦部) が生じる。これは熱力学的1次相転移を想起させる現象だ」。

この「シェルのスナッピング」現象に

よって、基本構成要素の形状が凸状から凹状へと変形し、その結果、散乱特性が劇的に変化する。ジェルーリ氏は、「実際に観察してみると、連続相とシェルの材料の屈折率が一致した場合、透明状態から不透明状態に変化する」と述べる。

本メタフルイドは、マクロおよびミクロの両レベルで単純な形状であるため、シンプルな設計だ。このシンプルさゆえに、「製造が容易で、かつ大規模化も可能」だ、とジェルーリ氏は言う。「当チームのメタフルイドでは、熱力学的、光学的、レオロジー的など、さまざまなメタフルイドの特性を調整できる。単純なロボットに柔軟性と制御性の両方をもたらすが、まだ解明できない複雑な流動特性を示す。多くの研究者の方々にこの新たな系を採用し、実験してもらいたい」。

調整可能な光学特性と非ニュートン流動性

メタフルイドは、圧力の変化に応じて光学特性が変化する。

丸みを帯びたカプセルは光を散乱させ、液体を不透明にする。しかしこの



図2 本研究チームのメタフルイドの液滴(画像提供:ハーバード大SEAS)

ようなカプセルは、圧力がかかるとマイクロレンズに変形し、光を集光して液体を透明にする。

ジェルリ氏のチームはさらに、メタフルイドのカプセルが完全な球状である場合、メタフルイドはニュートン流体のように挙動し、その粘度は温度に応じてのみ変化することも実証した。しかし、カプセルが変形すると、懸濁液は非ニュートン流体へと遷移し、その粘度はせん断力に応じて変化する。せん断力が大きければ大きいほど、流動性が高く(粘性が低く)なる。

驚くべきことに、これはニュートン流体と非ニュートン流体の状態間を遷移することが初めて確認されたメタフルイドなのだ。

メタフルイドの製造

同研究チームは、メタフルイドを効率的に大規模製造できるよう、SEASの物理学および応用物理学教授、デビッド・A・ワイツ氏(David A. Weitz)の研究室に協力を仰いだ。同研究室では、

空気を充填し、シリコンオイル中に懸濁した、非常に変形しやすい球状のカプセルを何十万個も製造した。

液体内の圧力が上昇すると、カプセルはレンズのような半球状に変形する。圧力がなくなると、カプセルは再び球状に戻る。この変形により、液体の粘性や不透明性など多くの特性が変化する。このような特性は、液体内のカプセルの数、厚さ、サイズを変更することで調整できる。

同チームは、メタフルイドを用いて単純なロボットに知能を付与するという、興味深いデモンストレーションを行った。メタフルイドを油圧式ロボットグリッパーに装填し、重いガラス瓶、割れやすい卵、小さなブルーベリーを持ち上げさせるよう、メタフルイドにプログラミングしたのだ。空気や水を動力源とする従来の油圧式システムでは、ロボットがグリッパーを調節し、3つの物体を押しつぶすことなく持ち上げるには、センサや何らかの外部制御機能が必要だった。

一方、同チームのメタフルイドは、さまざまな圧力に反応し、グリッパーの力を自動的に調節して瓶、卵、ブルーベリーを持ち上げるため、センサが不要で、かつ追加のプログラミングも不要である点が優れている。

さらに同チームは、メタフルイドの組成を変更することで再プログラミング可能な、流体論理ゲートのデモンストレーションも行った。

同チームが最も驚嘆したこととして、メタフルイドの流動特性が挙げられる。その流動性は、入口と出口の圧力差だけでなく、絶対圧力にも左右されるからだ。「形状遷移によって、当チームがまだ解明できていない多彩な挙動が生み出されるだろう」とジェルリ氏は述べる。

同チームの今後の課題は、研究室レベルから実用レベルへと製造規模を拡大し、さらにデバイスの小型化を進めていく中で、膜からの空気の拡散を抑制することである。

エネルギー用途の可能性

実用化の段階にはまだ至っていないが、「衝撃の強さに応じて調整可能な衝撃吸収の研究に加え、エネルギー変換と貯蔵の両面での研究も、大いに可能性が見込まれる用途例として挙げられる」とジェルリ氏は言う。

また、メタフルイドはその光学的特性から、「圧力に応じて変化する適応型光フィルタ」としても使用できる、とジェルリ氏は補足する。「さらに、加熱によって透過率がどのように変化するかにもよるが、高出力レーザーの出力リミッタとしても利用できる可能性がある」。

同チームは現在、メタフルイドの調整可能な音響特性と熱特性の研究を進めている。