

2021年3月23日

報道関係者各位

慶應義塾大学
神奈川県立産業技術総合研究所

流体界面エネルギーを駆動力とする微小液滴の3次元配列の出現

—3次元の周期構造を持つ新規材料開発への応用に期待—

慶應義塾大学理工学部機械工学科の三木則尚教授、同大学院理工学研究科博士課程（研究当時）の矢菅浩規（現お茶の水女子大学特別研究員、慶應義塾大学訪問研究員）、神奈川県立産業技術総合研究所研究開発部人工細胞膜システムグループ（グループリーダー：東京大学 竹内昌治教授）、スウェーデン王立工科大学 Micro and Nanosystems の Wouter van der Wijngaart 教授らの共同研究グループは、非混和性の流体（水と油など）の間の界面エネルギーを駆動力として利用することで、マイクロスケール（1 mm の 1000 分の 1）の微小流体から成る 3 次元構造を出現させることが可能であることを報告しました。

具体的には、特定の格子構造中に非混和性の 2 流体を順次通過させると、微小液滴が 3 次元かつ周期的に生成・配列されるという現象です。この現象を用いることで、単位体積当たり非常に大きな流体界面を有する材料を構築することが可能であり、その特性を生かしたソフトアクチュエータ材料、3 次元組織状材料、およびヒト細胞のマイクロカプセル化技術を実証しました。今回発見された現象とその技術は、スマートマテリアル、フォトニック結晶、医療およびバイオミメティクスの多岐にわたる分野で利用できる新規材料開発に貢献すると期待されます。

本研究成果は、2021年3月22日（GMT/UTC+0000）に英国の科学雑誌「Nature Physics」のオンライン版に掲載されました。

1. 本研究のポイント

- ・ 流体界面が特定のマイクロ格子構造を通過する時に 3 次元液滴配列が出現することを発見（図 1）
- ・ 実験とシミュレーションから液滴の出現条件と形状を明らかにした
- ・ 多様な組み合わせ（液体-液体、液体-固体など）で配列を形成可能であることを確認した
- ・ 温度制御可能なソフトアクチュエータ材料、3 次元組織状材料、およびヒト細胞のマイクロカプセル化技術をはじめとする多様な分野で利用できる新規材料開発への応用が期待される

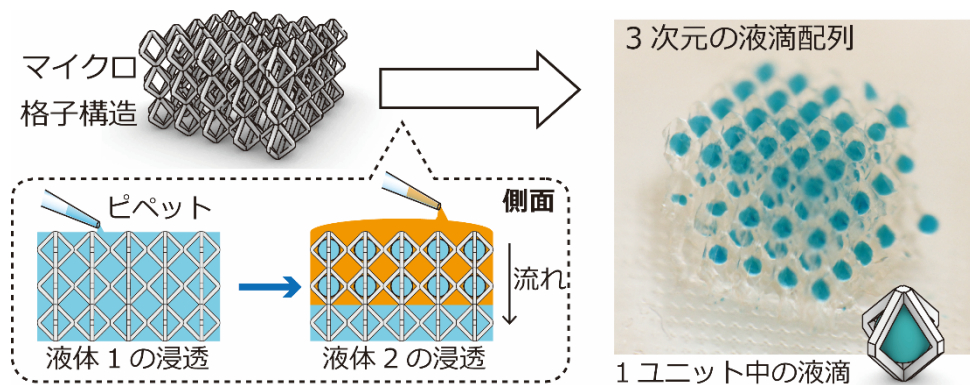


図 1 マイクロ格子構造中での微小流体から成る 3 次元構造の出現

2. 研究背景

マイクロスケールの周期的な 3 次元構造は、生物の組織内部の細胞の 3 次元配置など自然界にも数多く見られることに加え、スマートマテリアル、フォトニック結晶、医療およびバイオメテイクス分野といった多様な工学領域においても重要な構造です。これらの材料を形成する技術として、3D プリンタなどを用いるアディティブマニュファクチャリングや、層構造の積み重ねといった方法が用いられますが、迅速かつ高い空間分解能での製作は困難です。近年では、こういった 3 次元の周期構造の製作に、自発的な現象を活用する方法が大きな関心を集めています。例えば、液体中の微粒子の自己組織化により 3 次元構造を製作するといった方法が報告されています。しかし、そのような構造は分散された相と周囲を覆う相（例えば微粒子とその隙間の液体）の 2 種類の構成要素から成る構造に限定されてきました。

3. 研究内容・成果

本研究グループが今回報告した Fluid–fluid interfacial energy driven 3D structure emergence in a micro-pillar scaffold (FLUID3EAMS) と名付けられた現象は、3 次元のマイクロ格子構造中に流体界面が通過する時に、微小液滴が 3 次元かつ周期的に生成・配列されるというものです。格子構造の濡れ性と流体粘性比、毛管数（※1）をもとに実験とシミュレーションを行い、当該現象が生じる条件を明らかにしました。また、この現象の確認に用いられた格子構造は多方向フォトリソグラフィ（※2）を用いて製作されていますが、構造中の格子サイズに応じて、液滴のサイズを 10 μm ~1 mm 程度に調節可能であることが確認されています。さらに、格子の濡れ性などを調節することで、大量の液滴を自動かつ迅速に形成することが可能である事も示唆されています。

この方法を用いることで、単位体積当たり大きな流体界面を有する材料を構築することが可能です。本研究ではその特性を生かし、刺激応答性ゲル（※3）の粒子の 2 次元配列から構成される温度制御可能なソフトアクチュエータ材料を開発し、脂質二分子膜で連結された水滴からなる 3 次元の組織状材料の新たな構築方法を考案することに成功しました。さらに、液滴生成においてせん断力を低減できるという特徴を生かした、ヒト細胞等の高密度なマイクロカプセル化技術を実証し、細胞療法という新たな治療法に活用できる技術としての価値を示しました。

4. 今後の展開

FLUID3EAMS は、微小流体から成る 3 次元構造が自発的に現れるという現象としての新しさ・面白さに加えて、今回実証したソフトアクチュエータや細胞のマイクロカプセル化を初めとする様々な工学的アプリケーションを開拓する可能性を秘めています。今後、サブミクロンスケール（1 mm の 1000 分の 1 以下のスケール）での液滴生成の実験的検証など更なる微小化の追究により、潜在的な応用範囲の拡張が期待されます。例えば、3 次元の周期構造はスマートマテリアルやフォトニック結晶などでも重要な構造であるため、そういった分野における新規材料開発のための新たな技術となることが期待されます。

※本研究は、（独法）日本学術振興会 特別研究員奨励費 16J06211、（公財）住友財団、慶應義塾大学若手研究者育成ものづくり特別事業、博士課程学生研究支援プログラム、the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 675412、the Swedish Childhood Cancer Foundation (grant no. MT2017-0024)、the Wallenberg Academy Fellows Program (grant no. KAW 2015.0178)、the Knut and Alice Wallenberg Foundation (grant no. KAW 2016.0255)などの助成や支援を受けて行われました。

<原論文情報>

タイトル（和訳）：Fluid interfacial energy drives the emergence of three-dimensional periodic structures in micropillar scaffolds（流体界面エネルギーを駆動力とするマイクロ格子構造中での3次元周期構造の出現）

著者名：Hiroki Yasuga, Emre Iseri, Xi Wei, Kerem Kaya, Giacomo Di Dio, Toshihisa Osaki, Koki Kamiya, Polyxeni Nikolakopoulou, Sebastian Buchmann, Johan Sundin, Shervin Bagheri, Shoji Takeuchi, Anna Herland, Norihisa Miki and Wouter van der Wijngaart

掲載誌：Nature Physics (DOI: 10.1038/s41567-021-01204-4)

<用語説明>

※1 毛管数

流体粘性と、異なる流体間の界面張力との比であり、粘性と界面張力の影響を比較する指標となる

※2 多方向フォトリソグラフィ

感光性の物質に対し多方向からパターン露光を行うことで、迅速に3次元格子構造を製作する方法

※3 刺激応答性ゲル

温度などの外部刺激に対し、物理的特性が大きく変わるゲル

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 教授 三木 則尚（みき のりひさ）

TEL：045-563-1141 FAX：045-566-1495 E-mail：miki@mech.keio.ac.jp

・本リリースの配信元

慶應義塾広報室（澤野）

TEL：03-5427-1541 FAX：03-5441-7640

Email：m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>

（地独）神奈川県立産業技術総合研究所

研究開発部 小林・雨森

TEL：044-819-2031 TEL：044-819-2026

E-mail：sks@newkast.or.jp <https://www.kistec.jp/>