

2017年8月23日

報道関係各位

明星大学 学長室広報課
東京都日野市程久保 2-1-1
TEL: 042-591-5670

解禁日時：2017年8月24日（木）18時（日本時間）

「水面で自発的に運動する」イオンゲルの新機能を発見
～自己推進型材料の新たな選択肢～

【概要】

学校法人明星学苑明星大学（東京都日野市）は、日本電信電話株式会社との共同研究において、水面で強力かつ持続性の高い自己推進力を発現する人工材料を発見し、その動作機構を明らかにしました。この材料はわずかな気液界面があるだけで持続性のある駆動力を産み出すことから、マイクロモータやソフトロボティクスへの応用が期待されます。また、併せて非線形運動を示すことから、アクティブマター^(注1)の研究対象としても期待される材料です。

本研究の人工材料はイオン液体^(注2)と高分子とからなる高分子ゲル^(注3)（以下「イオンゲル」という）です。イオンゲルを水面におくと、化学エネルギーを運動エネルギーに変換し、強力な持続性の高い運動を生じることを見出しました。運動はイオンゲルからイオン液体が水面に溶出することによる水の表面張力の差異により駆動されますが（マランゴニ効果^(注4)）、運動を持続するために必要なイオン液体の除去に新しい機構があることを提案しました。この機構を実証する過程で、自己推進型イオンゲルが運動の自由度が制限された狭小な気液界面においても持続性の高い運動を発現することを、世界で初めて観察しました。気液界面と自己推進型イオンゲルの形状をデザインすることにより、回転運動や往復運動を発現できることを明らかにしました。

本研究の成果は、従来知られた自己推進型材料にイオンゲルという新たな物質群を加えることを意味します。イオンゲルを構成するイオン液体と高分子の組合せは多岐にわたるため、多様な自己推進型材料の開発につながります。

この成果は、英国科学誌 Scientific Reports に2017年8月24日（木）午前10時（英国時間）に掲載されます。

【研究者】 古川 一暁（理工学部 総合理工学科 物理学系 教授）

【論文情報】 雑誌： Scientific Reports

題目： Self-propelled ion gel at air-water interface

著者： Kazuaki Furukawa¹, Tetsuhiko Teshima², Yuko Ueno²

所属： ¹明星大学理工学部、²NTT 物性科学基礎研究所

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-09351-6>

DOI: 10.1038/s41598-017-09351-6

【研究体制】

本研究は、学校法人明星学苑明星大学と日本電信電話株式会社との共同研究により実施しました。

【研究背景】

非生物でありながら自発的に運動を生じる人工材料を目の当たりにすると、しばしばその現象に見入ってしまうと同時にどうして動くのかという疑問を抱きます。外部からのエネルギー供給なしに運動を生じさせるために、そのような材料の内部には運動を発現する仕組みが組み込まれています。多くの場合、それは化学エネルギーを力学エネルギーに変換する仕組みであり、生物がエネルギーを生み出す仕組みと類似した方式です。現代社会で利用する動力の多くは熱機関で生産されますが、その効率は熱源の温度差で決まり限界があります。化学エネルギーを直接運動エネルギーに変換する過程はほぼ等温で進行し、その変換効率は極めて高いものとなります。

自発的に運動を生じる自己推進型材料は、近年ではアクティブマターと呼ばれ、物理学・生物学・化学の学問領域を超えて興味を持たれる研究対象になっています。これまでに報告された自己推進型材料には、液滴や微粒子、ゲルがあります。特にゲルは成型加工性に優れる特徴を有し、ソフトアクチュエータやソフトロボティクスへの応用が期待されています。より強力でより持続性のある運動を発現する材料の開発や、回転運動や往復運動を制御して誘起する方式の開発は、当該研究分野での重要な課題になっていました。

本研究で用いたイオンゲルは、これまでもリチウム 2 次電池のイオン伝導体や、トランジスタへのゲート電圧印加用材料として利用されてきました。これらの用途では水が不純物として振る舞うため、イオンゲルから水は徹底的に排除されてきました。そのため、水が関与するイオンゲルの特性はこれまで調べられていませんでした。

【研究成果】

本研究の自己推進型イオンゲルは、イオン液体として 1-メチル-3-イミダゾリウム ビストリフルオロメチルスルホニルイミド (EMIM-TFSI)、高分子としてポリ (ビニリデンフルオリド-コ-ヘキサフルオロプロピレン) (P(VDF-co-HFP)) を用いています (図 1)。作製したイオンゲルは厚さ 0.5 mm 程度のやわらかなフィルム状で、これを目的の形にナイフ等で切り出して使用します。

実験では作製したイオンゲルが水面で運動する様子を高速カメラで撮影・解析することにより、運動の特徴を抽出しました。細長い短冊状 (約 $1 \times 15 \times 0.5$ mm) に切り出したイオンゲルは、水面におくと直ちに回転運動を生じました。イオンゲルの両端にあらかじめ描いておいた追尾点の動きを示したものが図 2a です。追尾点の x 座標位置の時間変化はきれいな正弦波を描いており (図 2b)、1 秒間に約 7 回転、ほぼ一定速度の回転運動が生じていることがわかります。追尾点の速度は速い点で 300 mms^{-1} に達し、これは既報の自己推進型材料としては最大の値といえます (図 2c)。

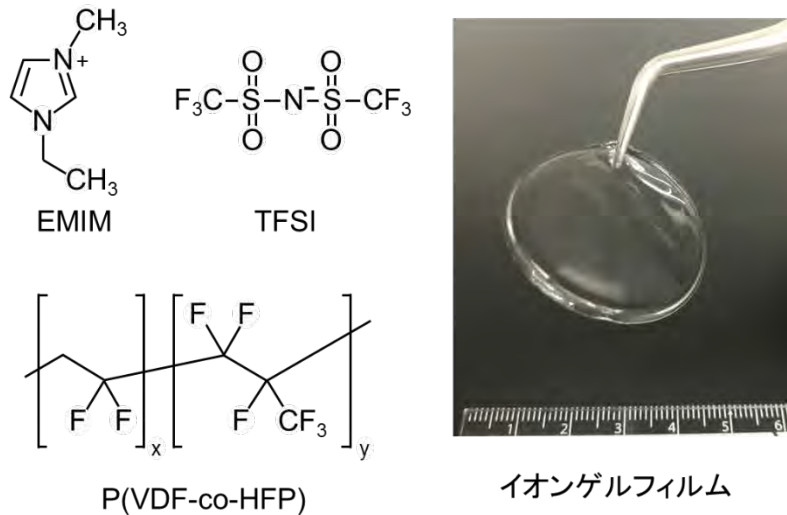


図 1. 自己推進型イオンゲルの材料. イオン液体を構成する EMIM (陽イオン) と TFSI (陰イオン) およびゲルの原料となる高分子 P(VDF-co-HFP). 得られたゲルフィルムの写真を右に示す.

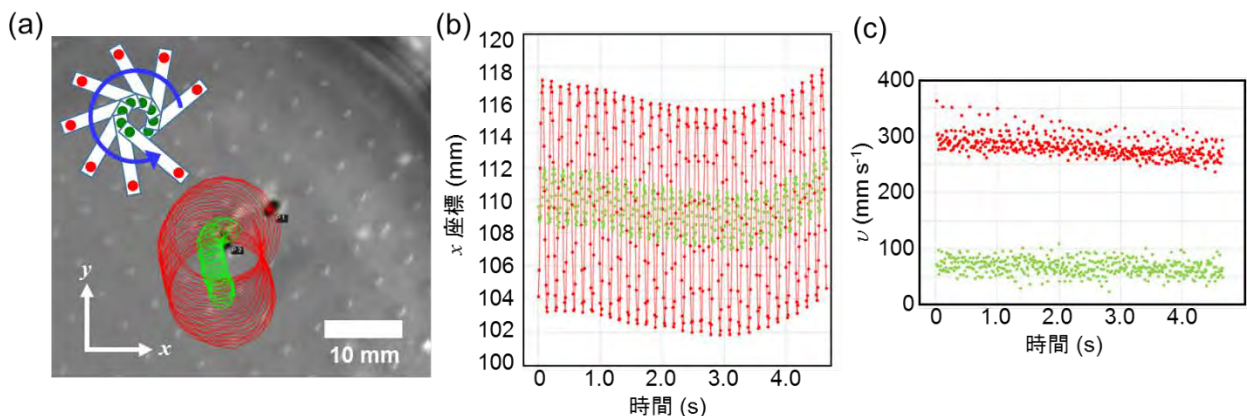


図 2. 自己推進型イオンゲルの水面における運動. (a) 短冊状のイオンゲルが水面で生じる回転運動の軌跡. 挿入図はその模式図で、赤と緑で示した点はイオンゲル上に描いた追尾点である. (b) 2 つの追尾点の x 座標の時間変化. (c) 追尾点の速度 v (mm s^{-1}) の時間変化.

自己推進力の発現機構は、イオンゲルを水に完全に沈めてしまうと運動が生じないことや、水面に界面活性剤を加えると直ちに運動が停止することから、水の表面張力が関与するマランゴニ効果であると考えられます。従来マランゴニ効果はしょうのう船の駆動力発現原理として知られています。このとき、運動が継続するためには、水の表面に溶出した分子が除去される機構が必要です。高い昇華性をもつしょうのうは、昇華により逐次水面から除去されます。イオン液体は蒸気圧が実質ゼロであるため、同様の機構で水の表面のイオン液体が除去されることはありません。私たちはイオン液体が速やかに水中に溶解することで除去される動作機構を提案しました。

この動作機構を実証する実験として、気液界面の面積が極めて小さな場合にも運動が生じることを観察しました。これは自由度の制限された空間での自己推進運動を観測するという点で、物理的な興味の対象ともなります。目的の気液界面は、水滴や水中の気泡を利用して作製することができます。実験の結果、気液界面とイオンゲルの形状を変えることにより、回転運動や往復運動を誘起できることを具体的に示しました（図3）。

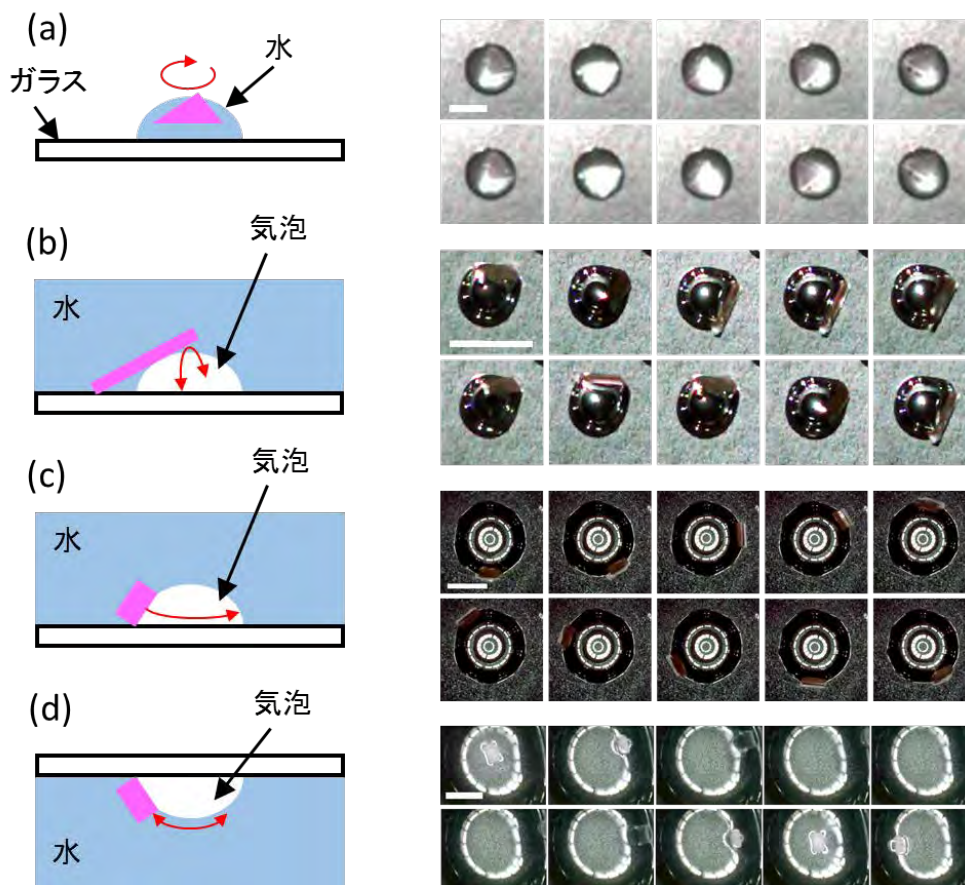


図3. 制限された気液界面上での自己推進型イオンゲルの運動. (a) ガラス上の水滴に三角形に切り出したイオンゲルをおいた場合、回転運動を示した. (b) 水中のガラス上面の気泡に短冊状のイオンゲルをおいた場合、気泡表面をなでるような往復運動を生じた. (c) 水中のガラス上面の気泡に四角形状のイオンゲル小片（正方形の一辺が気泡の周囲長よりも短い）をおいた場合、気泡の周囲を回転する運動が生じた. (d) 水中の気泡のガラス下面に四角形状のイオンゲル小片をおいた場合、気泡の直径方向で往復運動を生じた. スケールバー：5 mm. インターバル：(a) 0.050 s, (b) 0.033 s, (c) 0.064 s, (d) 0.040 s.

自己推進型イオンゲルの運動を長時間観察すると、運動のモードが変化することもわかりました。例えば短冊状のイオンゲルは回転運動を100秒程度継続した後、並進運動に移行し1000秒程度継続した後停止します。しかしながら、この状態から非周期的に突発的な運動を生じることを観察し、運動が完全

に終了していないことを確認しました。時折思い出したように動く様子は、生物様の動きと言えます。これはイオンゲル内部の EMIM-TFSI が P(VDF-co-HFP)の作るネットワーク内を不均一に拡散すること由来します。

イオンゲルを構成する高分子やイオン液体は不揮発性なので、イオンゲルを真空槽に入れ、蒸着法によってパリレン^(注5)の薄膜をコーティングすることができます。パリレンは水を通さないため、コーティングしたイオンゲルを水面においても運動は生じません。しかしながら、コーティングの一部を切断するとそこからイオン液体が溶出できるようになり、自己推進力を示すようになります。また、イオンゲルの強力な自己推進力を用いて、水面において他の構造体を駆動するエンジンとしての動作ができます。実際、プラスチックの構造体を用いて、自己推進型イオンゲルの強力な推進力を方向性のある運動に変換することを実証し、イオンゲルの応用の可能性を具体的に示しました。

【今後の展開】

本研究により、イオンゲルが新規の自己推進型材料として大きな可能性を秘めていることが明らかになりました。今後、種々のイオンゲルの自己推進力を評価し、最高性能を見極めていきます。また運動エネルギーをさらに電気エネルギーや光エネルギーに変換する素子の構築や、マイクロ流体デバイスや生体を含む環境で動作するデバイスへの応用に取り組んでいきます。

【補足事項】

下記の URL にて、関連する動画をご覧ください。

<https://meisei-u.jp/pr17082401>

【お問合せ先】

<研究に関すること>

古川 一暁 (ふるかわ かずあき)

理工学部 総合理工学科 物理学系 教授

TEL: 042-591-7107 FAX: 042-591-7107

e-mail: kazuaki.furukawa@meisei-u.ac.jp

<広報に関すること>

明星大学 学長室広報課 (担当: 上田)

TEL:042-591-5670 FAX:042-591-5678

e-mail: koho@gad.meisei-u.ac.jp

【用語解説】

(注 1) アクティブマター

自発的に運動を生じる仕組みを持った物質。主に化学エネルギーを運動エネルギーに変換する仕組みを有する。人工材料だけでなく、分子モーターや細胞などの生体分子や生命体を含む。

(注2) イオン液体

陽イオンと陰イオンのみからなる塩で、常温付近において液体のものを指す。蒸気圧が低い、難燃性、化学反応性および昇華性に乏しいといった特徴を有する、安定な物質。

(注3) 高分子ゲル

高分子が架橋されることで三次元的な網目構造を形成し、その内部に溶媒を含んだゲル。

(注4) マランゴニ効果

濃度や温度の差異によって液体の表面張力が局所的に変化して不均一になることにより、液体の運動に変化が生じる現象。表面張力が小さいほうから大きい方へ流体が力を受ける。

(注5) パリレン

パラキシリレン系の高分子で、真空蒸着装置内に置かれた物質の表面で重合して作製される。水や化学物質に対するバリア性に優れるコーティング材料である。