



## 光で駆動する人工分子モーターを創出 —分子の自己組織化で生きているかのような状態を創り出す—

### 研究成果のポイント

- ・ 光を当てると、肉眼でも分かるような大きな運動を一定の速さで繰り返し続ける分子集合体を創出。
- ・ 「化学反応」と「集合体の構造の変化」が連携することで、自律的・永続的な運動が実現。
- ・ 生命の本質的特徴を取り入れた物質輸送など、多彩な機能を実現する物質科学の発展へ期待。

### 研究成果の概要

北海道大学大学院理学研究院の景山義之助教及び大学院生の池上智則氏は、光を照射し続けると顕微鏡で見える大きさの運動を自発的に繰り返す分子集合体を、世界で初めて創出しました。これは、エネルギーが供給されれば、自律的に運動し続ける「分子モーター<sup>(注1)</sup>」を創り出す研究において、画期的な成果です。通常物質は、化学反応によって安定なものへと変化し、そこで変化するのをやめます。これに対し、この物質は安定なものにならず、光を受ける間、常に化学反応を行い、運動を繰り返します。生きているかのようなこの現象は、「散逸的<sup>(注2)</sup>な時空間自己組織化<sup>(注3)</sup>」と呼ばれ、栄養を摂取し続ける限り生き続ける生命現象と本質的な類似性を有しています(図1)。

### 論文発表の概要

研究論文名: Dissipative and Autonomous Square-Wave Self-Oscillation of a Macroscopic Hybrid Self-Assembly under Continuous Light Irradiation (定常光照射下で発現する巨視的複合分子集合体の散逸的かつ自律的な矩形波自励振動運動)

著者: 池上智則(北海道大学大学院総合化学院), 景山義之(北海道大学大学院理学研究院・JST さきがけ), 小原一馬(北海道大学大学院総合化学院), 武田 定(北海道大学大学院理学研究院)

公表雑誌: Angewandte Chemie, Angewandte Chemie International Edition

DOI: 10.1002/anie.201600218

公表日: ドイツ時間 2016年5月19日(木) (オンライン公開)

## 研究成果の概説

### (研究の背景と経緯)

分子の大きさは、ナノ（ミリの百万分の1）メートルのスケールです。その小さな分子の構造を変化させることで、より大きな物体を動かしたり輸送したりすることができる「分子モーター」の開発が、医療等への応用を見据え活発となっています。

日常生活で用いられているモーター（原動機）では、機械や電気仕掛けの「ラチェット構造」を用いることで、決められた回転方向の動きを創り出しています。また、生体内においては、化学反応とたんぱく質の構造変化が噛み合った動的な「ラチェット機構<sup>(注4)</sup>」により、恒常的に、摂取したエネルギーを運動に変えています。

一方、分子の大きさはとても小さいため、その構造変化を用いて、肉眼でも見えるような大きさの物質を動かすことや、その運動方向を人工的に制御することは、簡単なことではありません。また、化学反応は一般的に定常状態（平衡状態）で見かけ上停止するので、物質の運動を自律的に繰り返させることは困難です。動的なラチェット機構を取り入れることで、今回初めて、肉眼で判別できる大きさの運動を繰り返す分子モーターの創出に成功しました。

### (研究の内容)

本研究では、化学反応としてアゾベンゼン誘導体（図2中の分子1）の光異性化反応<sup>(注5)</sup>を、運動する物質としてこの分子1とオレイン酸（図2中の分子2）の混合分子集合体を、それぞれ用いました。この物質に青色光を定常的に照射すると、一定のリズムと振幅で自発的に振動運動を繰り返しました（図3a）。また、照射する光の強さに比例してそのリズム運動のテンポが変わりました。これは、この物質が、外部から供給される光のエネルギーを、力学的な運動に変換する「モーター」として機能していることを示しています。

分子1は、トランス体とシス体の二つの異性体を有し、青色光によって、トランス体はシス体に、シス体はトランス体にそれぞれ変化（光異性化）することが知られています（図2）。また、用いた物質では、分子1のシス体及びトランス体の存在比によって、その安定形状を変えます。平板状のものを「形状A」、屈曲状のものを「形状B」とすると（図3b）、形状AとBの間には、その安定性の違いから、それぞれへの変化を妨げるようなエネルギーの障壁が存在します（図3c）。また、それぞれの形状で、分子1と2の並び方が異なっているため、分子1の光異性化反応の起こりやすさが異なります。この分子集合体では、形状A（初期形状）ではトランス体からシス体への変化が、形状Bではシス体からトランス体への変化が、それぞれ進行しやすい性質があります（図3b）。これらの性質を動的なラチェット機構として用いることで、本研究で開発した物質は、形状Aと形状Bの間を繰り返し運動しました。つまり、集合体中での双方向の化学反応とそれに伴う形状変化とが、定常的な光照射の下で互いに連動し、繰り返されることで、肉眼でも分かるような大きさの、自発的な力学運動を発現したのです。さらに、振動運動の結果、集合体が水中で泳ぐような挙動も観察されました。

### (今後の展開)

これまでは、外部からのエネルギーにより持続的に決まった運動をするような分子モーターを開発する上で、ラチェット機構が働いた自己組織化、いわば自律的に動きを生み出すような物質を創出することが一番の難題でした。本研究がそれを実現したことで、分子モーターの研究開発はさらに飛躍すると考えられます。また、この仕組みを解明することで、分子の機能で物質輸送を実現するような

分子技術の確立が期待されます。

なお、本研究で実現した「外界からエネルギーを受け、永続的な時空間パターンを形成する自己組織化現象」は、生物における恒常性、生体リズムの発現など、生命活動の根幹をなす現象と関連します。自己組織化が関与する幅広い学術研究が、本研究から派生すると期待されます。

本成果は、JST 戦略的創造研究推進事業個人型研究（さきがけ）「分子技術と新機能創出」研究領域（研究総括：加藤隆史 東京大学教授）における研究課題「ヘテロ集積分子集合体の方向性をもった遊泳」（研究代表者：景山義之 研究期間：平成 25 年 10 月～平成 29 年 3 月）によって得られました。

## お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院化学部門 助教 景山 義之（かげやま よしゆき）

TEL：011-706-3532 FAX：011-706-4841 E-mail：y.kageyama@mail.sci.hokudai.ac.jp

ホームページ：<http://wwwchem.sci.hokudai.ac.jp/~ekitai/>

ホームページ：<http://www.sci.hokudai.ac.jp/~y.kageyama/public/>

## <用語解説>

### 注 1) 分子モーター

分子によって、光エネルギー・化学エネルギーなどを、力学的なエネルギーに変換するデバイスのこと。生体内では、ミオシンをはじめとする、アデノシン三リン酸（ATP）駆動型の分子モーターが機能している。我々の筋肉の運動も、細胞分裂も、これらの分子モーターの作動の結果である。

### 注 2) 散逸的

外界からエネルギーを受けた系が、エネルギーを蓄えずに消費する様相のこと。エネルギーを消費する際、系は何らかの仕事を外に行うことができ、しかも系自身は元の状態を保つことができるため、何度でも同じ仕事を繰り返すことができる。

### 注 3) 時空間自己組織化

分子が「平衡から遠く離れた状態」で、時間的秩序（リズム）と空間的秩序（パターン）を形成する現象のこと。ここでは特に、「散逸的な」秩序形成に対してこの言葉を用いている。なお、生きている状態とは、散逸的な自己組織化が行われている状態である。

### 注 4) ラチェット機構

分子に方向性を有した運動を発現させる制動機構のこと。方向性を持たないエネルギーにより、分子や物体に方向性のある運動を行わせる仕組みとして注目されている。また、時間と共にラチェット構造が変化するものを、ここでは「動的なラチェット機構」と表した。

### 注 5) 光異性化反応

分子が光を吸収した結果、「構造異性体」になる化学反応のこと。可逆的な光異性化反応を示す分子として、アゾベンゼンなどが知られている。この光異性化前後で、色、形、極性などが変化することを利用した、様々な光応答型機能性材料が知られている。

<参考図>

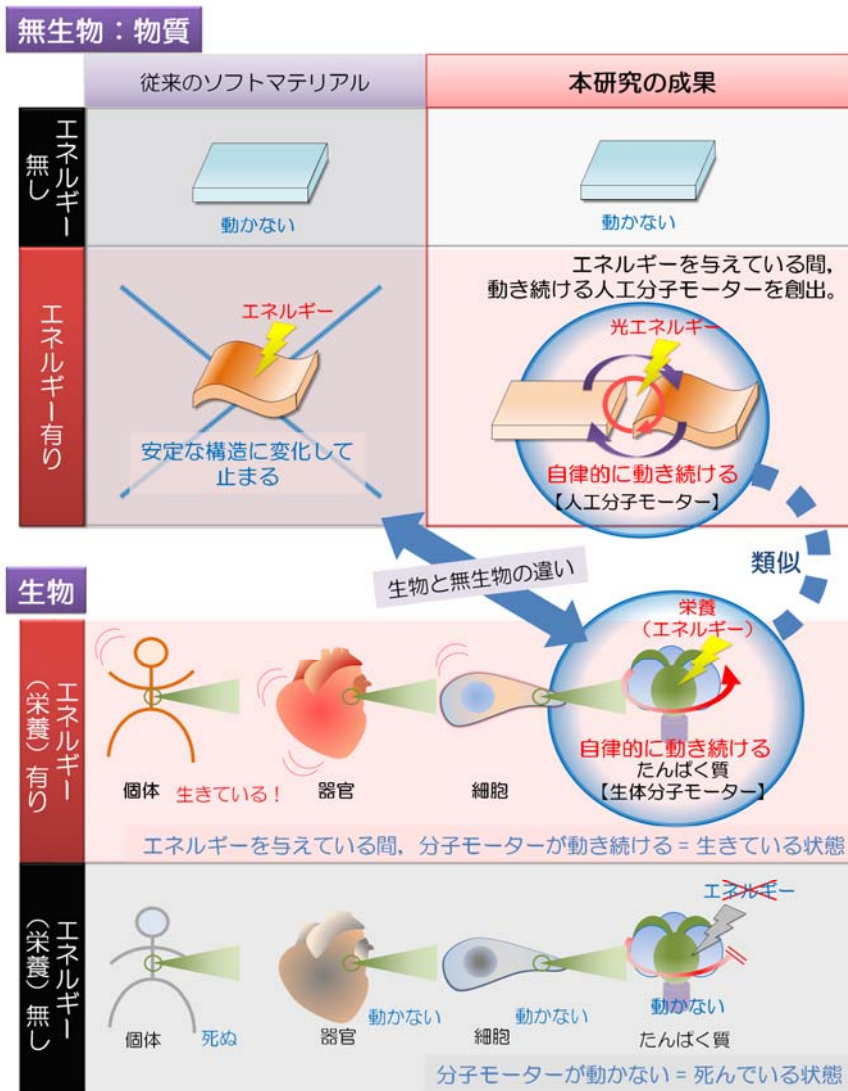


図 1. 生命の特徴をもった「人工分子モーター」

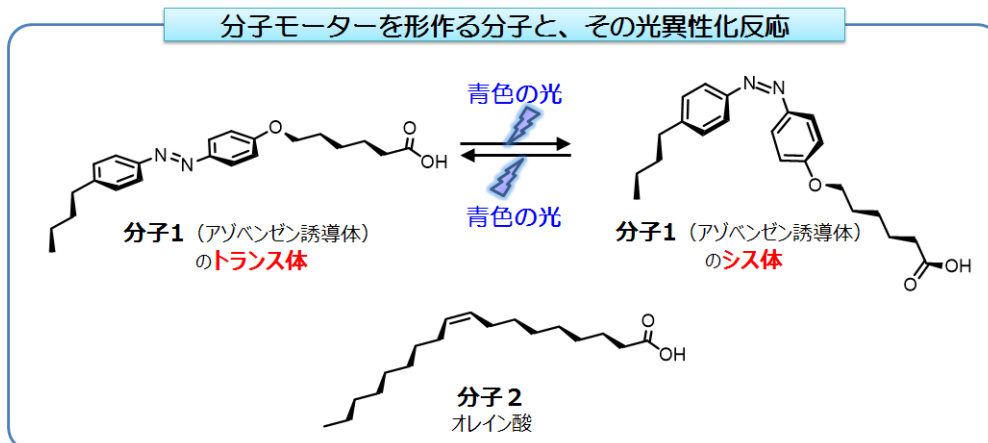


図 2. 研究に用いた分子 1 及び 2 と、分子 1 の青色光照射下での可逆なトランス・シス光異性化反応  
 青色光を吸収することで、アゾベンゼン誘導体 (分子 1) はトランス体からシス体への化学反応と、シス体からトランス体への化学反応を繰り返す。溶液中では、化学反応速度が釣り合ったときに、これらの反応は見かけ上停止する。

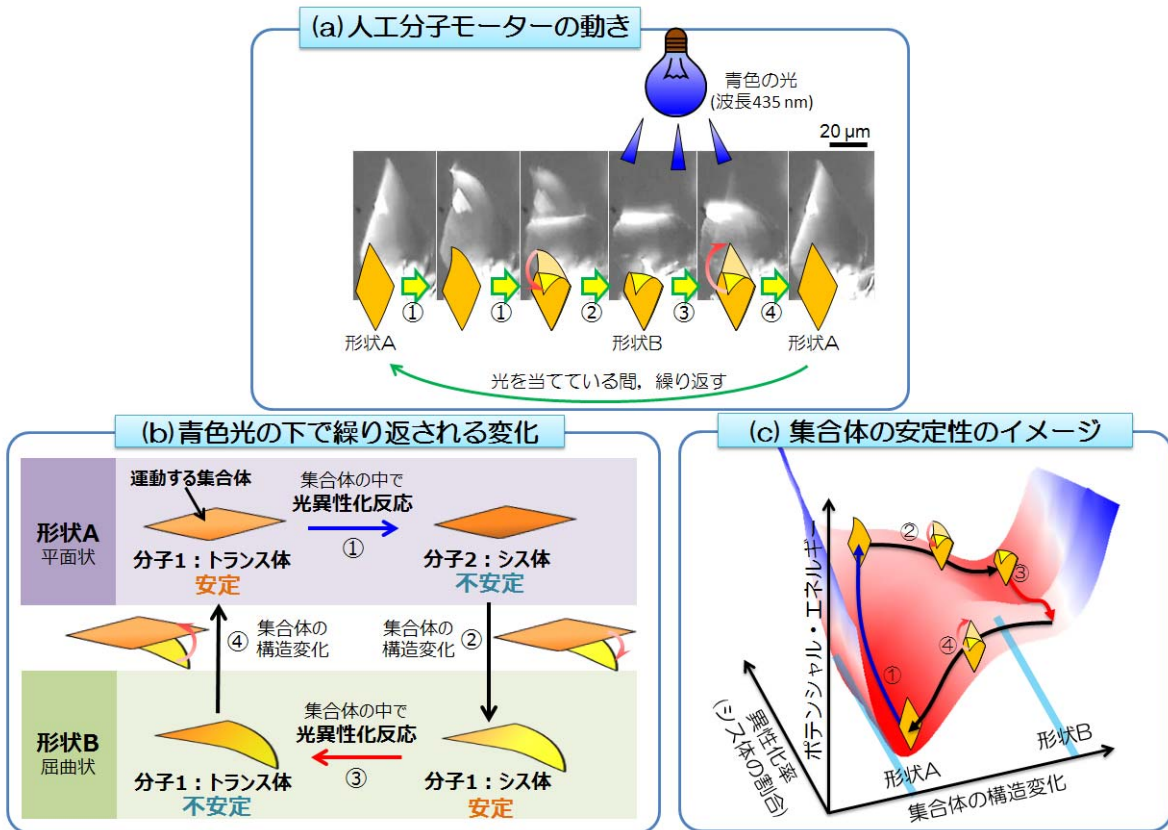


図 3. (a) 青色光を当てることで屈曲を繰り返す物質の顕微鏡写真 (b) 光異性化と集合体形状の変化が周期的に起こる機構の模式図 (c) 分子 1 のシス体・トランス体の組成比（異性化率）と、形状 A と形状 B の安定性との関係の模式図

形状 A の集合体の中では、分子 1 の光異性化反応の結果、シス体の割合が増える (①)。シス体の割合が増えると元の集合体は不安定化し、より安定な構造である形状 B に変化する (②)。形状 B の集合体中では、逆に、分子 1 の光異性化反応の結果、シス体の割合が減る (③)。シス体の割合が減ることによって形状 B の集合体は不安定化し、安定な元の構造である形状 A に戻る (④)。多くの化学反応は、「見かけ上停止する」という性質を有しているが、本研究においては繰り返し性の運動を発現している。その鍵は、①→②→③→④→①の一方向周りの順番で変化が進む、あたかもラチェット・レンチのような一方向にしか回らない機構が働いているからである。(動画は、当該論文のオンライン版から閲覧可能。)