

偏光で振り付けを変えて踊る分子ロボットを実現

～分子モーターと分子センサーの連携で多様な運動を可能に～

ポイント

- ・ 偏光情報を感知して運動様式を変えられる数十 μm サイズの光駆動自律分子ロボットを実現。
- ・ 分子モーターと分子センサーの連携によって多様な運動が可能。
- ・ 情報演算機能のような分子モーターが実現する高度な分子機能などへの発展に期待。

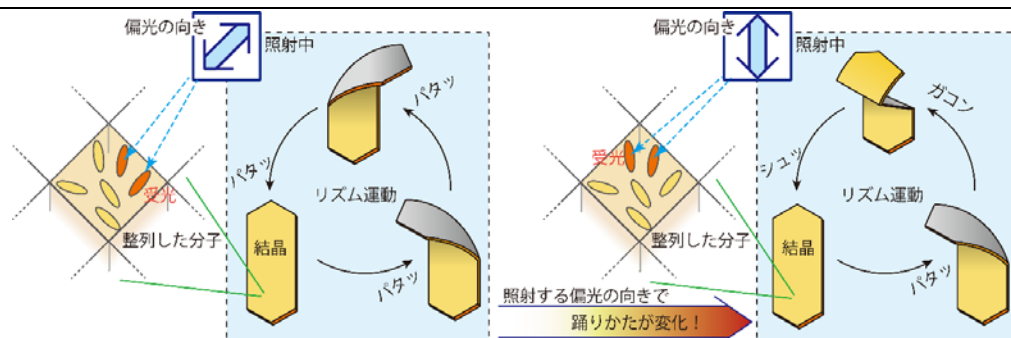
概要

北海道大学大学院理学研究院の景山義之助教らの研究グループは、光照射下で継続的に分子構造を変換する「アゾベンゼン」という分子の結晶の運動が、受ける光の特性によって大きく変わることを明らかにしました。

2016年のノーベル化学賞は、「分子マシンの設計と合成」に対して与えられました。分子マシンの一つに、与えられたエネルギーを力学的な運動に変換させることが期待される分子モーター^{*1}があります。しかし、合成化学的に得た分子モーターで何かを永続的に駆動させることは未だに難しく、分子モーターが私達の社会にどのような貢献をするのかは、未知数と言わざるを得ません。

研究グループは、光をエネルギー源として自律^{*2}的にリズム運動（反復運動）する小さな結晶について研究を行っています。本研究では、まず、アゾベンゼン分子の結晶の中での分子の並び方を明らかにしました。結晶の中では、それぞれ異なる方向を向いた六個のアゾベンゼン分子が一組を形成し、その組が整列していました。さらに、エネルギー源である光に偏光を用いることで、結晶の反復運動が多様に変化することを見いだしました。この運動を解析した結果、結晶中の六個のアゾベンゼンには、周期運動の動力源になる「分子モーター」として機能するものと、偏光^{*3}の向きを感知し折れ曲がる向きを調整する「分子センサー」として機能するものがあることを明らかにしました。この成果は、踊る（リズムカルに動く）という動作を可能にする分子モーターと、偏光を感知して“振り付け”をアレンジする分子センサーとの“分業協力体制”で、多彩な踊りをみせる化学的な小さなロボットを世界で初めて実現した研究になります。今後、感知の次段階として、複数の情報を感知しその情報を演算して自分の動きを決定する「情報演算型自律運動材料」の実現が期待されます。

なお、本研究成果は、2020年3月19日（木）公開の *Chemistry – A European Journal* 誌に掲載されました。



偏光で振り付けを変えて踊る結晶の概念図

【背景】

2016年のノーベル化学賞は、「分子マシンの設計と合成」に対して与えられました。分子マシンの一つに、エネルギーを与えると決まった方向に動き続ける分子モーターがあります。モーターの語彙は「何かを動かすもの」であるものの、化学的に合成した小さな分子モーターで、実際に何かを動かし続けることは、複合的な要因で極めて難しいことが知られています。一方で、この難題を解決すれば、分子モーターを実社会の中で役立てられるようになり、物質社会に根本的な変革が訪れると期待されています。

研究グループは、2016年に光照射下で自律的に反復運動を続ける結晶を世界で初めて報告しました（資料1）。自律とは、結晶が自ら運動を継続することを意味します。この結晶は、アゾベンゼンという光照射下で繰り返し形状を変える分子（図1）と、オレイン酸という天然由来の分子の混合物できていました。アゾベンゼン分子の継続的な形状変化と、結晶の構造変化が連携することで、結晶の明確な周期運動が可能になっています。

【研究手法】

本研究では、まず化学的に合成して得た分子（アゾベンゼン）だけで作った結晶で、反復運動を続けさせることに成功しました。次に、その結晶のX線構造解析に成功しました。結晶の中では、全てのアゾベンゼン分子が同じ方向を向いているわけではなく、異なる方向を向いた六個の分子が一つのユニットを作り、そのユニットが整列していることがわかりました（図2）。また、結晶の中には、「すき間が大きく分子が動きやすいところ」と「すき間が小さく分子が動きにくいところ」がミルフィーユ状に並んだ柔らかい構造を形成していることもわかりました。

これらの実験結果を踏まえて、照射する光を偏光にした時の結晶の自律運動様式を観察しました。偏光ではない時は、六通りの方向を向いたアゾベンゼン分子のいずれもが光を受けることができますが、偏光を用いた時には、偏光の方向と合致する方向を向いたアゾベンゼン分子だけが光を受けることができます。観察してみると、偏光の向きによって反復運動の様式が大きく変わりました（図3・表1・資料2）。どのアゾベンゼン分子が光を受け取るかによって、結晶の運動が大きく変わることを示しています。

【研究成果】

この実験結果は、異なる方向を向いた六個の分子が、各々独自の役割を担っていることを示しています。少なくとも一個の分子はモーターとして結晶の自律運動を誘起し、残りの分子は光の波の向きを感知するセンサーとなって結晶の運動様式を調整しています。私たちの身の回りにはロボットは、それを動かすモーターと、動きを機能的にするセンサーとを、人間の手によって搭載することで製造されています。一方、この研究では、結晶成長という自発的な組み立て過程^{*4}によって、ナノメートルの大きさの分子モーターと分子センサーを実装した小さなデバイスを創ることに成功しています。人間の手では組み立てられないくらい小さな自律ロボットを人工分子で創り、状況に応じた振る舞いを発現させた研究として、この成果は画期的なものです。

【今後への期待】

生命は、分子が集積してできたものであり、生体分子モーターによって恒常的に動く（生きる）ことができます。人工的にも、分子モーターで何かを自在に動かせるようになれば、生命と同様、歩いたり、泳いだり、ものを運搬したり、考えたり、情報伝達したり、学習したり、繁殖したりするような

小さなデバイスを創り出せるようになると期待されます。本研究では、偏光を感知して動き方(踊り方)を変える自律運動を実現しました。感知の次段階として、複数の情報を感知し、その情報を演算して自分の動きを決定する「情報演算型自律運動材料」の実現が期待されます。

(資料 1) T. Ikegami, Y. Kageyama, K. Obara, S. Takeda, *Angewandte Chemie International Edition*, **55**, 8239-8243 (2016). 北海道大学学術成果コレクション HUSCAP からダウンロード可能 (<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/72714>)。 (該当文献のプレスリリース資料: https://wwwchem.sci.hokudai.ac.jp/wp/wp-content/uploads/2016/08/160520_sci_pr.pdf)

(資料 2) 発表論文に添付した動画(Movie S5)を参照。<https://dx.doi.org/10.1002/chem.202000701> の Supporting Information から無料でダウンロード可能。

論文情報

論文名	Light-driven flipping of azobenzene assemblies — sparse crystal structures and responsive behaviour to polarized light (光で駆動されるアゾベンゼン分子集合体の反復運動 — 空隙のある結晶構造と偏光に応答した運動)
著者名	景山義之 ¹ , 池上智則 ² , 里永慎之介 ² , 小原一馬 ² , 佐藤寛泰 ³ , 武田 定 ¹ (¹ 北海道大学大学院理学研究院, ² 北海道大学大学院総合化学院, ³ 株式会社リガク)
雑誌名	<i>Chemistry – A European Journal</i> (欧州各国の化学会が共同出版する総合化学誌)
DOI	10.1002/chem.202000701
公表日	2020年3月19日(木)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 助教 景山義之(かげやまよしゆき)

T E L 011-706-3532 F A X 011-706-4841 メール y.kageyama@sci.hokudai.ac.jp

U R L <https://www.sci.hokudai.ac.jp/~y.kageyama/public/>

配信元

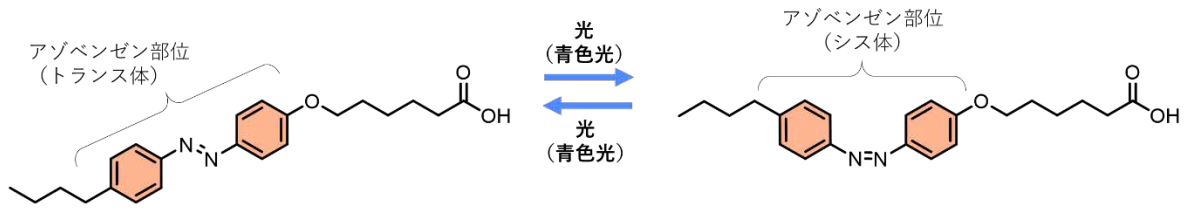
北海道大学総務企画部広報課(〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール kouhou@jimuhokudai.ac.jp

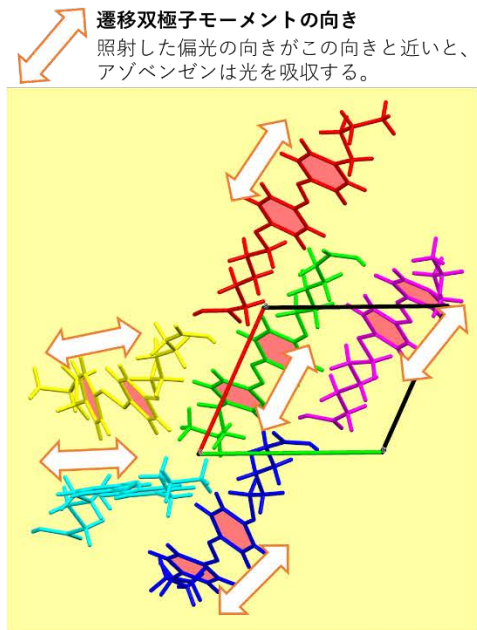
【用語解説】

- *1 分子モーター … エネルギーを受けると決まった方向に動き続けることができる分子の総称。化学エネルギーや光エネルギーなどを力学系のエネルギー(例:運動エネルギー)に変換する。生体の中にも分子モーターが存在し、そのエネルギー変換過程によって生命活動が維持されている。
- *2 自律 … 自己が有する規律に従って行動すること。自律運動とは、外部からの制御が無くても継続可能な運動を指す(運動をするためにはエネルギーが必要なので、外部からのエネルギーの供給は必要である)。生物は基本的に自律運動するものと考えられるが、分子を集めることで化学的につくった材料は、外部からの仕事を受けて変形することは多々あっても、多くの場合、自律運動はしない。ただし、自己組織化(self-organization)という現象が介在したときには、自律運動をできる。この研究では、定常光照射下(強度が一定の光を照射している環境)で継続する自律運動を対象にしている。
- *3 偏光 … 波の向きが揃った光のこと。光は波としての性質を持つ。
- *4 自発的な組み立て過程 … 分子が集まって特徴的な集合構造をつくる過程。ナノメートルの世界で複雑な高次構造を実現する手法として広く利用されている。自己集積(self-assembly)や自己集合(self-aggregation),あるいは自己会合(self-association)ともいう。

【参考図】



(図1) 実験に用いた分子の構造式と、光照射下で進行する可逆な構造変換 (光異性化)



(図2) 結晶中でのアゾベンゼン分子の集積構造
黄色・水色・赤色・緑色・青色・桃色で示した結晶学的に異なる六個のアゾベンゼンが存在。平行四辺形は結晶の単位格子の軸を示す。

(表1) 照射した偏光の向きと、観察された周期運動との関係

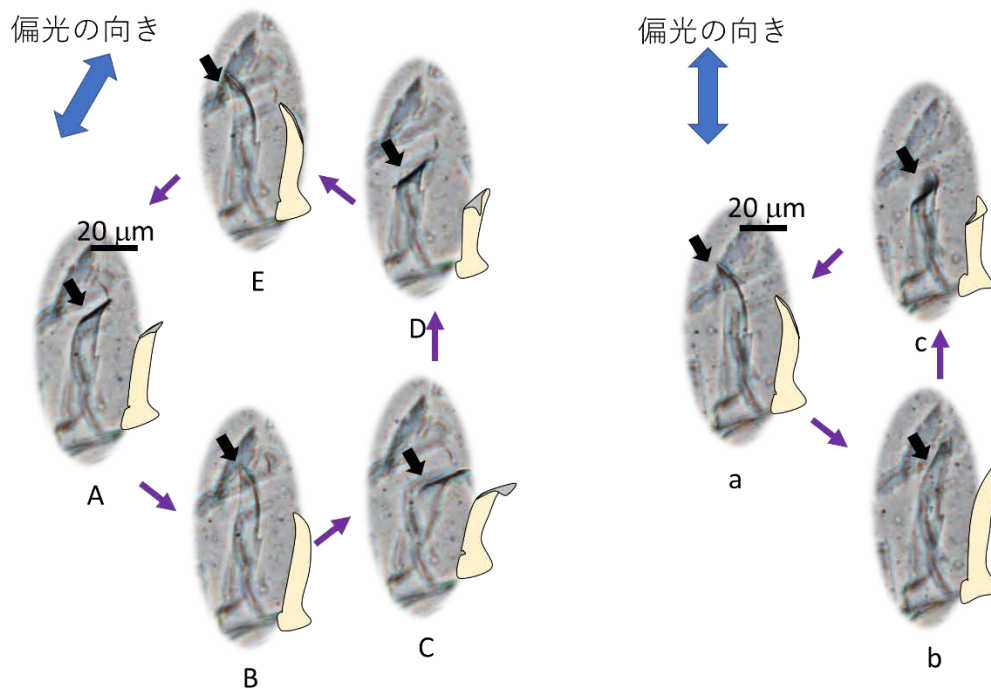
照射した偏光の向き	受光する分子	周期運動 (リズム運動)
	水色・黄色	しない
	水色・黄色 青色・桃色	する
	青色・桃色 赤色・緑色	する
	赤色・緑色	しない

実際の結果例 (資料2の動画)

偏光の向き (角度) によって、周期運動の振り舞い方が変化
偏光の向き (角度) によって各分子の光の吸収効率が異なる

青色や桃色の分子：
結晶の周期運動を実現する「分子モーター」として振る舞う。
(両方ともか、片方だけかは、決定できていない。)

その他の色の分子：
偏光を受けて運動の様式を調整する「分子センサー」として振る舞う。



(図3) 結晶が踊る様子 (顕微鏡写真) 偏光の方向によって、異なる踊り方で運動を繰り返す。