

同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配布）
文部科学記者会（資料配布）
科学記者会（資料配布）
京都大学記者クラブ（資料配布）



人工分子モーターの回転方向制御を超分子で実現

～柔軟に動作するナノマシン大量生産への道を拓く～

国立研究開発法人 物質・材料研究機構
国立大学法人 京 都 大 学

概要

1. 国立研究開発法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)の内橋隆 MANA 研究者、ジョナサン・ヒル MANA 研究者、中山 知信 ユニット長、クリスチャン・ヨアヒム MANA 主任研究者（フランス CEMES/CNRS グループリーダー兼任）らのグループと、国立大学法人京都大学化学研究所の 小野 輝男 教授らからなる研究チームは、金属基板の上で超分子¹を用いた分子モーター²を作製し、超分子を構成する分子同士の結合を組み替えることで、モーターを逆回転させるという柔軟な動作を実現しました。

2. 分子モーターは生物の生命活動を維持するために欠かせないナノマシン³の一種であり、ナノマシンによって構成された機械的システムを、生物の体内と同じように自己組織化⁴の手法を用いて作製することは、ナノテクノロジーが掲げる夢の一つです。これまで、基板表面上で有機分子を使った分子モーターが作られてきましたが、モーターの回転方向を切り替えることができないという大きな問題がありました。これはモーターを構成する分子同士が強い力によって結合されているため、構造上、柔軟性に乏しいことが原因でした。

3. 今回、研究チームは、超分子を用いることで柔軟な構造をもつ分子モーターを作製し、モーターの回転方向を切り替えることに初めて成功しました。超分子は、構成単位となる複数の分子が、共有結合より弱い水素結合などの力によって結びついてできた複雑な構造をもつ分子です。超分子で作製された分子モーターは、分子内に注入された電流によって一方向に回転します。さらに、ある条件下で電流を流すことで、モーターの部位を組み替え、これにより回転方向を反転させることに成功しました。組み替えができたのは、超分子内の分子同士が、強過ぎずまた弱過ぎもしない適切な大きさの力によって結びつけられているためです。また、この分子モーターの作製には自己組織化の手法を利用しており、一度に大量に作製することも可能です。

4. 今後はこの成果を利用して、より大規模で高機能のナノマシンの構築を目指します。また、人工分子モーターの動作を調べることで、生体内の天然の分子モーターが動く詳細なメカニズムの解明につながることも期待されます。

5. 本研究は科学研究費助成事業 挑戦的萌芽研究「アインシュタイン・ドハース効果を用いた有機分子モーターの創製」（代表者：内橋隆）の一環として行われました。

6. 本研究成果は、米国化学会発行の Nano Letters 誌に平成 27 年 6 月 22 日に掲載されました。

*実際に分子モーターが逆回転する様子の動画は、下記のアドレスでご覧いただけます。

<http://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acs.nanolett.5b01908>

研究の背景

生物の体の中では、分子モーターと呼ばれる機械的な部品が働いていて、生命活動を維持しています。このような分子モーターは自律的に組織化されて動作していますが、その構造とメカニズムの解明は生命科学の大きな目標の一つです。一方、このような分子モーターを人工的に合成して、ナノスケールの機械的システムを構築することが、この十数年来、ナノテクノロジーにかかわる世界中の研究者達の大きな夢でした。この目標に向かって着実に研究が進められつつあり、すでに化学合成の手法を用いることで、溶液中では多くの分子モーターが作製されてきました。デバイス応用を念頭において、固体基板上で作製した分子モーターもいくつかの研究グループから報告されており、走査トンネル顕微鏡⁵の探針から電流を注入して回転させる実験などが行われています。

しかし、これまではモーターの回転方向を反転させることが難しいといった挙動の柔軟性に大きな問題がありました。これは、これまでに作製された分子モーターでは、モーターを構成する部位が強い結合（共有結合）によって結びつけられており、一度作製してしまうと事実上その構成を組み替えることができないことが原因でした。この問題の解決のためには、分子モーターの部位を、切り離すことができる程度の弱い力でつなげればいはいはずですが、結合力が弱すぎると今度はモーターとして一体の動作をすることができなくなります。よって、適切な大きさの力で各部位を結びつけることが、非常に重要となります。

研究内容と成果

今回、研究チームは、超分子を分子モーターの構成部品に用いることで、この問題を解決することに成功しました。超分子は構成単位となる複数の分子が、共有結合より弱い水素結合などの力によって結びついてできた、より複雑な構造をもつ分子です。また、その結合力は分子を適切に設計することで調整することができます。研究チームはポルフィリンという有機分子に3本の「足」をつけ、さらに結合のための「手」を1つつけることで、2つのポルフィリン分子が結合して超分子を作り、さらに基板上で滑らかに動くように設計しました（図1）。

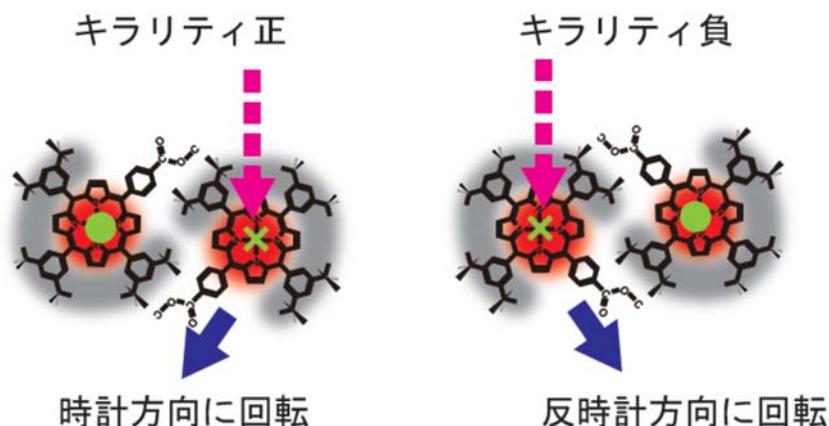


図1 超分子でできた人工分子モーターの模式図。電流を注入することによって、矢印の方向に回転する。回転方向は超分子のキラリティによって決まる。点線矢印は電流注入を、丸印は回転軸の場所を示す。

回転動作のためには軸となる部位も必要ですが、これはポルフィリン分子の中心の金属原子と、基板表面の単原子の突起によって構成されます。走査トンネル顕微鏡を用いて、電流を超分子に注入したところ、超分子は分離することなく全体で回転運動をしました（図2）。回転方向は、超分子の向きを示すキラリティ⁶が正か負かによって、一意的に決まっています（図1、図3のaとb）。さらに、電流を注入する際の電圧を負の値にすると、超分子内で分子同士の結合の組み替えがおこってキラリティが変化しました（図3c）。この結果、超分子の回転方向を反転させることができました。この組み替えと回転方向の反転は、何度でも繰り返すことができます。また、超分子の結合力は強くないので、回転中に時々構造が崩れますが、それでも元の形に復帰して回転を続けることができます。このような柔軟な振る舞いは、生物が自らを修復する性質に非常に良く似ています。

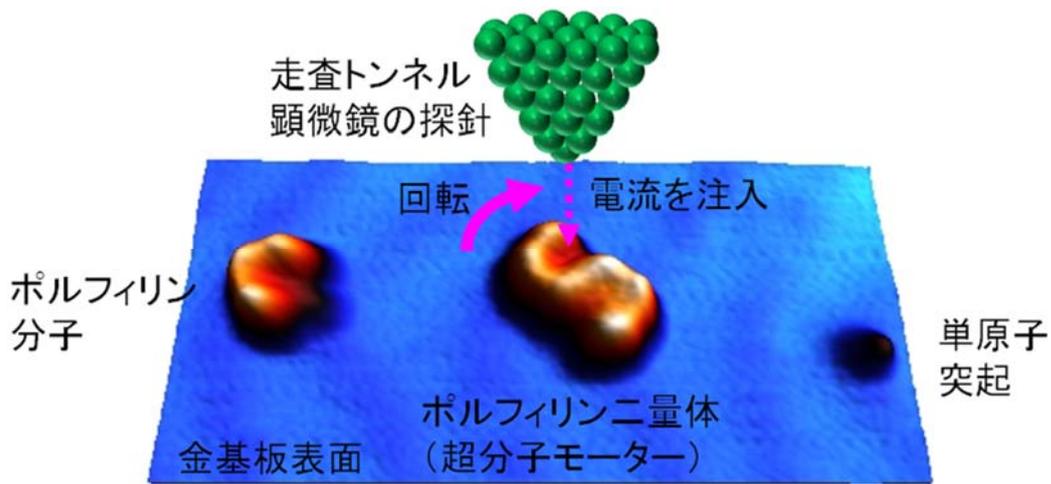
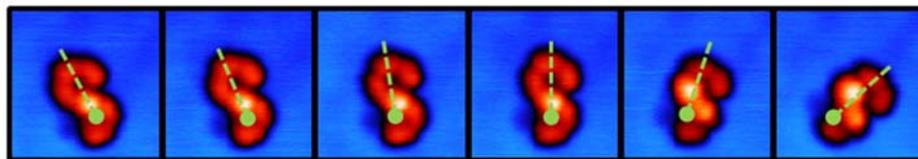
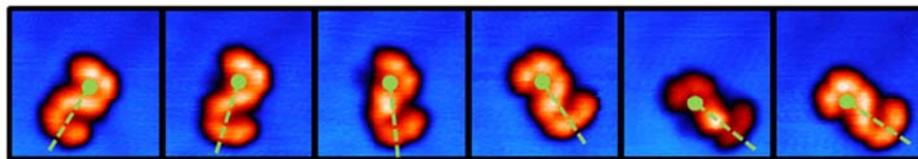


図2 分子モーターが動作する様子を示す概念図。走査トンネル顕微鏡の探針から電流を注入することで、ポルフィリン分子の二量体が矢印の方向に回転する。

(a)キラリティ正：時計方向に回転



(b)キラリティ負：反時計方向に回転



(c)キラリティの反転

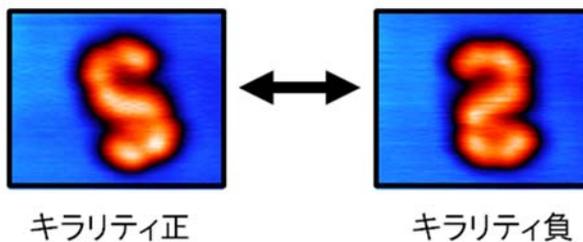


図3 走査トンネル顕微鏡で観察した人工分子モーターの回転の様子。
 (a) ではキラリティが正で、時計方向に回転し、(b) ではキラリティが負で、反時計方向に回転する。(c) は負電圧下の電流注入で、キラリティが正から負に反転した様子を表す。

今後の展開

今後は、さらに複数の超分子を組み合わせて、より複雑で高機能なナノスケールの機械的システムの構築を目指します。今回作製した分子モーターは、自己組織化や自己修復の性質を持つため、周りの刺激に

応じて自らその機能を変化させていくといった、生物のような柔軟なシステムの構築が可能となるかもしれません。また近年、スピントロニクスと機械的システムを融合させる研究が注目されており、実際にスピントロニクスを用いて分子モーターを駆動する原理も考案されています。実験的には拡張は容易であることから、本研究成果はスピントロニクスと機械的システムとの融合研究の先駆けになると考えています。さらに、今回のような有機分子でできた分子モーターは、構造が簡単であり、詳細な動作メカニズムの解明も十分に可能なことから、より複雑な構造を持つ生体内のタンパク質分子モーターの動作メカニズムの解明に貢献することも期待されます。

掲載論文

題目：Current-driven Supramolecular Motor with In-situ Surface Chiral Directionality Switching

著者：Puneet Mishra, Jonathan P. Hill, Saranyan Vijayaraghavan, Wim Van Rossom, Shunsuke Yoshizawa, Maricarmen Grisolia, Jorge Echeverria, Teruo Ono, Katsuhiko Ariga, Tomonobu Nakayama, Christian Joachim, and Takashi Uchihashi

雑誌：Nano Letters (米国化学会発行)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01908>

掲載日時：平成27年6月22日

用語解説

(1) 超分子

通常分子は原子が共有結合で結びついてできているが、複数の分子がより弱い水素結合などの力によって結びついてできた高次の構造をもつ分子を超分子と呼ぶ。脂質の集合体の細胞膜やヘモグロビンなどのタンパク質の集合体も一種の超分子である。

(2) 分子モーター

回転子などの部品が分子によって構成されたモーター。生体内に存在するATP合成酵素が有名で、回転動作を行うことでエネルギーの生成や消費を行い、生命活動の基礎を担っている。より簡単な構造をもつ有機分子からできた人工の分子モーターも、天然の生体分子モーターと同様のメカニズムによって動作すると考えられている。

(3) ナノマシン

モーターや歯車などの機械的部品を、ナノスケールの分子などによって置き換えて実現したもの。ナノテクノロジーの提唱者の一人であるドレクスラーによる著書「創造する機械」での提案などが有名。

(4) 自己組織化

分子などの構成単位が多数集積して、より複雑なシステムを自ら構成する現象を指す。生物の体はDNA、細胞から臓器に至るまで、異なるレベルの自己組織化によって実現されている。

(5) 走査トンネル顕微鏡

先鋭な金属針を探針に用い、試料との間に流れるトンネル電流を検出することで動作する顕微鏡の一種。一般に原子分解能を有し、ナノテクノロジー研究において多用される。

(6) キラリティ

左右の掌のように、並進・回転運動をしても重ね合わせることはできないが、鏡に映す（反転する）ことで重ね合わせができるような空間的な特徴を指す。キラリティは多くの分子で重要であり、同じ構造を持つ分子でも、キラリティが異なると全く異なった化学的・光学的特性を示すことがある。