

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：15501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13676

研究課題名(和文) 光の放射圧を利用した有機分子の回転制御

研究課題名(英文) Molecular manipulation utilizing radiation pressure

研究代表者

川俣 純 (Kawamata, Jun)

山口大学・創成科学研究科・教授

研究者番号：40214689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： 光には物質を動かす力(光の放射圧)がある。本研究では、光により、溶液や液晶、柔粘性結晶中にある分子を運動・回転させられるようにすることを目的とした。

単分子にまで剥離させた無機ナノシートを水中に分散させたコロイドにレーザー光を照射したところ、無機ナノシートをレーザー光の偏光方向に対して平行に配向させることができた。ナノシートに有機分子を吸着させるとよりたやすく配向変化がもたらされ、分極率、屈折率、そして照射した光の波長におけるモル吸収係数が大きい有機分子を吸着させるほど配向を容易に変化させられることもわかった。

研究成果の概要(英文)： A photon carries not only energy but also momentum. When photons collide to an object, momenta of photons change by scattering. At the same time, a force called radiation pressure is applied to the object. By taking advantage of the radiation pressure of a tightly focused laser beam, an object can be trapped selectively at the focal point. In this study, we attempted to apply radiation pressure of a tightly focused laser beam to molecular manipulation.

An exfoliated nanosheet, an inorganic macromolecule, was found to align along the polarization direction of incident laser beam. The radiation pressure induced orientation was obtained even by irradiating a smaller incident power when the nanosheet adsorbed an organic molecule with a large polarizability, refractive index or molar absorption coefficient.

研究分野：機能物性化学

キーワード：放射圧 ナノシート

1. 研究開始当初の背景

光には物質を動かす力(光の放射圧)がある。一般的な光の放射圧は、光の進行方向に作用するため、物質を「押す」。一方、軌道角運動量を持つ光、「光渦」は、気中や液中にある微粒子に照射するだけで、粒子を任意の速さで回転させることができるため、近年注目されている。

申請者は、20年以上の長きにわたり、有機化合物とレーザー光との相互作用について研究を進めてきた。実験の過程で、特定の条件下では有機化合物に無視できない強さの光の放射圧が作用する現場に何度も遭遇してきた。そこで、光の照射条件を最適化すれば、「光渦」の放射圧を利用して、分子の運動を制御できると着想した。

2. 研究の目的

本研究では、光渦により、溶液や液晶、柔軟性結晶中にある分子を協奏的に同一方向に回転させられるようにすることを目的とした。そのために、

- (1) 分子の同一方向への回転運動を感度良く検出する方法の確立
 - (2) 光渦の放射圧を強く受ける分子の設計指針の導出
- に取り組んだ。

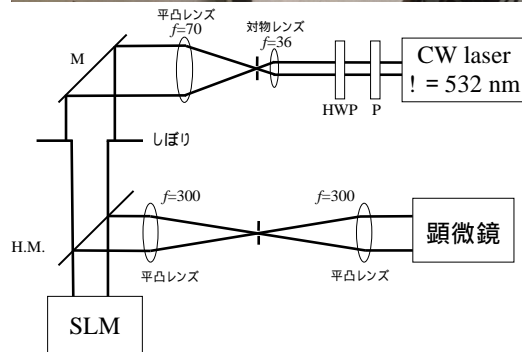
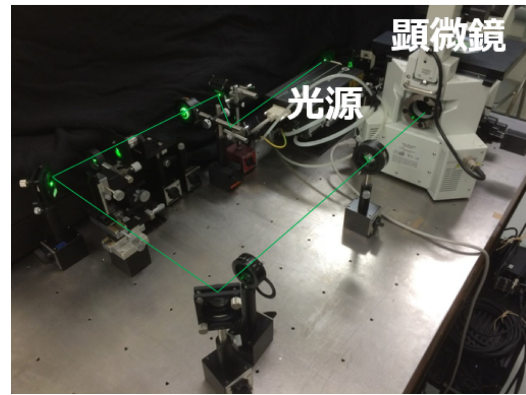
3. 研究の方法

平成 27 年度は、光渦発生装置を製作した。製作した装置を用い、直径 $1\mu\text{m}$ 程度のナノ結晶を顕微鏡下で運動・回転させられるようにした。

平成 28 年度は、光渦と強く相互作用する分子がどのようなものか、知見を集めた。その知見に基づき、溶液中の分子にらせん状の配列を誘起する方法論を確立させるとともに、分子のらせん状の配列を検出するシステムの開発を行った。

4. 研究成果

溶液や液晶、柔軟性結晶中にある分子は等方性であるが、本研究で誘起することを目的している分子の配列には異方性がある。異方性が生じたことを感度良く、確実に検出するための方法として、本研究ではまず、直交ニコル下での偏光顕微鏡観察を選んだ。光渦を照射しながら偏光顕微鏡観察ができるようにするために、市販の蛍光顕微鏡を改造し、励起光を照射するポートから光渦を照射できるようにした。光渦の発生には、空間光位相変調器(SLM)、またはスパイラル位相板の何れも用いられるようにした。また、明視野像でも微粒子の運動をできるだけ明瞭に観察できるようにするために、偏光顕微鏡観察のためのプローブ光には青色光を用い、ビーム径を適切に調整することで、回折限界に近い 500nm の分解能を有するシステムを構築した。開発したシステムの概観、および光学系の概略を図 1 に示す。



HWP: 1/2波長板、P: 偏光子、H.M.: ハーフミラー、M: 平面鏡

図 1 本研究で構築した光渦照射システム。(上)スパイラル位相板を用いた系の装置概観と、(下)空間光位相変調器を用いた場合の光学系の模式図。

この装置を用い、当初計画に沿って有機化合物の微結晶に光渦を照射し、その運動・回転制御を行った。計画段階では、有機化合物の分極率、屈折率、そして照射した光渦の波長におけるモル吸収係数が分子運動の速さを決めるパラメータになると予想していた。しかし実際に実験を行うと、これらのパラメータよりも、微結晶の形状やサイズの違いの方が運動の速さに大きく影響を与えることが明らかとなった。定量性のあるデータを得るためには、形状とサイズの揃った微粒子を得ることが不可欠であるが、有機微結晶により形状とサイズが揃った微粒子を研究期間内に得ることは困難であると判断し、研究対象を見直した。

無機高分子である無機酸化物のナノシートは、単層にまで剥離させることが可能であり、単層剥離したナノシートは一個の高分子である。サイズの揃った無機ナノシートは比較的容易に手に入れられることに鑑み、研究対象を無機ナノシート、および無機ナノシートに有機分子を吸着させたハイブリッド粒子にスイッチした。

水中に無機ナノシートを分散させたコロイドに、レーザー光をその偏光方向が偏光子または検光子に対して 45° 傾けて照射すると、偏光顕微鏡下、焦点には明点が観察された。一方、偏光の向きが偏光子または検光子に平行なレーザー光を照射しても、焦点で複屈折は生じず暗視野のままであった。その様

子を図2に示す。解析の結果、サブマイクロメートルサイズの焦点の範囲内でナノシートは、照射するレーザー光の偏光方向に対して平行に配向していることがわかった。このナノシートの配向は、レーザー光の偏光方向を回転させると追隨して回転することも明らかとなった。

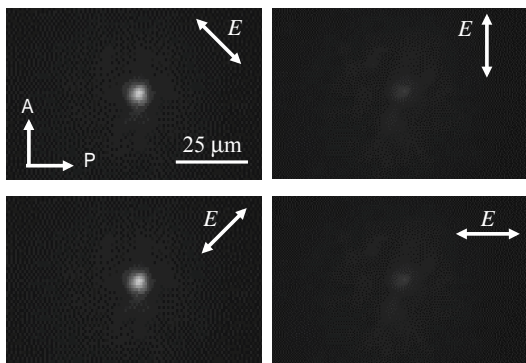


図2 ナノシートコロイドに偏光を照射したときの偏光顕微鏡像。(A)検光子、(P)偏光子の偏光方向、(E)レーザー光の偏光方向。

また、円偏光を照射すると、焦点の明暗は周期的に変化した。この周期は、ナノシートに有機分子を吸着させると短くなり、分極率、屈折率、そして照射した光の波長におけるモル吸収係数が大きい有機分子を吸着させるほど周期が短くできることもわかった。

ナノシートのコロイドはリオトロピック液晶性を示す。そこで、液晶状態にあるナノシートコロイドにもレーザー光を照射してみた。驚くべきことに、焦点よりも100倍も大きな範囲のナノシートの配向が変化した(図3)。液晶状態にあるナノシートの配向が変化すると、その大きな形状の異方性、すなわちナノシートならではの大きな排除体積により、焦点のサイズの100倍にもおよぶ長距離にわたって配向変化が生じたものと考えられる。

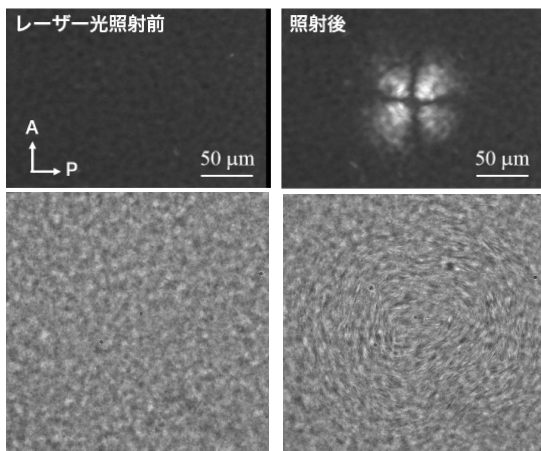


図3 ナノシート液晶にレーザー光を照射したときの配向変化。(上)偏光、(下)明視野

顕微鏡像、(左)レーザー光照射前、(右)レーザー光照射後。

以上のように、本研究では、無機高分子の運動や配向を自在に操る方法論を創出することができた。これらの成果は現在論文として投稿中で審査を受けているところである。この成果に立脚し、有機分子の光圧による配向制御技術の確立に向けた研究にも現在取り組んでいるところである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計14件)

長下敬、東裕貴、富永亮、鈴木康孝、川俣純、熊本拓哉、中戸晃之、レーザー光の放射圧によるニオブ酸ナノシート液晶の配向制御~ナノシートの配向の偏光依存性~、日本化学会第97春季年会、2017年3月19日、慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)

熊本拓哉、富永亮、長下敬、毛利恵美子、鈴木康孝、川俣純、中戸晃之、レーザーの放射圧による無機ナノシート液晶の局所操作、日本化学会第97春季年会、2017年3月17日、慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)

川俣純、無機ナノシート/有機化合物ハイブリット材料の光機能、日本化学会第97春季年会、2017年3月16日、慶應義塾大学(神奈川県・横浜市)

長下敬、富永亮、熊本拓哉、中戸晃之、鈴木康孝、川俣純、レーザー光の放射によるコロイド中のニオブ酸ナノシートの配向制御、日本化学会低次元系光機能材料研究会第5回サマーセミナー、2016年9月27日、美保館(島根県・松江市)

長下敬、富永亮、熊本拓哉、中戸晃之、鈴木康孝、川俣純、液晶状態にあるニオブ酸ナノシートの光の放射圧を用いた配向制御-金蒸着基板による局在プラズモンの効果-、第60回粘土科学討論会、2016年9月16日、九州大学(福岡県・福岡市)

富永亮、長下敬、熊本拓哉、中戸晃之、鈴木康孝、川俣純、光ピンセットを用いたナノシートコロイドの局所的な配向制御、第60回粘土科学討論会、2016年9月16日、九州大学(福岡県・福岡市)

富永亮、長下敬、熊本拓哉、中戸晃之、鈴木康孝、川俣純、液晶の配向制御への光の放射圧の利用、山口大学研究推進体「先端的計測・分析基盤技術の創出」×物質構造解析研究会ジョイントセミナー、2016年8月26日、山口大学(山口県・山口市)

Marián Matejdes, Daisuke Himeno, Makoto Tominaga, Yasutaka Suzuki, Jun

Kawamata, Optical properties of organic dyes after excitonic coupling in clay mineral hybrid film, 8th Mid-European Clay Conference, 2016年7月7日, Kosice (Slovakia)

Marián Matejdes、Daisuke Himenno、Makoto Tominaga、Yasutaka Suzuki、Jun Kawamata, Switchable optical properties of PIC in clay mineral hybrid film, 日本化学会第96春季年会、2016年3月26日、同志社大学(京都府・京田辺市)

Ryo Nakanishi, Makoto Tominaga, Yasutaka Suzuki, Jun Kawamata, Yuji Shimura, Toshiaki Iwai, Yoshihiro Nono, Teruyuki Nakato, Orientation of niobate oxide nanosheet liquid crystals under circularly polarized laser beam, Pacificchem 2015, 2015年12月17日, Hawaii (America)

Toshiki Sakurai, Ryo Nakanishi, Makoto Tominaga, Yasutaka Suzuki, Jun Kawamata, Yuji Shimura, Toshiaki Iwai, Yoshihiro Nono, Teruyuki Nakato, Formation of vortex-shaped orientation of niobate oxide nanosheet liquid crystals by irradiation of an optical vortex, Pacificchem 2015, 2015年12月17日, Hawaii (America)

Marián Matejdes, Adriana Czimerová, Marián Janek, Jun Kawamata, Functionalization of thin montmorillonite films with cyclodextrin/dye supramolecular complexes, Pacificchem 2015, 2015年12月17日, Hawaii (America)

Marián Matejdes、Adriana Czimerová、Marián Janek、Jun Kawamata、Intercalation of fluorescent supermolecular complexes into montmorillonite thin film、日本化学会低次元系光機能材料研究会第4回サマーセミナー、2015年9月25日、休暇村志賀島(福岡県福岡市)

殿田博志、富永亮、鈴木康孝、谷誠治、川俣純、分子動力学計算による粘土層間に取り込まれた有機化合物の吸着挙動、第59回粘土化学討論会、2015年9月4日、山口大学(山口県・山口市)

〔図書〕(計 1件)

T, Nakato, J. Kawamata, S. Takagi (Eds), Springer, Inorganic Nanosheets and Nanosheet-Based Materials, 2017, 542頁

〔その他〕

ホームページ等

<http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~solid/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川俣 純 (KAWAMATA JUN)