

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13373

研究課題名(和文) ナノ光渦シンセシスによるカイラル・フォトニクスへの展開

研究課題名(英文) Chiral photonics based on optical vortex nearfield

研究代表者

尾松 孝茂 (Oatsu, Takashige)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：30241938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：螺旋波面に由来する角運動量(軌道角運動量)とカイラリティーを持つ光(光渦)が物質と相互作用すると、軌道角運動量が物質に転写されて螺旋構造体(カイラル構造体)ができる。光渦が創るこのカイラル構造体は、その先端近傍の対称性の破れによって軌道角運動量を持つ極微(ナノメートルサイズ)な近接場光(「ナノ光渦」)を発生する。本研究では、カイラル構造体が創る「ナノ光渦」によってアゾポリマーのカイラルな質量移動を誘導することに成功した。この成果は、分子やその集合体(分子系)の位置・配向・公転運動・電子遷移を階層的に制御してナノスケールの新奇カイラル構造体(カイラル・ナノ構造体)創成につながる。

研究成果の概要(英文)：We and co-workers discovered that optical vortices twist an organic azo-polymer thin film to establish a single-armed chiral surface relief with a micrometer-scale modulation depth. Such chiral structures act as plasmonic metasurfaces to selectively assign and enhance the chirality of molecules and their aggregations. They will also allow us to provide nanoscale imaging systems with chiral selectivity. In this research, we demonstrate plasmon-enhanced nearfield induced chiral mass transport of the superimposed azo-polymer thin film around the chiral surface relief formed by optical vortex illumination, for the first time. This result paves the way to develop chiral plasmonic devices, for instance, chiral chemical micro-reactors.

研究分野：量子光工学・応用光学

キーワード：特異点光学 軌道角運動量 光渦 近接場光学 有機高分子

1. 研究開始当初の背景

螺旋波面を持つ光波の総称である光渦は、1波長空間伝播する間の螺旋波面の巻数で決まる軌道角運動量を持つ。

光渦を物質に照射すると、融解あるいは軟化した物質は光渦の軌道角運動量を受取る。この時、物質は軌道角運動量の符号(すなわち光渦のヘリシティ)に沿って秩序的な力学的質量移動を起こし、最終的に光渦のヘリシティに対応したカイラルな螺旋構造体(カイラル構造体)へと変化する。

この新奇物理現象を活用すれば、単に物質のカイラリティが光で制御できるだけではなく、カイラル・メタマテリアルをはじめとするカイラル光学素子などカイラリティを多次元に活用した素子が創成できる。

2. 研究の目的

光渦が創るカイラル構造体は、その先端近傍の対称性の破れによって軌道角運動量を持つ極微小な近接場光(「ナノ光渦」)を発生する。本研究の目的は、光渦が創る多彩なカイラル構造体によって「ナノ光渦」を操り、分子やその集合体(分子系)の位置・配向・公転運動・電子遷移を階層的に制御してナノスケールの新奇カイラル構造体(カイラル・ナノ構造体)を創成することである。本研究によって光の軌道角運動量で分子系を制御しカイラル・ナノ構造体を創ることができる。

3. 研究の方法

主に下記2項目について研究を行った。

(1)光のヘリシティ転写の可視化

われわれは、アゾポリマー薄膜に可視の光渦を照射すると、光異性化反応を介して光渦のヘリシティに対応したカイラルな表面レリーフができることを発見した。この表面レリーフにおける軌道角運動量の転写機構を解析する。

(2)カイラル表面レリーフにおける近接場光の可視化

同一構造を有するカイラル表面レリーフを二次元的に集積する。ナノインプリンティング法を用いて二次元カイラル表面レリーフアレイの複製を作成する。複製の上に、金膜をスパッタリング、アゾポリマー薄膜をスピコートしてデバイスを作成する。近接場光がカイラルな光渦である場合は、アゾポリマーがカイラルな質量移動を起こすはずである。アゾポリマーの質量移動から近接場光のポインティングベクトルを可視化する。

4. 研究成果

(1) 光のヘリシティ転写の可視化

全角運動量 J は円偏光に由来するスピン角運動量と軌道角運動量のベクトル和として与えられる。例えば、全角運動量 $J=2$ の光渦は3種類あるが、アゾポリマー薄膜に創る表面レリーフ形状は異なる。これは同じ全角運

動量を持つ3つの光渦の縮退が物質を介して解けることを意味する。

カイラルな表面レリーフができるのは軌道角運動量とスピン角運動量が同じ符号の場合のみであることが分かった。(図1)。

また、円偏光を照射してもスピン角運動量が軌道角運動量に変換されて一時的にはカイラルな表面レリーフを創ることが分かった(図2)。これらのスピン軌道相互作用の詳細の解明にはさらなる研究が必要である。

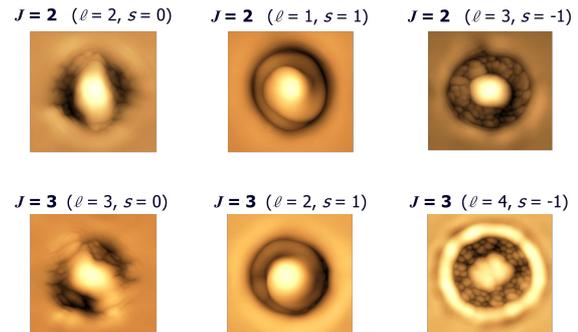


図1 全角運動量における縮退の破れ。軌道角運動量とスピン角運動量が同符号の時だけカイラル表面レリーフができる。



図2 スピン角運動量によるカイラル表面レリーフ形成のダイナミクス。レーザー照射直後、スピン角運動量は軌道角運動量に変化して、カイラルな表面レリーフを創るが、すぐに消えてしまう。

(2) カイラル表面レリーフにおける近接場光の可視化

右回りの表面レリーフに微弱な右回りあるいは左回り円偏光を照射した。右回りの円偏光を照射した場合、FDTD シミュレーションによるとカイラルな近接場ができるはずである(図3)。

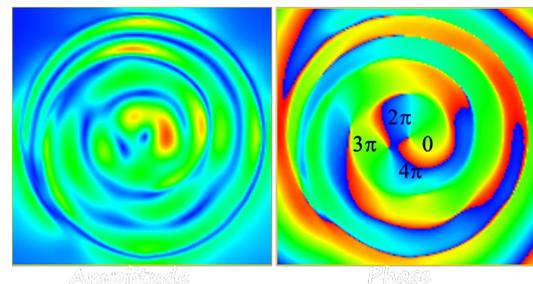


図3 数値解析した近接場。2次の光渦が現れていることが分かる。

事実、アゾポリマーのカイラルな質量移動が起こり、ナノスケールの螺旋レリーフができ

た。このことは螺旋表面レリーフ近傍にカイラルな近接場ができていていることを示す(図4)。

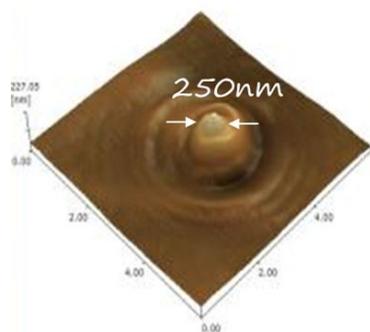


図4 カイラル表面レリーフが創る近接場によって誘起されたアゾポリマーの質量移動。右回り円偏光を照射することで、アゾポリマーがカイラルな表面レリーフに変形。表面レリーフの大きさは照射したレーザー波長の半分の大きさで近接場がナノスケールの質量移動を誘起したことを示す。

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)

[雑誌論文](計4件)

- 1) "Azo-polymer film twisted to form a helical surface relief by illumination with a circularly polarized Gaussian beam," K. Masuda, S. Nakano, D. Barada, M. Kumakura, K. Miyamoto, T. Omatsu, Opt. Express, 25, pp. 12499-12507 (2017).
- 2) "Constructive spin-orbital angular momentum coupling can twist materials to create spiral structures in optical vortex illumination," D. Barada, G. Juman, I. Yoshida, K. Miyamoto, S. Kawata, S. Ohno, T. Omatsu, Appl. Phys. Lett., 108, 051108 (2016).
- 3) "Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle," F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu, Sci. Rep., 6, 21738—1-10 (2016).
- 4) "Optical vortex pulse illumination to create chiral monocrystalline silicon nanostructures," F. Takahashi, S. Takizawa, H. Hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, Phys. Stat. Solid. A, 213, 1063–1068 (2016).

[学会発表](計14件)(すべて招待講演)

- 1) Takashige Omatsu, "Optical parametric vortex lasers and their applications towards chiral materials science," The 5th Advanced Lasers and Photon Sources 2016 (17-20 May 2016, Yokohama)

- 2) Takashige Omatsu, "Chiral nanostructures formed by optical vortex illumination," International conference on electric materials (ICEM-2016), (4-8 July 2016, Singapore)
- 3) Takashige Omatsu, "Nanostructures fabrication by optical vortices illumination," The 8th international conference on information optics and photonics (CIOP2016), (17-20 July, Shanghai, China).
- 4) Takashige Omatsu, "Formation of chiral nanostructures by optical angular momentum transfer effects," META'16, The 7th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (25-28 July, 2016, Malaga, Spain)
- 5) Takashige Omatsu, "Nanostructures creation by optical angular momentum transfer," SPIE Optics and Photonics 2016 (28 August - 1 September, 2016, San Diego, USA)
- 6) Takashige Omatsu, "Towards chiral materials science based on optical vortices illumination," Frontiers in Optics 2016 (17–21 October 2016, Rochester, USA)
- 7) Takashige Omatsu, "Optical vortex structures materials," OSJ-OSK-TPS Joint Symposium - Advanced light control and applications - (1 November 2016, Tokyo, Japan)
- 8) Takashige Omatsu, "Twisting lights twist materials," Orbital Angular Momentum Workshop, Asia Communications and Photonics Conference 2016 (ACP2016) (2 November 2016, Wuhan, China)
- 9) 尾松孝茂, "分子キラルフォトニクス," キラル対称性物理, トヨタ産業技術館, 名古屋, 2016.11.18-20.
- 10) 尾松孝茂, "トポロジカル光波が創る多彩なナノ・マイクロ構造," 第125委員会・第151委員会合同第234回研究会「微細加工と光科学」, 明治大学・駿河台キャンパス・紫紺館, 2016.12.19.
- 11) Takashige Omatsu, "Twisting lights' Establish Chiral Structured Materials," JSPS-EPSC Collaborative Symposium Materials Science Pioneered by Structured Lights, London, UK 2017.1.6.
- 12) 尾松孝茂, "光の角運動量によるレーザー加工の新展開," 大阪大学ナノ理工学人材育成産学コンソーシアム平成28年度第4回ナノ理工学情報交流会「光テクノロジーとナノテクノロジー」大阪大学豊中キャンパス, 2017.2.27.
- 13) 尾松孝茂, "光の角運動量はレーザー加

- 工を変えるか?” 第 143 回 微小光学研究会「最新の光伝送・伝搬制御・伝搬制御技術～光の特質利用はどこまで?」上智大学, 2017.3.2.
- 14) 尾松孝茂, ” 光の角運動量によって形成された螺旋構造が創るキラル近接場光.” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、ナノ物質光マニピュレーションの最先端、パシフィコ横浜 2017.3.14.

〔図書〕(計 2 件)

- 1) “Optical Vortices Illumination Enables the Creation of Chiral Nanostructures,” Takashige Omatsu, Katsuhiko Miyamoto, Ryuji Morita, Vortex Dynamics and Optical Vortices edited by Hector Perez-de-Tejada, ISBN 978-953-51-2930-1, Print ISBN 978-953-51-2929-5, Published: March 1, 2017 under CC BY 3.0 license, DOI: 10.5772/67073, InTech
- 2) “Direct Generation of Vortex Laser Beams and Their Non-Linear Wavelength Conversion, Andrew James Lee and Takashige Omatsu, Vortex Dynamics and Optical Vortices edited by Hector Perez-de-Tejada, ISBN 978-953-51-2930-1, Print ISBN 978-953-51-2929-5, Published: March 1, 2017 under CC BY 3.0 license, DOI: 10.5772/66425, InTech

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾松孝茂 (Omatsu, Takashige)

千葉大学・大学院融合科学科・教授

研究者番号：30241938

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし