

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600108

研究課題名(和文) 光波のヘリシティー・シンセシスによるカイラル・フォトニクス創成

研究課題名(英文) Helical lights pioneer Chiral Photonics

研究代表者

尾松 孝茂 (Omatsu, Takashige)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・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)：光渦の全角運動量 $J$ を0-2の範囲で変調するとともにアゾポリマー薄膜に照射した。円偏光の向きと螺旋波面の向きが一致した場合( $J=2$ の場合)にアゾポリマーがトランス-シス異性化するとともに軌道角運動量を受け取り公転運動し、数秒後に螺旋形の表面レリーフが形成されることが分かった。また、光渦によってできる螺旋構造は減衰を伴う2次元円運動に対応する対数螺旋関数で記述できることが分かった。その近傍に発生する近接場光を計算した結果、右回りの螺旋構造体に右回り円偏光を照射すると構造体近傍に近接場光が増強し、近接場光渦を増強することが分かった。

研究成果の概要(英文)：A mass transport driving force in an azo-polymer is mostly driven from a bright fringe toward a dark fringe along the polarization direction of the light. Thus, a chiral surface relief formation in the azo-polymer film is generally inhibited by the irradiation of linearly or circularly polarized light. We discovered that a novel chiral structured surface relief with a micro-scale height can be established in an azo-polymer film by irradiating circularly polarized optical vortex with a total angular momentum of  $J=2$ . The temporal evolution of the chiral surface relief formation in the azo-polymer film was also observed. Such chiral surface reliefs will open the door to new materials sciences, such as planar chiral metamaterials, plasmonic holograms, and identification of chiral chemical composites.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：特異点光学 光物性 レーザー 非線形光学

### 1. 研究開始当初の背景

螺旋波面を持つ(偏光に依存しないヘリシティーを持つ)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大きさが決まる軌道角運動量を有する。

強い光渦パルスを金属に照射すると、融解あるいは蒸散して生成された金属は光渦の軌道角運動量を受取る。この時、金属は軌道角運動量の向き(すなわち光渦のヘリシティー)に沿って秩序的な力学的運動を起こし、最終的に光渦のヘリシティーに対応したカイラリティーを有する螺旋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ー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ーを多次元に活用したカイラル・フォトンクスという新しい研究領域が創成できる。

### 2. 研究の目的

「局所(偏光)とマクロ(螺旋波面)の光のヘリシティーを合成(光波のヘリシティー・シンセシス)すると物質のカイラリティーがどのように制御できるのか?」という究極の課題に挑戦する。研究項目は以下のとおりである。

(1) 円偏光と螺旋波面の合成による光のヘリシティーの空間分布がどのように物質に転写されるのか、その瞬間を可視化する。

(2) カイラル・ナノ針を2次元的に集積したカイラル・メタマテリアルの設計指針を明らかにする。

### 3. 研究の方法

主に下記2項目について研究を行った。

#### (1) 光のヘリシティー転写の可視化

光異性化反応を示すアゾポリマーに可視光を照射すると、可視光の空間強度分布に対応して物質移動が起こり凹凸の表面レリーフが形成される。この質量移動現象はミリ秒から秒の時間スケールで起こるため、市販のCCDカメラで計測できる。そこで、アゾポリマー薄膜に光渦を照射し、カイラル構造が形成する過程を可視化する。また、アゾポリマーに働く面内輻射力を解析してカイラル構造が形成されるメカニズムを明らかにする。

#### (2) カイラル構造体の2次元アレイ化と近接場光解析

同一構造を有するカイラル構造体を2次元的に集積する。複数のカイラル構造体を一枚のターゲット基板に集積する最も簡便な方法は、ターゲット基板を二次元ステージで走査しながらカイラル構造体を作成していく方法である。

また、実際に作成できるカイラル構造体のサイズ(高さ、先端半径、直径)からカイラル・メタマテリアルの動作波長を近赤外から中赤外に設定してFDTD法により近接場光の電

場を解析する。

### 4. 研究成果

#### (1) 光のヘリシティー転写の可視化

円偏光に由来するスピン角運動量と螺旋波面に由来する軌道角運動量のベクトル和として全角運動量 $J$ が与えられる。光渦の全角運動量 $J$ を0-2の範囲で変調するとともにアゾポリマー薄膜に照射した。照射した光渦の波長は532nmである。本来、光異性化反応に伴う物質移動は光の偏光方向に起こるので、光の波面の形状によらず、いかなる偏光を用いても螺旋形の表面レリーフは形成できない。確かに、 $J=0$ もしくは1の場合、螺旋形の表面レリーフはできない。

しかしながら、 $J=2$ の場合はアゾポリマーがトランス-シス異性化するとともに軌道角運動量を受け取り公転運動し、数秒後に螺旋形の表面レリーフが形成されることが分かった(図1, 2)。

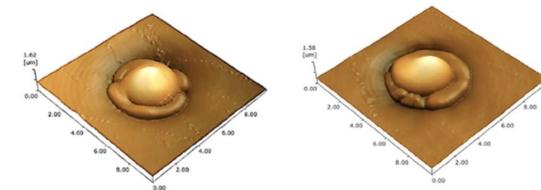


図1 形成されたカイラル表面レリーフ。

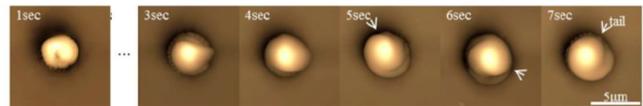


図2 カイラル表面レリーフ形成のダイナミクス。

定性的には、光渦の電場と全角運動量の空間分布の重なり積分を用いて説明できる。

#### (2) カイラル構造体の2次元アレイ化と近接場光解析

光渦によってできる螺旋構造は減衰を伴う2次元円運動に対応する対数螺旋関数で記述できることが分かった。対数螺旋関数を用いて設計した螺旋構造を2次元に配置し、その近傍に発生する近接場光をFDTD法によって計算した。右回りの螺旋構造体に右回り円偏光を照射すると構造体近傍に近接場光が増強し、その近接場光の位相が周回方向に沿って $2\pi$ 変化することがわかった。すなわち、螺旋構造体は渦状の近接場光(近接場光渦)を増強する(図3)。

螺旋構造体の先端径で決まる近接場光渦の広がり、波長の数分の1となるため、ナノ物質の構造的なカイラリティー制御に応用できることが分かった。

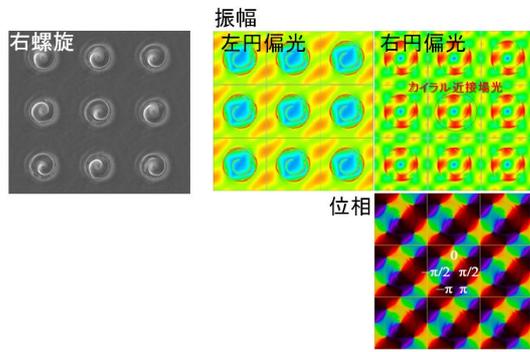


図 3 カイラル構造体の近傍にできる近接場。右円偏光を入射させた場合に近接場光増強が起こり、近接場光渦として機能する。

#### 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)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

すべて査読有り。

- 1) "Light induced conch-shaped relief in an azo-polymer film," M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, T. Omatsu, Sci. Rep., **4**, Article Number 4281 (2014)
- 2) "Transfer of light helicity to nanostructures," K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, Phys. Rev. Lett., **110**, 14, (2013) 143603.

〔学会発表〕(計 18 件)

すべて招待講演。

- 1) "Optical vortices pioneer chiral nano-structures," T. Omatsu, SPIE Photonics West, LASE, 935006-935006-4 (San Francisco, USA, 2015.2.9.)
- 2) "Chiral materials fabrication by vortex lasers," T. Omatsu, 9th International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (Matsue, Japan, 2014.9.29-10.3.)
- 3) "Helical lights twist materials to form chiral structures -Chiral Photonics-", T. Omatsu, JSAP-OSA Joint Symposia, 18.4 Optical Micro sensing, Manipulation, and Fabrications (Hokkaido University, Japan, 2014.9.18.)
- 4) "Vortex laser technologies toward chiral materials science", T. Omatsu, Photonics-international symposium on physics and applications of laser dynamics 2014 (Hsinchu, Taiwan, 2014.9.4.)
- 5) "光波の角運動量と物質科学", 尾松孝茂, 第 24 回光物性研究会, (大阪市大, 2013.12.13.)
- 6) "Optical vortex lasers for chiral material science," T. Omatsu, Advanced solid-state lasers 2013, (Paris, France, 2013.11.1.)
- 7) "Angular momentum of light forces materials to become chiral nano-structures", T. Omatsu, Structured light in structured media from classical to quantum optics incubator, (Washington DC, USA, 2013.10.1.)

8) "光のドーナツビームと軌道角運動量", 尾松孝茂, 日本物理学会秋季大会シンポジウム (徳島, 2013.9.25.)

9) "Recent Progress of Vortex Laser," T. Omatsu, The 12th Asia pacific physics conference, Makuhari messe international conference halls (Chiba, Japan, 2013.7.18.)

10) "Compact yellow-orange Raman lasers", T. Omatsu, A. J. Lee, H. M. Pask, CLEO-PR 2013 (Kyoto, Japan, 2013.7.4.)

11) "Optical vortex fiber lasers and their application to material nano-processing", T. Omatsu, CLEO2013 (San Jose, USA, 2013.6.9-14.)

12) "光の角運動量によるナノ構造体のカイラリティー・マニピュレーション", 尾松孝茂, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会、シンポジウム「物質共鳴とデザインされた光場で拓く次世代光マニピュレーション」, 27p-G16, (神奈川工科大学, 2013.3.27.)

13) "光波のヘリシティによる物質のカイラル構造制御", 尾松孝茂, 日本顕微鏡学会超分解能電子顕微鏡分科会第 8 回研究会 (東京駅東京八重洲ホール, 2013.3.4.)

14) "光渦レーザーが拓く新しいナノプロセッシング", 尾松孝茂, 光材料・応用技術研究会 第四回研究会「最先端加工とそれを支えるレーザー計測」(東京, 森戸記念館, 2013.3.1.)

15) "トポロジカル光波による物質のカイラル構造制御", 尾松孝茂, 第 8 回励起ナノプロセス研究会 (大阪大学中之島センター, 2012.12.17-18.)

16) "Recent progress of high power optical vortex laser technologies," T. Omatsu, International conference on manufacturing with photons, energetic particles and power fields, (Wuhan, China, 2012.11.2.)

17) "トポロジカル光波とカイラリティー", 尾松孝茂, 分子研研究会「新しい光の創成と物質科学 — 精密計測と操作への展開」(岡崎, 2012.10.12-13.)

18) "Optical vortex lasers and their application to material nano-processing," T. Omatsu, APLS 2012 (Anhui, China) (2012.5.28.)

〔図書〕(計 件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況 (計 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

〔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

(3) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし