

尾松孝茂

千葉大学大学院融合科学研究科
教授

トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出

§ 1. 研究実施体制

(1)「千葉大」グループ

① 研究代表者:尾松孝茂 (千葉大学大学院融合科学研究科、教授)

② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された高出力トポロジカル光源の開発
- ・「全角運動量」が制御された未踏波長域トポロジカル光源の開発
- ・トポロジカル光波によるカイラル構造制御
- ・「全角運動量」が制御されたトポロジカル光波によるナノ構造体創成と新機能性デバイス応用

(2)「北大」グループ

① 主たる共同研究者:森田隆二 (北海道大学大学院工学研究院、教授)

② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光源の超広帯域・超短パルス(サイクル域)化・高繰返し化・高出力化
- ・ポンプ・プローブ軌道角運動量・全角運動量変換に基づくキャリアダイナミクス観測法のリング構造試料への適用および観測手法の最適化
- ・トポロジカル光波による面発光レーザーの軌道角運動量変換メカニズム解明と制御

§ 2. 研究実施の概要

トポロジカル光波とは、光波面のトポロジカルな構造から現れる軌道角運動量($m\hbar$)と偏光によって現れるスピン角運動量($s\hbar$)の量子力学的なベクトル和($j\hbar=m\hbar+s\hbar$)で与えられる光パラメータ「全角運動量($j\hbar$)」を有する光波の総称である。本研究チームは、強いトポロジカル光波を物質(金属であるタンタル)に照射すると、タンタルがトポロジカル光波を吸収して溶融するとともに「全角運動量」を受取り、螺旋状のナノ構造体(カイラルナノ構造体)へ変形する現象を世界で初めて発見した。

その実績を踏まえ、昨年度から今年度にかけて、カイラルナノ構造体の構造(螺旋の向き、螺旋の巻き数(螺旋周波数)、構造体の高さなど)が m 、 j のパラメータによって制御できることを実証した。具体的には、 m の大きさが違っていてもトポロジカル光波の j が同じであれば、同じ螺旋周波数を持つカイラルナノ構造体が形成できること、カイラルナノ構造体の螺旋の向き(カイラリティ)は m の符号で決まること、を明らかにした¹⁾。

また、今年度は、タンタルに代わるターゲット試料として高分子材料であるアゾポリマー薄膜を用いて実験を行った。一般に、アゾポリマーにレーザー照射すると、シストランス光異性化反応と光勾配力を介して起こる質量移動によって薄膜表面に凹凸のレリーフ(表面レリーフ)ができる。質量移動は必ずレーザーの偏光方向に沿って起こるので、レーザー光の偏光をいかに制御しようとも螺旋の表面レリーフ(カイラル表面レリーフ)は決して形成されない。

本研究チームは、トポロジカル光波を照射することでアゾポリマー表面にカイラル表面レリーフができることを世界で初めて発見した⁹⁾。金属の場合と同様に、カイラル表面レリーフのカイラリティはトポロジカル光波の角運動量の符号で制御できることも明らかにした。ポリマーには有機色素やナノ磁性体、さらには、半導体ナノ微粒子などのナノ材料を分散させることができる。したがって、様々な新奇機能を示す素子が設計できる可能性がある。

今後は、これらの金属、高分子などのカイラルナノ構造体の光学特性評価を行う。具体的には、2 次元的に配列することで、旋光性などを示す新奇光学素子(カイラルメタマテリアル)やプラズモニクスデバイスやスピントロニクスデバイスなどのデバイス設計を狙う。

これらの研究成果は、米国物理学会学術誌 *Physical Review Letters*、Nature 系学術誌 *Scientific Reports* に掲載された。

上記の研究は、トポロジカル光波の「全角運動量」を物質の構造変化として記録する研究であるということもできる。本研究チームでは、トポロジカル光波の「全角運動量」を物性として記録するための研究も進めている。具体的には、液体 He 温度に冷却された窒化ガリウム (GaN) の励起子重心系が「全角運動量」を位相緩和時間 ~ 2 ps とほぼ同程度の 2.2ps 保持できることを実証した。

また、多様な物質の構造・物性制御へトポロジカル光波を応用するため、高出力レーザー技術、波長変換技術、超短パルスレーザー技術を駆使した光源開発も進めている。すでに紫外(266nm)から中赤外(5-11 μ m) の幅広い波長域で高効率なトポロジカル光波の発生に成功している。

トポロジカル光波を特徴づける j 、 m 、 s の 3 つの量子数はいずれも整数である。本研究チームは、この常識に一見反する半整数の m を持つトポロジカル光波(非整数トポロジカル光波)が、光パラメトリック発振器(トポロジカル光波励起光パラメトリック発振器)から直接発振することを世界で初めて発見した。

光パラメトリック過程では、励起光の 1 光子がシグナル光とアイドラー光の 2 つの光子に分割される。励起光のトポロジカルチャージがシグナル光とアイドラー光に等分配されて、半整数のトポロジカルチャージを持つトポロジカル光波がシグナル光(あるいはアイドラー光)として発生したと考えられる。これらの研究成果は、米国光学学会学術誌 *Optics Express* に掲載された。

この他、波長帯域 760-850 nm、パルスエネルギー ~ 1 mJ、パルス幅 27 fs の高強度かつ軌道角運動量可変な超広帯域超短パルス・トポロジカル光波の発生にも成功した。

§ 3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

論文詳細情報(国際)

1. K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, “Transfer of light helicity to nanostructures,” *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 14, 143603-1-5, (2013).

(DOI: doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.143603)

2. A. J. Lee, T. Omatsu, H. M. Pask, “Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser,” *Opt. Express*, **21**, 10, 12401–12409, (2013).

(DOI: doi.org/10.1364/OE.21.012401)

3. T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, “THz-wave sensing via pump and signal wave detection interacted with evanescent THz-waves,” *Opt. Lett.*, **38**, 18, 3687-3689 (2013).

(DOI: doi.org/10.1364/OL.38.003687)

4. M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, and N. Murakami, “Stable and flexible ring-shaped optical lattice generation by use of axially-symmetric polarization elements,” *Opt. Lett.*, **38**, 3661-3664 (2013).

(DOI: doi.org/10.1364/OL.38.003661)

5. Y. Toda, K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, “Efficient Laguerre-Gaussian mode conversion for orbital angular momentum resolved spectroscopy”, *Opt. Commun.*, **308**, 147-151 (2013). (DOI: doi.org/10.1016/j.optcom.2013.05.050)

6. K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, “Orbital angular momentum spectral dynamics of GaN excitons excited by optical vortices,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JL08-1-5 (2013). (DOI: doi.org/10.7567/JJAP.52.08JL08)

7. T. Yusufu, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Handedness control in a 2- μ m optical vortex parametric oscillator,” *Opt. Express*, **21**, 20, 23604-23610 (2013).

(DOI: doi.org/10.1364/OE.21.023604)

8. T. Akiba, Y. Akimoto, M. Tamura, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, J. Takayanagi, T. Takada, K. Kawase, “Broadband THz-wave generation by satisfying the noncollinear phase-matching condition with a reflected signal beam”, *Appl. Opt.*, **52**, 34, 8305-8309, (2013).

(DOI: doi.org/10.1364/AO.52.008305)

9. M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Light induced conch-shaped relief in an azo-polymer film”, *Scientific Reports*, **4**, 4281 (2014). (DOI: doi.org/10.1038/srep04281)

10. K. Yamane, Z. Yang, Y. Toda, R. Morita, "Frequency-resolved measurement of the orbital angular momentum spectrum of femtosecond ultra-broadband optical-vortex pulses based on field reconstruction", New J. Phys. (in press).

(3-2) 知財出願

- ① 平成 25 年度特許出願件数 (国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数 (国内 4 件)