

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656040

 研究課題名（和文） リング状物質と相互作用する極限時間域環状ビーム光パルスによる  
新規光物理の開拓

 研究課題名（英文） Novel optical physics by using ultrashort annular optical beams  
interacting with ring-shaped materials

研究代表者

森田 隆二 (MORITA RYUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30222350

研究成果の概要（和文）：

光渦パルスを生束光とし、縮退光パラメトリック増幅およびチャープ補償を行うことにより、サイクル域の光渦パルスの発生に初めて成功した。また、軌道角運動量可変な超短光渦パルス発生ならび高精度軌道角運動量スペクトル測定法の開発も行った。さらに、光渦を用いたポンプ・プローブ閉ループ時間分解非線型励起分光法および高精度軌道角運動量変換法を開発し、物質との相互作用としては、スピン角運動量および軌道角運動量を制御した光渦パルスを用いて、ナノサイズの金属螺旋ニードル構造を作製することに初めて成功した。

研究成果の概要（英文）：

Few-cycle optical vortex pulses were first generated by optical parametric amplification and chirp compensation. In addition, topological-charge-programmable ultrashort optical-vortex pulse generation was demonstrated. Measurement method of orbital angular momentum (OAM) spectra with high precision, time-resolved nonlinear spectroscopy technique using optical vortices as a pump and a probe, nonlinear OAM conversion method with high accuracy were developed. Furthermore, chiral nano-needles of metal were first fabricated by using spin-controlled optical-vortex pulses.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：超高速非線型光学，量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

 キーワード：光量子科学，量子エレクトロニクス，高性能レーザー，モノサイクル光パルス，  
環状ビーム，位相特異性，偏光特異性

## 1. 研究開始当初の背景

近年発見されたリング状結晶はそのトポロジーには注目され、電気物性研究が着手されているものの、その光物性を通じたマクロな性質に関しては、ほとんど未知といえる状況であった。

一方、研究代表者らは、モノサイクル域光パルス発生・制御技術と空間的位相・偏光制御技術とを独自に開発しており、環状ビームである超広帯域コヒーレント光渦発生に成功した実績を有していた。

## 2. 研究の目的

本研究は、研究代表者らが現在までに独自に開発したモノサイクル域光パルス発生・制御技術と空間的位相・偏光制御技術とを融合させることにより、1) リング状物質のトポロジーと合致したモノサイクル域光渦・偏光渦の極限時間域環状ビームを用いた閉ループ時間分解非線型励起および分光の手法を確立すること、2) モノサイクル域光渦・偏光渦の極限時間域環状ビームのトポロジー

を利用した新規トポロジカル光波の発生を行うこと、を目的とする。

### 3. 研究の方法

以下の方法により研究を実施した。

(1) 分散のない超広帯域光渦発生・制御技術を用いた高出力・超短光渦パルスの発生。

(2) 軌道角運動量を自在に変化させることのできる高出力・超短・超広帯域光渦パルスの発生。

(3) 2次元干渉像を用いた高精度軌道角運動量スペクトル測定法の開発。

(4) 光渦を用いたポンプ・プローブ閉ループ時間分解非線型励起・分光における軌道角運動量スペクトル分解測定法および高精度軌道角運動量変換法の開発。

(5) 光渦パルスを用いたレーザーアブレーションによる光渦と金属との相互作用実験。

### 4. 研究成果

(1) 分散のない超広帯域光渦発生・制御技術を用いた高出力・超短光渦パルスの発生

申請者らが既に開発した分散のない超広帯域光渦発生法により生成した光渦パルスをシード光とし、縮退光パラメトリック増幅およびプリズム対・チャープミラーを用いたチャープ補償を行うことにより、スペクトル

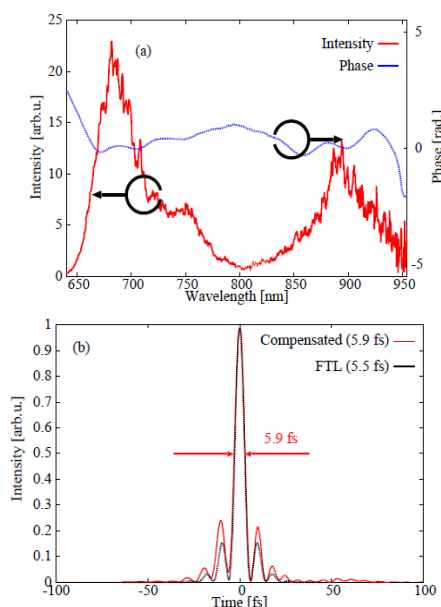


図1 (a) 超短光渦パルスのスペクトルおよびスペクトル位相, (b) 超短光渦パルスの時間プロファイル。

帯域 650–950 nm, 2.3 サイクル, 5.9 fs, 56  $\mu\text{J}$  の高出力・超短光渦パルスの発生に成功した。図1 (a)にその強度スペクトルとスペクトル位相を示す。このスペクトル位相は、自作の2次元スペクトルシアリング干渉法により測定されている。図1 (b)には、発生させた光渦パルスの時間プロファイルを示す。このパルス幅 5.9 fs は、対応するスペクトルのフーリエ変換限界パルス幅 5.5 fs ときわめて近い値となっており、サイクル域における光渦パルス発生としては、本結果が最初の例である。光パラメトリック増幅の過程で、シード光の軌道角運動量が保存されていること、空間分散をとまなわないことも確認されており、この発生技術は、本研究の基盤技術となる。

(2) 軌道角運動量可変な高出力・超短・超広帯域光渦パルスの発生

光渦を生成する際、空間位相変調器 (SLM) が用いられることが多いが、回折効率が低いことや超広帯域パルスには空間分散をとまなうという問題点がある。そこで本研究では、実効的に2つの SLM を4f光学系内に配置することにより、空間分散を避け、その後、光パラメトリック増幅を行うことにより、低回折効率を補償する光学系を構築し、超広帯域に適応可能な高出力・超短光渦パルス発生を実現した。この手法は、SLM のホログラムパターンを変化させるだけで、容易に光渦の軌道角運動量 (トポロジカルチャージ) を制御することができるという利点を持つ。

図2に発生させた超短光渦パルスのビーム強度プロファイルを示す。(a), (c), (e), (g)が SLM のホログラムパターンを変化させることにより発生させた、それぞれトポロジカルチャージ  $l=0, 1, 2, 3$  の結果である。円柱レンズを通した干渉測定の際の暗線の数  $l$

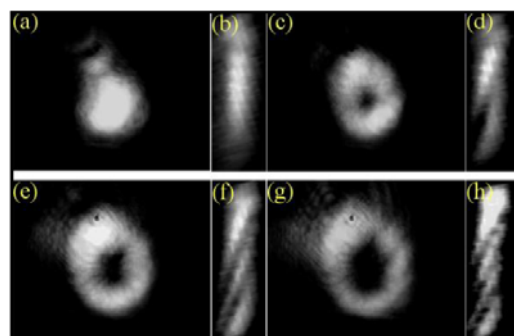


図2 (a)  $l=0$ , (c)  $l=1$ , (e)  $l=2$ , (g)  $l=3$  の軌道角運動量自在制御された超短光渦パルスビームプロファイル, (b), (d), (f), (h)の暗線の数  $l$ に対応する。

に対応するので、(b), (d), (f), (h)から確かに所望のトポロジカルチャージが得られていることがわかる。

### (3) 2次元干渉像を用いた高精度軌道角運動量スペクトル測定法の開発

通常、光渦の軌道角運動量を測定するには、平面波との干渉像の分岐数を数える方法やホログラムパターンを変化させながら、回折強度を測定する手法が用いられる。しかしながら、精確なスペクトル分布を求めるのが困難であったり、実時間計測ができないという欠点があった。本研究では、2次元干渉像を用いた、準実時間計測可能な高精度軌道角運動量スペクトル測定法の開発を行った。この方法は、被測定対象である光渦と平面波とみなせる光との2次元干渉像を測定し、2次元空間フーリエ変換、空間周波数フィルタリングを行った後、空間逆フーリエ変換を行うことにより、空間座標（方位角）に依存した位相ならびに軌道角運動量スペクトルを求めるというものである。

650–950 nm 超広帯域光渦を切り出した光（650 nm を中心、スペクトル幅 10 nm）に対し、本手法を適用し求めた軌道角運動量スペクトルを図3に示す。ほとんどの成分は軌道角運動量  $l=2$  であるが、1/100 程度のサイドバンドの存在さえ同定できる高精度な測定であることがわかる。

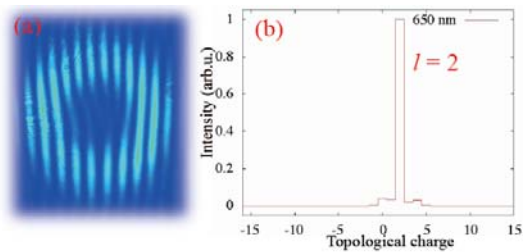


図3 650–950 nm 超広帯域光渦を 650 nm ± 5 nm で切り出した光渦パルス (a) 平面波との 2次元干渉像、(b) 測定された軌道角運動量スペクトル。

### (4) 光渦を用いたポンプ・プローブ閉ループ時間分解非線型励起・分光における軌道角運動量スペクトル分解測定法および高精度軌道角運動量変換法の開発

光渦を用いたポンプ・プローブ閉ループ時間分解非線型励起・分光を行い、軌道角運動量スペクトル分解測定法を確立した。また、その軌道角運動量スペクトルのダイナミクス測定により、光渦によって励起された窒化ガリウム (GaN) 励起子は、その軌道角運動

量を  $\sim 1.5$  ps の位相緩和時間内で保持していることを明らかにした。

さらに、異なる軌道角運動量をもつ光渦を用いたポンプ・プローブ四光波混合信号に対する軌道角運動量スペクトル分解測定法において、発生信号の軌道角運動量スペクトルのサイドバンド発生の原因を明らかにした。これにより、光渦パルスを用いた GaN の四光波混合を通して、精度良い軌道角運動量変換法を確立した。

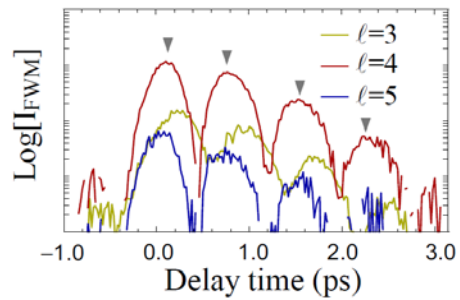


図4 軌道角運動量  $l_1 = -2$  のポンプ光渦と  $l_2 = 1$  のプローブ光渦による GaN 励起子からのポンプ・プローブ四光波混合信号. 信号の軌道角運動量を分解しながら測定している. 信号光の軌道角運動量  $l = 3$  が  $\sim 1.5$  ps 程度の位相緩和時間内で保持されている。

### (5) 光渦パルスを用いたレーザーアブレーションによる光渦と金属との相互作用実験

ナノ秒の光パルスであるが、スピン角運動量（偏光）および軌道角運動量を制御した光渦パルスを用いて、金属タンタル (Ta) のアブレーション実験を行い、ナノサイズのニードル構造を作製することに成功した。ビームサイズが 100  $\mu\text{m}$  であるのに対して、このニードル先端曲率は 40 nm 程度である。また、光渦の波面構造を反映して、このニードルは側面に螺旋構造を持つ。光渦の螺旋の向きにより、ニードルの螺旋構造も反転可能である。その典型的結果の電子顕微鏡写真を図5に

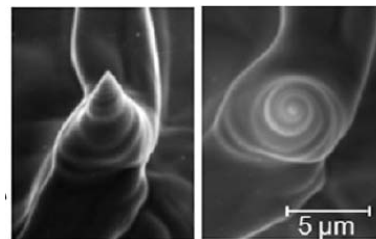


図5 光渦パルスと金属の相互作用により作製された螺旋ナノニードル（電子顕微鏡像）。光渦の波面構造を物質構造に転写することに初めて成功した例である。

示す。この実験は、光渦の持つ螺旋波面構造を物質構造に転写した初めての例である。

また、軌道角運動量とスピン角運動量の和である全角運動量の大きさを変化させることにより、ニードルの螺旋の巻き数を制御できることも明らかにしている。

#### 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 10 件)

(1) K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, "Orbital angular momentum spectral dynamics of GaN excitons excited by optical vortices", Jpn. J. Appl. Phys. (2013) in press, 査読有.

(2) K. Toyoda, F. Takahashi, S. Takizawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Transfer of light helicity in nanostructures", Phys. Rev. Lett. **110** (2013) 143603 — 1-5, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.143603.

(3) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Ultrashort optical-vortex pulse generation in few-cycle regime", Opt. Express **20** (2012) 18986-18993, 査読有, DOI: 10.1364/OE.20.018986.

(4) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultrashort optical-vortex pulses in few-cycle regime", Technical Digest of 5th EPS-QEOD Europhoton Conference 2012 [USB memory] TuP.7 (2012) 査読有.

(5) K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu, "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures", Nano Lett. **12** (2012) 3645-3649, 査読有, DOI: 10.1021/nl301347j.

(6) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultrashort optical vortex pulses using optical parametric amplification", Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science (QELS) Conference, [CD-ROM] JTulK4 (2012), 査読有, DOI: 10.1364/CLEO\_AT.2012.JTulK.4.

(7) M. Sakamoto, K. Oka, and R. Morita, "Diffraction characteristics of optical

and polarization vortices generated by an axially symmetric polarizer", Proceedings of SPIE **8274** (2012) 827414—1-7, 査読有, DOI: 10.1117/12.910108.

(8) 森田隆二, 戸田泰則, 尾松孝茂, 「位相・偏光特異性を持つ極限光パルスの発生とその応用」, 表面科学 **32** (2011) 748-754, 査読有, DOI: 10.1380/jssj.32.748.

(9) M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Nonlinear propagation effects on high-power optical-vortex pulses in anisotropic crystals", Technical Digest of CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) Europe, [CD-ROM] CD5.1 (2011), 査読有, DOI: 10.1109/CLEOE.2011.5942697.

(10) K. Toyoda, K. Miyamoto, M. Okida, R. Morita, T. Omatsu, "Tilting metal micro-needle fabrication based on optical vortex laser ablation", Technical Digest of CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) Europe, [CD-ROM] CM5.5 (2011), 査読有, DOI: 10.1109/CLEOE.2011.5943337.

[学会発表] (計 34 件)

(1) 坂本盛嗣, 岡和彦, 森田隆二, 村上尚史, 「複数の軸対称偏光素子を利用したリング状光格子の生成(II)」, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 2013年3月30日, 神奈川工科大学(厚木).

(2) 高橋冬都, 豊田耕平, 滝澤隼, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂, 「光渦レーザーアブレーションによって形成された螺旋ナノニードル」, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学(厚木市).

(3) 山根啓作, 本田亜沙美, 戸田泰則, 森田隆二, 「トポロジカルチャージ可変な高強度超短光渦パルス光源の開発」, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学(厚木市).

(4) 鈴木雅人, 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「非線型屈折率効果を伴う物質の異方性を用いた光子のスピン軌道角運動量変換IV」, 第60回応用物理学会春期学術講演会, 2013年3月28日, 神奈川工科大学(厚木市).

(5) 森田隆二, 「サイクル域トポロジカル光波の発生とその応用」, 2012年度日本分光学会

会北海道支部シンポジウム, 2013年3月1日, 北海道大学(札幌市).

(6) R. Morita, "Topological light pulse generation in few-cycle regime and its applications", Extreme photonics Seminar, 2012年12月20日, Cooperation Center, RIKEN, Wako, Japan.

(7) R. Morita, "Optical-vortex pulse generation in few-cycle regime", International Workshop on Spintronic Nano Materials 2012, 2012年11月5日, Hokkaido University, Sapporo, Japan.

(8) 豊田耕平, 高橋冬都, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂, 「全角運動量を有する光渦によるカイラリティナノニードル創成」, Optics & Photonics Japan 2012, 2012年10月24日, タワーホール船堀(東京都江東区).

(9) K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, "Orbital-angular-momentum spectral dynamics of GaN excitons excited by optical vortices", International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), 2012年10月18日, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan.

(10) Z. Yang, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Measurement of orbital angular momentum spectrum from fork-like interferogram", The 73rd JSAP Autumn Meeting, JSAP-OSA Symposia, 2012年9月14日, Ehime University, Matsuyama, Japan.

(11) 鈴木雅人, 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「非線型屈折率効果を伴う物質の異方性を用いた光子のスピンの軌道角運動量変換 III」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月13日, 愛媛大学(松山市).

(12) 重松恭平, 戸田泰則, 山根啓作, 森田隆二, 「高次光渦励起による GaN 励起子の軌道角運動量分解四光波混合分光」, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012年9月13日, 愛媛大学(松山市).

(13) R. Morita, "Few-cycle optical-vortex pulse generation by parametric amplification", France-Japan Joint workshop on Advanced Lasers and Nonlinear Optics, 2012年9月3日, Néel Institute, Grenoble, France.

(14) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultrashort optical-vortex

pulses in few-cycle regime", Europhoton Conference 2012, 2012年8月28日, Alba Nova University Centre, Stockholm, Sweden.

(15) M. Suzuki, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Nonlinear propagation of optical vortex with topological charge conversion in a uniaxial crystal", Topological lightwave synthesis and its applications 2012 (T-LWS 2012), 2012年7月6日, Chiba University, Chiba, Japan.

(16) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Few-cycle optical-vortex pulse generation by optical parametric amplification", Topological lightwave synthesis and its applications 2012 (T-LWS 2012), 2012年7月5日, Chiba University, Chiba, Japan.

(17) K. Shigematsu, Y. Toda, K. Yamane, R. Morita, "Coherent orbital angular momentum transfer to GaN excitons using optical vortex pulses", Topological lightwave synthesis and its applications 2012 (T-LWS 2012), 2012年7月5日, Chiba University, Chiba, Japan.

(18) M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, N. Murakami, "Ring-shaped optical lattice generation using axially-symmetric polarization elements", Topological lightwave synthesis and its applications 2012 (T-LWS 2012), 2012年7月5日, Chiba University, Chiba, Japan.

(19) 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「数サイクル域超短光渦パルス発生」第4回超高速光エレクトロニクス研究会 "新レーザー光源とその応用", 2012年6月8日, 慶應義塾大学日吉キャンパス(横浜市).

(20) K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultrashort optical vortex pulses using optical parametric amplification", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science (QELS) Conference, 2012年5月8日, San Jose Convention Center, San Jose, USA.

(21) 重松恭平, 戸田泰則, 森田隆二, 「光渦励起による励起子軌道角運動量スペクトルダイナミクス」, 第67回日本物理学会年次大会, 2012年3月25日, 関西学院大学(西宮市).

(22) 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「数サイクル域超短光渦パルス発生」, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 18 日, 早稲田大学 (東京都新宿区).

(23) 坂本盛嗣, 岡 和彦, 森田隆二, 村上尚史, 「複数の軸対称偏光素子を利用したリング状光格子の生成」, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 17 日, 早稲田大学 (東京都新宿区).

(24) 森田隆二, 「超短トポロジカル光波の発生」, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, シンポジウムシンポジウム「レーザービームシェイピングの新展開」, 2012 年 3 月 16 日, 早稲田大学 (東京都新宿区).

(25) 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「光パラメトリック増幅による超短光渦パルスの発生」, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, プロセス基礎部門招待講演, 2012 年 2 月 1 日, TKP 仙台カンファレンスセンター (仙台市).

(26) 尾松孝茂, 森田隆二, 「光波の全角運動量を用いたナノプロセッシング」, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, プロセス基礎部門招待講演, 2012 年 1 月 30 日, TKP 仙台カンファレンスセンター (仙台市).

(27) M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, "Diffraction characteristics of optical and polarization vortices generated by an axially symmetric polarizer", Proceedings of SPIE Photonic West 2012, 2012 年 1 月 25 日, Moscone Center, San Francisco, USA.

(28) 鹿島準一郎, 戸田泰則, 森田隆二, 「低屈折率粒子の動的自在マニピュレーションを用いた液滴融合」, 第 47 回 応用物理学会北海道支部/第 8 回 日本光学会北海道地区合同学術講演会, 2012 年 1 月 6 日, 北海道大学 (札幌市).

(29) 森田隆二, 「超短光パルスの位相制御とその応用」, 応用物理学会量子エレクトロニクス研究会「非線形光学 50 年 その基礎と材料・デバイスおよび応用」, 2011 年 12 月 9 日, 上智大学セミナーハウス (長野県軽井沢町).

(30) J. Kashima, Y. Toda, R. Morita, "Arbitrary Dynamical Manipulation of Low-Refractive-Index Droplets using Optical Vortices", 12th Chitose International Forum on Photonics Science and Technology, 2011 年 10 月 14 日, Chitose,

Japan.

(31) 鈴木雅人, 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 「非線型屈折率効果を伴う物質の異方性を用いた光子のスピン軌道角運動量変換 II」, 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 30 日, 山形大学 (山形市).

(32) 重松恭平, 戸田泰則, 天野竜郎, 森田隆二, 「GaN 励起子の軌道角運動量分解四光波混合分光」, 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2011 年 8 月 30 日, 山形大学 (山形市).

(33) M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Nonlinear propagation effects on high-power optical-vortex pulses in anisotropic crystals", Conference on Lasers and Electro-Optics Europe 2011, 2011 年 5 月 25 日, International Congress Centre Munich, Munich, Germany.

(34) K. Toyoda, K. Miyamoto, M. Okida, R. Morita, T. Omatsu, "Tilting metal micro-needle fabrication based on optical vortex laser ablation", Conference on Lasers and Electro-Optics Europe 2011, 2011 年 5 月 23 日, International Congress Centre Munich, Munich, Germany.

〔図書〕 (計 1 件)

(1) T. Omatsu, R. Morita, "Chiral Nanostructures Fabricated by Twisted Light with Spin", Singular and Chiral Nanoplasmonics, Pan Stanford Publishing, in press.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森田 隆二 (MORITA RYUJI)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号: 30222350

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号: