

戦略的創造研究推進事業 CREST

研究領域

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」

研究課題

「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」

## 研究終了報告

研究期間 平成22年10月～平成28年3月

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)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

光波の「全角運動量( $j\hbar$ )」とは、光波面のトポロジカルな構造によって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。ここでは「全角運動量」を有する光波をトポロジカル光波と呼ぶ。

本研究チームは、「トポロジカル光波を物質に照射すると、物質が熔融すると同時にトポロジカル光波の「全角運動量」を受取り、その結果、物質が公転運動しながら螺旋状のナノ構造体(キラルナノ構造体、現在実証できている螺旋構造の直径は $<50\text{nm}$ )へ変形する」という新奇物理現象を世界で初めて発見した。また、そのキラルナノ構造体の構造(螺旋周波数、向きなど)がトポロジカル光波の「全角運動量」の大きさや符号で制御できることも実証した。

当初の実験では、トポロジカル光波を照射するターゲット物質にタンタルを用いていたが、その後、銅やシリコンやアゾポリマーなどの様々な物質が、タンタル同様、キラルナノ構造体に変形することが分かった。すなわち、物質依存ではなく普遍的に起こる物理現象であることが明らかになった。

現在、キラルなナノ構造体はメタサーフェスの新奇構造としてキラリティー識別性を有するバイオセンサー・バイオ MEMS などのキラル光学デバイスへ応用が期待されている。室温大気雰囲気中で起こるこの新奇物理現象を活用すれば、省エネルギー性・省スペース性・耐環境性に優れたキラル光学デバイス創成技術が確立できる。

トポロジカル光波の潜在能力をさらに開花させ、応用分野を拡大するには、物質の共鳴波長に合わせて波長が可変できる光源が必要不可欠である。本研究チームは栗村グループ(物材機構)が提供する周期分極反転型非線形光学結晶を用いて紫外域でのトポロジカル光波発生を可能にした。さらに、光渦励起光パラメトリックレーザーを考案し、中赤外～テラヘルツ波帯でトポロジカル光波の発生を可能にした。このように深紫外～テラヘルツ波帯のあらゆる波長域でトポロジカル光波を自在に発生できる光源開発技術を確立した。その成果の一部はテラヘルツ螺旋位相板としてすでに商品化されている。

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。本研究チームは非整数の  $m$  を持つトポロジカル光波が光パラメトリックレーザー共振器から直接発振し、固有モードのように空間伝播することも世界で初めて発見した。この非整数トポロジカルチャージを持つトポロジカル光波は、異なる  $m$  を持つ複数の固有モードのコヒーレントな重ねあわせで記述できることが分かった。

これらの研究成果は当初の予想をはるかに上回るものであり、千葉大グループの有する高出力レーザー技術と北大グループの有するレーザー計測・制御技術を融合させることで初めて実現できたものである。

具体的には、トポロジカル光波の発生技術・ターゲット物質に照射するトポロジカル光波の品質計測技術・キラルナノ構造体ができるダイナミクスの時間分解計測技術など、北大グループの有する数多くの計測・制御技術の共有化がなければ、キラルナノ構造体創成という物理現象の発見とそのメカニズムの解析は到底なしえなかったと言える。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. “Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures”, Nano Letters, **12**, 3645-3649 (2012).

被引用件数: 81 件(Google scholar)、60 件(web of science) (化学系トップ 10%論文)

「全角運動量」を有するトポロジカル光波を金属に照射すると、熔融した金属に「全角運動量」が転写されて金属が螺旋の針状構造体に変形することを発見した。針先端部の直径約  $50\text{nm}$ 、長さ  $10\mu\text{m}$  であった。また、螺旋構造の向きはトポロジカル光波の「全角運動量」の符号で制御できることも分かった。

トポロジカル光波の「全角運動量」と物質の相互作用で、キラリティーを持つナノ構造体

が創成できることを示した世界最初の研究である。

2. “Transfer of Light Helicity to Nanostructures”, Phys. Rev. Lett., **110**, 143603--1-5(2013).

被引用件数: 47 件(Google scholar)、32 件(web of science) (物理系トップ 10%論文)

トポロジカル光波を金属に照射することで形成された螺旋の針状構造体(キラルナノニードル)の単位高さあたりの螺旋の巻数(螺旋周波数)がトポロジカル光波の「全角運動量」の大きさと制御できることを、世界で初めて実証した。すなわち、軌道角運動量の大きさが違っていてもトポロジカル光波の「全角運動量」が同じであれば、螺旋周波数を持つキラルナノニードルが形成できることを発見した。また、キラルナノニードルの螺旋の向き(キラリティー)は軌道角運動量の符号で決まることも合わせて明らかにした。

3. ”Light induced conch-shaped relief in an azo-polymer film”, Sci. Rep., **4**, 4281--1-5 (2014).

被引用件数: 26 件(Google scholar)、16 件(web of science) (物理系トップ 10%論文)

アゾポリマー薄膜に光照射すると光異性化反応を介して質量移動が起こり、薄膜表面に凹凸のレリーフ構造ができることが知られている。しかしながら、質量移動は必ず偏光方向に沿って起こるため、一般にキラルな表面レリーフはできない。本論文では、トポロジカル光波をアゾポリマーに照射すると螺旋の表面レリーフ(キラル表面レリーフ)が形成できることを、世界で初めて実証した。

これら 3 つの研究成果は、トポロジカル光波を照射すると、「全角運動量」の作用によって物質がキラル構造体へと変形することを発見した世界初の研究成果として国内外の注目を集めている。研究代表者は CREST 研究期間中に 39 件(国際会議 18 件)の招待講演を行ったことから注目度の高さが分かる。将来的には、キラリティー識別性を有するキラル光学デバイス、具体的には、物質のキラリティーを検出できる近接場光プローブや原子間力プローブ、光学素子のない波長域で旋光性を示すメタマテリアル、さらにはナノコイルやバイオMEMSなど、先端ナノテクノロジーを支える機能性デバイス開発へと応用できる可能性がある。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. “Tunable 2- $\mu\text{m}$  optical vortex parametric oscillator”, Opt. Express, **20**, pp. 23666-23675 (2012).

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。励起光がトポロジカル光波である場合、量子数であるトポロジカルチャージがシグナル光とアイドラー光にどのように分割されるかは自明ではない。1- $\mu\text{m}$  のトポロジカル光波を励起光とする光パラメトリック発振器では、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 2- $\mu\text{m}$  トポロジカル光波が発生する場合とトポロジカルチャージがそのままシグナル光に転写される場合があることを実証した。また、2- $\mu\text{m}$  帯のトポロジカル光波としては最高パルスエネルギー 2mJ を観測した。このエネルギーレベルはポリマーなど高分子材料の加工に十分応用できるエネルギーレベルである。

2. “Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate”, Appl. Phys. Lett., **104**, 261104--1-4 (2014).

分子の大振幅振動に相当するテラヘルツ波帯でトポロジカル光波が発生できれば、超解像テラヘルツ分光イメージングなどが可能になる。テラヘルツ波と可視光に対して透明でかつ分散の少ないポリマー(Tsurupica)を用いた螺旋位相板を開発し、テラヘルツ波帯トポロジカル光波の発生を可能にした。また、トポロジカルチャージの計測、空間伝播特性の測定からトポロジカル光波の純度を計測した。

3. ”Tunable mid-infrared (6.3–12 $\mu\text{m}$ ) optical vortex pulse generation”, Opt. Express, **22**, pp. 26351-26357 (2014).

1- $\mu\text{m}$  のトポロジカル光波を励起光とする光パラメトリック発振器において、励起光のトポロジカルチ

ヤージをそのままシグナル光に転写できる共振器を設計した。その結果、トポロジカル光波として発生するシグナル光とガウスビームとして発生するアイドラー光の差周波光を発生させた。その結果、6~10 $\mu\text{m}$  帯(30THz 帯)でサブミリジュールレベルのエネルギーを有するトポロジカル光波の発生に成功した。

1-3. で得られた成果はすべて特許申請を完了しており、1. に関しては JST の海外特許出願制度によるPCT出願した。また、2. に関しては製品化が完了し、パックス(株)より購入可能である。

## § 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「千葉大」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
尾松 孝茂	千葉大学 大学院融合科学研究科	教授	H22.10～
宮本 克彦	同上	准教授	H22.10～
時実 悠	同上	研究員	H23.10～H25.9
Taximaiti Yusufu	同上	研究員	H26.4～H27.7
高橋 冬都	同上	D3	H23.4～
佐々木 祐太	同上	D1	H27.4～
北畑 裕之	同上	准教授	H26.4～
茨田 大輔	宇都宮大学 大学院工学研究科	助教	H26.4～
大野 誠吾	東北大学 大学院理学研究科	助教	H27.4～

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レーザー誘起プラズマダイナミクス of 解明」から「トポロジカル光波によるキラル構造制御」へ計画変更。
- ・「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

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
森田 隆二	北海道大学大学院工学 研究院	教授	H22.10～
戸田 泰則	同上	教授	H22.10～
山根 啓作	同上	准教授	H23.4～
鈴木 雅人	同上	D3	H25.4～

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開発

- ・「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光波を用いたマイクロリング結晶における進行波型電荷密度波の発生とそのダイナミクス解析」から「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光波を用いた半導体結晶における励起子「全角運動量」コヒーレンスの検出とそのダイナミクス解析」へ計画変更
- ・「マイクロリング結晶からのトポロジカル・テラヘルツ波発生」から「マイクロリング結晶からのトポロジカル光波発生と制御」へ計画変更

① 「物材機構」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
栗村 直	独立行政法人物質・材料 研究機構	主幹研究員	H26.10～
Hwan Hong LIM	同上	博士研究員	H26.10～
藤井 一史	同上	研究補助員(派遣 職員)	H26.10～
池田 正見	同上	研究補助員(派遣 職員)	H26.10～
野中 幹修	同上	研究補助員(M2)	H26.10～

研究項目

- ・紫外トポロジカル光発生デバイスの光学設計およびナノ電極構造設計
- ・紫外トポロジカル光発生デバイスの試作

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

1. 国際ネットワークと国際共同研究

2012年7月「Topological-lightwave synthesis and its application」を千葉大学自然科学研究科大会議室において主催し、国内外の研究者総数75名（うち外国人招待講演者6名を含む）を一堂に会し、トポロジカル光波に関する国際ネットワークの構築と強化に努めた。また、2012年9月「France-Japan joint workshop on Advanced Lasers and Nonlinear Optics」をNeel研究所(Grenoble, France, 参加者25名)において開催し、トポロジカル光波に関する日本・フランス研究者間の研究交流と情報交換を行った。

さらなる国際ネットワークの強化を狙い、Optics & Photonics International Congress (OPIC)の国際会議として Optical manipulation conference 2014, 2015 (OMC'14, OMC'15, パシフィック横浜) を主催した。この会議では、本領域総括である伊藤 正教授を Advisory board、領域アドバイザーである笹木敬一教授(北大)を Steering Committee member に招き、領域内研究者間の連携も実施した。佐藤俊一教授(東北大)研究チームからの参加もあった。会議の参加者は~80名であり、その30%以上が海外からの参加者である。参加者の会議に対する満足度が高く継続的運営を希望する強い要望を受けて、OMC'16も開催予定である。

さらに、Macquarie 大学(豪州)での「トポロジカル光波とキラルナノ構造体」と題するセミナー講演をきっかけに H. M. Pask 准教授、A. J. Lee 博士との新たな国際共同研究を開始した。具体的には、誘導ラマン散乱過程において基本波のトポロジカルチャージがストークス光へとそのまま転写されることを実験的に検証し、その結果をもとに高効率にトポロジカル光波を2波長同時する小型固体レーザー（基本波(1.06 μm)、ストークス光(1.18 μm)出力ともにCWで400mW)を開発した。このレーザーは超解像顕微鏡などに応用できる。

この他、亜洲大学校・韓国・F. Rotermund 教授グループとトポロジカル光波を用いたグラフェンのテラヘルツ非線形分光、国立交通大学・台湾・増原 宏 教授とトポロジカル光波を用いたレーザートラッピング法によるアミノ酸結晶成長、ニューヨーク州立バッファロー大学・アメリカ・N. M. Litchinitser 教授と中赤外メタマテリアルなどの共同研究も進めている

る。



図 Optical Manipulation Conference 2014。参加者写真。

## 2. 産業界と連携

2012年6月26日 読売新聞・東京新聞、2013年3月27日日刊工業新聞・東京新聞などのプレスリリース効果で、複数の企業からキラルナノニードルに関する技術指導・技術委託の問い合わせを受けた。また、OPIC2013（パシフィコ横浜）の展示会にて行われたオプトサイエンスセミナー、京都府中小企業技術センターが主催する京都光技術研究会（第5回光ものづくりセミナー）などで企業研究者に向けてトポロジカル光波に関するセミナー講演を行った。

現在、2社の企業とニードル形成・液滴の飛翔制御の共同研究をそれぞれ開始している。また、テラヘルツ螺旋位相板を商品化し、株パックスから販売を開始した。

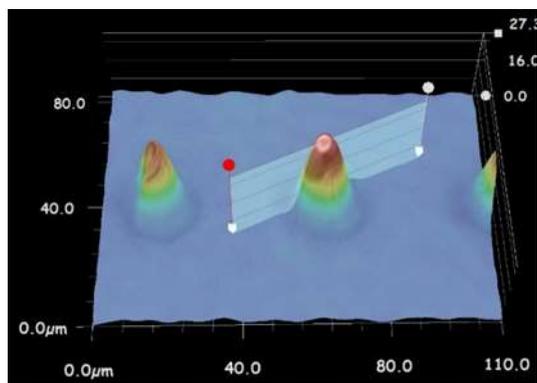


図 中赤外トポロジカル光波によって創ったヒアルロン酸ニードル。

### § 3 研究実施内容及び成果

「千葉大」 「物材機構」 グループ

#### 3. 1 「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 (物材機構グループと連携。)

##### 研究実施内容及び成果(研究論文1, 3, 23, 25)

光波の「全角運動量」が様々な物質に及ぼすコヒーレント相互作用のメカニズムを解明し、「全角運動量」の潜在能力を十二分に活用するため、トポロジカル光波を高出力に発生させるレーザー装置を開発した。

ガウスビームを代表的なトポロジカル光波であるラゲール・ガウスビームへと変換する有効な方法の一つに円筒対称性を有するマルチモードファイバーを用いる方法がある。しかしながら、ファイバー内で選択的に高次モードを励振させる必要があるため、大きな損失を伴い変換効率は高々30%程度である。そこで、ファイバー内でラゲール・ガウスビームを発生させると同時にレーザー増幅によって結合損失を上回る実効的な光増幅が可能な Yb 添加ラージモードエリアファイバー増幅器(ファイバー増幅器)をモード変換器として用いる方法を着想した。

基本概念図を図 1-1 に示す。ガウスビームを光軸からわずかに外してファイバー増幅器へ入射し、ファイバーの LP<sub>11</sub> モードを選択的に励振する。励振された LP<sub>11</sub> モードは互いに直交し同位相である 2 つの LP<sub>11</sub> モードに展開できる。ここでファイバーを加圧することで応力性複屈折をファイバーに誘起する。直交する 2 つの LP<sub>11</sub> モード間の位相差が  $\pi/2$  もしくは  $-\pi/2$  となるように加圧を調整することで、LP<sub>11</sub> モードをラゲール・ガウスビームに変換できる。

ファイバー増幅器に入射するマスターレーザーには Nd:YVO<sub>4</sub> レーザー(CW モードロック、もしくは、Q スイッチ、波長 1064nm)を使用した。増幅器には長さ 4m、コア径 30 $\mu$ m、クラッド径 400 $\mu$ m の Yb ドープダブルクラッドファイバーを使用し、975nm 半導体レーザー(ファイバー径 200 $\mu$ m、最大出力 75W)で励起した。実験配置図を図 1-2 に示す。

マスターレーザーがピコ秒レーザー(繰返し周波数 100MHz)の場合、最大出力 40W が得られ、この時の光-光変換効率は 50%に達した(図 1-3)。出力光のパルス幅~11ps であった。励起半導体レーザーの最大パワー、ファイバー内で発生する熱効果、ファイバー端面における光電場による破損などが、レーザー出力を制限しているが、現状での限界性能が実現できた。

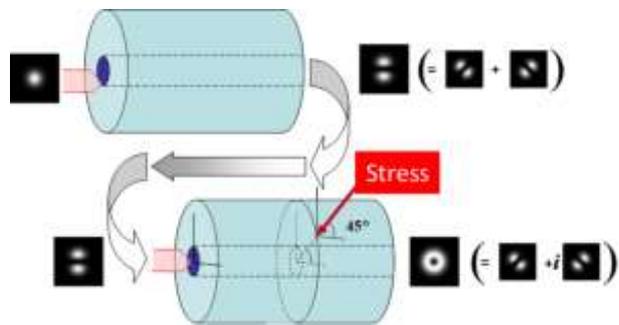


図 1-1 モード変換の基本概念図。

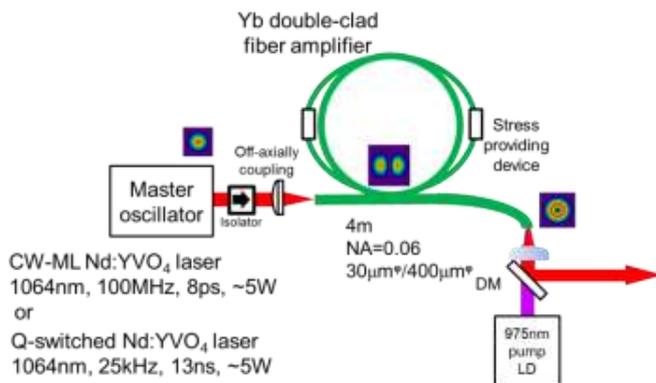


図 1-2 実験配置図。

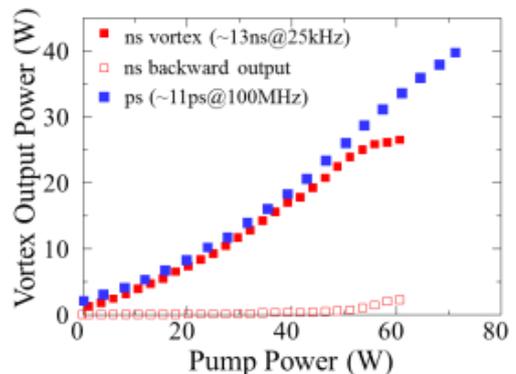


図 1-3 実験結果(レーザーの入出力特性)。

マスターレーザーが Q スイッチレーザーの場合、レーザー出力が 25W (パルスエネルギー 1mJ) を

超えると飽和し始める。この出力飽和は誘導ブリルアン散乱に起因する後方散乱光による。出力光はラゲール・ガウスビーム特有のドーナツ型空間強度分布を示す(図 1-4)。発生したラゲール・ガウスビームとその波面の一部を切り出し作った球面波との干渉によって得られる干渉縞が螺旋を描くことから波面中央に位相特異点があることが確認できる。さらに、螺旋波面の向きはファイバーへの加圧を調整することで反転できる。

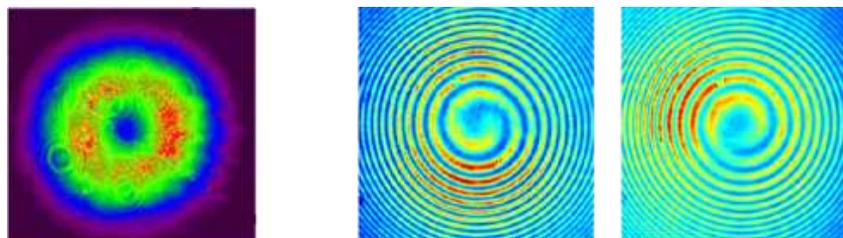


図 1-4 (a) 出力光の空間強度分布。(b) 出力光波面(時計周り) (c) 出力光波面(反時計周り)

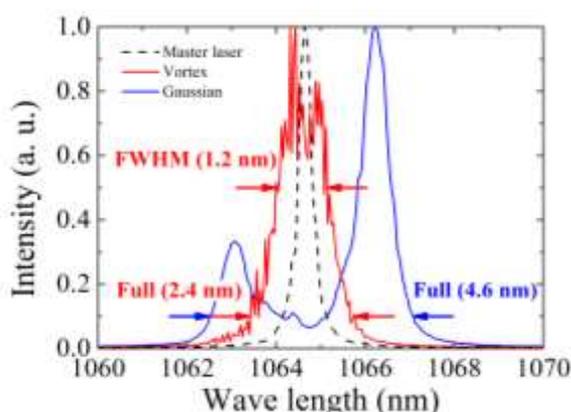


図 1-5 増幅されたラゲール・ガウスビームのスペクトル線幅。

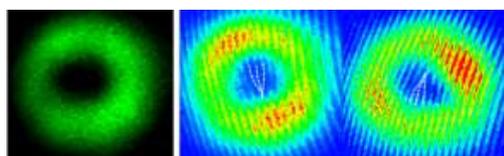


図 1-6 第二高調波の空間強度分布と波面。

第二高調波の位相特異点が空間分離してしまう。この問題を解決するため、非臨界位相整合(ウォークオフが現れない)可能でかつ光損傷しきい値の高い  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  結晶を用いた。その結果、第二高調波発生に際してトポジカル光波のトポジカルチャージが2倍になることを実験的に明らかにした(図 1-5)。また、変換効率 31%(基本波 24W に対して第二高調波 7.7W)を達成した(図 1-6)。

紫外域では空間変調器をはじめ高効率な位相変調素子は数少ない。また、非臨界位相整合可能な非線形光学結晶(研究段階の結晶はいくつか存在するが)は紫外域では未だ現存しない。そこで、紫外でトポジカル光波を発生するために、結晶主軸を反転させた $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO)結晶をカスケードに配置する手法を考案した。ナノ秒パルスレーザー(1064nm、20ns、PRF50Hz)の第二高調波を螺旋位相板でラゲール・ガウスビームへ変換し、開発した主軸反転 BBO デバイス(厚さ 0.5mm)の 4 枚の BBO 結晶を主軸反転させて常温接合さ

ファイバーによるレーザー増幅では、強い光強度による自己位相変調が現れることが知られている。ファイバー中でのモードフィールド径がガウスビームより大きなラゲール・ガウスビームは自己位相変調を受けにくく、スペクトル線幅は増幅後もほとんど変化しないことがわかった(図 1-4)。この結果は、ガウスビームに比べラゲール・ガウスビームの方が、ファイバーの光損傷なく高出力化できること、第二高調波発生をはじめとする非線形波長変換(非線形光学結晶の位相整合許容波長幅は一般に狭い)に有利であること、を意味する。そこで、金属、半導体、誘電体などの材料が強い吸収を示す可視・紫外域でラゲール・ガウスビームを発生するため、第二高調波発生を行った。第二高調波発生において最も一般的な角度位相整合法を用いると第二高調波が結晶の複屈折性によってウォークオフして、

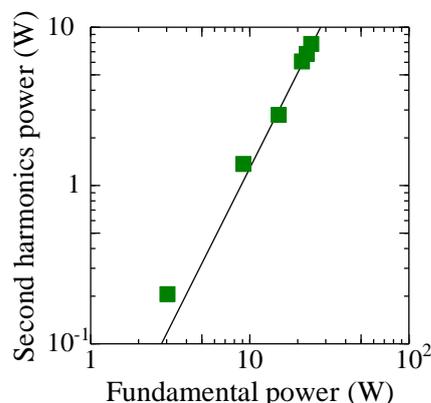


図 1-7 第二高調波のレーザー出力。

せたデバイス)へ入射した。その結果、266nm の紫外域で変換効率 13.7%の紫外ラゲール・ガウス

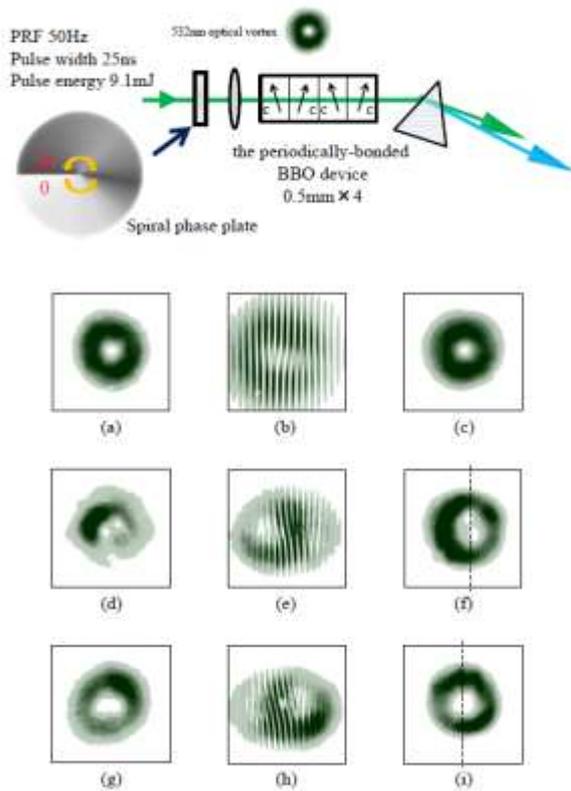


図 1-8 実験配置図と紫外トポロ。(g)-(i)主軸反転 BBO デバイスを用いた場合の紫外光。

ビームの発生に成功した。位相特異点の空間分離はほとんど無視できる(図 1-8)。

これらの結果は固有モード展開による理論計算から求めた空間強度分布と空間伝播特性とよく整合する。

微細加工の標準波長である 355nm の紫外域で非臨界位相整合を可能にし高品位なトポロジカル光波を効率よく発生させるため、物材機構グループから周期分極反転ストイキオメトリック  $\text{LiTaO}_3$  (PPSLT) 結晶(結晶長 10mm、2 次位相整合)の提供(ナノ微細電極技術に立脚した分極反転技術で設計・作成)を受けた。

1 次ラゲールガウスモードの基本波とガウスモードの第二高調波の和周波光発生をピコ秒パルスあるいはナノ秒パルスレーザーで行った。ピコ秒・ナノ秒励起ともに変換効率は 1% 程度であるが、近視野、遠視野ともに良好な 1 次ラゲールガウスモードが得られた(図 1-9)。今後、より長いデバイスの提供を受けて高効率化を目指す。

励起半導体レーザーの高出力化、ファイバーの冷却、ファイバー端面のエンドキャップなどの手法を併用することでトポロジカル・ファイバーレーザーのさらなるパワースケーリング(100W)も可能である。

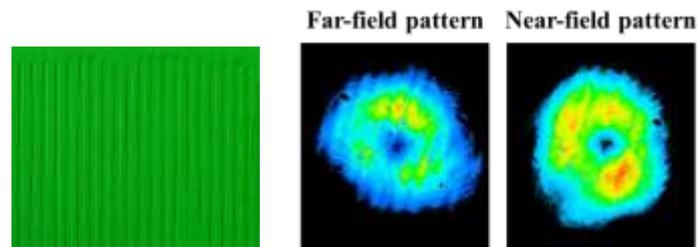


図 1-9 開発した PPSLT(左)と発生した 355nm トポロジカル光波の強度分布(右)。デバイス周期  $4.4\mu\text{m}$ 、厚さ  $1.0\text{mm}$ 、長さ  $10\text{mm}$ 。

この他、高出力トポロジカル光波発生のため高出力レーザー技術として非線形モードロックピコ秒レーザー発振器の開発(M. J. Damzen 教授(Imperial College London, UK)との共同研究, 研究論文 7)、高品位高出力ピコ秒レーザーの高効率化(研究論文 4, 11, 35)を並行して行った。

### 3. 2 「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(北大グループと連携。) 研究実施内容及び成果(研究論文 2, 10, 19, 26, 28, 36)

金属、半導体、誘電体、有機高分子などの様々な材料をアブレーションするには、材料のプラズマ周波数や分子間結合に対応した広い波長域で高効率にトポロジカル光波を発生させる必要がある。特に、分子の振動準位や回転準位の固有周波数に相当する中赤外~テラヘルツ域( $2\text{-}30\mu\text{m}$ )の光源は、出力、波長、時間幅以外の光波パラメータはほとんど計測すらされていない光波の未開拓領域である。この波長領域でトポロジカル光波を発生することに挑戦した。

励起光に1 $\mu\text{m}$ トポロジカル光波を用いた光パラメトリック発振器から2 $\mu\text{m}$ 帯トポロジカル光波を発生(シグナル光とアイドラー光の2波長発生)させて、さらに、差周波光発生により6-18 $\mu\text{m}$ 帯のトポロジカル光波を発生させた。

第二高調波発生の場合、基本波のトポロジカルチャージはそのまま加算されて、波長変換後の光波のトポロジカルチャージは2倍になる。例えば、基本波が $m=1$ のチャージを持つ場合、第二高調波のチャージは $m=2$ となる。これに対して、励起光の1光子がシグナル光、アイドラー光の2つの光子に分割されなければならない光パラメトリック過程の場合、励起光のトポロジカルチャージがシグナル光、アイドラー光にどのように分配されるのかは自明ではない。

QスイッチNd:YAGレーザー(波長1064nm、パルス幅20ns、PRF 50Hz)を螺旋位相板によって $m=1$ のトポロジカルチャージを持つラゲール・ガウスビームに変換し、光パラメトリック発振器の励起光として使った。非線形光学結晶にはタイプIIの位相整合が可能なKTP結晶(結晶長30mm)、2枚の凹面鏡(出力鏡R100mm、入力鏡2000mm)を用いた共振器(共振器長50mm)によって、2 $\mu\text{m}$ 波長のシグナル光、アイドラー光を発生させた。KTP結晶の角度を制御することでシグナル光の波長は同調できるが、より広帯域な波長同調を可能にするために、光軸を反転させたKTPを2個共振器内に配置した。この共振器では、アイドラー光の幾何学的ウォークオフを補償できるため、シグナル光とアイドラー光はコリニアに発振する(図2-1)。

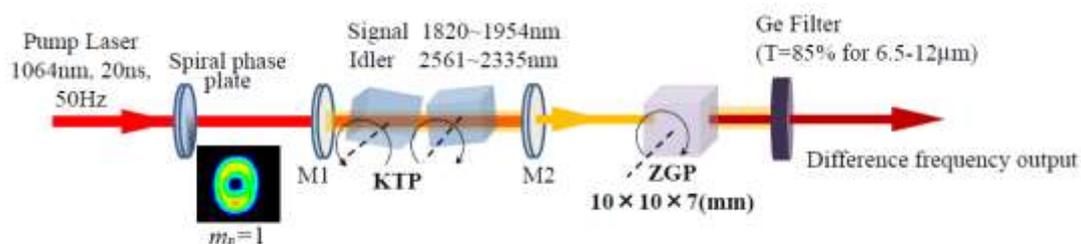


図2-1 中赤外波長可変トポロジカル光波の実験配置図。

この時、励起光(常光線)のトポロジカルチャージはシグナル光(常光線)へそのまま転写されて、アイドラー光(異常光線)のトポロジカルチャージは常に0になることが分かった。異常光線であるアイドラー光の波面はKTP結晶のウォークオフ効果を受け、2個のKTP結晶を用いても補償できない。そのため、トポロジカル光波の位相特異点は共振器内を周回中に空間分離するため、共振器の固有モードとなりえない。そのため、シグナル光のみがトポロジカル光波として発振する。

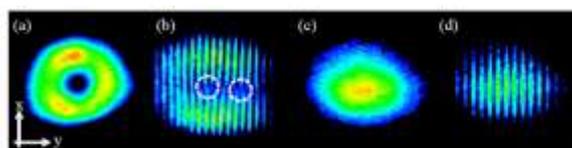


図2-2 (a), (b) シグナル光の強度分布と波面。(c), (d) アイドラー光の強度分布と波面。

励起光のトポロジカルチャージが $m=1$ であり、かつ、シグナル光(1949 nm)、アイドラー光(2339 nm)の最大エネルギーは3.5mJ、2.5mJ(励起光エネルギーは34mJ)を観測した。実験結果を図2-2、2-3に示す。

この結果を踏まえ、ZnGeP<sub>2</sub>(ZGP)結晶によって差周波光発生を行い、6-12 $\mu\text{m}$ の中赤外波長域でトポロジカル光波を発生させた。差周波光発生による12 $\mu\text{m}$ 帯トポロジカル光波の発生は世界初である。これによって、当初の目的である中赤外~THz帯でのトポロジカル光波発生を達成した。

差周波光はトポロジカル光波特有のドーナツ型強度分布を示す。また、パルスエネルギー

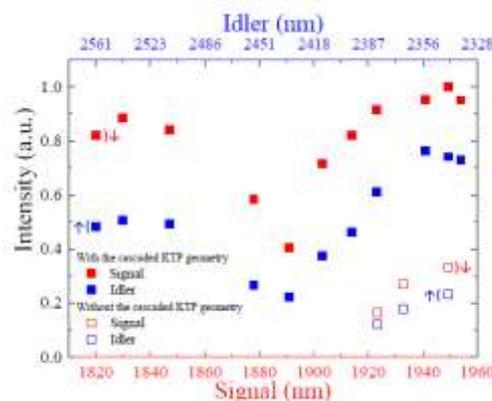


図2-3 シグナル光、アイドラー光の同調曲線。比較のため共振器内のKTPが1個の場合もプロットしてある。エネルギーが低く波長可変範囲も狭い。

ギーは  $100\mu\text{J}$  を超え、最大  $390\mu\text{J}$  (波長  $6.5\mu\text{m}$ ) であった。このパルスエネルギーは分子分光やアブレーション加工を行うに十分なエネルギーレベルである。また、差周波光のトポロジカルチャージの符号反転も可能である(図 2-4)。

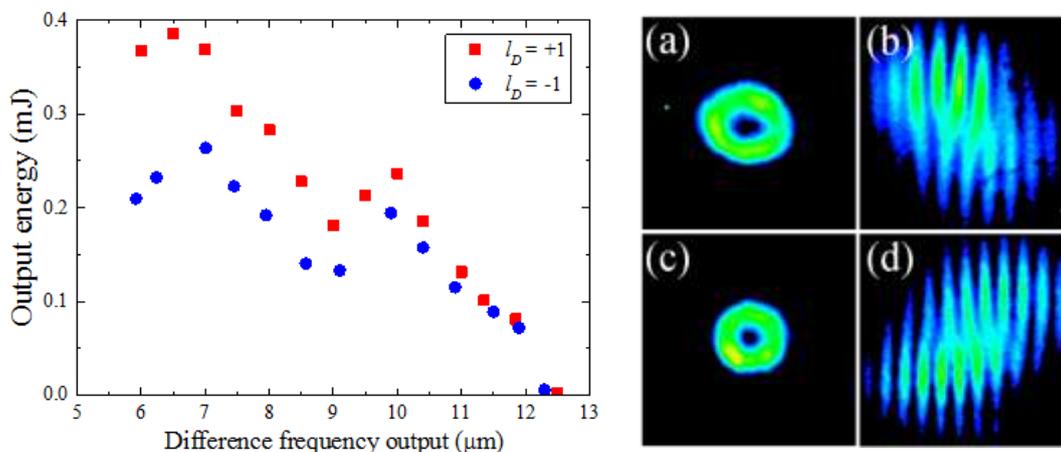


図 2-4 中赤外トポロジカル光波の同調曲線。トポロジカルチャージの符号制御も可能。右図は  $10\mu\text{m}$  トポロジカル光波の強度分布と波面。(a), (b) トポロジカルチャージ+1、(c), (d) トポロジカルチャージ-1。

非線形結晶に  $\text{AgGaSe}_2$  を用いることで、すでに  $18\mu\text{m}$  ( $17\text{THz}$ ) 帯トポロジカル光波の発生にも成功した(図 2.5)。

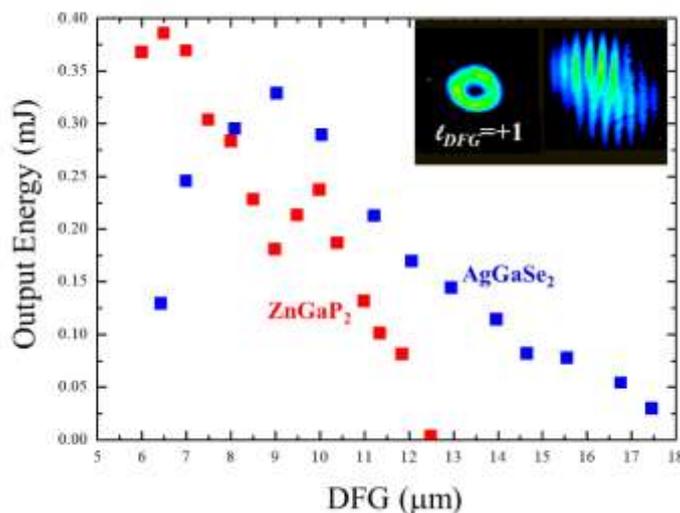


図 2-5  $\text{AgGaSe}_2$  を用いた中赤外トポロジカル光波の同調曲線。

上述したように励起光の 1 光子がシグナル光、アイドラー光の 2 つの光子に分割されなければならない光パラメトリック過程の場合、励起光のトポロジカルチャージがシグナル光、アイドラー光にどのように分配されるのかは自明ではない。したがって、常に、量子数であるトポロジカルチャージが励起光からシグナル光へそのまま転写されるわけではない。共振器を構成している共振器ミラーを凹面鏡から平行平面鏡に変更した時、励起光のトポロジカルチャージはシグナル光、アイドラー光に均等分割され、非整数のトポロジカルチャージを持つスプリットリングに近い開環状の強度分布を持つシグナル光が発振することを発見した(図 2-6)。

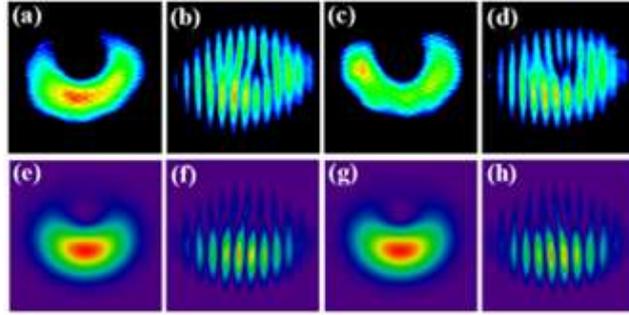


図 2-6 非整数トポロジカル光波(シグナル光)。(上)実験結果と(下)計算結果。開環状強度分布を持つ。また、励起光のトポロジカルチャージの符号を反転させても空間強度分布は変わらない((a), (b))が、トポロジカルチャージの符号は反転することが干渉縞画像からわかる((b)と(d)では符号が反転している)。計算された干渉縞との比較からトポロジカルチャージは $\sim 0.5$ であると判断できる。

このシグナル光は空間伝播しても強度分布を変えず、あたかも固有モードのように空間伝播する。また、励起光のトポロジカルチャージの符号を反転させると、シグナル光のトポロジカルチャージの符号も反転する。パルスエネルギーはトポロジカルチャージの符号によらず、1mJであった。このような非整数のトポロジカルチャージは  $m=0, m=1$  のチャージを持つ光のコヒーレントな重なり状態とみなすことができ、共振器が次数の異なる空間モードのコヒーレント結合器の役割を果たしていると考えられる。平行平面共振器では、共振器内を伝播中する異なるモード間のグイ位相分散が 0 となるため、このような非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レーザー発振するものと考えられるが、メカニズムの全貌は未だ完全には理解できていない。また、非整数のトポロジカ

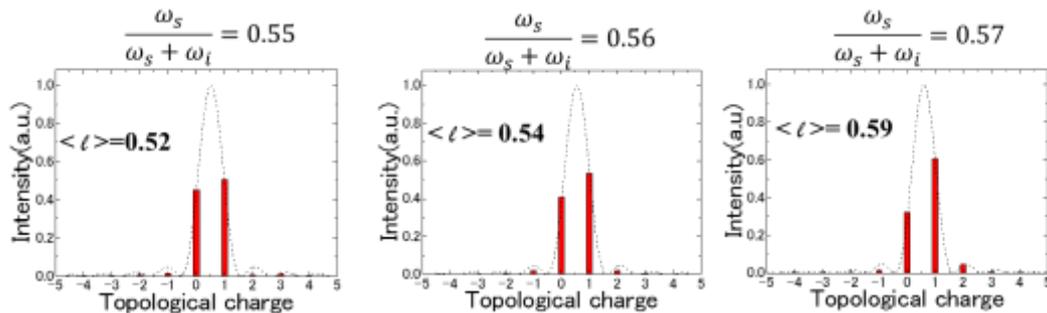


図 2-7 非整数トポロジカル光波の実効的なトポロジカルチャージ。シグナル光の周波数増加に対応してトポロジカルチャージも大きくなる。

ルチャージを計測する手段として空間変調器を用いた軌道角運動量分解が知られているが、測定誤差が大きく、非整数の次数を定量的に評価することができない。そこで、北大グループと連携して開発したフーリエ干渉計測による電場回復に立脚した非整数トポロジカルチャージの計測法(電場回復軌道角運動量スペクトル測定法)を用いて実効的なトポロジカルチャージを計測した。その結果、シグナル光・アイドラー光の光子エネルギー比に従って、トポロジカルチャージが分配されることを発見した(図 2-7)(論文準備中)。そのメカニズムを解析するため、現在、実験を継続している。非整数トポロジカル光波の発振はレーザーとして興味深いだけではなく、そのユニークな強度分布はメタマテリアルのためのスプリットリング共振器の加工に有効かもしれない。

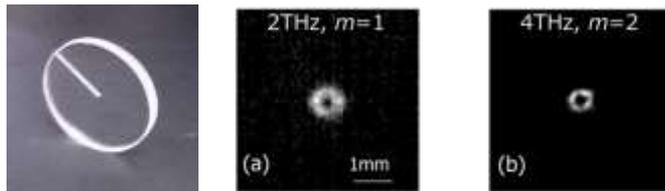


図 2-8 テラヘルツ螺旋位相板(Tsurupica 製)と(a)2THz および(b)4THz テラヘルツ・トポロジカル光波。

この他、誘導ラマン散乱過程において

基本波のトポロジカルチャージがストークス光へとそのまま転写されることを実験的に検証し、その結果をもとに高効率にトポロジカル光波を2波長同時する小型固体レーザー(基本波(1.06 μm)、ストークス光(1.18 μm)出力ともに CW で 400mW)を開発した。さらに第二高調波発生、和周波光発生による可視域で多波長発振するトポロジカル光源も実現した。この研究は H. M. Pask 教授、A. J. Lee 博士との国際共同研究である(研究論文 8, 14, 24)。開発したレーザーは超解像顕微鏡などに応用できる。

さらに高出力ピコ秒テラヘルツ波発生、テラヘルツ波帯(2THz)螺旋位相板(テラヘルツ用光学材料 Tsurupica を使用)の試作とテラヘルツ・ラゲール・ガウスビームの発生(図 2-8)、さらには、テラヘルツ波帯エバネッセント分光(研究論文 15, 20, 33, 34, 37)でも成果を得た。

### 3.3 トポロジカル光波による物質のキラル構造制御 (北大グループと連携。)

#### 研究実施内容及び成果(研究論文 5, 13, 21, 27)

「全角運動量」を有するトポロジカル光波を用いれば、光を照射するだけのトップダウン・プロセスで金属表面から突き出す針状ナノ構造体ができる。この現象のメカニズムを解明するために、レーザー誘起プラズマの時空間ダイナミクスを定量計測することを当初の研究目的とした。

もし、「全角運動量」が針状ナノ構造体の形成に寄与しているのであれば、「全角運動量」の符号(ヘリシティ)を反転させることで構造の違いが現れるはずだという推論の下に実験を行った。また、針状ナノ構造体の構造を高空間分解能で観測するため、SEM を活用した。さらに、ターゲットに照射するパルスエネルギーをアブレーションしきい値近くまで低減することで、アブレーション時に発生する荷電粒子による光遮蔽効果を除去した。その結果、針状ナノ構造体が螺旋構造を有すること、螺旋の向きがトポロジカルチャージの符号で決まること、すなわち、針状ナノ構造体にはキラリティーがある(キラル金属ナノニードル)ことを見出した。これは「トポロジカル光波の「全角運動量」が、ナノ空間の物質に力学的に作用し、物質を螺旋構造体へと変形させる」という世界初の発見である。

具体的な実験を簡単に説明する。螺旋位相板を用いて Q スイッチ Nd:YAG レーザー(波長 1064nm、パルス幅 20ns) をガウスビームから 1 次もしくは 2 次のラゲール・ガウスビームへ変換し、1/4 波長板を用いて円偏光に変換する。また、螺旋位相板や 1/4 波長板を反転させることで、「全角運動量」を  $-3\hbar \sim +3\hbar$  ( $j = -3 \sim +3$ ) の範囲で変調する。このように「全角運動量」を制御された光渦パルスレーザーを対物レンズで金属(タンタル)ターゲット上に集光した。金属面でのレーザーの集光径は 65μm、レーザーパルスエネルギーは 0.1~1mJ (アブレーションしきい値の 10 倍以下) となるように調整し、1 箇所にて 4 パルスを重ねて照射した。実験は室温でかつ大気雰囲気中で行った。図 3-1 は直線偏光のラゲール・ガウスビーム ( $j=\pm 1$  ( $m=\pm 1, s=0$ )) によって加工されたターゲット表面の SEM 画像である。加工痕中央部には、小さな針状の構造体が見える。一方、同じ  $j=+1$  でも円偏光のガウスビームによって加工された加工痕には、このような構造体は何も形成されない。すなわち、光の軌道角運動量が針状の構造体の形成には必要であることが分かった。

さらに、針状の構造体は、底から頂点に向かって螺旋を巻いていて、螺旋の向きは  $m$  の符号によって決まる ( $m$  の符号を反転すると螺旋の向きも反転する。)。また、 $j$  の大きさを大きくしていくと螺旋の単位高さ当たりの巻数(ここでは螺旋周波数と定義している)が増える(図 3-2)。

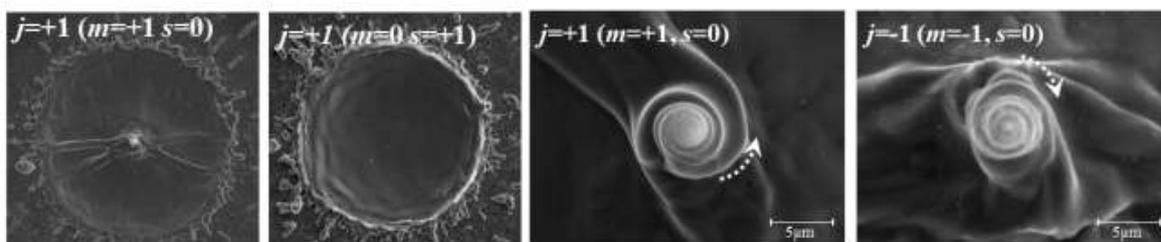


図 3-1 トポロジカル光波による金属ターゲット加工痕の SEM 画像。

これらのことから、光の軌道角運動量が金属を螺旋の針(キラル金属ナノニードル)に変形すること、

スピン角運動量(円偏光)だけでは螺旋構造体はできないこと、螺旋構造体の螺旋の巻数は「全角運動量」(軌道角運動量の大きさによらず「全角運動量」が同じであれば同じ螺旋周波数のキラル金属ナノニードルができる)で決まること、が分かった(図 3-3)。言い換えると「全角運動量」が同じトポロジカル光波は縮退している。

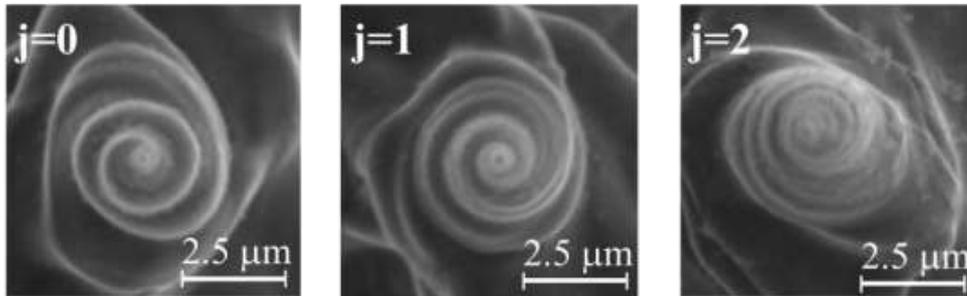


図 3-2 異なる  $j$  に対応するキラル金属ナノニードルの SEM 画像。

$m$  次のラゲール・ガウスビームを仮定して「全角運動量」空間密度  $j_{m,s}(r)$  を計算すると

$$j_{m,s}(r) \propto \frac{1}{|m|!} \left( m - |m|s + s \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^2 \right) \left( \frac{\sqrt{2}r}{\omega_0} \right)^{2|m|} \exp \left( -\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right)$$

が得られる。この結果から、

$$j_{m,s} = j_{m \pm 1, \mp 1} \quad (|m| \geq 2)$$

$$j_{m,s} = -j_{-m,-s}$$

という関係式が解析的に求められ、実験結果を定性的に説明できることが分かった。

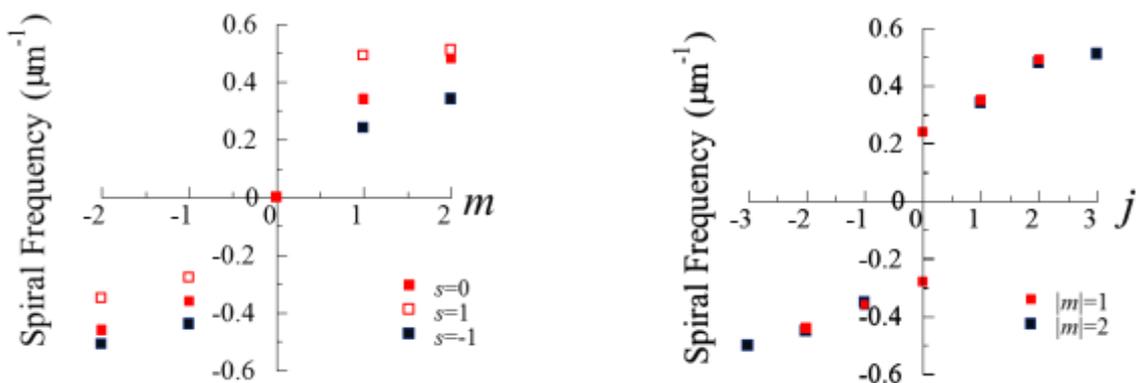


図 3-3 キラル金属ナノニードルの螺旋周波数と軌道角運動量  $m$ 、全角運動量  $j$  との関係。

また、対物レンズの NA を大きくしていくとキラル金属ナノニードルの先端直径は反比例して小さくなる。現在までにできたキラル金属ナノニードルの最短直径は 36nm である。照射するパルス数を増やしていくとキラル金属ナノニードルの高さは徐々に高くなり、8 パルスでほぼ飽和する。キラル金属ナノニードルと金属基板間の抵抗値は 50mΩ 以下と見積もれ、基板の物性値とほとんど変わらない金属特性を示す。

さらに、金属に照射するトポロジカル光波のパルス幅をナノ秒からフェムト秒へと短くすることで現象の起こるタイムスケールを検証した。その結果、金属が螺旋構造体へ変形するのに必要な光パルス幅は最短数 10 ピコ秒であることが分かった(図 3-4)。

これらの実験結果から、キラル金属ナノニードルができるメカニズムとして以下のようなモデルが推定できる。まず、トポロジカル光波が照射された金属は、トポロジカル光波を吸収し溶解する(ピコ秒のタイムスケール)。溶解した金属はトポロジカル光波から「全角運動量」を受取り、加工痕の周回方向に回転運動しはじめる(ピコ秒のタイムスケール)。さらに、金属は回転運動しながら強い前方散乱を受け、光場から光軸付近の暗点(位相特異点)近傍へ逃げようとする(ピコ秒からナノ秒のタイムスケール)。その後、回転運動が減衰するとともに温度が急速に下がり固化し、キラル金属ナノニードルができる。

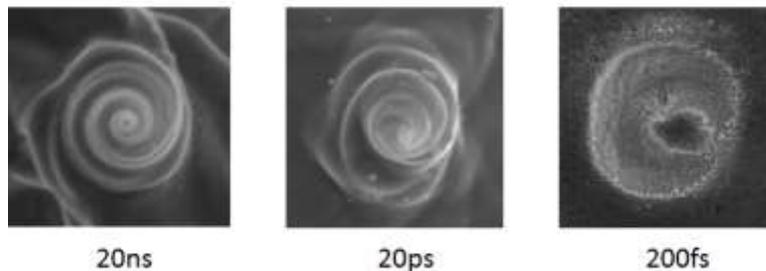


図 3-4 トポロジカル光波のパルス幅を変えた時のナノ構造体の SEM 画像。螺旋構造ができるには数 10 ピコ秒のパルス幅が必要であることがわかる。

トポロジカル光波を照射した金属がキラルナノ構造体へと変形する現象は溶解した金属(金属クラスター)とトポロジカル光波との電磁気学的相互作用によって金属クラスターに「全角運動量」が力学的に作用することで起こるため、本質的に材料は問わない。そこで、シリコンフォトニクスをはじめ光エレクトロニクスにおける基盤的な材料であり誘電体的特性を示すシリコンを対象にしてトポロジカル光波を照射した。タンタルに比べて融点・沸点が低いシリコンでは、わずか 0.05mJ 程度のエネルギーの単一光パルスで照射するだけでキラル構造体ができる(研究論文 40)。また、螺旋構造体のキラルティーもタンタル同様、トポロジカル光波のヘリシティを反転させることで制御できる。タンタルに比べ熱伝導の高いシリコンでは、HAZ(熱拡散領域)の影響が大きく現れる。このため、「全角運動量」が大きくなっても螺旋周波数の増加はタンタルほど顕著には現れない。キラル構造体の高さも 5 $\mu\text{m}$  を超えない。先端直径は約 100nm であった。さらに、プラモニクス材料である銅も同様のキラル構造体に変形することが確認できた(図 3-5)。

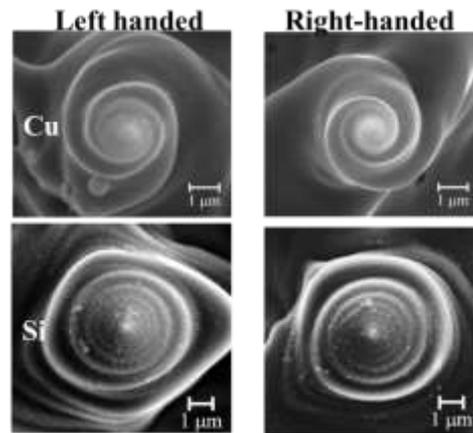


図 3-5 銅とシリコンのキラル構造体。

アゾポリマー薄膜はシス-トランス光異性化反応に伴う光誘起質量移動を示し、表面レリーフを形成する材料として知られる。アゾポリマーには金属・半導体ナノ微粒子、有機色素・ナノ磁性体などを添加できるため、これまでにアゾポリマーの表面レリーフを用いた光導波路ホログラム、導波路レーザー、光集積回路などの機能性デバイスが提案されている。一般に、アゾポリマーにおける質量移動は異方性流動性と光勾配力を介して光電場の方向に沿って起こる。そのため、直線偏光のラゲール・ガウスビームや円偏光やベクトルビームを用いても螺旋状の表面レリーフは

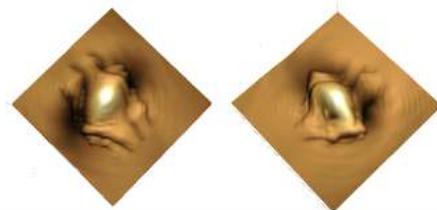


図 3-6 直線偏光のラゲール・ガウスビーム(トポロジカルチャージの符号は(左)プラス(時計周り)、(右)マイナス(反時計周り)である)をアゾポリマーに照射した場合にできる表面レリーフ。レリーフはわずかに回転しているように見えるが質量移動は主として偏光方向(左右)に沿って起こっている。

形成できない(図 3-6)。

「全角運動量」をもつトポジカル光波をアゾポリマー薄膜に照射すると、従来の常識では予想できなかった巻貝状の螺旋構造をもつ新奇表面レリーフ(キラル表面レリーフ)が形成できることを世界で初めて実証した。

実験について簡単に説明する。波長 532 nm の Nd:YVO<sub>4</sub> レーザー光を螺旋位相板と 1/4 波長板を用いて軌道角運動量とスピン角運動量が右回り(「全角運動量」 $j=2$ )のトポジカル光波(円偏光ラゲール・ガウスビーム)に変換した。レーザーを円偏光にすることでアゾポリマーの強い偏光依存性を回避できる。また、螺旋位相板と 1/4 波長板の向きを変えることにより、「全角運動量」の符号を  $j=+2$  から  $j=-2$  に変更できる。レーザー光を対物レンズ(NA 0.65)によりターゲット表面に集光し、レリーフ形成を行った。集光されたビームのスポット径は  $\phi 5\mu\text{m}$ 、光強度は  $\sim 3\text{kW}/\text{cm}^2$ 、レーザー照射時間は 12 秒であった。

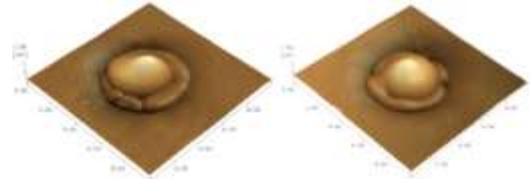


図 3-7 アゾポリマーの巻貝状のキラル表面レリーフ(左は時計回り、右は反時計回り)。

図 3-7 に形成された表面レリーフの AFM 像を示す。巻貝のようなキラル表面レリーフ(直径 $\sim 6.0\mu\text{m}$ 、高さ $\sim 1.8\mu\text{m}$ )が形成されていることが分かる。「全角運動量」の符号を反転させることで表面レリーフのキラリティーは反転する。この現象のメカニズムは以下のように理解できる。光異性化反応を介してシス化し、軟化したアゾポリマーが光渦の「全角運動量」を受け取り、時計回り(あるいは反時計回り)に回転する。異方性流動性と光勾配力を介して、アゾポリマーはトポジカル光波の暗点へ移動し、トランス体へ戻ると同時に硬化する。結果として巻貝状のキラル表面レリーフが形成できる。

### 3. 4 トポジカル光波が創る輻射力の定式化と螺旋構造体における近接場光の解析

(茨田(宇都宮大)、北畑(千葉大)、大野(東北大)との共同研究による成果)

光波の偏光状態を一般化して、トポジカル光波が創るビーム断面内輻射力  $\mathbf{F}(r, \phi, z)$  を円筒座標系において定式化した。

$$\mathbf{F}(r, \phi, z) = \frac{\varepsilon_0 \chi_r}{4} \left\{ \frac{\sqrt{1-\sigma^2}}{2} \frac{\partial A^2}{\partial r} (-\cos\phi \mathbf{e}_x + \sin\phi \mathbf{e}_y) + \left( \frac{1}{2} \frac{\partial A^2}{\partial r} - m\sigma \frac{A^2}{r} \right) \mathbf{e}_r \right\} + \frac{\varepsilon_0 \chi_i}{4} \left\{ m\sqrt{1-\sigma^2} \frac{A^2}{r} (\sin\phi \mathbf{e}_x + \cos\phi \mathbf{e}_y) + \left( m \frac{A^2}{r} - \frac{\sigma}{2} \frac{\partial A^2}{\partial r} \right) \mathbf{e}_\phi + 2 \frac{\partial \psi}{\partial z} A^2 \mathbf{e}_z \right\}$$

$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$  は偏光ベクトルである。この式に従うと、動径方向の輻射力と周回方向の輻射力がそれぞれ物質の複素電気感受率の実部  $\chi_r$ 、虚部  $\chi_i$  に依存することが分かる。この他、トポジカル光波が創る前方散乱力が物質に加わる。

パルスのトポジカル光波を照射した場合、相変化を伴う過渡的現象となるため、解析は容易ではない。そこで、アゾポリマーの表面レリーフ形成に対して上式を適用した。

アゾポリマーの複素電気感受率は 532nm に対して  $2+2i$  とした。その結果、キラルな表面レリーフが形成されるには、軌道角運動量の大きさを示すトポジカルチャージ  $m$  とスピン角運動量の大きさを示す  $s$  が同符号でなければならない(互いに異符号である場合や直線偏光の場合、キラルな表面レリーフは決して形成されない)ことが導かれた。また、これまでアゾポリマーにおける質量移動は偏光方向に現れる勾配力によって起こると考えられていたが、「全角運動量」による面内輻射力は偏光に対して垂直方向に働く。前方散乱力による等価的な中心力が強くアゾポリマーに働くため、結果として偏光方向に質量移動が起こることが分かった。さらに、同じ  $j$  を持つトポジカル光波であっても径方向輻射力の影響で縮退しない。実際、記録されるレリーフは完全に異なる(図 3-8, 9) (研究論文 41)。

これに対して、トポジカル光波パルスが消滅後にキラルな構造ができるタンタルやシリコンの場合、融解のための光吸収(電気感受率の虚部に依存)によって光輻射力を受取る。その結果、同じ  $j$  を持つトポジカル光波は同じ構造を創る(縮退する)ことが分かる。

今後は、キラルナノ構造体ができるまでのダイナミクスを再現するための数値シミュレーションが今後の研究課題である。

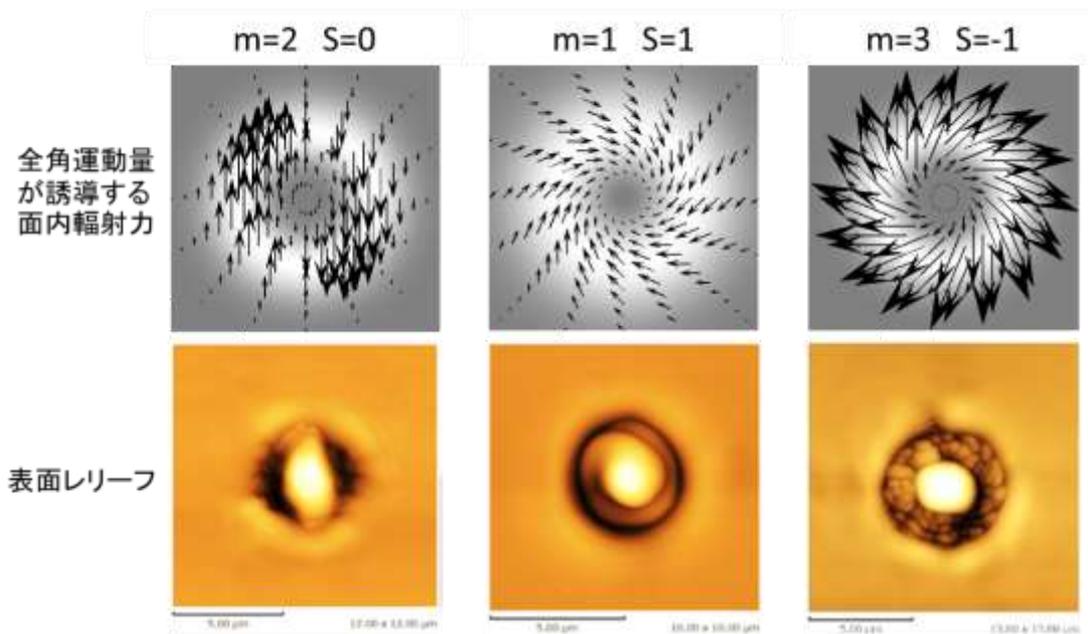


図 3-8 全角運動量が誘導する輻射力と分布と形成される表面レリーフ。J=3 であっても異なる表面レリーフが形成される。アゾポリマーの表面レリーフ形成では J に対するトポロジカル光波の縮退は解ける。

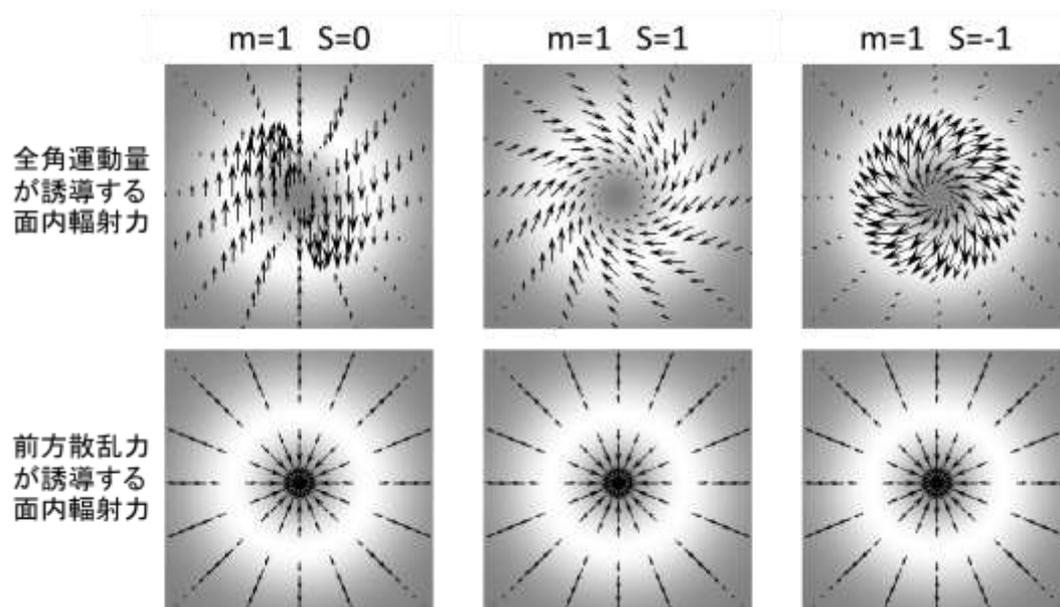


図 3-9 トポロジカル光波が物質に及ぼす輻射力の空間分布。 $m$  と  $s$  の符号が同符号の場合のみ、螺旋状の中心力が働く。逆符号の場合は前方散乱力が誘導する面内輻射力と全角運動量による動径方向の輻射力が打ち消しあいアゾポリマーは単に周回運動する。 $s=0$  の場合、偏光方向は  $x$  方向。全角運動量による面内輻射力は偏光に対して垂直方向に働くが、前方散乱力による中心力が強くアゾポリマーに働くため、結果として偏光方向に質量移動が起こる。

また、右回りキラル表面レリーフを対数螺旋関数で近似し、表面レリーフ近傍にできる近接場の電場分布、円偏光二色性を FDTD 法で数値解析した。キラルな表面レリーフの外周に沿って近接場光の増強がみられる(図 3-10)。この時、周回方向に沿って近接場光が  $2\pi$  の位相シフトを有する渦であることが分かる。表面レリーフは顕著な円偏光二色性を示し、左回り円偏光に対して透過率が大きくなる。すなわち、近接場光増強が現れにくい。これらのことから、表面レリーフ近傍に分子集合体をはじめとするナノ微粒子が存在すると、ナノ微粒子は、その円偏光二色性に対応して表面レリーフ近傍の近接場光を吸収する。その結果、ナノ微粒子のキラリティー識別が可能になる。特に、共鳴周波数は螺旋の直径で決まるので表面レリーフ直径を大きくすると構造的な共鳴周波数は長波長側にシフトするため、分子構造に由来する円偏光二色性が計測できる。

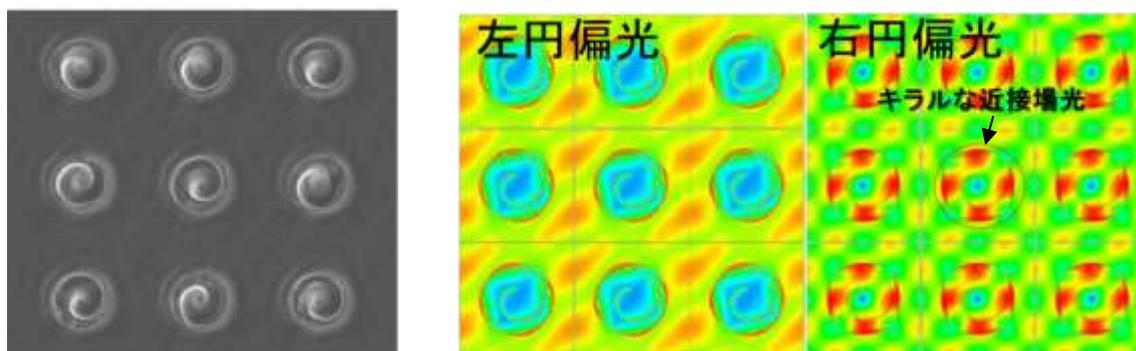


図 3-10 作成した右手系 2 次元キラル表面レリーフアレイ(左)。右円偏光を照射した場合のみ、その表面には周回方向に沿って位相が  $2\pi$  変化する近接場光(トポロジカル近接場光)が発生する。

### 3.5 新機性能デバイス応用のためのトポロジカル光波による単結晶性シリコンニードル創成(北大グループと連携。)

研究実施内容及び成果(研究論文 42)

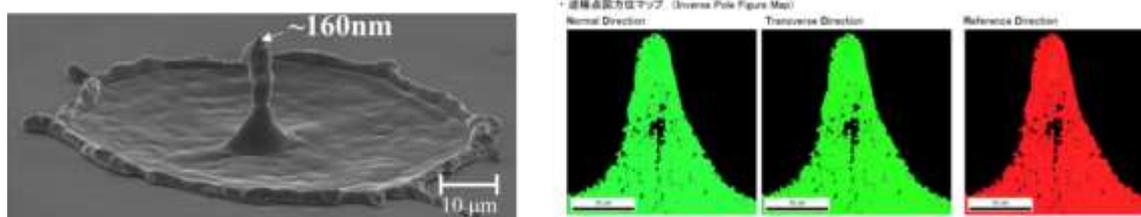


図 4-1 ピコ秒パルス・トポロジカル光波を単結晶シリコンに照射した場合にできる単結晶性シリコンニードル。高さは  $\sim 15\mu\text{m}$ 、先端曲率半径は  $\sim 160\text{nm}$ 。ニードル断面内のすべての領域で(101)の方位を有する。

シリコンフォトニクスをはじめ光エレクトロニクスにおける基盤的な材料であり誘電体的特性を示すシリコンを対象にしてトポロジカル光波を照射し、キラル構造体以外の構造の創成を狙った。具体的には、ターゲットに照射するパルスエネルギーをアブレーションしきい値より十分大きくするとともに、強い前方散乱力作用させるためパルス幅を  $\sim 20\text{ps}$  まで短くした。単一パルス照射によってできた構造体の SEM 画像を図 4-1 に示す。高さ  $15\mu\text{m}$ 、先端曲率半径  $\sim 160\text{nm}$  のニードルが形成されていることが分かる。また、パルス幅が熱拡散時間より短いため、デブリはほとんど現れない。

$\sim 10$  パルスを重ね打ちするとニードルの高さは  $40\mu\text{m}$ (先端曲率半径  $\sim 280\text{nm}$ )に達する(図 4-2)。

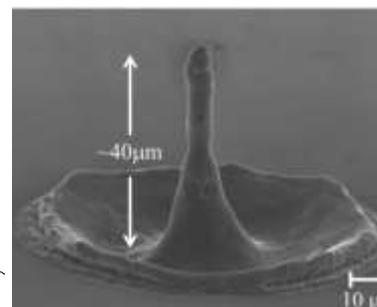


図 4-2 ピコ秒パルス・トポロジカル光波を 10 パルス重ねた打ちした時にできる単結晶シリコンニードル。高さは  $40\mu\text{m}$ 、先端曲率半径は  $\sim 280\text{nm}$ 。

ニードル内部にはわずかに熱効果による空孔があるものの、全域でシリコン基盤と同じ電子線回折像を示す完全な単結晶であった。すなわち、エピタキシャル成長によって結晶化していることが分かった。通常、エピタキシャル成長には緩やかな熱緩和が必要で最低でもマイクロ秒近い時間を要する。したがって、超短パルスレーザーによるアブレーション加工では多結晶化することが圧倒的に多い。なぜ単結晶性シリコンニードルができるのか明らかにするため、超高速カメラ( $5 \times 10^6$  フレーム/秒)を用いて現象を可視化した(図 4-3)。

トポジカル光波照射後、シリコンが溶融してトポジカル光波の輻射力を受取り、位相特異点に向かって質量移動する。その後、位相特異点部からシリコンが飛び出し、固化していく。余剰なシリコンは液滴 (あるいは微粒子) となって光の入射方向に向かって指向性良く直線的に飛翔する。その結果、シリコンニードルが完成する。この現象は $\sim 1\mu\text{s}$  のタイムスケールで起こるため、エピタキシャル成長が起こったと考えられる。一連の現象はすべてレーザーパルスが消失後に起こっている。すなわち、溶解したシリコンはトポジカル光波の輻射力を「記憶」して質量移動したことになる。トポジカル光波の「全角運動量」を大きくするとニードルが先鋭化することから、余剰なシリコンが液滴 (あるいは微粒子) として自転運動しながら飛翔していると予想される。現在は推論に過ぎないが、飛翔している液滴(あるいは微粒子)の運動をスペックル計測法などによって可視化することで現象を解明する。

このような単結晶性シリコンニードルは例えばコアシェル素子やバイオ MEMS などへ応用できる。また、優れた指向性を持つ液滴(あるいは微粒子)の飛翔運動は光の力学的効果であるため、本質的にはシリコンに限らずあらゆる物質で起こる。金属・磁性体・有機エレクトロニクス材料をトポジカル光波で融解・飛翔させて所望の位置に固定できればプリンタブル・エレクトロニクスへも応用できる。

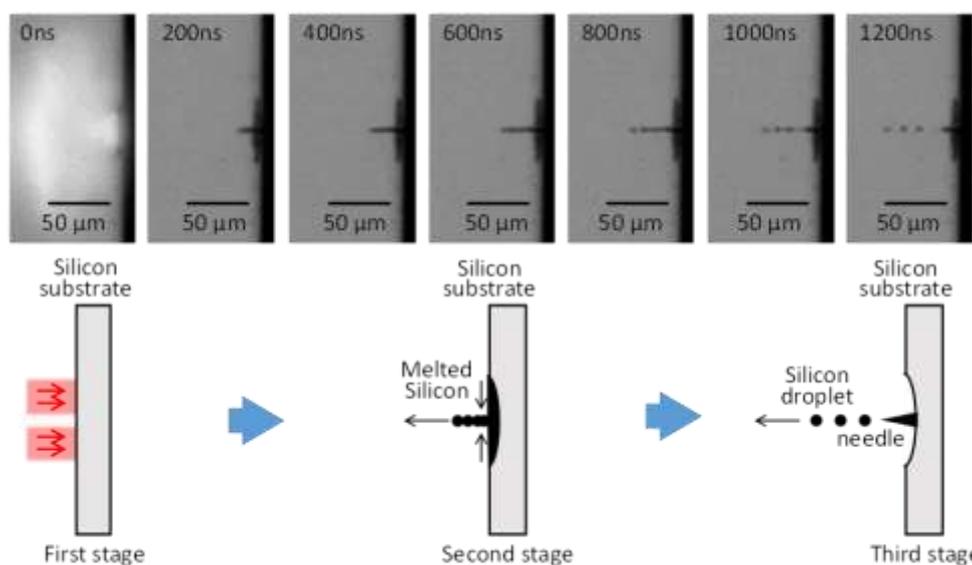


図 4-3 トポジカル光波照射によるシリコンニードル形成のダイナミクス。溶融したシリコンが位相特異点に集まり、ニードルとして成長する。余剰のシリコンが球形の液滴(微粒子)となり飛翔し、先端の先鋭なニードルが完成する。パルス照射後、 $\sim 1\mu\text{s}$  程度要する。

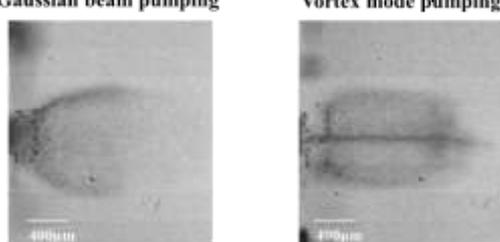


図 4-4 顔料系インクの飛翔運動。トポジカル光波を照射するとフィラメンテーションが起こる。フィラメンテーションが起こるまでの時間はトポジカル光波照射から約  $1\mu\text{s}$ 。

「北大」グループ

3.6 「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開発(千葉大グループへ技術移植。)

研究実施内容及び成果(研究論文 9, 16, 22)

フェムト秒時間域およびサイクル時間域において、光波の「全角運動量」が物質に及ぼすコヒーレント相互作用のメカニズムを解明・制御するために、超短パルス・トポロジカル光波を発生させる光源を開発した。特に、独自の方法により発生させた超広帯域トポロジカル光波を光パラメトリック増幅およびチャープ補償することにより、超短パルス・トポロジカル光波発生光源を開発した。トポロジカル光波はその位相や偏光特異性に関する研究に重きがおかれ、時間領域・周波数領域での位相の制御技術と距離があった。北大グループでは、トポロジカル光波発生技術と超短時間域ならびに超広帯域位相制御技術とを融合することにより、サイクル時間域における高出力な超短パルス・トポロジカル光波の発生を行った。その実験配置を図 6-1 に示す。

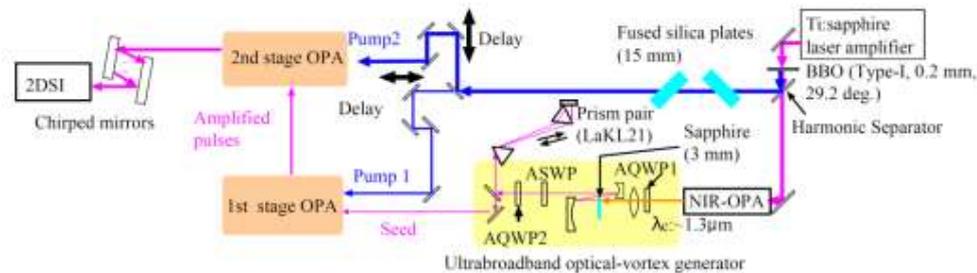


図 6-1 高出力な超短パルス・トポロジカル光波を発生させる実験系。発生したパルスのスペクトル位相は自作の 2 次元スペクトル干渉計(2DSI)により測定する。

チタニウムサファイアレーザー増幅器からの光パルス(パルス幅~25 fs, 中心波長 800 nm)を 2 つに分ける。一方は超広帯域連続光を発生させ、さらにトポロジカル光波である光渦に変換し、光パラメトリック増幅のシード光とする。他方は、第二高調波を発生させ、光パラメトリック増幅の励起光とする。2 段の光パラメトリック増幅とプリズムおよびチャープミラーによるチャープ補償を行う。この増幅過程において、すべての周波数成分が空間分散を受けることなくトポロジカルチャージ ( $m=1$ ) を保存していることを確認した(図 6-2)。自作の 2 次元スペクトル干渉計(2DSI)により増幅されたトポロジカル光波のスペクトル位相を測定した結果、波長帯域 650-950 nm、パルスエネルギー 56  $\mu$ J、パルス幅 5.9 fs (2.3 サイクル)の超広帯域超短パルス・トポロジカル光波の発生を確認した。対応する波長帯域から得られるフーリエ変換限界パルス(5.5 fs)ときわめて近く、世界で初めてサイクル域超短パルス・トポロジカル光波発生に成功した。

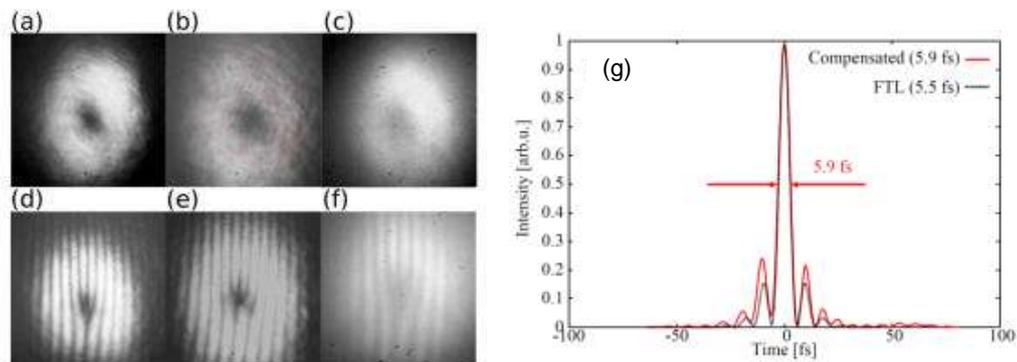


図 6-2 光パラメトリック増幅後のトポロジカル光波の(a)-(c)ビームプロファイルおよび(d)-(f)自己参照干渉像。(a),(d)は波長 650 nm、(b),(e)は波長 800 nm、(c),(f)は波長 950 nm で波長分解された成分である。(g) 発生させたパルス幅 5.9 fs (2.3 サイクル)の超広帯域超短パルス・トポロジカル光波(波長帯域 650-950 nm、パルスエネルギー 56  $\mu$ J)。

開発した上記の超短パルス・トポロジカル光波発生光源は数 100nm に渡る帯域を有し、高強度の増幅も可能である。その一方で、トポロジカル光波のトポロジカルチャージ  $m$  は軸対称波長板の構造に対応して一意的に決定される。そのため、異なる  $m$  を持つ光波を発生させるには、 $m$  に対応した軸対称波長板を物理的に交換することになり、場合によっては光パラメトリック増幅器の再調整も行わなければならない。このことは実際の応用研究において  $m$  に依存した特性比較を行う際には利便性を損なうことになる。

この問題点を解決すべく高強度かつトポロジカルチャージを容易に制御可能な超短光渦パルス光源の開発を行った。本手法では、液晶ホログラムを用いた 4-f 配置光渦変換器により基本ガウシアン光をトポロジカル光波である光渦に変換し、発生した光渦を増幅するという構成を取っている。前述の通り 4-f 配置のモード変換器のスループットは非常に低いが、光波の増幅を行うことによって損失を容易に補償して高強度化を達成できる。加えて本手法は液晶変調器の損傷閾値に制限されることなく高強度化な光渦を発生できるという非常に大きな利点を有している。

図 6-3 に液晶ホログラムのパターンを変えることにより自在にトポロジカルチャージ  $m$  を変化させ発生させた超短パルス・トポロジカル光波発生結果を示す。波長帯域 760 - 850 nm、パルスエネルギー  $>1\text{mJ}$  の超短パルス・トポロジカル光波が得られた。パルス幅は  $\sim 27\text{fs}$  であった。

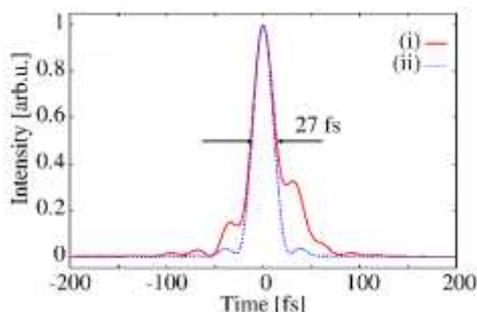
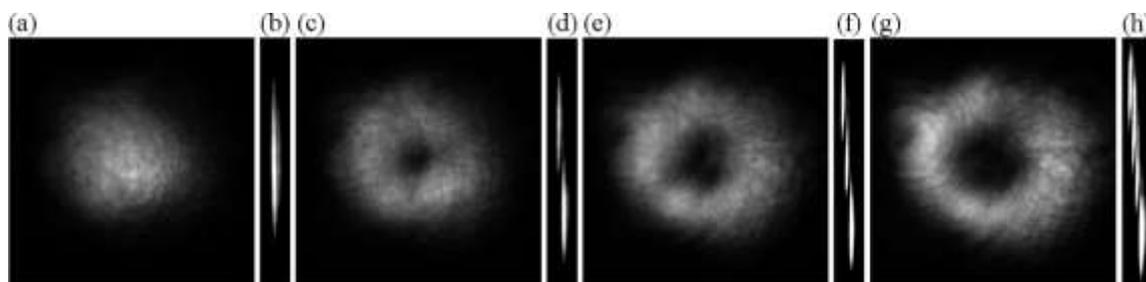


図 6-3 (上)自在にトポロジカルチャージ  $m$  を変化させた高出力超短パルス・トポロジカル光波発生結果。(a), (c), (e), (g) は  $m=0, 1, 2, 3$  に対応するビームプロファイル、(b), (d), (f), (h) は円柱レンズにより集光した際のパターン。暗線の数  $m$  に対応する。  
(左) 上記に対応する高出力超短パルス・トポロジカル光波の (i) 強度時間プロファイル、及び (ii) 時間位相。

また、偏光特異点を持つトポロジカル光波(軸対称偏光モード; 径偏光や方位偏光など)は、その特異な偏光特性により、通常のパラメトリック増幅ができない。そこで、上記で開発した位相特異点を持つ超短パルス・トポロジカル光源の光を二つに分け、一方のトポロジカルチャージを反転させた後、コヒーレント合成することで、超短パルス・トポロジカル光波(軸対称偏光モード)が発生できることを実証した(図 6-4)。

そのほか、コリニアでトポロジカル光波を重ね合わせることで、リング型光格子を発生できる新規手法を提案した。すでに、基礎実験は完了しており、光トラッピング・光マニピュレーションへ応用できる。超短パルス・トポロジカル光波の開発は、光渦・軸対称偏光モードともに成功しており、ほぼ完了していると考えられる。物質とトポロジカル光波のキラル相互作用のメカニズム解明の手段の一つとして、チャープパルス増幅によるフェムト秒領域からサブナノ秒領域までパルス幅が可変なトポロジカル光波として利用できる。

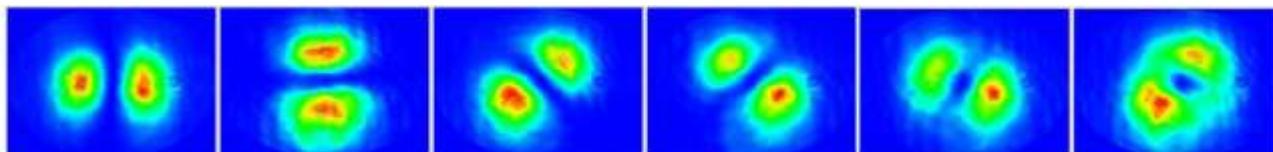


図 6-4 コヒーレント合成により発生させた超短パルス・トポロジカル光波(径偏光)ビームの偏光分布。左から順に水平、鉛直、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、左回り円偏光、右回り円偏光成分の強度プロファイル。

### 3.7 「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光波を用いた半導体結晶における励起子「全角運動量」コヒーレンスの検出とそのダイナミクス解析(千葉大グループと連携。)

#### 研究実施内容及び成果(研究論文 17, 18, 30)

当初、極限時間域トポロジカル光波の「全角運動量」を駆使したマイクロリング結晶における進行波型電荷密度波の発生とそのダイナミクスの解析を目的としていたが、機能性デバイス創成という目的を達成するため、よりデバイスに適していると思われる半導体励起子物性およびマイクロリング結晶・共振器構造に着目した研究に方針変更し研究を進めた。

「全角運動量」のストレージ・変換・制御できるデバイスとして有望と思われる窒化ガリウム(GaN)励起子重心系へ軌道角運動量をコヒーレントに転写すること、さらに、そのダイナミクスを明らかにすること、を目的に超短パルス・トポロジカル光波を用いた四光波混合分光を行った。

図 7-1 に四光波混合分光実験系を示す。チタニウムサファイアレーザーの第二高調波を二つに分け、一方は空間位相変調器によりトポロジカル光波(光渦)に変換してポンプ光とし、他方は光渦に変換した後、時間遅延をつけたプローブ光として、クライオスタット中にある GaN 試料へ集光する。発生した信号光を空間位相変調器および空間フィルターにより軌道角運動量分解する。その後、信号光の強度またはスペクトルを CCD/分光器によって計測する。ここで用いている軌道角運動量スペクトル分解手法とは、 $+m$  の軌道角運動量を持つ成分を $-m$  を持つ空間位相変調パターンにより、ガウスビームに変換し、ビーム中心部のみを空間フィルタリングすることで軌道角運動量 $+m$  の成分の強度比を求める手法である。

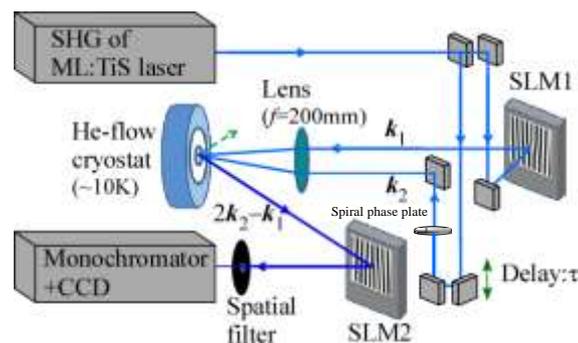


図 7-1 励起子重心系への軌道角運動量のコヒーレント転写とそのダイナミクス測定のための四光波混合分光実験系。

図 7-2 に(a) ポンプ光( $m_1=-2$ )、(b) プローブ光( $m_2=+1$ )の軌道角運動量スペクトルを示す。励起パルスのスペクトルは A, B 励起子を共鳴して励起しているため、(c)軌道角運動量分解四光波混合信号の時間発展は量子ビートを示す。 $2k_2-k_1$  の信号を取得しているため、 $2m_2-m_1=+4$  に強い信号が現れている。時間遅延 0.1, 0.7, 1.5, 2.2 ps における軌道角運動量分解スペクトル(d)-(g)は形を変えない。ビームプロファイルも特異点を保持している。したがって位相緩和時間内(~2ps)で励起子系が軌道角運動量のコヒーレンスを保持していることがわかる。これらの結果は、ガスではなく半導体素子が軌道角運動量をストレージ・変換・制御できることを示したものである。

さらに、デバイス応用で重要となる GaN 励起子緩和時間の軌道角運動量依存性の測定を行った。光渦パルスの軌道角運動量が大きいほど励起された励起子軌道角運動量の緩和時間が長くなることを初めて観測した。この結果は励起子の空間不均一性、軌道角運動量と方位角のフーリエ共役性から説明できた。この成果は、高次光渦に対して長いコヒーレンス時間を持つデバイス開発に重要な知見である。

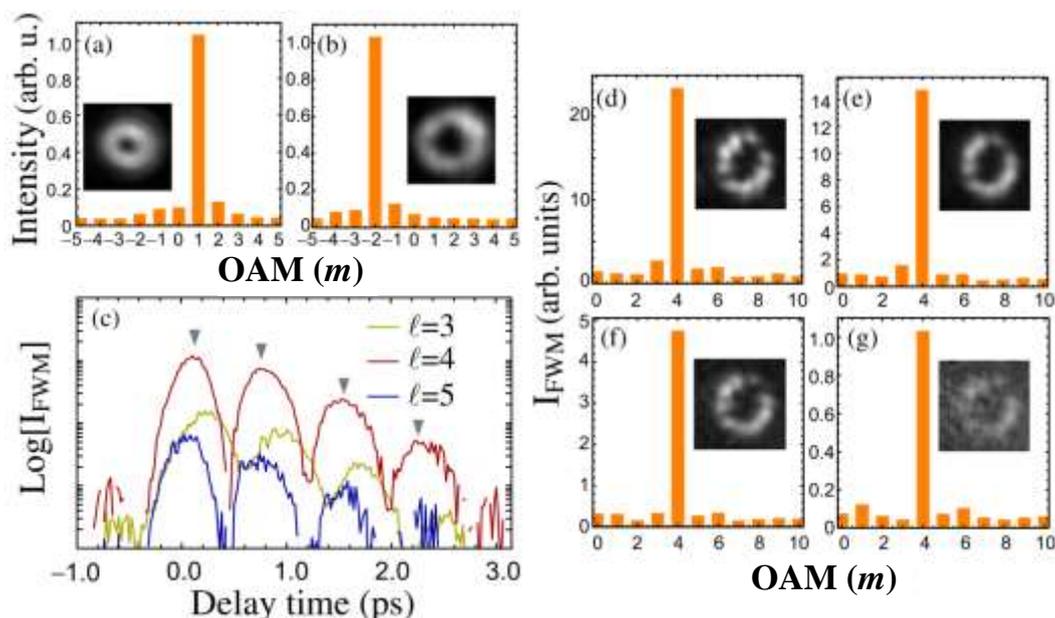


図 7-2 (a) ポンプ光( $m_1=-2$ )、(b) プロブ光( $m_2=1$ )の軌道角運動量スペクトル。(c)軌道角運動量分解四光波混合信号の時間発展、(d)-(g)は時間遅延 0.1, 0.7, 1.5, 2.2 ps のときの軌道角運動量スペクトル。挿入図はそれぞれの場合のビームプロファイル。

軌道角運動量スペクトル分解には空間位相変調器および空間フィルターを用いる本測定では、軌道角運動量スペクトル測定精度は、空間位相変調器による光渦からガウスビームへの変換効率で決まる。ビームの空間伝播特性を考慮して、軌道角運動量 0 のガウスビームに変換する位相変調と放物線の位相変調を重ねた螺旋位相変調を行うと高効率に光渦からガウスビームへ変換できることを発見した(図 7-3)。

さらに、広帯域な超短パルス・トポジカル光波でも精度良く軌道角運動量を測定できる独自計測法、電場回復軌道角運動量スペクトル測定法を開発した。この方法は、被測定光である超短パルス・トポジカル光波をコヒーレントな準平面波パルスと干渉させることによって得られる干渉像を空間フーリエ変換・フィルタリングした後、実空間に戻し、被測定パルスの電場空間プロファイル(振幅・位相)を回復させて軌道角運動量スペクトルを求めるものである。

図 7-4 に (a)干渉像からの電場回復により求めた(b) 強度プロファイル、(c) 位相プロファイル、(d) 軌道角運動量スペクトルを示す。支配的なトポジカルチャージ  $m=+2$  のスペクトルの他に $\sim 1\%$ 程度のサイドモードまで検出できている。これらの結果は中心波長 660 nm、帯域幅 10 nm の成分を切り出したものである。本手法は波長分解測定も同時に行うことができるので、超広帯域超短パ

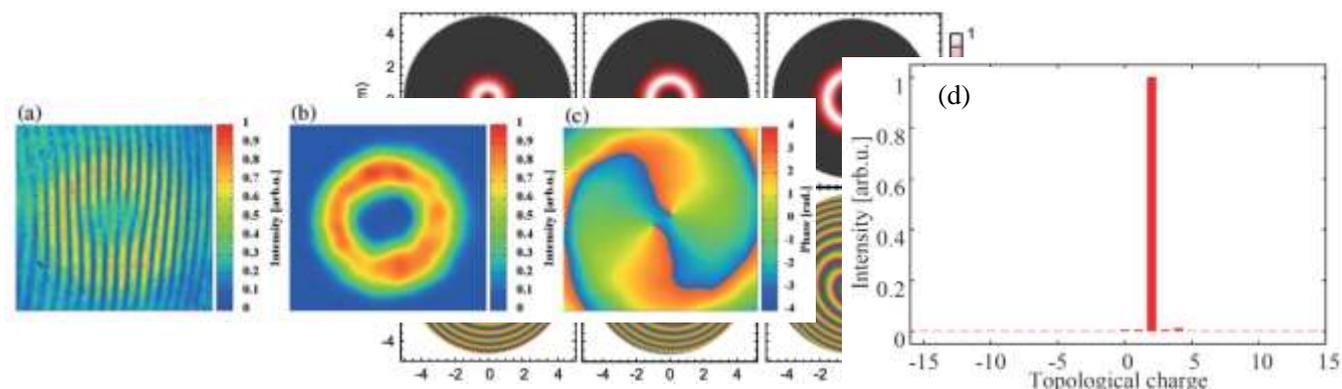


図 7-4 (a)干渉像からの電場回復により求めた(b) 強度プロファイル、(c) 位相プロファイル、(d) 軌道角運動量スペクトル(中心波長 660 nm、帯域幅 10 nm)。

ルス・トポロジカル光波の軌道角運動量分散も高精度で測定できる。現在、さらなる改良を進め、動径方向のモード展開も可能になった。

本手法を千葉大グループの開発する非整数トポロジカル光波(研究項目4. 2)に適用し、非整数トポロジカル光波発生メカニズムを解析中である。

### 3. 8 マイクロリング結晶からのトポロジカル光波発生と制御(北大グループ単独。)

#### 研究実施内容及び成果(研究論文 31)

マイクロリング結晶からのトポロジカル・テラヘルツ波発生を当初の目標としていたが、デバイス応用の可能性が高く、トポロジカル光波とデバイス構造との相互作用が期待できるマイクロリング結晶・共振器構造によるトポロジカル光波発生と制御の研究に方針変更した。

高出力軸対称偏光パルスはレーザーアブレーションやリング型結晶の物性測定などを行う光源として有望である。特に、軸対称偏光モードの中でも径偏光モードや方位角偏光モードは、対物レンズなどにより強く集光すると、ビームの伝播軸に沿った電場や磁場が発生することから、注目を集めている。このような軸対称偏光パルスを生成する方法の一つとして、一軸性結晶の異方性を用いる方法がある。この方法では、軸対称偏光パルスの一つである円偏光光渦パルスを一軸性結晶の光軸にそって絞りをながら伝播させる。このとき、結晶内での径偏光モードと方位角偏光モードとが感じる屈折率が異なることから、径偏光モードと方位角偏光モードの分離を行うことが可能である。この原理により径偏光モードや方位角偏光モードを生成できる。本研究では、一軸結晶中での軸対称偏光モードの非線形相互作用を明らかにする。高出力円偏光光渦パルスを絞りをながら一軸性結晶に入射し、3 次の非線形光学効果により、偏光状態がどのように変化するかを調べた。軸対称偏光状態の評価には後述する空間的に拡張したストークスパラメータ  $S_i^{s,e}$  ( $i=0\sim3$ )を用いている。

ストークスパラメータは空間的に一様なビームの偏光状態を記述するのに使われる一般的なパラメータである。これを空間的に非一様なビームに対して拡張した"Higher-order Stokes parameters"が提案されているが、このパラメータはモード振幅のみを用いているため、適用可能な場面が限られる。そこで、式(1)-(4)に挙げた空間的に拡張したストークスパラメータを新たに導入する。

$$S_0^{s,e} = \iint (|E_r|^2 + |E_\phi|^2) dx dy = I_r + I_\phi \quad (1)$$

$$S_1^{s,e} = \iint (|E_r|^2 - |E_\phi|^2) dx dy = I_r - I_\phi \quad (2)$$

$$S_2^{s,e} = \iint (E_r^* E_\phi + E_r E_\phi^*) dx dy \quad (3)$$

$$S_3^{s,e} = \iint (E_r^* E_\phi - E_r E_\phi^*) dx dy = I_+ - I_- \quad (4)$$

ここで、 $E_r, E_\phi$ はそれぞれ径偏光モード、方位角偏光モードの電場振幅を表し、 $I_r, I_\phi, I_+, I_-$ はそれぞれ径偏光モード、方位角偏光モード、円偏光光渦( $(s, m)=(+1, -1)$ )、円偏光光渦( $(s, m)=(-1, +1)$ )のエネルギーである。このようにストークスパラメータの要素をビーム断面内で積分することにより、より一般的なビームでも偏光状態を評価することが可能になる。軸対称偏光ビームでは、4 つのストークスパラメータのみで十分であるが、"Higher-order Stokes parameters"と同様に、本パラメータも高次元化が可能である。

本研究では、特に規格化した空間に拡張したストークスパラメータ  $S_i^{s,e}$  ( $i=0\sim3$ )  $S_i^{s,e} / S_0^{s,e}$  ( $i=0\sim3$ )を用いる。図 8-1 は  $(S_1^{s,e}, S_2^{s,e}, S_3^{s,e})$  が作る空間における軸対称偏光状態を示しており、この 3 つのパラメータで軸対称偏光状態を評価することが可能である。

軸対称偏光パルスの一つである左回り円偏光光渦パルス(パルス幅~100 fs)を一軸性結晶の端面へ光軸に沿って集光しながら入射させるという条件で、3 次の非線形光学効果による偏光状態の変

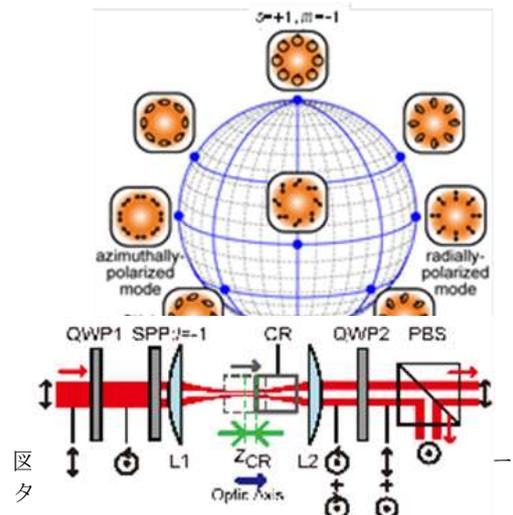


図 8-2 一軸性結晶中でのトポロジカル光波(軸対称偏光)の非線形結合実験系。SPP は螺旋位相板、CR は非線形光学結晶。

化を観測した(図 8-2)。特に、結晶位置とビーム焦点の関係性を調べるために、軸対称偏光状態の結晶位置依存性をいくつかのパルスエネルギーで調べた。実験結果を図 8-3 に示す。横軸は非線形結晶(c-cut Calcite, 5mm 厚)の結晶の入射端面位置  $z_{CR}$  を示しており、結晶が無いときのビーム焦点位置を基準( $z_{CR}=0$ )とし、ビーム出射側を正としている。縦軸は、 $S^{s,e}_1$  および  $S^{s,e}_3$  の値である。図 8-3 上段の  $S^{s,e}_1$  結果を見ると、 $z_{CR} \sim 1\text{mm}$  に強度依存するピークが存在する。入射光である円偏光光渦( $(s, m)=(+1, -1)$ )は、径偏光モードと方位角偏光モードのエネルギー比 1:1 の重ね合わせ状態( $S^{s,e}_1=0$ )である。一軸性結晶内では、径・方位角偏光モードはそれぞれ異なった屈折率を感じながら伝播するため、結晶内にビームの焦点があるような結晶位置においては、径・方位角偏光モードそれぞれの焦点位置がずれて存在する。この 2 つの焦点位置のずれは結晶位置に比例することから、 $z_{CR} < -3\text{mm}$  の場合は、2 つのモードの焦点付近におけるビームの重なりが悪いために径・方位角偏光間の非線形相互作用は起こらない。また、線形領域では径・方位角偏光モードは独立に伝播し、結晶位置  $z_{CR}$  に関わらず  $S^{s,e}_1$  の値は入射時の 0 から変化しない(図 8-3 上段点線)。しかしながら、2 つのモードのビームが重なり合うほど 2 つのモードの焦点位置が近くなるような結晶位置においては、非線形相互作用の 1 つである四光波混合(FWM)により、径・方位角偏光間のエネルギー変換が生じ、 $S^{s,e}_1$  は大きく変化する(図 8-3 上段-2mm <  $z_{CR}$  < 0mm)。

一方、図 8-3 下段の  $S^{s,e}_3$  に注目すると、特に 0.67  $\mu\text{J}$  の結果において、 $z_{CR} \sim 0\text{mm}$  を境とした  $S^{s,e}_3$  の非対称な増減が観測されている。 $S^{s,e}_3$  は式(4)より、光渦( $(s, m)=(+1, -1)$ )と光渦( $(s, m)=(-1, +1)$ )とのエネルギー差に比例する。ここで、光渦( $(s, m)=(+1, -1)$ )と光渦( $(s, m)=(-1, +1)$ )の電場をそれぞれ  $E_+$ 、 $E_-$  とおくと、 $E_+ \propto E_r - iE_\phi$ 、 $E_- \propto E_r + iE_\phi$  と径・方位角偏光モードの重ね合わせで表現できる。線形伝播の場合は結晶位置  $z_{CR}$  に関わらず径・方位角偏光モードのビーム拡がりは変化しないため、 $S^{s,e}_3$  は  $z_{CR}$  に対して一定である(図 8-3 下段点線)。これに対し、非線形伝播では自己位相変調(SPM)、相互位相変調(XPM)による径・方位角偏光モードのビーム拡がりの変化が  $S^{s,e}_3$  に反映される。ビーム焦点が結晶内にあるとき( $z_{CR} < 0$ )は、SPM、XPM によりビーム拡がりは大きくなり、 $S^{s,e}_3$  は線形伝播時の値よりも減る。一方、ビーム焦点が結晶入射面の手前にある場合( $z_{CR} > 0$ )は、ビーム拡がりが小さくなり、 $S^{s,e}_3$  は線形伝播時の値よりも増える。 $S^{s,e}_3$  の非対称な増減はこのように解釈することができる。

空間的に拡張したストークスパラメータ  $S^{s,e}_1$  および  $S^{s,e}_3$  を新たに導入し、一軸結晶中での径偏光、方位角偏光の非線形相互作用を初めて実験的・理論的に明らかにした。この手法は一軸結晶を用いた新たなトポロジカル光波発生法につながるものである。さらに、この拡張パラメータを用いて、軸対称偏光モードの空間的な偏光度という概念を初めて定義・導入し、広帯域の 1 次の軸対称偏光パルス、2 次の軸対称偏光パルスに関し、その純度を評価した。その結果、発生した軸対称偏光パルスが、>99% 以上の純度と >99% 軸対称性を有することを初めて実証した。この成果は、トポロジカル光波とリング結晶・共振器構造をはじめとする物質との相互作用を制御する際に重要な知見となる。今後は物質とトポロジカル光波との相互作用を詳細に解析し、新規のトポロジカル光波変換・発生・制御を実現していく。

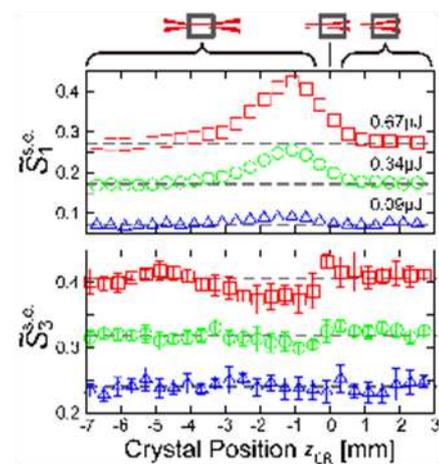


図 8-3  $s=+1, m=-1$  のトポロジカル光波が一軸性結晶中を伝播した際の  $S^{s,e}_1$ 、 $S^{s,e}_3$  値の変化。

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 45件)

1. M. Koyama, T. Hirose, M. Okida, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Power scaling of a picosecond vortex laser based on a stressed Yb-doped fiber amplifier," *Opt. Express*, **19**, 2, 994-999 (2011).
2. K. Miyamoto, S. Miyagi, M. Yamada, K. Furuki, N. Aoki, M. Okida, T. Omatsu, "Optical vortex pumped mid-infrared optical parametric oscillator," *Opt. Express*, **19**, 13, 12220-12226 (2011).
3. M. Koyama, H. Tetsuya, M. Okida, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Nanosecond vortex laser pulses with millijoule pulse energies from an Yb-doped double-clad fiber power amplifier," *Opt. Express* **19**, 15, 14420-14425 (2011).
4. M. Koichi, K. Miyamoto, S. Ujita, T. Saito, H. Ito, T. Omatsu, "Dual-frequency picosecond optical parametric generator pumped by a Nd-doped vanadate bounce laser," *Opt. Express*, **19**, 19, 18523-18528 (2011).
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**, 7, 3645-3649 (2012).
6. T. Omatsu, M. Okida, A. J. Lee, H. M. Pask, "Thermal lensing in a diode-end-pumped continuous-wave self-Raman Nd-doped GdVO<sub>4</sub> laser," *Appl. Phys. B*, **108**, 1, 73-79 (2012).
7. G. M. Thomas, T. Omatsu, M. J. Damzen, "High power neodymium-doped mixed vanadate bounce geometry laser, modelocked with nonlinear mirror," *Appl. Phys. B*, **108**, 1, 125-128 (2012).
8. G. M. Bonner, H. M. Pask, A. J. Lee, A. J. Kemp, J. Wang, H. Zhang, T. Omatsu, "Measurement of thermal lensing in a CW BaWO<sub>4</sub> intracavity Raman laser," *Opt. Express*, **20**, 9, 9810-9818 (2012).
9. K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Ultrashort optical-vortex pulse generation in few-cycle regime," *Opt. Express*, **20**, 17, 18986-18993 (2012).
10. T. Yusufu, Y. Tokizane, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Tunable 2- $\mu$ m optical vortex parametric oscillator," *Optics Express*, **20**, 21, 23666-23675 (2012).
11. T. Yoshino, H. Seki, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Efficient high-quality picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> bounce laser system," *J. Opt. Soc. Am. B*, **30**, 4, 894-897 (2013).
12. K. Miyamoto, A. J. Lee, T. Saito, T. Akiba, K. Suizu, T. Omatsu, "Broadband terahertz light source pumped by a 1 $\mu$ m picosecond laser," *Appl. Phys. B*, **110**, 3, 321-326 (2013).
13. 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).
14. 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).
15. T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "THz-wave sensing via pump and signal waves detection interacted with evanescent THz-wave," *Opt. Lett.*, **38**, 18, 3687-3689 (2013).
16. 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**, 18, 3661-3664 (2013).
17. 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).
18. 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**, 8S, 08JL08-1-5 (2013).
19. T. Yusufu, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Handedness control in a 2- $\mu$ m optical vortex parametric oscillator," *Opt. Express*, **21**, 23604-23610 (2013).
20. 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).
21. M. Watabe, G. Juman, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Light induced conch-shaped relief in an azo-polymer film,” *Sci. Rep.*, **4**, 4281 (2014).
  22. 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.*, **16** 053020/1-15 (2014).
  23. M. Koyama, A. Shimomura, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Frequency-doubling of an optical vortex output from a stressed Yb-doped fiber amplifier,” *Appl. Phys. B*, **116**, 2, 249-254, (2014).
  24. A. J. Lee, C. Zhang, T. Omatsu, H. M. Pask, “An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser,” *Opt. Express*, **22** (5), 5400-5409 (2014).
  25. Y. Sasaki, M. Koyama, K. Miyamoto, Y. Ariga, T. Onda, I. Shoji, T. Omatsu, “Ultraviolet vortex generation using periodically bonded  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> device,” *Opt. Express*, **22**, 11, 12829-12835 (2014).
  26. K. Miyamoto, K. Suizu, T. Akiba, T. Omatsu, “Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate,” *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 26, 031105/1-4 (2014).
  27. 多幡 能徳, 高橋 冬都, 滝澤 隼, 宮本 克彦, 森田 隆二, 尾松 孝茂, “光渦照射によるカイラル銅ナノニードルの創成,” *レーザー研究*, **42**, 10, 780-783 (2014).
  28. K. Furuki, M. Horikawa, A. Ogawa, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Tunable mid-infrared (6.3–12  $\mu$ m) optical vortex pulse generation,” *Opt. Express*, **22**, 21, 26351-26357 (2014).
  29. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, “Nonlinear coupling between axisymmetrically-polarized ultrashort optical pulses in a uniaxial crystal,” *Opt. Express*, **22**, 14, 16903-16915 (2014).
  30. 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.*, **16**, 053020/1-15 (2014).
  31. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, “Extended Stokes parameters for cylindrically polarized beams,” *Opt. Rev.*, **22**, 1, 179-183 (2015).
  32. M. Sakamoto, R. Fukumoto, N. Murakami, R. Morita, K. Oka, “Dispersion reduction in generation of high-order optical vortex using axially symmetric half-wave plates,” *Opt. Rev.*, **22**, 1, 174-178 (2015).
  33. T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Real-time terahertz wave sensing via infrared detection interacted with evanescent terahertz waves,” *Opt. Rev.*, **22**, 1, 166-169 (2015).
  34. T. Akiba, Y. Seki, M. Odagiri, I. Hashino, K. Suizu, Y. H. Avetisyan, K. Miyamoto and T. Omatsu, “Terahertz wave generation using type II phase matching polarization combination via difference frequency generation with LiNbO<sub>3</sub>,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **54**, 6, 062202/1-4 (2015).
  35. M. Abe, H. Seki, M. Kowa, Y. Sasaki, K. Miyamoto, T. Omatsu, “High average power, diffraction-limited picosecond output from a sapphire face-cooled Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **32**, 4, 714-718 (2015).
  36. A. Abulikemu, T. Yusufu, R. Mamuti, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Widely-tunable vortex output from a singly resonant optical parametric oscillator,” *Opt. Express*, **23**, 14, 18338-18344 (2015).
  37. A. M. Mahjoub, S. Suzuki, T. Ouchi, N. Aoki, K. Miyamoto, T. Yamaguchi, T. Omatsu, K. Ishibashi, Y. Ochiai, “Terahertz bolometric detection by thermal noise in graphene FET,” *Appl. Phys. Lett.*, **107** (8), 083506 (2015).
  38. M.-T. Horikawa, A. Ogawa, K. Miyamoto, Y. Taximaiti, T. Omatsu, “Handedness control in a tunable mid-infrared (6.0–12.5  $\mu$ m) vortex laser,” *J. Opt. Soc. Am. B*, **32** (12), 2406-2410 (2015).
  39. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, “Full quantitative analysis of arbitrary cylindrically polarized pulses by using extended Stokes parameters,” *Sci. Rep.*, **5**, 17797-1-9

(2015).

40. D. Barada, G. Juman, I. Yoshida, K. Miyamoto, S. Kawata, S. Ohno, T. Omatsu, "Constructive spin-orbital angular momentum coupling can twist materials to create spiral structures in optical vortex illumination," *Appl. Phys. Lett.*, **108** (5), 051108 (2016).
41. F. Takahashi, K. Miyamoto, H. Hidai, K. Yamane, R. Morita, T. Omatsu, "Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle," *Sci. Rep.*, **6**, 21738-1-10 (2016).
42. F. Takahashi, S. Takizawa, H. Hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Optical vortex pulse illumination to create chiral monocrystalline silicon nanostructures," *Phys. Stat. Solid. A*, **213** (4), 1063-1068 (2016).
43. A. J. Lee, H. M. Pask, T. Omatsu, "A continuous-wave vortex Raman laser with sum frequency generation," *Appl. Phys. B*, **122**, 64-1-7 (2016).
44. K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Coherent dynamics of exciton orbital angular momentum transferred by optical vortex pulses", *Phys. Rev. B* **93**, 045205-1-8 (2016).
45. Y. Taximaiti, Y. Sasaki, S. Araki, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Beam propagation of efficient frequency-doubled optical vortices," *Appl. Opt.* (in press).

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 尾松孝茂, "レーザ光の角運動量マニピュレーション," *レーザ協会誌* **36** No.1 (2011)15-19.
2. T. Omatsu, "Optical-fiber laser produces high-power vortex output," *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201102.003459 1-2 (2011)
3. 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**, 748-754 (2011).
4. T. Saito, Y. Toda, R. Morita, "Optical Vortex Generation and its Precise Control in Optical Fiber," *Polymer Photonics, and Novel Optical Technologies*, PWC Publishing, 234-238 (2011).
5. Y. Ueno, Y. Toda, S. Adachi, R. Morita, T. Tawara, "Arbitrary Control of Orbital Angular Momentum of Light via Excitons in GaN," *Polymer Photonics, and Novel Optical Technologies*, PWC Publishing, 120-124 (2011).
6. 尾松孝茂, "高出力側面励起 Nd ドープバナデートスラブピコ秒レーザーシステム," *レーザー協会誌*, **37**, 1, 6-14 (2012).
7. T. Omatsu, R. Morita, "Optical vortex laser for chiral material science," *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201308.004959 1-3 (2013).
8. 尾松孝茂, "高出力光渦レーザーの開発とレーザープロセッシングへの応用," *レーザー研究*, **41**, 708-713 (2013).
9. 尾松孝茂, "トポロジカル光波とその広がる可能性," *光学*, **42**, 12, 586-596, (2013).
10. T. Omatsu, R. Morita, "Chiral Nanostructures Fabricated by Twisted Light with Spin," *Singular and Chiral Nanoplasmonics*, Pan Stanford Publishing Pte Ltd., pp.311-335 (USA, 2014)
11. T. Omatsu, "Vortex lasers can create chiral polymeric reliefs," *SPIE Newsroom*, (2015).
12. 尾松孝茂, 宮本克彦, "テラヘルツ光渦の発生と観測," *光アライアンス*, **26** (1), 6-9 (2015).
13. 尾松孝茂, "光渦レーザーが創るナノスケールの螺旋針," *O plus E*, **4**, (2015).
14. K. Yamane, A. Honda, Y. Toda, R. Morita, "Over 1-mJ intense ultrashort optical-vortex pulse generation with programmable topological-charge control by chirped-pulse amplification," *Ultrafast Phenomena XIX*, Springer pp. 809-812 (Cham, Switzerland, 2015)
15. T. Omatsu, N. Aoki, K. Miyamoto, "Vortex Lasers Twist Materials to Form Chiral Nanostructures," *Electronic Processes in Organic Electronics*, Springer pp.417-427 (Japan, 2015)
16. Y. Toda, R. Morita, "Laser Spectroscopy Using Topological Light Beams," *Progress in Nanophotonics 3*, Springer pp.83-117 (Switzerland, 2015).

17. 尾松孝茂, “光渦の螺旋性が創るさまざまなナノ構造体,” 光アライアンス, **27** (4), (2016).
18. 森田隆二, “光渦の生成とその応用,” 応用物理, **85** (5), (2016).

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 59 件 (国内会議 33 件、国際会議 26 件)

〈国内〉

1. 尾松孝茂, “レーザー光の角運動量制御,” 第 34 回レーザー協会セミナー, (中央大学駿河台記念館 610 号室, 2010.11.).
2. 尾松孝茂, “高出力光渦ファイバーレーザーとその応用,” レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会(電通大, 2011.1.9.).
3. 森田隆二, 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,” レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, (電通大, 2011.1.10.).
4. 尾松孝茂, “光波の全角運動量マニピュレーションによる物質の構造制御,” フォトニクス技術フォーラムー次世代光学素子研究会, (大阪科学技術センター, 2011.3.2.).
5. 尾松孝茂, “光渦レーザーによるナノプロセッシング,” 第 75 回レーザー加工学会 (関西大学, 2011.5.12.).
6. 尾松孝茂, “光波の角運動量を用いた金属ナノニードル加工,” 平成 23 年度第 1 回「微細加工と表面機能」専門委員会 (千葉大, 2011.7.28.).
7. 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」, (上智大学セミナーハウス, 2012.1.29.).
8. 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 (仙台, 2012.1.30.).
9. 青木伸之, 土井達也, 魏小均, 宮本克彦, 尾松孝茂, J.P.バード, 落合勇一, “選択的な光渦照射によるフラーレンエレクトロニクスの作製,” レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, (仙台, 2012.1.30.).
10. 尾松孝茂, “高出力光渦レーザーの開発とその波長変換,” 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学, 2012.3.16.).
11. 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 16a-E9-3, (早稲田大学, 2012.3.16.).
12. 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”, (慶應義塾大学日吉キャンパス, 2012.6.8.).
13. 尾松孝茂, “光波の角運動量が創る光科学,” 大阪大学光科学センター主催レーザー第 18 回夏の学校(熱海、ハートピア熱海, 2012.8.4-5.).
14. 尾松孝茂, “トポロジカル光波とカイラリティ,” 分子研研究会「新しい光の創成と物質科学ー精密計測と操作への展開」(岡崎, 2012.10.12-13.).
15. 尾松孝茂, “トポロジカル光波による物質のキラル構造制御,” 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. 森田隆二, “Topological light pulse generation in few-cycle regime and its applications (サイクル域トポロジカル光パルスの発生とその応用),” エクストリームフォトニクスセミナー (理化学研究所和光研究所, 2012.12.20.).
17. 尾松孝茂, “トポロジカル光波と物質科学,” 第 19 回 光波シンセシス研究グループ研究会「未来を切り開く最先端フォトニクス研究」, (秋保グランドホテル, 2013.2.28.).
18. 尾松孝茂, “光渦レーザーが拓く新しいナノプロセッシング,” 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」(森戸記念館, 2013.3.1.).
19. 尾松孝茂, “光波のヘリシティによる物質のキラル構造制御,” 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.).

20. 尾松孝茂, “光の角運動量によるナノ構造体のカイラリティ・マニピュレーション,” 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.).
21. 尾松孝茂, “光渦レーザーによる材料加工と産業応用,” 第 5 回光ものづくりセミナー (京都光技術研究会, 2013.7.4.).
22. 尾松孝茂, “トポロジカル光波による金属ツイスト構造形成,” 日本物理学会秋季大会シンポジウム (徳島, 2013.9.25.).
23. 尾松孝茂, “光波の螺旋性とキラル構造体,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 13pBS5, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.13.).
24. 宮本克彦, “非線形光学効果を用いた波長可変中赤外～テラヘルツ発生,” 第 27 回ポリマー光回路(POC)研究会, (東北大学, 仙台, 2013.11.18.).
25. 森田 隆二, 山根 啓作, 戸田泰則, “超短光渦パルスの発生・制御・特性測定,” レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, シンポジウム「新しいコンセプトに基づく超短パルスレーザー」S3-22pI-1, (北九州国際会議場, 福岡, 2014.1.22.).
26. 尾松孝茂, “光の輻射圧が創る螺旋ナノ構造,” 分子科学研究所技術課セミナー「レーザー加工技術の基礎と応用」, (分子科学研究所, 岡崎, 2014.3.26.).
27. 尾松孝茂, “光渦とキラルティ,” 光と chirality の研究会, (東京大学本郷キャンパス, 2014.4.27.).
28. 尾松孝茂, “中赤外パラメトリック光渦レーザー,” 第 24 回光波シンセシス研究会, (九州大学・伊都キャンパス 福岡, 2014.12.25.).
29. 森田隆二, “超短・超広帯域トポロジカル光波の発生・制御・計測,” 第 24 回光波シンセシス研究会, (九州大学・伊都キャンパス 福岡, 2014.12.25.).
30. 森田隆二, 山根啓作, “超短トポロジカル光パルスの発生・制御・特性測定,” 第 6 回超高速光エレクトロニクス研究会, (東京大学柏キャンパス 柏市, 2015.01.16.).
31. 栗村直, “レーザーディスプレイへの期待,” レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, (東海大学高輪校舎, 2015.01.12.).
32. 堀川マイケル知樹, 尾川あずさ, 古城健司, 宮本克彦, 尾松孝茂, “中赤外(9-12  $\mu$  m)光渦レーザーにおける符号制御,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-A13-1, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.03.13.).
33. 森田隆二, “光渦によるヘリシティテクノロジー,” 日本物理学会第 71 回年次大会, 領域 11, 2, 6 合同シンポジウム「ヘリシティ」, 19pBR-5 (東北学院大学泉キャンパス, 仙台, 2016.3.19.).

〈国際〉

1. Y. Toda, Y. Tokizane, S. Tanda, R. Morita, “Global evaluation of closed-loop electron dynamics in NbSe<sub>3</sub> ring,” Collaborative workshop “Charge density waves: small scales and ultrashort time,” (Vukovar, Croatia, 2010.10.28- 31.).
2. T. Omatsu, “High power vanadate bounce lasers,” International photonics and opto-electronics meeting (POEM2010), (Wuhan, China, 2010.11.).
3. T. Omatsu, “Optical vortex lasers and their application to material nano-processing,” APLS 2012 (Anhui, China, 2012.5.28.).
4. T. Omatsu, “Optical vortex laser technologies,” France-Japan joint workshop on Advanced Lasers and Nonlinear Optics, (Grenoble, France, 2012.9.3.).
5. R. Morita, “Few-cycle optical-vortex pulse generation by parametric amplification,” France-Japan Joint workshop on Advanced Lasers and Nonlinear Optics (Grenoble, France, 2012.9.3.).
6. 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), PR7-1, (Sapporo, Japan, 2012.10.18.).
7. T. Omatsu, “Recent progress of high power optical vortex laser technologies,” International

- conference on manufacturing with photons, energetic particles and power fields, (Wuhan, China, 2012.11.2.).
8. R. Morita, "Optical-vortex pulse generation in few-cycle regime," International Workshop on Spintronic Nano Materials 2012. (Sapporo, Japan, 2012.11.5.).
  9. \*T. Omatsu, "Optical Vortex Fiber Lasers and their Application to Material Nano-processing," CLEO2013 (San Jose, USA, 2013,6.9-14.).
  10. T. Omatsu, A. J. Lee, H. M. Pask, "Compact yellow-orange Raman lasers," CLEO-PR 2013 (Kyoto, Japan, 2013.6.30.).
  11. T. Omatsu, "Recent Progress of Vortex Laser," The 12th Asia Pacific Physics Conference, Makuhari messe International Conference Halls, (2013.7.18.).
  12. T. Omatsu, "Angular Momentum of Light Forces Materials to Become Chiral Nano-Structures," Structured Light in Structured Media From Classical to Quantum Optics Incubator, (Washington DC, 2013.10. 1.).
  13. \*T. Omatsu, "Optical Vortex Lasers for Chiral Material Science," Advanced solid-state lasers 2013, (Paris, 2013.11.1.).
  14. K. Miyamoto, K. Suizu, T. Omatsu, "Tunable picosecond terahertz light source," Photonics Conference 2013 (PC2013), T2B-II 1, (Phoenix Island, JEJU, Korea, 2013.11.21.).
  15. R. Morita, K. Yamane, Z. Yang, Y. Toda, "Ultrafast and ultra-broadband optical-vortex pulse generation and characterization," Complex Light and Optical Forces VIII, 2014 Photonic West, 8999-31, (Moscone Center, San Francisco, 2014.2.6.).
  16. \*T. Omatsu, "Vortex Laser Technologies toward Chiral Materials Science," International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2014 (IS-PALD 2014). (National Chia Tung University, Taiwan, 2014.9.4.). (Plenary)
  17. T. Omatsu, "Helical lights twist materials to form chiral structures –Chiral Photonics," JSAP-OSA Joint Symposia 2014, 18p-C3-8, (Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido, JPN, 2014.09.18.).
  18. T. Omatsu, "Chiral materials fabrication by vortex lasers," 9<sup>th</sup> International Conference on Photo-Excited Processes and Applications (Matsue, 2014.9.29-10.3.).
  19. \*T. Omatsu, "Optical vortices pioneer chiral nano-structures," SPIE Photonics West, LASE, 935006-935006-4 (San Francisco, 2015.2.9.).
  20. T. Omatsu, "Orbital angular momentum of lights pioneers chiral materials science," EMN Meeting on OptoElectronics, Energy materials and Nanotechnologies, Topological Phenomena in Photonics (24-27 April, 2015, Beijing, China)
  21. T. Omatsu, "Illumination of Optical Vortices Forms Chiral Nanostructures," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2015) (6-9 July, 2015, Prague, Czech)
  22. T. Omatsu, "Optical Vortex Forms Chiral Nanostructures," META'15, The 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (4-7 August, 2015, New York, USA)
  23. K. Suizu, N. Kaneko, T. Akiba, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Novel THz-wave detection technique via interaction between optical pumping waves and THz-wave generated by Cherenkov phasem matching," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 28B1-2 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).
  24. T. Omatsu, "Optical parametric vortex lasers and their applications," The 12th International Conference "Correlation Optics" (14-18 September 2015, Chernivsti, Ukraine)
  25. Takashige Omatsu, "Optical vortices 'twist' materials to form chiral nanostructures," Nanophotonics in Asia 2015, (10-11 December 2015, Osaka)
  26. 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 口頭発表 (国内会議 120 件、国際会議 63 件)

〈国内〉

1. 鈴木雅人, 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,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 2011.3.25.).
2. 豊田耕平, 中條恵介, 鳥越貴紀, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂, “ナノ秒光渦パルスによる金属マイクロニードルの成長方位制御,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 2011.3.25.).
  3. 芦原誠, 林香織, 吉野喬晴, 沖田昌仁, 宮本克彦, 尾松孝茂, “サブ 100W タンデム配置側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> バウンス増幅器による位相共役ピコ秒レーザー,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 2011.3.26.).
  4. 宇治田秀人, 小市真樹, 宮本克彦, 尾松孝茂, “側面励起バナデートピコ秒レーザーによる 1.5 $\mu$ m 帯域 2 波長同時発生,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 2011.3.26.).
  5. 小山美緒, 広瀬徹弥, 田中佑一, 宮本克彦, 尾松孝茂, “Yb 添加ファイバー増幅器によるサブ mJ ナノ秒パルス光渦レーザー,” 第 58 回応用物理学関係連合講演会 (神奈川工科大学, 2011.3.26.).
  6. 古城健司, 宮城祥雄, 山田将来, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光パラメトリック発振による中赤外光渦発生,” 第 72 回応用物理学学会学術講演会 30p-J-1 (山形大学, 2011.8.30.).
  7. 小山美緒, 広瀬徹弥, 宮本克彦, 尾松孝茂, “ファイバー増幅器を用いた高出力ナノ秒パルス光渦レーザー,” 第 72 回応用物理学学会学術講演会 30a-J-6 (山形大学, 2011.8.30.).
  8. 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 回応用物理学学会学術講演会 30p-ZH-10 (山形大学, 2011.8.30.).
  9. 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 回応用物理学学会学術講演会 30p-ZH-11 (山形大学, 2011.8.30.).
  10. 青木伸之, 土井達也, 小山恭平, 魏小均, 宮本克彦, 尾松孝茂, J. P. バード, 落合勇一, “光渦照射による C<sub>60</sub> 薄膜の光重合化,” 日本物理学会 2011 年秋季大会, 21aTD-9 (富山大学, 2011.9.21.).
  11. 宮城祥雄, 山田将来, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光パラメトリック発振による中赤外域非整数量子光渦発生,” 日本光学会年次学術講演会 29aG8 (大阪大学, 2011.11.29.).
  12. 宇治田秀人, 斎藤岳史, 宮本克彦, 尾松孝茂, “高出力ピコ秒 Nd ドープバナデートバウンスレーザー励起による 3.2 テラヘルツ波発生,” 日本光学会年次学術講演会 29pE1 (大阪大学, 2011.11.29.).
  13. 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 A-3 (北海道大学, 2012.1.6.).
  14. 尾松孝茂, 時実悠, 宮城祥雄, 山田将来, 宮本克彦, “光パラメトリック発振器における非整数光渦モードの角運動量スペクトル分解,” レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会 01aV-6 (TKP仙台カンファレンスセンター, 2012.2.1.).
  15. 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 01aV-5 (TKP仙台カンファレンスセンター, 2012.2.1.).
  16. 水津光司, 宮本克彦, 宇治田秀人, 斎藤岳史, 尾松孝茂, “励起光デプリションによるテラヘルツ計測の提案,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 16p-E8-10 (早稲田大学, 2012.3.16.).
  17. 小市真樹, 宮本克彦, 尾松孝茂, “側面励起バナデートピコ秒レーザーの高効率(>75%)第二高調波発生,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 16p-E9-4 (早稲田大学, 2012.3.16.).
  18. 斎藤岳史, 宇治田秀人, 小市真樹, 宮本克彦, 尾松孝茂, “狭線幅 1.5  $\mu$ m 帯 2 波長ピコ秒光パラメトリック発生,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 16p-E9-5 (早稲田大学, 2012.3.16.).
  19. 吉野喬晴, 芦原誠, 関浩貴, 宮本克彦, 尾松孝茂, “高効率側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> 薄スラブバ

- ウンスピコ秒レーザー,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 16p-E9-6 (早稲田大学, 2012.3.16.).
20. 広瀬徹弥, 小山美緒, 下村章人, 宮本克彦, 尾松孝茂, “添加ファイバー増幅器を用いた 25W 級ナノ秒パルス光渦レーザー,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 17a-E9-1 (早稲田大学, 2012.3.17.).
  21. 山田将来, 宮城祥雄, 時実悠, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦励起パラメトリック発振器による  $2\mu\text{m}$  光渦発生,” 第 59 回応用物理学関係連合講演会 17a-E9-3 (早稲田大学, 2012.3.17.).
  22. 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 17a-A2-5 (早稲田大学, 2012.3.17.).
  23. 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 18-E9-9 (早稲田大学, 2012.3.18.).
  24. 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 25aAC-5 (関西学院大学, 2012.3.25.).
  25. 初山大輝, 土井達也, 小山恭平, 鳥海直人, 魏小均, 宮本克彦, 尾松孝茂, J. P. バード, 青木伸之, 落合勇一, “光渦照射による  $\text{C}_{60}$  光重合体の作製と物性評価,” 日本物理学会 第 67 回年次大会, 27aCC-7 (関西学院大学, 2012.3.27.).
  26. 小山美緒, 広瀬徹弥, 下村章人, 宮本克彦, 尾松孝茂, “Yb 添加ファイバー増幅器を用いた 40W ピコ秒パルス光渦レーザー,” 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12p-B2-4 (愛媛大学, 2012.9.12.).
  27. 時実悠, Yusufu Taximaiti, 山田将来, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦励起  $2\mu\text{m}$  光パラメトリック共振器における光渦モードのコヒーレント結合,” 第 73 回応用物理学会学術講演会 12p-B2-5 (愛媛大学, 2012.9.12.).
  28. 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, 13a-B2-2 (愛媛大学, 2012.9.13.).
  29. 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 13a-B2-3 (愛媛大学, 2012.9.13.).
  30. 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, 14a-G2-7, (Ehime, Japan, 2012.9.14.).
  31. 初山大輝, 青木伸之, 土井達也, 鳥海直人, 穂山航, 宮本克彦, 尾松孝茂, J. P. バード, 落合勇一, “光渦照射による  $\text{C}_{60}$  薄膜の光重合化 II,” 日本物理学会 2012 年秋季大会 (横浜国立大学, 2012.9.21.).
  32. 佐藤真武, 時実悠, 宮本克彦, 尾松孝茂, “側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> バウンス光渦レーザーにおけるヘリシティ制御,” Optics & Photonics Japan 2012, 23aE7 (タワーホール船堀, 2012.10.23.).
  33. 佐々木佑太, 宮本克彦, 時実悠, 尾松孝茂, “高出力ピコ秒光渦レーザーの非線形波長変換,” Optics & Photonics Japan 2012, 23aE8 (タワーホール船堀, 2012.10.23.).
  34. 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, 24pE6 (タワーホール船堀, 2012.10.24.).
  35. 広瀬徹弥, 小山美緒, 下村章人, 宮本克彦, 尾松孝茂, “加圧 Yb 添加ラージモードエリアファイバー増幅器を用いた高出力光渦レーザー,” レーザー学会「ファイバーレーザー技術専門委員会」公開研究会プログラム, (名古屋大学, 2012.11.30.).
  36. 吉野喬晴, 関浩貴, Loun Lee, 宮本克彦, 尾松孝茂, “高効率側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> バウンスピコ秒レーザー,” レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会 28pIX-15 (姫路商工会議所, 2013.1.28.).
  37. 青木伸之, 初山大輝, 鳥海直人, 穂山航, 土井達也, 宮本克彦, 尾松孝茂, J. P. バード, 落合勇一, “光渦照射で作製した  $\text{C}_{60}$  光重合体の電気伝導特性,” 日本物理学会 第 68 回

- 年次大会, 26pXP-7, (広島大学, 2013.3.26.).
38. 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 回応用物理学会春季学術講演会 28p-A2-1 (神奈川工科大学, 2013.3.28.).
  39. 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 回応用物理学会春季学術講演会 28a-D2-6 (神奈川工科大学, 2013.3.28.).
  40. 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 回応用物理学会春季学術講演会 28a-D2-7 (神奈川工科大学, 2013.3.28.).
  41. 水津光司, 秋葉拓也, 宮本克彦, 斎藤岳史, 尾松孝茂, “チェレンコフ位相整合テラヘルツ波発生の偏光依存性,” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 29a-D1-9 (神奈川工科大学, 2013.3.29.).
  42. 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 回応用物理学会春季学術講演会 30a-A1-6 (神奈川工科大学, 2013.3.30.).
  43. Yusufu Taximaiti, 山田将来, 時実悠, 宮本克彦, 尾松孝茂, “2 $\mu\text{m}$  非整数光渦の光パラメトリック増幅,” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 30a-C1-4 (神奈川工科大学, 2013.3.30.).
  44. 宮本克彦, 水津光司, 斎藤岳史, 秋葉卓也, 尾松孝茂, “テラヘルツエバネッセント分光のための 1.5 $\mu\text{m}$  帯狭線幅ピコ秒レーザー,” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 30p-C1-1 (神奈川工科大学, 2013.3.30.).
  45. 下村章人, 小山美緒, 広瀬徹弥, 宮本克彦, 尾松孝茂, “ナノ秒パルス光渦ファイバーレーザーの第二高調波発生,” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 30a-C1-5 (神奈川工科大学, 2013.3.30.).
  46. 佐藤真武, 時実悠, 宮本克彦, 尾松孝茂, “側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> 光渦レーザーにおけるヘリシティ制御,” 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 30a-C1-3 (神奈川工科大学, 2013.3.30.).
  47. 佐々木佑太, 宮本克彦, 尾松孝茂, “分極反転  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 結晶ペアによる紫外光渦発生,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 16p-A8-1 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.16.).
  48. 宮本克彦, 水津光司, 秋葉拓也, 尾松孝茂, “波長可変(1-15THz)狭線幅ピコ秒テラヘルツ発生,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 17p-A14-5 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.17.).
  49. 渡部瑞季, Guzalay Juma, Azitiaili Abulikemu, 宮本克彦, 尾松孝茂, “円偏光光渦によるアゾポリマーのキラル表面レリーフ,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 18a-C13-7, (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.18.).
  50. 時実悠, 堀川知樹, Yusufu Taximaiti, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光パラメトリック共振器における波長可変 2  $\mu\text{m}$  非整数光渦発振,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A14-14, (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.19.).
  51. 塩田康之, 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, 覚間誠一, “高強度かつ広帯域な光渦パルスに適応可能な偏光変換器の開発,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 19p-A3-3 (同志社大学(京田辺市), 2013.9.19.).
  52. 高橋冬都, 滝澤隼, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂, “角運動量を持つ光によって形成されたシリコン螺旋構造体,” 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C14-10, (同志社大学京田辺キャンパス, 京都, 2013.9.19.).
  53. 青木伸之, 初山大輝, 鳥海直人, 秋山航, 土井達也, 宮本克彦, 尾松孝茂, J. P. バード, 落合勇一, “光渦照射によるフラーレン光重合体の in-situ 物性評価,” 日本物理学会 2013 年秋季大会 25pDF-6, (徳島大学・常三島キャンパス, 徳島市, 2013.9.25.).

54. 鈴木信一, 磯優平, M. アカラム, 大内隆寛, 青木伸之, 宮本克彦, 山口智弘, 尾松孝茂, J. P. バード, D. K. フェリー, 石橋幸治, 落合勇一, “グラフェンを用いた高周波検出デバイスの可能性”, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 26pDK-10, (徳島大学, 徳島, 2013.9.26.).
55. 長谷川明, 戸田泰則, 足立智, 森田隆二, 中山正昭, “強励起条件下におけるワイドギャップ半導体励起子のコヒーレントダイナミクス”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 28aDB-7, (徳島大学・常三島キャンパス, 徳島市, 2013.9.28.).
56. 重松恭平, 戸田泰則, 山根啓作, 森田隆二, “複合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”, 日本物理学会 2013 年秋季大会 28aDB-12, (徳島大学・常三島キャンパス, 徳島市, 2013.9.28.).
57. 本田亜沙美, 山根啓作, 横瀬尚也, 重松恭平, 戸田泰則, 森田隆二, “チャープパルス増幅を用いたトポロジカルチャージ可変な高強度超短光渦パルスの発生”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 12aE3, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.12.).
58. 鈴木雅人, 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二, “一軸結晶内における軸対称偏光ビームの非線型カップリングと空間的に拡張したストークスパラメータによるその解析”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 12aE4, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.12.).
59. 堀川マイケル知樹, 時実悠, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦励起光パラメトリック共振器における波長可変フラクショナル光渦の発生”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 12aE5, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.12.).
60. 渡部 瑞季, Guzhalayi Juman, 宮本克彦, 尾松孝茂, “アゾポリマーの光渦誘起キラル表面レリーフ”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 12aE6, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.12.).
61. 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”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 12aE7, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.12.).
62. 関浩貴, 阿部将士, 宮本克彦, 尾松孝茂, “サファイアを光学接合した Nd:YVO<sub>4</sub> スラブ増幅器を用いた高効率ピコ秒レーザー”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2013, 13pC4, (奈良県新公会堂, 奈良, 2013.11.13.).
63. 小山美緒, 下村章人, 宮本克彦, 尾松孝茂, “1 $\mu$ m 光渦ファイバーレーザーの第二高調波発生”, レーザー学会「ファイバーレーザー技術専門委員会」, (名古屋大学東山キャンパス, 愛知, 2013.11.22.).
64. 佐々木佑太, 宮本克彦, 尾松孝茂, “分極反転  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 結晶を用いた光渦レーザーの紫外光渦変換”, レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, B2-20pIV-11, (北九州国際会議場, 福岡, 2014.1.20.).
65. 関 浩貴, 阿部将士, 宮本克彦, 尾松孝茂, “高効率・高出力ピコ秒サファイアエンドキャップ Nd:YVO<sub>4</sub> バウンスレーザー”, レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, B4-21pIV-3, (北九州国際会議場, 福岡, 2014.1.20.).
66. 茨田大輔, 川田重夫, 谷田貝豊彦, 尾松孝茂, “ラゲールガウシアンビーム照射による光誘起表面レリーフ形成の解析”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-F6-6, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).
67. 阿部将士, 関 浩貴, 宮本克彦, 尾松孝茂, “サファイアエンドキャップ Nd:YVO<sub>4</sub> スラブ増幅器を用いた回折限界高出力ピコ秒レーザー”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E18-7, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).
68. 尾松孝茂, 宮本克彦, 時実 悠, 堀川マイケル知樹, “中赤外(6-10 $\mu$ m)波長可変光渦パルスレーザー”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E18-18, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).
69. 秋葉拓也, 秋元康尋, 田村基晃, 水津光司, 高柳 順, 宮本克彦, 尾松孝茂, “端面反射位相整合による広帯域 THz 波光源の開発”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E17-12, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.17.).

70. 宮本克彦, 梅本翔太, 時実 悠, 水津光司, 尾松孝茂, “単色テラヘルツ光渦の発生,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E17-13, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県, 2014.3.17.).
71. 鈴木雅人, 山根啓作, 塩田康之, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, “円筒座標系を基礎とする拡張ストークスパラメータによる軸対称偏光状態の解析,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-F6-8, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県, 2014.3.17.).
72. 山根啓作, 本田亜沙美, 戸田泰則, 森田隆二, “mJ 級高強度トポロジカルチャージ可変超短光渦パルス発生,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-F7-1, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県, 2014.3.18.).
73. 尾松孝茂, Andrew Lee, Helen Pask, “自己誘導ラマン光渦レーザーにおける共振器内第二高調波発生,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-E18-2, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県, 2014.3.18.).
74. 滝澤隼, 高橋冬都, 宮本克彦, 比田井洋史, 森田隆二, 尾松孝茂, “光波の角運動量転写によるシリコン螺旋円錐ナノ結晶,” 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-D1-13, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川県, 2014.3.19.).
75. 高橋冬都, 滝澤隼, 藤原穂波, 宮本克彦, 比田井洋史, 森田隆二, 尾松孝茂, “光渦レーザー照射により形成されたシリコン螺旋円錐体,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C1-5 (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
76. 滝澤隼, 高橋冬都, 藤原穂波, 宮本克彦, 比田井洋史, 森田隆二, 尾松孝茂, “光渦の輻射力による結晶性シリコンコラムの創成,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C1-6, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
77. 堀川マイケル知樹, 古城健司, 尾川あずさ, 宮本克彦, 尾松孝茂, “同軸位相整合差周波光発生による中赤外(6.3 $\mu$ m-12.0 $\mu$ m)光渦,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C8-4 (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
78. 佐々木佑太, 宮本克彦, 庄司一郎, 尾松孝茂, “周期反転  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> デバイスによる深紫外光渦発生,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C8-7, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
79. T. Yusufu, A. Abullikemu, K. Yamane, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Fractional vortex generation from a vortex pumped parametric oscillator,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C8-3, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
80. 宮本克彦, 水津光司, 秋葉拓也, 尾松孝茂, “連続螺旋型位相板を用いたテラヘルツ光渦の発生およびモード解析,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C6-11, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
81. 茨田大輔, 川田重夫, 谷田貝豊彦, 尾松孝茂, “ラゲール・ガウスビーム照射による光誘起表面レリーフ形成の解析(II),” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19p-C1-7, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
82. 坂本盛嗣, 山根啓作, 村上尚史, 森田隆二, 岡和彦, “ピコ秒時間スケールで高速回転するリング状光格子の生成,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C2-3, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
83. 本田亜沙美, 山根啓作, 鈴木雅人, 戸田泰則, 森田隆二, “ホログラムの最適化によるラゲールガウスビーム発生の高精度化,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C1-12, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
84. 横瀬尚也, 鈴木雅人, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, “円筒座標系を基礎とする拡張ストークスパラメータによる軸対称偏光状態の解析 II,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C1-13, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
85. 鈴木雅人, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, “拡張ストークスパラメータによる高次偏光渦の解析,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C1-14, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).

86. 西坂拓馬, 重松恭平, 由利洋樹, 山根啓作, 森田隆二, 淡路祥成, 戸田泰則, “空間変調光帰還による面発光レーザーの高次横モード制御,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C1-15, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
87. 由利洋樹, 重松恭平, 西坂拓馬, 山根啓作, 森田隆二, 淡路祥成, 戸田泰則, “多重横モード面発光レーザーにおける特異点ダイナミクス,” 第 75 回秋季応用物理学会秋季学術講演会, 19a-C1-16, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道, 日本, 2014.09.19.).
88. 高橋冬都, 滝澤隼, 藤原穂波, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂, “光渦が創るシリコン螺旋円錐体,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 5aB1, (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.05.).
89. 内田裕久, 宮本克彦, 水津光司, 尾松孝茂, “単色ピコ秒 THz 発生における DAST 結晶の特性評価,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 7aB10, (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.05.).
90. 阿部将士, 鴻和真弥, 佐々木佑太, 宮本克彦, 尾松孝茂, “高出力・高効率・回折限界ピコ秒 Nd:YVO<sub>4</sub> バウンスレーザーの開発,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 7pB4, (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.05.).
91. 岡和彦, 坂本盛嗣, 森田隆二, 村上尚史, “複数の軸対称偏光素子を利用した白色光渦およびリング状光格子の生成,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 5aCS3, (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.05.).
92. T. Yusufu, A. Abulikemu, K. Yamane, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Fractional optical vortex parametric oscillator,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 7aB15 (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.07.).
93. P. Aierken, L-J. Hyung, 曲澤学, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦の輻射力を用いたグリシン結晶成長制御,” 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2014, 7pB6 (筑波大学東京キャンパス, 文京区, 東京, 日本, 2014.11.07.).
94. 鈴木雅人, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, “コヒーレント結合系を用いて生成された超短径偏光パルスの拡張ストークスパラメータによる定量的解析,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A15-12, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.12.).
95. 山根啓作, 横瀬尚也, 鈴木雅人, 戸田泰則, 森田隆二, “軸対称偏光ビームの空間位相解析,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A15-13, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.12.).
96. 山根啓作, 中寫奨太, 鈴木雅人, 戸田泰則, 森田隆二, “光電場再生に基づいた光渦のラゲールガウスモード展開,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-A15-14, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.12.).
97. A. Aizitaili, T. Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Widely tunable optical vortex parametric laser,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-A13-2, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.13.).
98. 鴻和真弥, 阿部将士, 宮本克彦, 尾松孝茂, “サファイアエンドキャップ Nd:YVO<sub>4</sub> スラブバウンス増幅器を用いた高効率・高出力ピコ秒レーザー,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 14a-A13-4, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.14.).
99. 高橋冬都, 滝澤隼, 藤原穂波, 宮本克彦, 比田井洋史, 森田隆二, 尾松孝茂, “光渦の散乱力により形成された単結晶シリコンピラー,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 14a-A12-3, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2015.3.14.).
100. 重松恭平, 森本祥平, 鈴木雅人, 山根啓作, 森田隆二, 戸田泰則, “軸対称偏光パルスを用いた GaN 励起子微細構造の四光波混合分光,” 日本物理学会第 70 回年次大会, 21pCP-4, (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015.3.21.).
101. 吉田一貴, Guzhaliiyi Juman, 中野翔吾, 増田圭吾, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦誘起表面レリーフ形成におけるスピン角運動量の効果,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 13p-2E-4, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.13.).

102. 曲澤 学, 李 俊亨, 豊嶋駿亮, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦の輻射力によるグリーン結晶育成,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 13p-2E-6, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.13.).
103. Roukuya Mamuti, Aizitiaili Abulikemu, Taximaiti Yusufu, Katsuhiko Miamoto, Takashige Omatsu, “Tunable 1  $\mu\text{m}$  optical vortex parametric oscillator,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 14a-2D-9, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.14.).
104. 荒木隼悟, 鈴木健祐, Taximaiti Yusufu, 宮本克彦, 尾松 孝茂, “中赤外 2 波長非整数光渦レーザー,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 14a-2D-10, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.14.).
105. 堀川マイケル知樹, 尾川あずさ, 安藤花菜, 宮本克彦, 尾松孝茂, “中赤外光渦レーザーのカイラリティー制御,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 14a-2D-11, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.14.).
106. 中嶋 奨太, 山根 啓作, 鈴木 雅人, 戸田 泰則, 森田 隆二, “コリニア型配置を用いた光電場再生に基づく光渦のラゲールガウスモード展開,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 14a-2G-2, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.14.).
107. 鈴木 雅人, 山根 啓作, 中嶋 奨, 坂本 盛嗣, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二, “空間光位相変調器と軸対称偏光変換素子とによる強度分布制御された軸対称偏光パルスの生成,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 14a-2G-2, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.14.).
108. 内田裕久, 矢野貴義, 佐野和貴, 山崎智仁, 宮本克彦, 水津光司, 尾松 孝茂, “熱レンズ効果による有機非線形光学結晶のレーザー照射耐性評価,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 16a-2J-7, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.16.).
109. 宮本克彦, 矢野貴義, 佐野和貴, 山崎智仁, Kang Bong Joo, Kim Won-tea, Rotermund Fabian, 水津光司, 尾松孝茂, “広帯域テラヘルツ光渦の発生,” 第 76 回応用物理学秋季学術講演会 16a-2J-10, (名古屋国際会議場, 名古屋, 愛知, 日本, 2015.9.16.).
110. 西坂拓馬, 重松恭平, 山根啓作, 森田隆二, 淡路祥成, 戸田泰則, “空間変調光注入同期による面発光レーザーのトポロジカルチャージ制御,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-H116-3, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
111. 増田圭吾, Guzhaliayi Juman, 吉田一貴, 中野翔吾, 酒井大輔, 原田健治, 宮本克彦, 尾松孝茂, “コロナ放電による光渦誘起表面レリーフのガラス転写,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-H116-4, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
112. 藤原穂波, 高橋冬都, 泉澤魁, 比田井洋史, 宮本克彦, 山根啓作, 森田隆二, 尾松孝茂, “光渦によって形成される単結晶性シリコンニードルのパルス幅依存性,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-H116-5, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
113. 白石福太郎, 中村優里, 高橋冬都, 藤原穂波, 泉澤魁, 宮本克彦, 鈴木一己, 吉野正樹, 尾松孝茂, “光渦によるインク液滴の飛翔制御,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-H116-6, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
114. 小原威吹, 坂本盛嗣, 山根啓作, 森田隆二, 岡和彦, “軸対称偏光子を用いたトラップ粒子の回転制御,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-H116-7, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
115. 永井美祐, 坂本盛嗣, 山根啓作, 森田隆二, 岡和彦, “チャープパルスを用いた直線偏光の偏光方位の超高速回転,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 19p-S621-7, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).
116. 西潟由博, 宮本裕司, 宮本克彦, 尾松孝茂, “光渦励起ラマンレーザー,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 20p-S224-16, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.20.).
117. A. Abulikemu, R. Mamuti, T. Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Widely tunable optical vortex laser with extended cavity configuration,” 第 63 回応用物理学学会春季学術講演会

- 20p-S224-17, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.20.).
118. 安藤花菜, 堀川マイケル知樹, 尾川あずさ, 宮本克彦, 尾松孝茂, “波長可変外中赤外 (6-17 $\mu\text{m}$ )光渦の発生,” 第63回応用物理学会春季学術講演会 20p-S224-18, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.20.).
119. 水津光司, 水野光貴, 木村優基, 南部広樹, 秋葉拓也, 宮本克彦, 尾松孝茂, 諸橋功, 小川洋, 中島慎也, 関根徳彦, 寶迫巖, “励起光状態変化によるテラヘルツ波検出技術および導波路導入による高効率化,” 第63回応用物理学会春季学術講演会 21p-H135-7, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.21.).
120. 鈴木雅人, 山根啓作, 岡和彦, 戸田泰則, 森田隆二, “拡張ストークスパラメータにおける拡張偏光度スペクトルを用いた光波の空間回転対称性解析の検討” 第63回応用物理学会春季学術講演会 21p-S622-20, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.21.).

〈国際〉

1. K. Miyamoto, M. Koichi, S. Ujita, T. Omatsu, “1.5  $\mu\text{m}$  dual-frequency pico-second optical parametric generator pumped by a Nd-doped vanadate bounce laser,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2011), CTuD4, (Baltimore, USA, 2011.5.3.).
2. M. Okida, J.Y. Huang, Y.F. Chen, T. Omatsu, “Controllable direction switching of vortex output in a Nd:YVO<sub>4</sub> bounce laser,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CA.P.4, (Munich, Germany, 2011.5.22.).
3. 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 and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CM5.5, (Munich, Germany, 2011.5.23.).
4. M. Ashihara, K. Hayashi, T. Yoshino, M. Okida, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Sub-100W phase conjugate pico-second Nd:YVO<sub>4</sub> laser system based on a tandem bounce amplifier,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CA6.4, (Munich, Germany, 2011.5.23.).
5. G. Thomas, T. Omatsu, M. J. Damzen, “High power mixed vanadate laser and modelocking with nonlinear mirror,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CA6.5, (Munich, Germany, 2011.5.23.).
6. T. Omatsu, K. Iwamatsu, S. P. Chard, A. Minassian, M. J. Damzen, “Radially-polarized, Q-switched pulses from a side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> compact stigmatic bounce laser with a photonic crystal output coupler,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CA9.2, (Munich, Germany, 2011.5.24.).
7. 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 and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CD5.1, (Munich, Germany, 2011.5.25.).
8. M. Koyama, T. Hirose, Y. Tanaka, K. Miyamoto, T. Omatsu, “Sub-mJ nano-second vortex pulse generation from a stressed Yb-doped double-clad fiber amplifier,” Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO-EUROPE/EQEC 2011), CJ9.1 THU, (Munich, Germany, 2011.5.26.).
9. T. Omatsu, M. Okida, K. Iwamatsu, A. Minassian, M. J. Damzen, “Frequency-doubled Vortex Laser Based on a Side-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> Compact Stigmatic Bounce Amplifier,” International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, 3630-CT-3, (Sydney, Australia, 2011.8.30.).
10. K. Miyamoto, S. Miyagi, M. Yamada, M. Okida, N. Aoki, T. Omatsu, “2 $\mu\text{m}$  Optical Vortex Output from a Degenerated Optical Parametric Oscillator,” International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, 3630-CT-4, (Sydney, Australia, 2011.8.30.).

11. 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, JTu1K4, (San Jose, USA, 2012.5.10.).
12. M. Koyama A. Shimomura, T. Hirose, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Over 25W nanosecond vortex laser based on a stressed Yb-doped fiber power amplifier," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science (QELS) Conference, QTh4E.8, (San Jose, USA, 2012.5.10.).
13. T. Yusufu, Y. Tokizane, S. Miyagi, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Milli-joule level  $2\mu\text{m}$  vortex pulses from an optical vortex pumped optical parametric oscillator," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science (QELS) Conference, CF2B.4, (San Jose, USA, 2012.5.11.).
14. 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), 5P-6, (Chiba, Japan, 2012.7.5.).
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), 6P-5, (Chiba, Japan, 2012.7.6.).
16. F. Takahashi, K. Toyoda, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Chiral nanoneedle fabrication based on optical vortex laser ablation," Topological lightwave synthesis and its applications 2012 (T-LWS 2012), 6P-6, (Chiba, Japan, 2012.7.6.).
17. H. Seki, T. Yoshino, K. Miyamoto, T. Omatsu, "High average-power, high-quality pico-second laser system based on a thin Nd:YVO<sub>4</sub> slab bounce amplifier," Europhoton 2012, FrA.3, (Stockholm, Sweden, 2012.8.31.).
18. K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, T. Omatsu, "Nano-needle fabrication based on optical vortex laser ablation," 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-optics (ICALEO) 2012, N503, (Anaheim, USA, 2012.9.27.).
19. Y. Tokizane, M. Yamada, T. Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Milli-joule level  $2\mu\text{m}$  fractional vortex generation from an optical parametric master oscillator and amplifier," The 2nd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'13), ALPS2-3, (Yokohama, Japan, 2013.4.24.).
20. A. Lee, T. Omatsu, H. Pask, "Continuous-wave emission from a self-Raman vortexlaser," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CA-1.6, (Munich, Germany, 2013.5.12.).
21. S. Takizawa, F. Takahashi, K. Toyoda, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Silicon chiral bump formed by optical vortex laser ablation," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CM-5.4, (Munich, Germany, 2013.5.15.).
22. M. Koyama, T. Hirose, A. Shimomura, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Frequency-doubled pico-second vortex fiber laser formed by a stressed Yb-doped fiber MOPA system," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CJ-6.6, (Munich, Germany, 2013.5.15.).
23. M. Sato, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Selective control of wavefront helicity in a side-pumped," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CA-10.1, (Munich, Germany, 2013.5.15.).
24. T. Yusufu, Y. Tokizane, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Tunable milli-joule-level  $2\mu\text{m}$  fractional vortex optical parametric amplifier," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CA-10.3, (Munich, Germany, 2013.5.15.).
25. M. Watabe, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Spiral relief formation in an azo-polymer film by the irradiation of a circularly polarized optical vortex beam," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CM-5.1, (Munich, Germany, 2013.5.15.).

26. F. Takahashi, K. Kohei, S. Takizawa, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Chiral structure control of metal nano-needles fabricated by optical vortex laser ablation," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2013, CM3H.6, (San Jose, USA, 2013.6.10.).
27. Z. Yang, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Quasi-real-time Measurement of Orbital Angular Momentum Spectra of Ultra-broadband Optical Vortices from Fork-like Interferograms," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2013, QM3E.2, (San Jose, USA, 2013.6.10.).
28. K. Miyamoto, K. Suizu, T. Saito, T. Akiba, T. Omatsu, "Widely Tunable (1-15THz), Narrowband Picosecond Terahertz Light Source," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference (CLEO-PR 2013), MC1-6, (Kyoto, Japan, 2013.7.1.).
29. T. Yusufu, Y. Tokizane, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Helicity control of a 2- $\mu$ m optical vortex output from a vortex-pumped optical parametric oscillator," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference (CLEO-PR 2013), MA2-4, (Kyoto, Japan, 2013.7.1.).
30. Y. Sasaki, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Ultra-Violet optical vortex generation," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and The 18th OptoElectronics and Communications Conference (CLEO-PR 2013), MA2-3, (Kyoto, Japan, 2013.7.1.).
31. Z. Yang, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Frequency-resolved Orbital Angular Momentum Spectrum Measurement of Ultra-broadband Optical Vortices," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2013), WB4-5 (Kyoto, Japan, 2013.7.3.).
32. M. Suzuki, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Azimuthally-Polarized Modes of Ultrashort Optical Pulses in an Anisotropic Crystal," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2013), WB4-4 (Kyoto, Japan, 2013.7.3.).
33. K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Programmable Ultrashort Optical-vortex Pulse Generation Using Optical Parametric Amplification and 4-f Configuration," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2013), WB4-3 (Kyoto, Japan, 2013.7.3.).
34. A. Mahjoub, S. Suzuki, Y. Iso, T. Ouchi, N. Aoki, K. Miyamoto, T. Yamaguchi, T. Omatsu, J.P. Bird, D.K. Ferry, K. Ishibashi, Y. Ochiai, "Room Conditions THz Detector Using Graphene FET," The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2013), Mo4-4, (Mainz on the Rhine, Mainz, Germany, 2013.9.4.).
35. A. Abulikemu, T. Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Direct generation of a fractional vortex output from an optical parametric oscillator," 1st Optical Manipulation Conference, OMC5-5, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
36. G. Juman, M. Watabe, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Optical vortex induced chiral surface relief in an azo-polymer film," 1st Optical Manipulation Conference, OMC7-2, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
37. F. Takahashi, S. Takizawa, K. Miyamoto, H. Hidai, R. Morita, T. Omatsu, "Chiral crystalline silicon nano-cone formation by the irradiation of an optical vortex pulse," 1st Optical Manipulation Conference, OMC7-3, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
38. N. Nakamura, W. Akiyama, D. Momiyama, K. Miyamoto, Y. Ochiai, T. Omatsu, N. Aoki, "Growth of ultra-flat thin film of C60 photo-polymer under optical vortex irradiation," 1st Optical Manipulation Conference, OMC-PDP-2, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
39. K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Spatiotemporal decoherence of excitons excited by an optical vortex with multiple orbital angular momentum," 1st Optical Manipulation Conference, OMC8-4, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
40. K. Yamane, A. Honda, Y. Toda, R. Morita, "Generation of mJ-class ultrashort optical-vortex pulses with programmable topological-charge control," 1st Optical Manipulation Conference, OMC6-1, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
41. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Extended Stokes Parameters Capable of Degree of Polarization definition for Axially-Symmetric Polarization based on Cylindrical Coordinates," 1st Optical Manipulation Conference, OMC5-3, (Pacifico Yokohama,

- Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
42. M. Sakamoto, R. Fukumoto, K. Oka, R. Morita, N. Murakami, "Dispersion reduction in generation of high-order optical vortex using axially-symmetric half-wave plates," 1st Optical Manipulation Conference, OMC1-4, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.23.).
  43. F. Takahashi, S. Takizawa, H. Hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Chiral mono-crystalline silicon nano-cone fabrication by optical vortex pumping," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), SF1J.5 (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.13.).
  44. K. Shigematsu, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Spatiotemporal coherence of GaN excitons excited by an optical vortex with multiple orbital angular momentum," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), FTu1B.3, (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.10.).
  45. K. Yamane, Y. Shioda, M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultra-broadband pulses with axially-symmetric polarization based on coherent beam combining of optical vortices," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), SW3E.5, (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.11.).
  46. T. Akiba, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Real-time THz-wave spectroscopy via infrared lights detection interacted with evanescent THz waves," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), JTh2A (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.12.).
  47. Michael-Tomoki Horikawa, Kenji Furuki, Yu Tokizane, Katsuhiko Miyamoto, Takashige Omatsu, "Tunable mid-infrared(6.3-7.8 $\mu$ m) optical vortex laser," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2014), SM11.6, (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.12.).
  48. K. Yamane, A. Honda, Y. Toda, R. Morita, "Over 1-mJ intense ultrashort optical-vortex pulse generation with programmable topological-charge control by chirped-pulse amplification," 9th International Conference on Ultrafast Phenomena, 08.Tue.D.5. (Okinawa Convention Center, Naha, Japan, 2014.7.8.).
  49. M. Sakamoto, K. Yamane, N. Murakami, R. Morita, K. Oka, "Generation of the ring-shaped optical lattice using axially-symmetric polarization elements (II)," The 2014 Frontiers in Optics/Laser Science (FiO/LS) meeting, The conference of Frontier in Optics and Laser Science (FiO/LS) 2014, FM4D.3 (The JW Marriott Tucson Starr Pass Resort in Tucson, Arizona, USA, 2014.10.20.).
  50. F. Takahashi, S. Takizawa, H. Fujiwara, H. hidai, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Optical vortex can create monocrystalline silicon pillar," The 2nd Optical Manipulation Conference (OMC'15), OMC8-2, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2015.04.24.).
  51. J. Lee, M. Magarisawa, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Glycine crystallization by structured photon radiation pressure," The 2nd Optical Manipulation Conference (OMC'15), OMC8-5, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2015.04.24.).
  52. A.Ogawa, M.T.Horikawa, K.Miyamoto, T.Omatsu, "Chirality control in mid-infrared vortex parametric laser," The 2nd Optical Manipulation Conference (OMC'15), OMC7-3, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2015.04.24.).
  53. A. Abulikemu, T.Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Widely tunable 1- $\mu$ m optical vortex laser," The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), SW3O.7, (San Jose, USA, 2015.05.10-15.).
  54. M. T. Horikawa, A. Ogawa, K. Furuki, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Handedness Control Of Mid-infrared (9-12 $\mu$ m) Vortex Laser, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), STh4H. 6, (San Jose, USA, 2015.05.10-15.).
  55. F. Takahashi, S. Takizawa, H. Fujiwara, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Monocrystalline silicon pillar created by optical vortex pulse illumination," The European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Europe 2015) , CM-3.4, (Messe München International, Munich, Germany, 2015.06.21.).
  56. M. Abe, M. Kowa, K.Miyamoto, T. Omatsu, "Diffraction-limited, high-average power pico-second laser formed of a sapphire end-capped Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier," The

European Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO Europe 2015), CM-3.4, (Messe München International, Munich, Germany, 2015.06.21.).

57. T. Yusufu, A. Abulikemu, K. Yamane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Widely tunable fractional vortex laser," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO Europe 2015), CA-7.6, (Munich, Germany, 2015.06.22.).
58. A. Lee, H. Pask, T. Omatsu, "A vortex Raman laser with sum-frequency emission at 559 nm," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO Europe 2015), CA-7.6, (Munich, Germany, 2015.06.22.).
59. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Quantitative Characterization of Polarization States of Axisymmetrically Polarized Pulses Generated by Coherent Beam Combining", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), SW1H.7, (San Jose, USA, 2015.05.13.).
60. M. Kowa, M. Abe, K. Miyamoto, T. Omatsu, "High average power picosecond sapphire face-cooled Nd:YVO<sub>4</sub> bounce laser system," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 26A1-5 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).
61. A. Ogawa, M.-T. Horikawa, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Handedness control of sub-millijoule mid-infrared (6-12 $\mu$ m) vortex laser," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 27A2-3 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).
62. K. Miyamoto, B. J. Kang, W.-T. Kim, F. Rotermund, T. Omatsu, "Broadband THz vortex pulse generation by a Tsurupica spiral phase plate," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 28B1-4 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).
63. Y. Sasaki, T. Yusufu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "High efficient frequency doubling of optical vortex," The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim (CLEO-PR 2015), 28G2-1 (Busan, Korea, 2015.8.25-28.).

③ ポスター発表 (国内会議 8 件、国際会議 23 件)

〈国内〉

1. 山田将来, 時実悠, Taximaiti Yusufu, 宮本克彦, 尾松孝茂, "光パラメトリック発振器における 2 $\mu$ m 帯非整数光渦の発生," 第 12 回レーザー学会 東京支部研究会 (東海大学, 2012.3.6.).
2. 斎藤岳史, 小市真樹, 宮本克彦, 尾松孝茂, "光注入型差周波発生による狭線幅ピコ秒テラヘルツ波発生," 第 73 回応用物理学会学術講演会 12a-PA2-3 (愛媛大学, 2012.9.12.).
3. 佐々木佑太, 宮本克彦, 尾松孝茂, "高出力ピコ秒光渦パルスの非線形波長変換," 第 73 回応用物理学会学術講演会 12a-PA2-4 (愛媛大学, 2012.9.12.).
4. 佐藤真武, 宮本克彦, 尾松孝茂, "側面励起 Nd:YVO<sub>4</sub> 光渦レーザーにおける符号制御," 第 73 回応用物理学会学術講演会 12a-PA2-5 (愛媛大学, 2012.9.12.).
5. 高橋冬都, 豊田耕平, 宮本克彦, 尾松孝茂, "光波の全角運動量を用いた金属ナノニードルのキラル制御," 第 73 回応用物理学会学術講演会 13p-PA9-9 (愛媛大学, 2012.9.13.).
6. 金子直也, 秋葉拓也, 水津光司, 宮本克彦, 尾松孝茂, "テラヘルツ・エバネッセント波によるリアルタイム計測," 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17a-PA2-12, (青山学院大学相模原キャンパス, 神奈川, 2014.3.19).
7. パリダンアルキン, Lee Jun Hyung, 曲澤学, 宮本克彦, 尾松孝茂, "光渦を用いたレーザートラッピング法によるグリシン結晶成長制御," 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-P2-1, (東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川, 日本, 2014.03.14.).
8. 重松恭平, 鈴木雅人, 山根啓作, 森田隆二, 戸田泰則, "時空間分解偏光解析から明らかとなった励起子コヒーレントダイナミクスにおける回転対称性破れ," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20p-P3-1, (東工大 大岡山キャンパス, 東京, 日本, 2016.03.19.).

〈国際〉

1. Y. Ueno, Y. Toda, S. Adachi, R. Morita, T. Tawara, "Arbitrary Control of Orbital Angular Momentum of Light via Excitons in GaN," The 11th Chitose International Forum on Photonic

- Science and Technology, (Hokkaido, Japan, 2010.10.14-15.).
2. T. Saito, Y. Toda, R. Morita, "Optical Vortex Generation and its Precise Control in Optical Fiber," The 11th Chitose International Forum on Photonic Science and Technology, (Hokkaido, Japan, 2010.10.14-15.).
  3. Junichiro Kashima, Yasunori Toda, Ryuji Morita, "Arbitrary Dynamical Manipulation of Low-Refractive-Index Droplets using Optical Vortices," 12th Chitose International Forum on Photonics Science and Technology (Hokkaido, Japan, 2011.10.14.).
  4. 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, P-6, (Chiba, Japan, 2012.7.5.).
  5. 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, P-15, (Chiba, Japan, 2012.7.5.).
  6. K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Generation of ultrashort optical-vortex pulses in few-cycle regime," Europhoton 2012, TuP.7, (Stockholm, Sweden, 2012.8.28.).
  7. Y. Tokizane, T. Yusufu, M. Yamada, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Over 2 mJ, 2  $\mu\text{m}$  optical vortex pulse generation from an optical vortex pumped optical parametric oscillator," Europhoton 2012, ThP16, (Stockholm, Sweden, 2012.8.30.).
  8. M. Suzuki, K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Nonlinear Conversion between Ultrashort Radially- and Azimuthally-Polarized Pulses in an Anisotropic Media," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), IF-P.14, (International Congress Centre Munich, Munich, Germany, 2013.5.12.).
  9. K. Yamane, Z. Yang, K. Shigematsu, Y. Toda, R. Morita, "Measurement of orbital angular momentum spectrum of optical vortices based on electric-field reconstruction in spatial domain," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), CF/IE-P.34, (International Congress Centre Munich, Munich, Germany, 2013.5.15.).
  10. K. Yamane, Y. Toda, R. Morita, "Amplification of ultrashort optical-vortex pulses with programmable topological-charge control," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2013), JW2A.04, (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2013.6.12.).
  11. Y. Tabata, F. Takahashi, S. Takizawa, K. Miyamoto, R. Morita, T. Omatsu, "Chiral copper nano-needle formation by optical angular momentum transfer", 1st Optical Manipulation Conference, OMCp3-4, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
  12. K. Furuki, M. T. Horikawa, Y. Tokizane, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Mid-Infrared (6.5 $\mu\text{m}$ ) optical vortex laser," 1st Optical Manipulation Conference, OMCp3-14, (Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 2014.4.24.).
  13. G. Juman, M. Watabe, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Chiral polymeric relief structures fabricated by using optical vortices," Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO: 2014), JT4A.129 (San Jose Convention Center, San Jose, Calif, America, 2014.06.09.).
  14. Y. Sasaki, K. Miyamoto, I. Shoji, T. Omatsu, "Deep ultraviolet vortex generation based on nonlinear frequency conversion by periodically-bonded  $\beta\text{-Ba}_2\text{B}_2\text{O}_4$  device," 6th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, TuP-T1-P-21 (University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland, 2014.08.28.).
  15. M. Abe, Y. Sasaki, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Diffraction-limited, high-power pico-second laser formed of a Nd:YVO<sub>4</sub>/sapphire composite bounce amplifier," 6th EPS-QEOD EUROPHOTON CONFERENCE, ThP-T1-P-25 (University of Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland, 2014.08.28.).
  16. Katsuhiko Miyamoto, Koji Suizu, Takuya Akiba, Takashige Omatsu, "Tsurupica spiral phase plate for terahertz vortex generation," International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2014 (IS-PALD 2014), P4. (National Chiao Tung University, Taiwan, 2014.9.4.).
  17. M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, R. Morita, "Quantitative Analysis of  $l = 2$  Radially Polarized Ultrashort Pulses by Using Extended Stokes Parameters", The European

Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), EE-P.9, (International Congress Centre Munich, Munich, Germany, 2015.6.21.).

18. K. Shigematsu, S. Morimoto, M. Suzuki, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda, "Coherent Dynamics of Uniaxially-Strained GaN Ex-citons Excited by Cylindrically Polarized Pulses", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), EE-P.15, (International Congress Centre Munich, Munich, Germany, 2015.6.21.).
19. K. Yamane, S. Nakajim, M. Suzuki, Y. Toda, R. Morita, "Eigenmode expansion of optical vortices based on electric-field reconstruction in spatial domain", The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015), CF-P.28, (International Congress Centre Munich, Munich, Germany, 2015.6.24.).
20. T. Yano, T. Abe, N. Kaneko, K. Suizu, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Tunable picosecond terahertz light source," International symposium on frontiers in THz technology (FTT 2015), Pos2.15 (Congress Center in ACT City Hamamatsu, Hamamatsu, Japan, 2015.09.01.).
21. A. Ogawa, T-M. Horikawa, K. Ando, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Chirality control in mid-infrared optical vortex parametric laser," SPIE/OSJ Biophotonics Japan, Paper 9792-61 (University of Tsukuba, Tokyo Campus, Tokyo, Japan, 2015.10.27.).
22. R. Mamuti, A. Abulikemu, Y. Taximaiti, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Widely tunable near-infrared optical vortex parametric oscillator," SPIE/OSJ Biophotonics Japan, Paper 9792-58 (University of Tsukuba, Tokyo Campus, Tokyo, Japan, 2015.10.27.).
23. J. Lee, M. Magarisawa, S. Toyoshima, K. Miyamoto, T. Omatsu, "Glycine crystallization by structured light illumination," SPIE/OSJ Biophotonics Japan, Paper 9792-60 (University of Tsukuba, Tokyo Campus, Tokyo, Japan, 2015.10.27.).

#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (5 件)

1. 光渦レーザービーム発振装置及び発振方法、尾松孝茂、沖田昌仁、千葉大学、平成 23 年 2 月 28 日、特願 2011-043386 号。
2. 光渦レーザー装置、尾松孝茂、宮本克彦、千葉大学、平成 23 年 6 月 7 日、特願 2011-127356 号。
3. 有機螺旋構造体の製造方法、及びそれにより製造される有機螺旋構造体、尾松孝茂、宮本克彦、千葉大学、平成 25 年 5 月 10 日、特願 2013-100784 号。
4. 光渦発生装置及びこれに用いられる連続螺旋型位相版並びに光渦発生方法、宮本克彦、尾松孝茂、工藤朗人、千葉大学、平成 26 年 2 月 28 日、特願 2014-039285 号。
5. アミノ酸結晶の製造方法及びタンパク質結晶の製造方法、尾松孝茂、宮本克彦、千葉大学、平成 26 年 8 月 31 日、特願 2014-176697 号。

##### ◎国内特許取得(参考)

1. 特許第5164151号「軸対称偏光レーザー発振装置及び軸対称偏光レーザー発振方法」平成20年2月8日出願(平成24年12月28日登録)  
全発明者氏名:尾松孝茂(千葉大学教授)、森田隆二(北海道大学教授)
2. 特許第5254077号「光渦発生装置と方法」平成21年2月25日出願(平成25年4月26日登録)  
全発明者氏名:尾松孝茂(千葉大学教授)
3. 特許第5470629号「微小スポット形成方法および微小スポット形成装置」平成20年6月29日出願(平成26年2月14日)  
全発明者氏名:尾松孝茂(千葉大学教授)、渡辺敏行(東京農工大学教授)
4. 特許第5531261号「レーザー加工方法、円偏光光渦レーザービームを用いたレーザー加工

方法、針状体を有する部材の製造方法、および針状体を有する部材」

平成22年2月12日出願(平成26年5月9日登録)

全発明者指名:尾松孝茂(千葉大学教授)、森田隆二(北海道大学教授)、丹田 聡(北海道大学教授)

5. 特許第5688698「フラーレン重合体の製造方法及び導体膜の製造方法」

平成22年5月30日出願(平成27年2月6日)

全発明者指名:落合勇二(千葉大学教授)、青木伸之(千葉大学准教授)、尾松孝茂(千葉大学教授)、宮本克彦(千葉大学准教授)

## ②海外出願 (1 件)

1. 光渦レーザー装置、尾松孝茂、宮本克彦、千葉大学、特願 2011-127356 号の海外特許、米国、ドイツ、英国を予定。

## ③その他の知的財産権

### (5)受賞・報道等

#### ① 受賞

1. 山田将来 (共著者 時実 悠, Taximaiti Yusufu, 宮本克彦, 尾松孝茂)  
第 12 回 レーザー学会 東京支部研究会ポスター講演最優秀賞, “光パラメトリック発振器における  $2\mu\text{m}$  帯非整数光渦の発生,” (2012.3.6.).
2. 豊田耕平 (共著者 高橋冬都, 宮本克彦, 森田隆二, 尾松孝茂)  
第 8 回 OPJ ベストプレゼンテーション賞, “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製,” (2012.10.26.).
3. 佐々木佑太 (共著者 宮本克彦, 時実悠, 尾松孝茂)  
第 8 回 OPJ ベストプレゼンテーション賞, “高出力ピコ秒光渦レーザーの非線形波長変換,” (2012.10.26.).
4. 高橋冬都 (共著者 豊田耕平, 宮本克彦, 尾松孝茂)  
第 33 回応用物理学会講演奨励賞, “光波の全角運動量を用いた金属ナノニードルのキラリズム制御,” (2012.秋季).
5. 尾松孝茂  
第 7 回応用物理学会フェロー, “トポロジカル光科学と高性能固体レーザーに関する研究,” (2013.7.1.).
6. 鈴木 雅人 (共著者 山根啓作, 戸田泰則, 森田隆二)  
IEEE Photonics Society Japan, Best Student Award at 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific-Rim, “Nonlinear Coupling between Radially- and Azimuthally-Polarized Modes of Ultrashort Optical Pulses in an Anisotropic Crystal,” (2013.7.3.).
7. 尾松孝茂  
Visiting Professor, Department of Energy Systems Research, Graduate School, Ajou University 亜州大学校(韓国) 客員教授就任, (2014.3.1.).
8. 尾松孝茂  
APEX/JJAP 編集貢献賞 (2014.4.9.).
9. 堀川マイケル知樹 (共著者 古城健司, 尾川あずさ, 宮本克彦, 尾松孝茂)  
第 37 回(2014 年秋季)応用物理学会講演奨励賞, “同軸位相整合差周波光発生による中赤外( $6.3\text{-}12.0\mu\text{m}$ )光渦” (2015.03.12.).
10. 尾川あずさ (共著者 堀川マイケル知樹, 宮本克彦, 尾松孝茂)  
The optical society, OSA best student paper prize, “Handedness control of sub-millijoule mid-infrared ( $6\text{-}12\mu\text{m}$ ) vortex laser” (2015. 8. 26.)
11. 重松恭平, 戸田泰則, 山根啓作, 森田隆二  
第 37 回応用物理学会論文賞, “Orbital Angular Momentum Spectral Dynamics of GaN Excitons Excited by Optical Vortices,” Jpn. J. Appl. Phys., **52**, 08JL08 (2013).

12. 尾松孝茂

The Optical Society (OSA) Fellow for pioneering contribution in optical vortex lasers and their applications including chiral nanostructures fabrication. (2016.1.1.).

13. 尾松孝茂

平成 28 年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門),”キラルな光渦によるナノ物質の構造・物性制御”(2016.4.20).

14. 尾松孝茂

第一回双葉電子記念財団賞受賞 (2016.7.8).

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 読売新聞(2012.6.26) “世界で最も細い針作製”、東京新聞(2012.6.28) “光渦が生む極小の針 千葉大研究所 尾松教授ら発表「レーザーで簡単、量産」”、その他チバテレビなど。  
レーザーでらせんの金属ナノ針を作ることに成功した。先端部の直径約 50 ナノメートル、長さ 0.01 ミリメートルのらせん針は化学反応を介さない光による物理的な変化でできる針としては最細である。
2. 日刊工業新聞・東京新聞 (2013.3.27) “千葉大など、光のらせん性とニードルの形の関係を定量的に解明”  
光渦を利用してできる螺旋形状の金属ナノニードルの形状が、光渦レーザーの螺旋波面の巻き数と円偏光の向き(螺旋性)で制御できることを、世界で初めて実証した。
3. マイナビニュース (2014.07.03) “千葉大、テラヘルツ波帯光渦を高効率に発生できるポリマー螺旋位相板を開発”  
可視光およびテラヘルツ波に対して透明なポリマーを用いて簡便にテラヘルツ波帯で光渦を発生できる螺旋位相板を開発した。
4. 平成27年6月17日 SPIE ジャパンニュースルーム「日本の研究ヘッドライン」(2015.06.17) “「光の渦」でポリマー薄膜表面に螺旋レリーフを創る”  
アゾポリマーでは光の偏光方向に沿って起こる質量移動を起源に表面レリーフができるので、一般に、螺旋型の表面レリーフは記録できない。その常識をつくがえす螺旋レリーフを円偏光光渦によって記録した。また、その記録過程を可視化した。
5. オプトロニクスニュース(2014.05.08)  
“北大、レーザーのらせん度をすばやく精密に測定する方法を開発”  
電場再生法を用いて、超広帯域の光渦パルスの軌道角運動量スペクトルを秒単位、1%以下の誤差で測定する手法を開発した。
6. 千葉大学ニュースリリース・オプトロニクス オンラインニュース・読売オンラインニュース・Infoseek・楽天 NEWS・産経ニュース  
“世界初、光渦の輻射力が創るシリコンニードルとその形成過程の可視化に成功”
7. 北大プレスリリース・OplusE オンラインニュース(2015.12.11)  
“径偏光レーザービームの偏光分布を高速で完全定量的に評価する手法を開発”  
径偏光レーザービームと呼ばれる偏光分布が放射状に分布する新奇レーザービームの完全定量評価手法を独自に開発した。

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- テラヘルツ波帯で簡便にトポロジカル光波が発生できる螺旋位相板(テラヘルツ波帯で分散が少ない樹脂 Tsurupica を使用)を梱パックスより商品化した。

②社会還元的な展開活動

- 得られた成果は、国際的な学術誌 Science (N. M. Litchinitser, “Structured light meets structured matter,” Science, **337**, 1054 (2012)) に取上げられた。

- 本研究成果は、Singular and Chiral Nanoplasmonics, (in press, Pan Stanford Publishing Pte Ltd.)で取り上げられた。(T. Omatsu, R. Morita, “Chiral Nanostructures Fabricated by Twisted Light with Spin.”)
- 国際会議 Topological lightwave synthesis and its applications 2012(2012.7.5-6, Chiba)を主催し、海外に情報発信した。
- 国際会議 Optical manipulation conference (横浜パシフィコ)を2014年より毎年主催し、海外に情報発信するとともに、研究者ネットワークを強化した。
- トポロジカル光波による物質科学を化学系や生命科学系に展開するため、千葉大学の融合的学際研究拠点として、2015年4月、千葉大学融合科学研究科附属分子キラリティー研究センターを発足した。
- 研究代表者は The Optical Society(米国光学会)の Director at large に就任し、日本の光学関連研究のプレゼンス可視化に貢献している。

## § 5 研究期間中の活動

### 5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2010.10.14.	チーム内ミーティング CREST のサイトビジット (非公開)	千葉大学	5	進捗状況報告および研究方針について打合わせた。
2011.6.24.	チーム内ミーティング 森田教授セミナー講演 (非公開)	千葉大学	20	進捗状況報告を含めたセミナー形式の講演会を行った。
2011.7.7.	チーム内ミーティング CREST のサイトビジット (非公開)	千葉大学	10	進捗状況報告および研究方針について打合わせた。
2011.12.22-23.	チーム内ミーティング (非公開)	北海道大学	10	両チームの進捗状況を含む成果発表会を行った。さらに、研究室を見学し技術移管の検討を行った。
2012.7.5-6.	Topological lightwave synthesis and its applications 2012	千葉大学	75	トポロジカル光波に関する国内外の研究者を一同に会し、トポロジカル光波の潜在的可能性を討議するとともに日本における研究アクティビティーを強く海外にアピールした。
2012.7.18.	チーム内ミーティング CREST のサイトビジット (非公開)	千葉大学	10	進捗状況報告および研究方針について打ち合わせた。
2012.9.3.	France-Japan joint workshop on Advanced Lasers and Nonlinear Optics	Grenoble, France	25	トポロジカル光波および非線形光学に関して日本・フランス研究者間の研究交流を図った。
2012.11.9-10.	チーム内ミーティング	北海道大学	10	両チームの進捗状況を含む

	(非公開)			成果発表会を行った。さらに、研究室を見学し技術移管の検討を行った。
2013.7.23.	チーム内ミーティング CREST のサイトビジット (非公開)	千葉大学	10	進捗状況報告および研究方針について打合わせた。
2013.11.22.	チーム内ミーティング (非公開)	千葉大学	5	研究進捗報告のためのミーティング
2013.12.20.	チーム内ミーティング (非公開)	北海道大学	20	研究進捗報告のためのミーティング
2014.2.18	チーム内ミーティング (非公開)	千葉大学	5	研究進捗報告のためのミーティング
2014.4.22-25.	Optical manipulation and its satellite topics (OMC'14)	パシフィコ 横浜	85	学術交流
2014.7.15.	チーム内ミーティング (非公開)	千葉大学	10	研究総括によるサイトビジットの際の、研究進捗報告ミーティング
2014.9.22.	チーム内ミーティング (非公開)	北海道大学	30	研究進捗報告のためのミーティング
2015.3.3	チーム内ミーティング (非公開)	千葉大学	10	研究総括によるサイトビジットの際の、研究進捗報告ミーティング
2015.4.22-24.	Optical manipulation and its satellite topics (OMC'15)	パシフィコ 横浜	80	学術交流
2015.7.14.	チーム内ミーティング (非公開)	千葉大学	5	研究進捗報告のためのミーティング
	国内外学会において千葉大・北大メンバー間の研究討議を実施。 (応用物理学会(6回)、日本光学会(2回)、CLEO(3回)、CLEO-Europe(2回)など総計10回以上)			進捗状況報告および研究方針に関する打合わせ。

## §6 最後に

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( $j\hbar=m\hbar+s\hbar$ )で与えられる光波のパラメータを「全角運動量( $j\hbar$ )」と呼ぶ。また、われわれは、「全角運動量」を有する光波をトポロジカル光波と呼んでいる。

本研究チームでは、トポロジカル光波の「全角運動量」を駆使した物質のナノ構造・ナノ物性制御を目標に研究を進めた。研究開始当初トポロジカル光波を金属に照射した際にできる金属ナノニードルに注目していた。

CREST 研究支援を受けて、光源技術や計測技術が整備され、ナノニードルの側面が螺旋構造を有することを発見した。この発見は「トポロジカル光波を物質に照射すると、物質が溶解すると同時にトポロジカル光波の「全角運動量」を受取り、その結果、物質が公転運動しながら螺旋状のナノ構造体(キラルナノ構造体)へ変形する」というこれまで誰も観測しなかった新奇物理現象であった。当初の実験では、ターゲット物質にタンタルを用いていたが、その後、銅やシリコンやアゾポリマーなどの様々な物質がキラルナノ構造体に変形することが分かった。すなわち、物質依存ではなく光の力学作用によって普遍的に起こる物理現象であることが明らかになった。現在、キラルなナノ構造体はメタサーフェースの新奇構造としてキラリティー識別性を有するバイオセンサー・バイオ MEMS などのキラル光学デバイスへ応用が期待されている。室温大気雰囲気中で起こるこの新奇物理現象を活用すれば、省エネルギー性・省スペース性・耐環境性に優れたキラル光学デバイス創成技術が確立できる。

また、「物質が光波の「全角運動量」を受け取り質量移動する」という事実に立脚すると、さらに様々なアイデアが生まれた。具体例を挙げると、アミノ酸結晶成長制御である。これらは、CREST 研究開始前は想像もしなかった研究テーマであり、CREST 研究チーム内の研究討議から発生したものである。同じフィールドでありながら立脚点が違う研究グループ、すなわち、光源開発を主とする千葉大グループと分光計測を主とする北大グループが連携したことの相乗効果である。また、検証実験が十分でないため詳細データは記載を控えさせていただいたが、フラーレンをトポロジカル光波で光重合すると金属的な電気伝導特性を示す重合体ができることが分かった。

このようにトポロジカル光波が数多くの新奇物理現象を誘導することが次々に明らかになってきた。

光科学では光源は脇役になりやすい。本研究チームでは、研究に使用した光源はほぼすべて自作した。現在、トポロジカル光波を発生させる技術では世界トップレベルであると自信をもって断言できる。このような光源開発の優位性が、研究をタイムリーにかつ強力に推進するドライビングフォースになったものだと信じている。

千葉大学、北海道大学の連携により、当初の CREST 研究計画を上回る研究成果が得られたと確信しているが、同時にアミノ酸結晶成長制御、金属性光重合フラーレンをはじめ新奇物質科学の胎動を感じさせる数多くの新研究テーマが生まれた。

今後は、トポロジカル光波が拓く物質科学を日本発の新学術領域として発信するとともに、新奇デバイス・新奇応用分野の開拓を積極的に推し進めイノベーションへと導く。さらに、光源開発の優位性を発揮しつつ、トポロジカル光波が誘導する新奇物理現象の探求と解明を推進していく所存である。

最後に、CREST 研究期間 5 年半に渡る手厚い経済支援に心より深く感謝するとともに、今後の継続的な支援も是非よろしく願いたい。



研究室集合写真。