

尾松孝茂

千葉大学大学院融合科学研究科・教授

トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出

## §1. 研究実施の概要

光波の「全角運動量( $\mathbf{J}$ )」とは、光波面のトポロジカルな構造から現れる軌道角運動量( $\mathbf{L}$ )と偏光のトポロジカルな構造によって現れるスピン角運動量( $\mathbf{S}$ )の量子力学的なベクトル和( $\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$ )で与えられる光パラメータである。ここでは「全角運動量( $\mathbf{J}$ )」を有する光波をトポロジカル光波と呼ぶ。

本研究では、光の新規パラメータである「全角運動量( $\mathbf{J}$ )」の 2 次元空間分布を超高速・高強度極限レーザー工学を用いて自在に操りトポロジカル極限光波を創成すること、極限トポロジカル光波の有する「全角運動量」を縦横無尽に駆使して物質のナノ構造・物性の極限的新機能を創出すること、さらには、光を用いたトップダウン・プロセスで機能性デバイスを創成すること、を目的とする。目的を達成するため、

- ①トポロジカル極限レーザー物理学の創成
  - ②トポロジカル物質科学の創成
  - ③トポロジカル・デバイス工学の創成
- の 3 項目を中心に研究を進める。

本年度は

### ①トポロジカル極限レーザー物理学

#### (1-1) 高出力高強度トポロジカル光源の開発(千葉大)

千葉大で提案した、加圧したラージモードエリアファイバー増幅器中での応力性モード分散を利用してガウスビームをトポロジカル光波へ変換する技術をもとに金属、半導体、誘電体、有機高分子などを高効率にアブレーションできる高出力ピコ秒あるいはナノ秒トポロジカル光源を開発した。

#### (1-2) 未踏波長域トポロジカル光源の開発(千葉大)

金属、半導体、誘電体、有機高分子をアブレーションしたり、高効率に電荷密度波を励振するには、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。千葉大では、KTP 結晶を用いた光パラメトリック発振器によって、2 $\mu\text{m}$  帯トポロジカル光波を開発した。

#### (1-3) 超短パルス・トポロジカル光波の創成(北大)

トポロジカル光波の「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し、「全角運動量」の潜在能力を十二分に活用する、高強度の超短パルストポロジカル光波の発生法の提案を行い、数値解析によりその有効性を明らかにした。

## ②トポロジカル物質科学(千葉大・北大)

「全角運動量( $J$ )」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を創成することができる。この現象を解明するため、第一段階として、プラズマ発光をICCDカメラによって時間分解計測し、「全角運動量」の違いによるプラズマ・ダイナミクスの変化をより定量的に計測する準備を行った。

また、 $\text{NbSe}_3$  マイクロリング結晶に「全角運動量」が制御された近赤外トポロジカル光波を照射すると、結晶のリング状構造(周回方向)に沿って「全角運動量」と同じ向きに進行する電荷密度波が励振される。スピン角運動量とともに、この励起トポロジカル光波の軌道角運動量は重要なパラメータである。そこで、トポロジカル光波の軌道角運動量スペクトルを測定するシステムを構築した。

## ③トポロジカル・デバイス工学(千葉大・北大)

トポロジカル光波の「全角運動量」によって、加工痕中央に金属面から突き出す高さ  $10\mu\text{m}$ 、直径数  $100\text{nm}$  の針状ナノ構造体が創成できる。22年度は、電子線走査顕微鏡によってナノ構造体の評価を行った。その結果、ナノ構造体の形状のみならず、トポロジカル光波の入射角度を変えるだけでナノ構造体の指向性まで制御できることが明らかになった。

## §2. 研究実施体制

### (1)「千葉大」グループ

① 研究分担グループ長:尾松孝茂 (千葉大学大学院融合科学研究科、教授)

#### ② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された高出力高強度トポロジカル光源の高エネルギー化
- ・「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高効率化と波面計測
- ・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の解明
- ・「全角運動量」によって形成されたナノ構造体のデバイス応用

### (2)「北大」グループ

① 研究分担グループ長:森田隆二 (北海道大学大学院工学研究院、教授)

#### ② 研究項目

- ・「全角運動量」が制御された超短パルス・トポロジカル光源の開発
- ・超短パルス・トポロジカル光波の軌道角運動量スペクトル解析実験
- ・超短パルス・トポロジカル光波の非線型相互作用・伝播実験およびその特性解析

### §3. 研究実施内容

(文中の引用番号等は(4-1)に対応する)

光波の「**全角運動量(J)**」とは、光波面のトポジカルな構造から現れる軌道角運動量(L)と偏光のトポジカルな構造によって現れるスピン角運動量(S)の量子力学的なベクトル和( $\mathbf{J}=\mathbf{L}+\mathbf{S}$ )で与えられる光パラメータである。ここでは「**全角運動量(J)**」を有する光波をトポジカル光波と呼ぶ。これまで光波の軌道角運動量、スピン角運動量はそれぞれ独立に研究が進められてきた。しかしながら、軌道角運動量(L)とスピン角運動量(S)のベクトル和で与えられる「全角運動量(J)」は未だ研究例が皆無で、未開拓な光パラメータである。

本研究では、光の新規パラメータである「全角運動量(J)」の2次元空間分布を超高速度・高強度極限レーザー工学を用いて自在に操りトポジカル極限光波を創成すること、極限トポジカル光波の有する「全角運動量」を縦横無尽に駆使して物質のナノ構造・物性の極限的新機能を創出すること、さらには、光を用いたトップダウン・プロセスで機能性デバイスを創成すること、を目的とする。

目的達成に向けて、以下の3項目を中心に研究を進める。

#### A.トポジカル極限レーザー物理学の創成

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、パワー・波長・パルス幅・位相において極限性能を示す極限トポジカル光波を発生させる。

#### B.トポジカル物質科学の創成

極限トポジカル光波の「**全角運動量**」を駆使して、金属、半導体、誘電体、有機高分子をはじめとする物質の新しいナノ構造・物性などの新機能を創出する。

#### C.トポジカル・デバイス工学の創成

極限トポジカル光波の「**全角運動量**」が生み出すナノ構造体、例えば、針状ナノ構造体を2次元あるいは3次元に配列化し、電界放射電極などの新機能性デバイス創成を狙う。

以下、本年度の研究成果を項目ごとに示す。

#### A.トポジカル極限レーザー物理学

千葉大は、加圧したラージモードエリアファイバー増幅器中での応力性モード分散を利用してガウスビームをトポジカル光波へ変換する独自の方法を提案した。この技術をもとに金属、半導体、誘電体、有機高分子などを高効率にアブレーションできるピコ秒トポジカル光源を整備した。本年度はファイバー増幅器の長さとおカットオフ値を最適化することで数値目標であった平均出力30Wを達成した。また、トポジカル光波の忠実度を示すM<sup>2</sup>因子はほぼ2で、理想的な一次のトポジカル光波が発生していることが分かった。この研究成果は Optics Express に論文掲載 (Opt. Express, 19, 2 (2011) 994-999.)された。

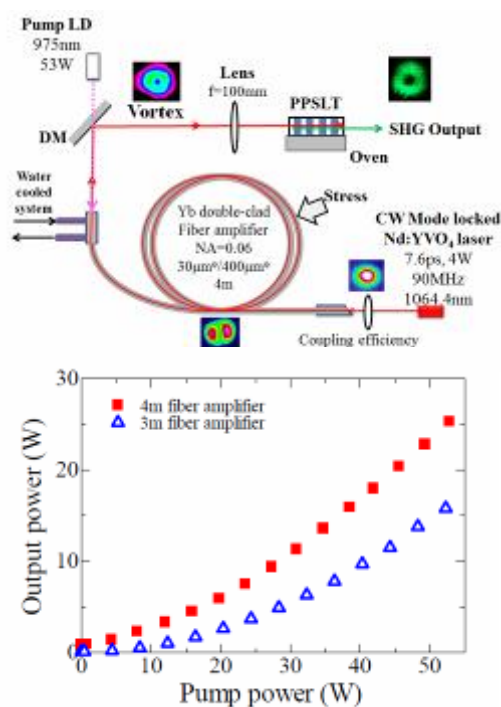


図 1 (上)実験配置図、(下)トポジカル光波の出力特性

金属、半導体、誘電体、有機高分子をアブレーションしたり、高効率に電荷密度波を励振するには、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。千葉大では、KTP 結晶を用いた光パラメトリック発振器によって、2  $\mu\text{m}$  帯トポロジカル光波の開発に着手した。本年度の数値目標であったパルスエネルギー1 mJ にはやや届かないものの 0.5 mJ の 2  $\mu\text{m}$  帯トポロジカル光波発生に世界で初めて成功した。本年度は 2  $\mu\text{m}$  帯トポロジカル光波の波面計測によるトポロジカルチャージの定量計測、パルスエネルギーの向上(>1 mJ)を狙う。

北大では、高強度超短パルス・トポロジカル光波を発生する方法として一軸結晶を用いる発生法を提案し、擬スペクトル法による数値解析により、その有用性を明らかにした。

### B.トポロジカル物質科学

「全角運動量(J)」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を創成することができる。この現象を解明するため、第一段階として、プラズマ発光を ICCD カメラによって時間分解計測し、「全角運動量」の違いによるプラズマ・ダイナミクスの変化をより定量的に計測する準備を行った。本年度の目標であった真空システムの設計が終わり、来年度より種々の雰囲気中で実験を開始する。本年度の研究でフラーレンの光重合にトポロジカル光波が有効であることが判明した。本年度は、重合後の電気伝導度をはじめとする物性値を定量化する。

トポロジカル光波に関して、スピン角運動量とともに軌道角運動量は重要なパラメータである。そこで、本年度はトポロジカル光波の軌道角運動量スペクトルを測定するシステムを構築した。また、超短光パルス・トポロジカル光波と物質との相互作用として、非線型光学物質内でトポロジカル光波の一つである複合光渦を発生させ、その伝播特性を調査した。この結果は、高強度トポロジカル光波と物質との相互作用を考える上での基礎となる。

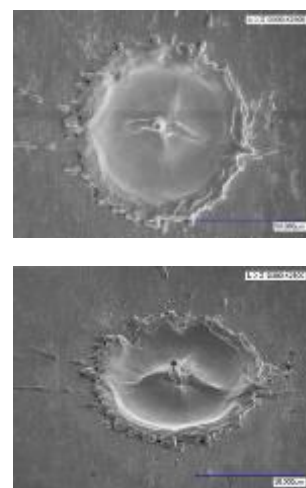


図 2 加工痕(ナノニードル)の SEM 画像。上は垂直方向に成長、下は斜め 10 度方向に成長していることが分かった。

### C.トポロジカル・デバイス工学

トポロジカル光波の「全角運動量」によって、加工痕中央に金属面から突き出す高さ 10  $\mu\text{m}$ 、直径数 100 nm の針状ナノ構造体が創成できる。本年度は、当初計画通り電子線走査顕微鏡によってナノ構造体の評価を行った。その結果、ナノ構造体の形状のみならず、トポロジカル光波の入射角度を変えるだけでナノ構造体の指向性まで制御できることが明らかになった。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

A-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, vol. 19, No. 2, pp.994-999, 2011. (DOI:10.1364/OE.19.000994)

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)