

「若手研究者スタートアップ支援プログラム」(2023年度支援分) 報告書

可知化センシングユニット 助教 川口 晴生

研究テーマ:トポロジカル光波によるレーザー微細構造形成の学理の探究

1. 今年度の進捗状況

本研究では波面・偏光の制御された2, 3次元的空间分布を持つ新しい光波であるトポロジカル光波を物質に照射することで、回折限界を超えた超解像微細構造形成とそれに基づくフォトニクスデバイス形成を実証するとともに、これまで散逸的に理解されてきたレーザーによる微細構造形成現象を「光と物質の相互作用」と「熱流体力学」に立脚した学理の再構築を目指す。そのためのツールとして精密なパラメータ制御が可能なトポロジカル光波を用いることで体系的な研究を行い、学理の解明と微細構造制御による新奇デバイス開発などアプリケーションへの展開を目指すものである。

当初掲げた3つの課題のうち、今年度は主に課題3として掲げたフェムト秒レーザーによる「偏光制御された高次 Hermite-Gaussian モードによるメタサーフェスデバイスの作成」に取り組んだ。当初は偏光 Hermite-Gaussian モードの使用を考えていたが、Q プレートという偏光制御素子一枚で多くの偏光分布モードを生成できるトポロジカル偏光渦を使用した。キラルメタサーフェス創成に向けてフェムト秒偏光渦レーザーによる微細周期構造形成(Laser induced Periodic Surface Structure: LIPSS)を含むアブレーション特性の評価および表面微細周期構造制御を行った。

①フェムト秒レーザー偏光渦(波長 520 nm(基本波 1040 nm), パルス幅 300 fs, 繰り返し周波数 500 kHz. Radial モード, Azimuth モード, その中間である Spiralモードを使用)を照射した場合、ビームプロファイルの2次元偏光分布を反映した放射状、同心円状、スパイラル状といった自伝的な表面周期構造形成に成功した。さらに、スパイラル構造の曲率は偏光渦の制御によって簡単にかつ自在に制御することができるため、波面変調、円偏光選

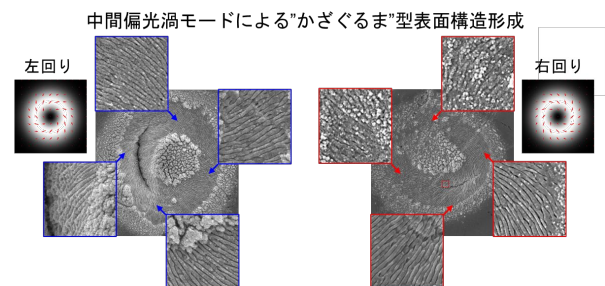


図1 スパイラル偏光を用いたスパイラル状のキラル LIPSS 構造

択のあるキラルメタサーフェスの製造法として有望である。このような表面構造形成は照射条件と周期幅から表面プラズモンポラリトン共鳴による LIPSS であると考えられ、流体力学的な質量移動はほぼなくプラズマによる材料の構造的な除去によってなされる構造であることが明らかとなった。

② Gaussian beam と偏光渦ビーム(Radial 偏光, Azimuth 偏光)におけるアブレーション閾値、および LIPSS 形成特性の調査を行った。結果として LIPSS 形成が発生するエネルギー閾値に大きな違いがない一方で、アブレーション閾値は光渦の方が 4 倍以上大きいことが明らかとなった。これは偏光渦レーザー加工ではアブレーションによる LIPSS 構造破壊が発生しにくいことを示しており、実験上避けられないパルスエネルギーの揺らぎに対してロバストなメタサーフェス生成が可能であることを示している。

③より強い集光条件($f=50$ mm)における偏光渦加工では、LIPSS 形成と高強度掘削によって3次元

的な対数螺旋構造、左右結び目構造が形成されるという全く予想外の結果が確認された。このような 3 次元トポロジカル構造形成の詳細なメカニズムは現在解析中であるが、これは偏光不均一空間分布によって焦点部に形成される偏光構造や縦電場の 3 次元的なトポロジカル構造を反映している可能性がある。今後はより詳しいメカニズム解明、及び新奇構造体創成に向けて近軸近似が成り立たないような高集光条件下におけるトポロジカルな電場、偏光構造にも注目してレーザー加工研究を進めていく予定である。

①～③の結果は Optical materials express 誌(IF: 2.8)にて論文が採択された。

課題 1「高次 Hermite-Gaussian モードを用いた新規構造形成と質量移動メカニズム」の検証、2「動径方向高次 Laguerre-Gaussian モードを用いたナノニードル構造の超微細化」の状況については、サブナノ秒の高出力マイクロチップレーザーを導入し、空間位相変調器を用いた実験専用の光学系を構築中である。完成次第、本課題終了後も継続して研究を進めていきたい。

今後の研究計画

本年の成果によりフェムト秒レーザーによる微細構造形成の研究を通して、偏光渦(軌道ポアンカレ)モードを強く集光した場合に現れるトポロジカルな電場構造が構造形成に強く寄与しているというレーザー加工の新たな可能性を見出した。このような高集光条件下におけるフェムト秒、ナノ秒レーザー加工における電場のトポロジカルな構造の影響も含めた物質の構造形成のメカニズム解明を推進する。

また、本件での構造形成過程解明の研究を通して、加工プロセスの直接計測の重要性が強く認識された。本プログラムで構築した加工システムをベースに加工実験を推進する一方で、加工中プロセスの測定を行えるようにする。核融合科学分野で発展してきた高精度、高速度なプラズマ検出、磁場検出技術などをレーザー加工分野に拓くことによって、レーザー加工現象の解明が可能になると期待している。これにより世界でも例を見ないトポロジカル光波と物質の相互作用過程の直接観測により光と物質の相互作用の本質を解明していきたい。

4. 成果等

投稿論文に関して、Optical material express (IF 2.7)の他、主著 1 件、共同著者 2 件の論文が採択された。科研費の採択・応募状況は下記のとおりである。

採択[代表] 2 件

- ・日本学術振興会・研究活動スタート支援
- ・自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 研究スタートアップ支援型

応募中[代表] 1 件

- ・天田財団 奨励研究助成

応募予定

- ・日本学術振興会 若手研究
- ・自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 若手研究、他 民間助成金に応募予定

不採択[代表] 4 件

他、共同研究者として 3 件を申請中