

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04627

研究課題名(和文)極微細レーザ描画、加工のための光プローブの研究

研究課題名(英文)Optical probes for ultra-fine laser processing

研究代表者

坪川 信 (Tsubokawa, Makoto)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・教授

研究者番号：70595975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：レーザ光の集光制御(光スポット径の縮小、長さの拡大等)に向け、ニューラルネットワークによるアルゴリズムを用いて、細径ファイバと先端レンズの構造における最適解を探索した。具体的には多層屈折率分布を有する先球構造をシミュレーション評価し、半波長以下のスポット径、100波長以上のスポット長などが確認できた。また、微小光スポットに有効な光ファイバ構造、例えば誘電体の Si や Si₃N₄ のボータイコア光ファイバにおいて、ナノ微粒子の補足及び両方向移送が制御できることを明らかにした。全成果は、学術論文2誌、国際会議3件、学内論文1(予定)に要約される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザ光の回折限界レベルを超える微細なスポット形成やビームシェーピング技術は、極微細な光電子回路やLSIの描画に不可欠、重要な技術である。また、ナノレベルの高強度光スポットやその空間制御は、医療工学分野などにおける光力を利用した高分子や生体分子の選別、ソーティングなどにおいて重要な基礎技術でもある。本研究はこれら両面に関する光ファイバ型デバイスの可能性を示唆する意義を持ち、基盤技術の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：For laser beam focusing control (spot radius reduction and length expansion), we searched for optimal structures of thin fiber and tip lens using a neural network algorithm. Specifically, a tip sphere structure with a multilayer refractive index distribution was evaluated by simulation, and spot diameters of $< \lambda/2$ and spot lengths of $> 100\lambda$ were obtained. Also, we found that trapping and bidirectional transport of nanoparticles can be controlled in optical fiber structures effective for micro-optical spots, for example, in dielectric Si or Si₃N₄ bowtie-core optical fibers. All results are summarized in 2 journal papers, 3 international conferences, and 1 Master thesis (expected).

研究分野：工学

キーワード：光ファイバ 光導波路 ナノ光デバイス 光スポット

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、2020年4月より3年にわたり実施された。微小な光ビームスポットやビーム成型は、レーザ光による微細加工や回路描画、医療分野等での微粒子/細胞分子のトラップなどに応用される重要な技術である。通常、レーザビームを集光する場合、開設限界によりそのスポット径は光波長の半分程度に制限されるため、紫外、極紫外あるいは電子線などが必須で光源や光学系のコスト、技術困難があった。比較的短波長の可視から近紫外領域の利用では、ビーム自体のスポット微細化、長焦点とともにビーム形状制御(ビームフォーミング)などの課題があり多くの研究がなされている。我々は光ビームの微小スポット形成と長焦点化をナノジェットと呼ばれる光プローブの設計・評価を第一の目標とし光ファイバ構造とその先端加工モデルの創案、シミュレーション評価を実施した。併せて、従来より研究していた微細光スポット形成に有効なボウタイコアを内蔵する光ファイバの応用を検討する中で、光力によるナノ微粒子の捕捉及び移送に適性があることを見出し、並列して研究を進めた。当時、ナノ粒子捕捉、移送、分岐では、光プローブの片端だけからの制御は困難であり、また光強度増強のため、メタルを利用したプラズモン導波路が多く利用されており、熱問題や加工の難しさを伴った。簡易な構造で熱吸収の少ない誘電体導波路、片端からのレーザ光制御などが求められていた。

研究内容ではないが、研究着手当初から COVID19 による登校停止などな長らく続いたため、シミュレーション評価などの進捗に大きく影響が生じた。

2. 研究の目的

レーザ光による微細加工、描画 ナノ微粒子制御などに適したマイクロ光ファイバプローブの構造創案と制御法の評価を狙いとし、具体的には、

1. ナノサイズ光ビームスポットの実現(回折限界程度以)
2. 回折限界スポットでの長焦点長、焦点形状の制御の実現(50λ以上程度の焦点長)
3. 光ファイバプローブ片端からのレーザ光制御によるナノ微粒子捕捉
4. ナノ微粒子の両方向移送の実現

を到達目標とした。1, 2は光プローブ出射後のレーザ光形状の制御であり、プローブと先端形状の設計が主であり、後者の3, 4は誘電体光ファイバ構造を適用する初めての試みである。

3. 研究の方法

【目標1, 2について】

最初に、我々の提案したボウタイスロットコア構造光ファイバがナノサイズ光スポット形成に有効であることに着目し[1]、その出射回折光の高い空間周波数成分が微細なスポット形成に応用できないか検討した。光スポットの偏光やモードパターンの安定性を調べるため事前評価として、複屈折性などの伝搬特性評価をシミュレーションにて確認した。続いて、出射光をマイクロレンズで集光し、スポット形状を評価した。加えて、通常よく用いられる円環コア、ベッセルビームなどいくつかのビーム形状においても集光特性を評価し、最小スポット、長焦点長などを調べた。残念ながら、期待される微小スポット形成が困難であったため、改善として、光ファイバ先端の微小レンズ設計を見直すこととした。単純な半球や球状の突起では焦点位置やスポット径、焦点長の制御が困難なため、多くのパラメータの最適化設計を図るため、インバース設計と呼ばれる手法、ニューラルネットワークのアルゴリズムを適用し、設計条件を探る手法を取ることにした。評価は現在も継続中である。

【目標3, 4について】

2021年度中盤より着手。光ファイバ中及び出射後の微細光スポット形成を追及する中で、微細なスポット制御が光圧利用による生体分子などの微粒子捕捉、移送、ソーティングなどに応用できる可能性を見出したため、追加目標を設定した。具体的には、前述のボウタイコア構造を持つナノサイズ光ファイバが、極微小な光スポット形成に有効で、かつその光圧制御が光ファイバ片端から可能であることを利用し、数十nm程度の微粒子の捕捉、移送を実現するための光ファイバの構造、屈折率(材料)、レーザ光波長、強度、入射条件などに対する条件評価を実施した。

4. 研究成果

【目標1, 2について】

最初に、当研究室で考案した微細光スポット形成を可能にするナノ光ファイバ構造に関して、光スポットの安定形成を実現しうる、直交モード形状の顕著な差異に起因する極めて高い複屈折と低クロストーク特性をシミュレーションにより確認し、サブミクロン径での曲がりにおいて

Relationship between optimization results and RIs distribution

The illumination wavelength, 365nm, plane wave, amplitude 1V/m;

Background index: $n_t = 1.33$ (water); Shell: R_s, n_s are 4.5 μm and 1.57.

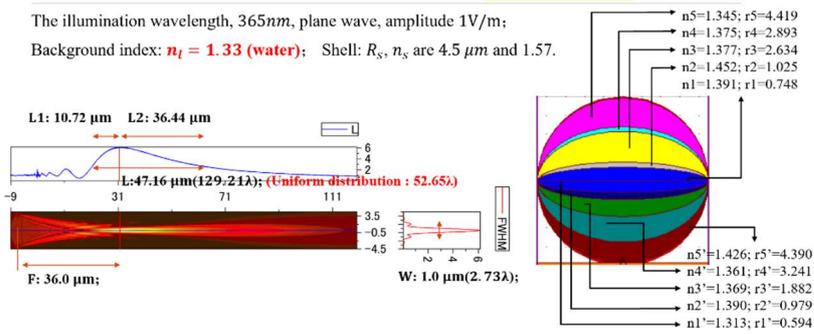


図 1 多層球レンズの設計とビームパターン例

光ナノジェット 技術で知られる光ファイバ先端部の微細レンズの設計に GA アルゴリズムを適用し最適屈折率分布の探索に取り組んでいる。図 1 (a), (b) は、10 層の多層屈折率からなる球レンズモデルと出射ビーム形状のシミュレーション結果の例である。波長以下のビーム径で波長の 130 倍程度の焦点長が得られており、他の関連文献と同程度以上の数値に至っている。現在修士論文として執筆中[4]。

【目標 3, 4 について】

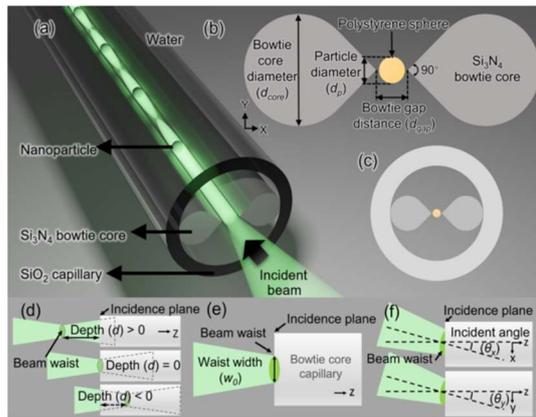


図 2 ボウタイコアを有するナノ光ファイバモデル

高屈折率コントラストなボウタイコア構造を内蔵する光ファイバは、微細光スポット形成に有効である。前述のようにモード分布も長手方向に安定形成されるため、光圧利用の粒子捕捉、移送に適用が期待される[5]。図 2 は光ファイバモデルとレーザ光入射条件の例を示した図である。SiO₂ の外周内部に Si₃N₄ の直径 0.25–0.5 μm のボウタイコア (コア間隔 30 nm) が配置される。動作光波長 0.5–1.2 μm の条件において、直径 20 nm 程度の球形や長楕円体微粒子が図 2 (b), (c) のようにギャップ中心に補足されること、さらにコアへの光励振条件あるいは光波長変化によって前後両方向に微粒子移送が可能になることを証明した[6, 7]。図 3 は光ファイバ中の主に LP₀₁ と LP₀₂ モードの長手方向での干渉パターンに応じた電界強度分布 (a)–(d) をしめしており、ガウスビームの入射条件 (焦点位置) を変えることで光ファイバ中での干渉強度のピーク位置が変化し、制御可能となる。その結果、微粒子は光強度の傾き方向に光力を受けるため、図 (e), (f) 中の矢印の向きの移送が実現されること。同様に光波長や球度変化に応じても制御が可能なることを示した。

従来、微粒子移送には光増強のためにプラズモン導波路や複数の共振型導波路を配列した製造困難な導波路が多く考案されてきたが、本提案は構造が比較的簡単でかつ、低損失、低熱伝導のオール誘電体構造で構成される点に特徴があり、粒子捕捉、移送の制御も入射条件により容易に実現できることが分かった。

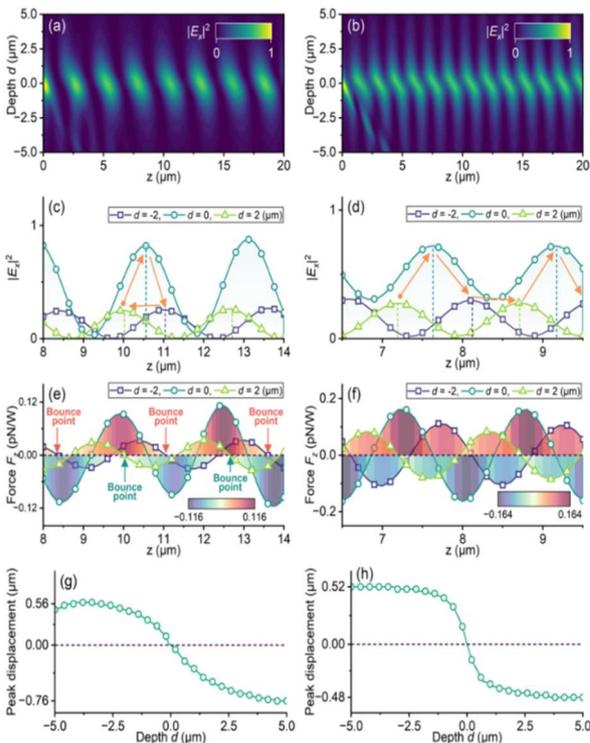


図 3 入射条件に応じた長手方向の電界強度分布

も優れた偏波保持性能が得られることを実証した [2, 3]。続いて、光導波路出射光を集光した場合のビーム形状をシミュレーション評価した。残念ながら、参照としたベッセルビーム、エアリービームと同様に本ナノ光ファイバ出射光の集光においても明瞭な微細光スポット、焦点長は得られず、回折によるビーム拡散の影響が強く、別手法の検討が必要となった。現在、

<引用文献>

1. A. Sheng and M. Tsubokawa, "Ultrasmall light-spot transmission in a silicon-core fiber with a bowtie slot structure," *Optics Express*, 26, 21797, 2018. doi.org/10.1364/OE.26021797
2. W. Feng and M. Tsubokawa, "High birefringence and polarization-maintaining ability in nanosized optical fibers with silicon bowtie cores," 14th International collaboration Symposium on Information, Production and Systems, 2020.
3. W. Feng and M. Tsubokawa, "High birefringence and polarization-holding ability in nanosized optical fibers with Si bowtie cores," *Optics Communications*, 466, 125603, 2020.
4. Z. Wang, to be Master Thesis in Graduate School, Waseda University, Spring 2023.
5. W. Feng, L. Xuecheng, and M. Tsubokawa, "Bidirectional transport of nanoparticles by micro capillaries with bowtie cores," CLEO, paper ATu4R.5, San Jose, May 2023.
6. W. Feng, L. Xuecheng, Z. Chenlin, and M. Tsubokawa, "Bidirectional Nanoparticle Transporting Optical Burettes with All-dielectric Bowtie Core Capillaries," OECC, Shanghai, July 2023
7. W. Feng, Z. Wang, and M. Tsubokawa, "Evaluations of nanoparticle capture and transport methods in dielectric bowtie core capillaries," *Optics Express*, 31, 16676, 2023. doi.org/10.1364/OE.489355

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 W. Feng; Z.Wang; M. Tsubokawa | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Evaluations of nanoparticle capture and transport methods in dielectric bowtie core capillaries | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 16676-16689 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.489355 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 W. Feng; M. Tsubokawa | 4. 巻 466 |
| 2. 論文標題 High birefringence and polarization-holding ability in nanosized optical fibers with Si bowtie cores | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Optics Communications | 6. 最初と最後の頁 125603 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2020.125603 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 W. Feng; M.Tsubokawa |
| 2. 発表標題 High birefringence and polarization-maintaining ability in nanosized optical fibers with silicon bowtie cores |
| 3. 学会等名 14th International collaboration Symposium on Information, Production and Systems（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 W. Feng; X. Li; M. Tsubokawa |
| 2. 発表標題 Bidirectional transport of nanoparticles by micro capillaries with bowtie cores |
| 3. 学会等名 CLEO（国際学会） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 W. Feng; X.Li; C. Zhao; M. Tsubokawa |
| 2. 発表標題 Bidirectional Nanoparticle Transporting Optical Burettes with All-dielectric Bowtie Core Capillaries |
| 3. 学会等名 OECC (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Zhao Wang, to be Master Thesis of Waseda University, July, 2023. Title is "Study on tunable photonic nanojets obtained by the graded-index dielectric microparticles."

| 6. 研究組織 | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |