

生体・工学応用に向けた 多機能ファイバの開発： 電気泳動・マイクロミキシング・ 磁気刺激機構の内蔵化

東北大学 学際科学フロンティア研究所
准教授 郭 媛元

2025年7月3日

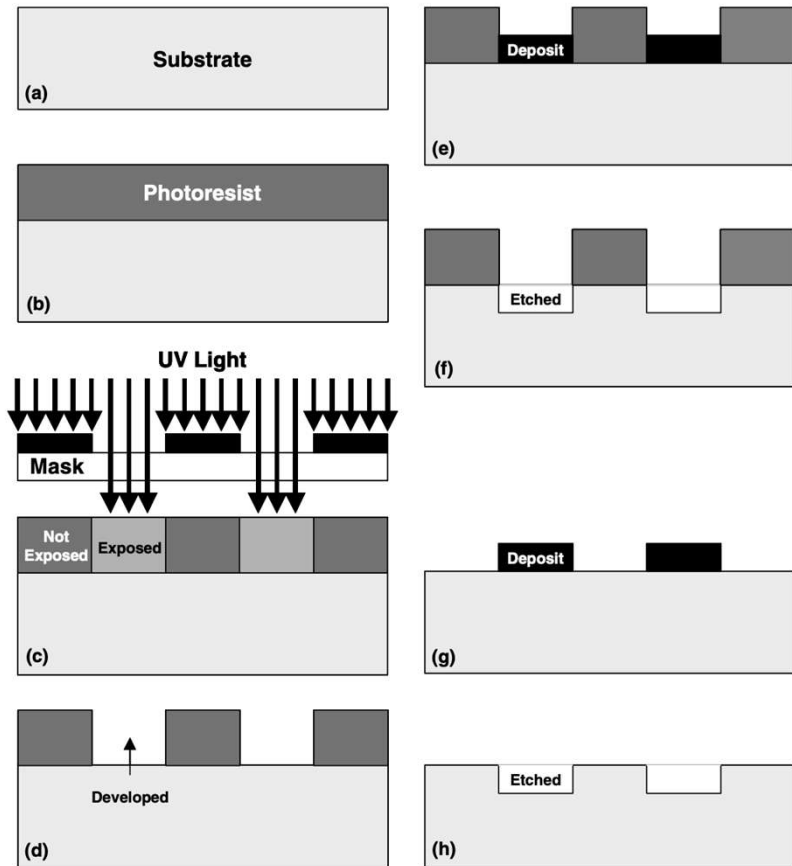
新技術の概要

回転型・スウィーピング熱延伸法により、三次元的な構造を有する①電気泳動、②マイクロミキシング、③磁気刺激機構をファイバ内に統合する多機能デバイスを開発した。

柔軟な構造・設計により、医療・診断、マイクロ流体工学、薬剤混合・細胞操作などへの応用が期待される。

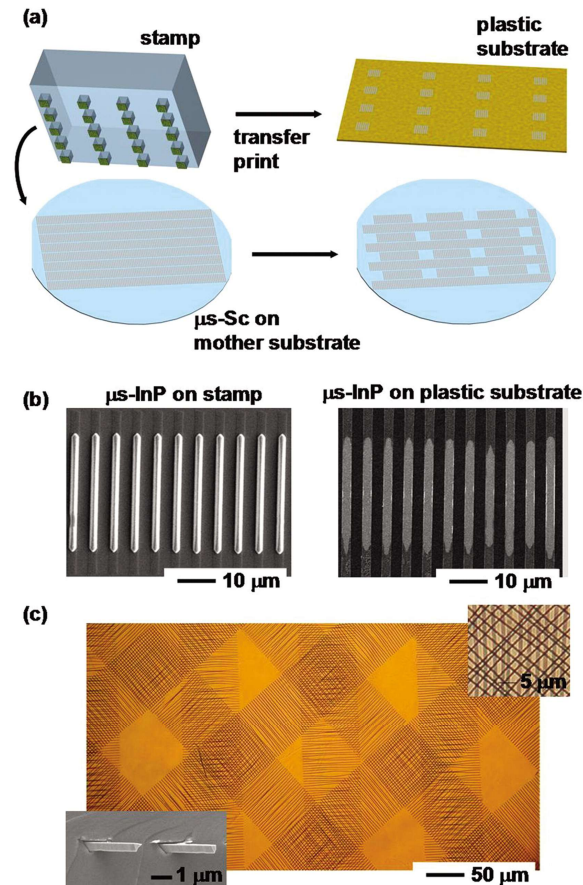
従来技術とその問題点

フォトリソグラフィ



Judy, Jack W. "Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications." *Smart materials and Structures* 10.6 (2001): 1115.

ソフトリソグラフィ

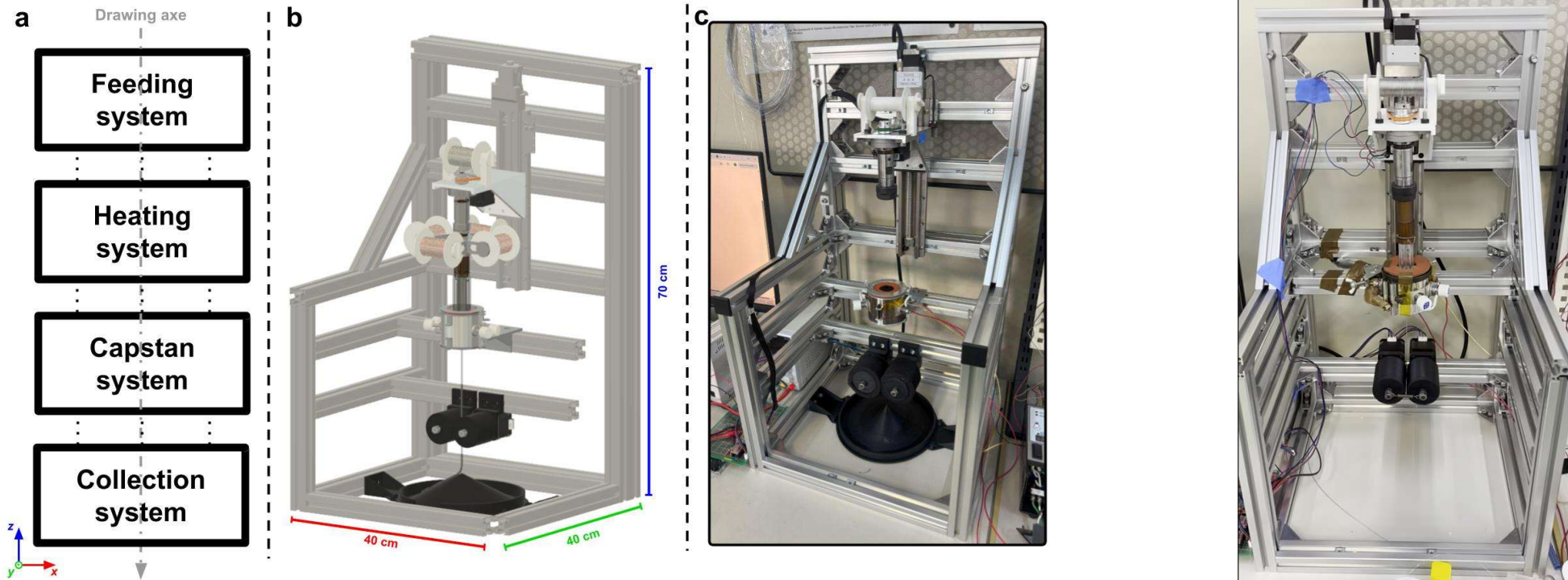


Rogers, John A., and Ralph G. Nuzzo. "Recent progress in soft lithography." *Materials today* 8.2 (2005): 50-56.

従来技術とその問題点

- 従来のマイクロデバイス製造法であるフォトリソグラフィやソフトリソグラフィは、主に平面基板上での加工を前提としており、構造が二次元に制限される傾向がある。
- そのため、異種材料の複雑な組み合わせや、三次元的なマイクロ構造の形成には限界があり、設計の自由度や機能集積の点で課題が残されている。

小型回転型・スウィーピング熱延伸法



本研究では、複雑な三次元構造と多材料の高精度な統合を可能にする製造技術として、「小型回転型・スウィーピング熱延伸法(mini-r/sTDP)」を提案する。

本手法は、熱延伸中にプリフォームを回転・スウィーピングさせることで、繊維断面内に高度に制御された3次元マイクロ構造を形成することが可能となり、従来法では困難であった構造的および機能的自由度を拡張する。

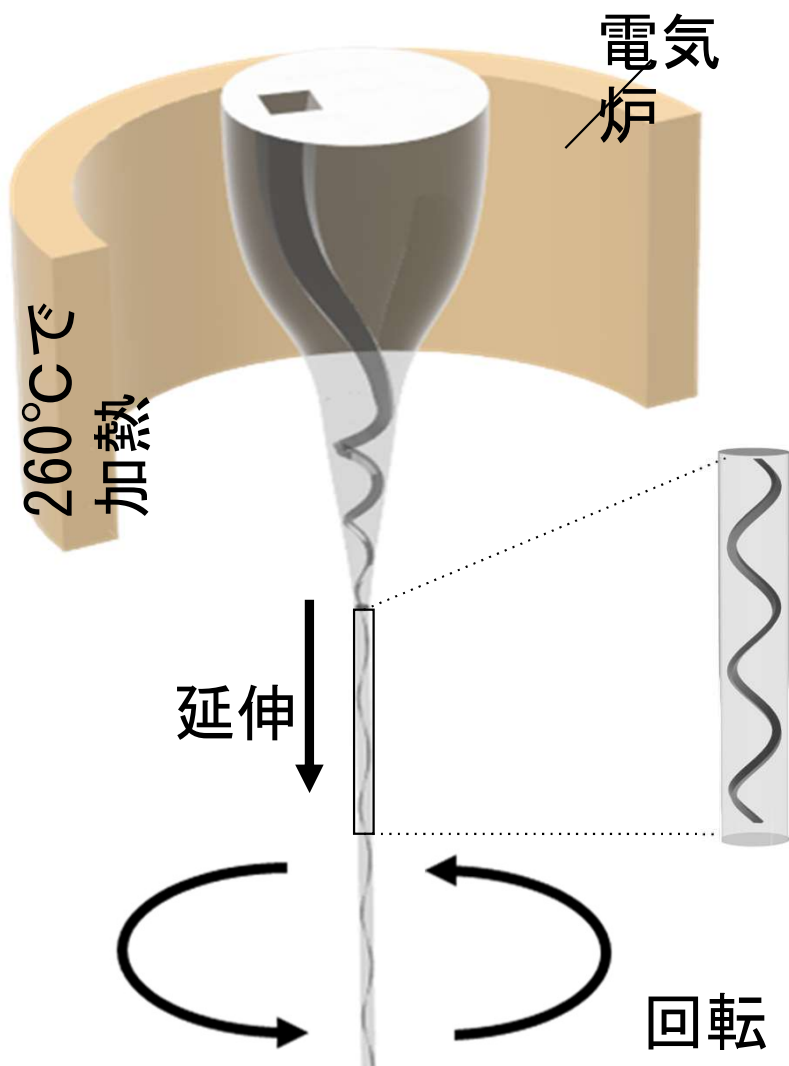
3次元構造ファイバの実現と新機能展開

1. 薬剤混合や細胞分離を目的としたファイバ内らせん流路の実現
2. 多機能ファイバを用いたキャピラリー電気泳動デバイスの実現
3. 磁場発生・センシング用ファイバ内マイクロコイルの構築

3次元構造ファイバの実現と新機能展開

1. 薬剤混合や細胞分離を目的としたファイバ内らせん流路の実現
2. 多機能ファイバを用いたキャピラリー電気泳動デバイスの実現
3. 磁場発生・センシング用ファイバ内マイクロコイルの構築

ファイバ内らせん流路の実現

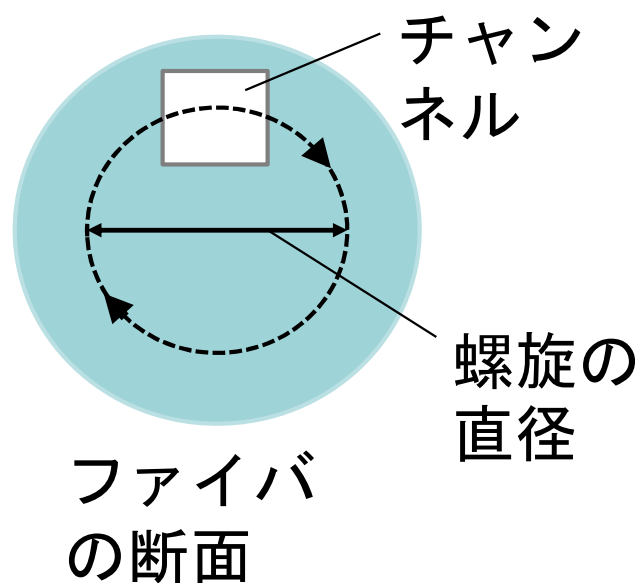


熱延伸 + 回転

延伸方向と垂直な方向に回転を与えることで、ファイバーを回転させながら延伸する



ファイバーの内部にらせん構造が作られる

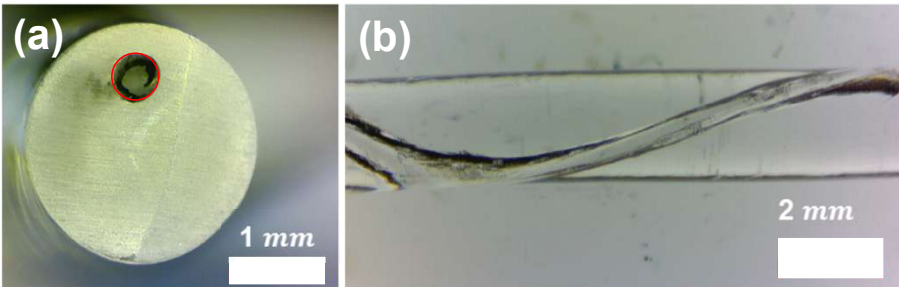


延伸後のファイバ

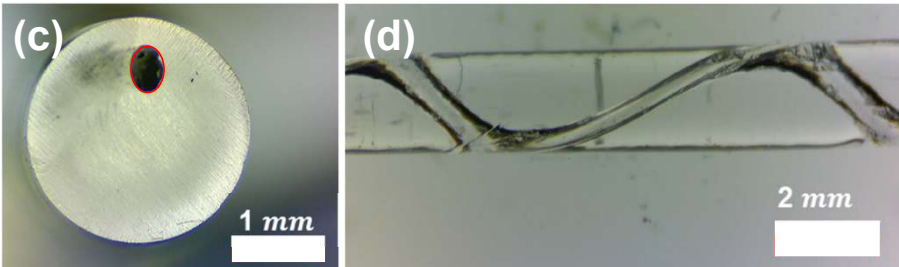
ファイバ内らせん流路の実現

ポリカーボネートを用いたファイバ流路

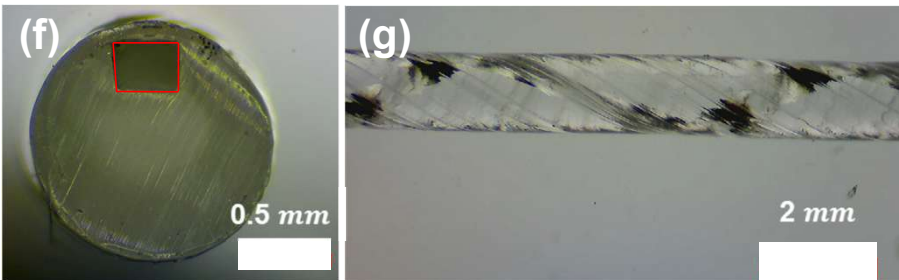
円形



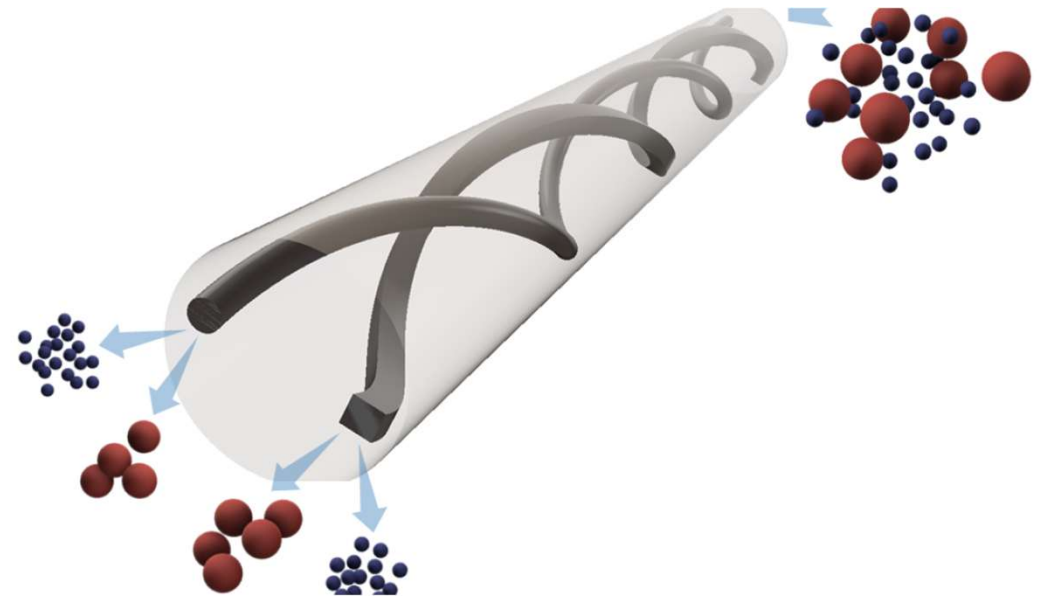
楕円



長方形



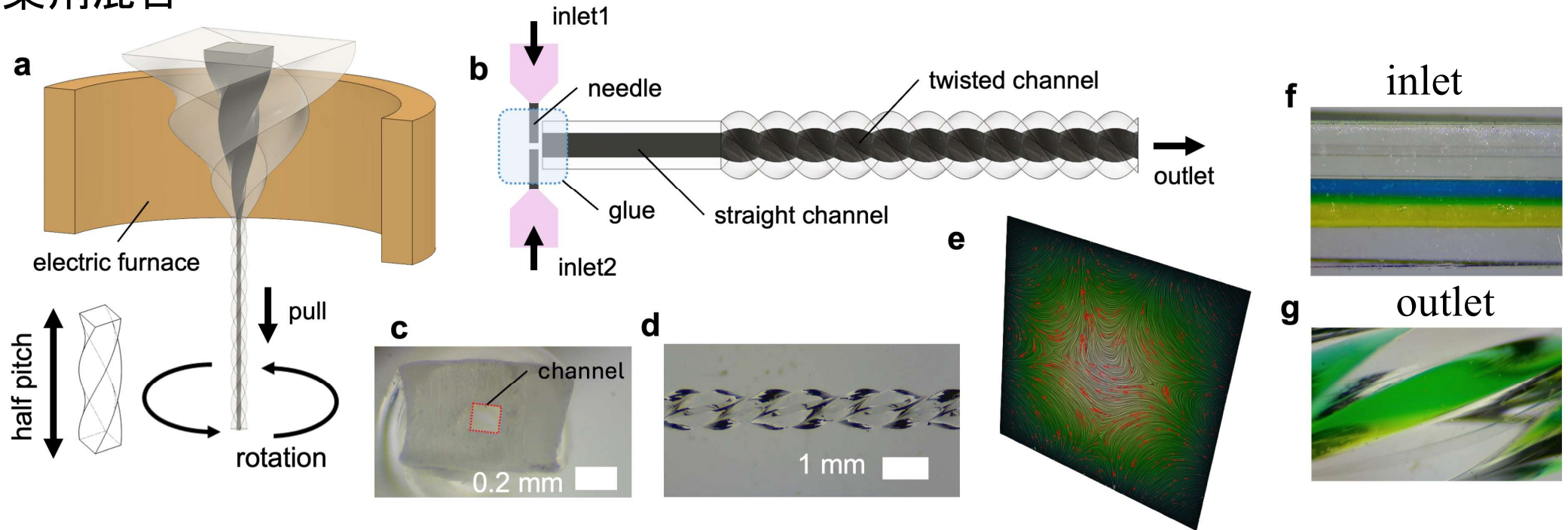
- 多様なチャネル形状の設計が可能.
- 優れた光学的アクセス性.
- 多様な材料の選択が可能



薬剤混合や細胞分離への応用

ファイバ内「ねじれ型」流路の実現

薬剤混合



(a) mini-r/sTDPを用いた「ねじれ型」のファイバ流路の制作とファイバ断面(c)と側面(d). (b) 混合効率を評価するために、2本の中空針をファイバに対してT字の注入口を持つデバイスの制作. (e) CFD計算による試薬の混合に適した旋回流が生成。簡易的な実験の結果、注入口付近での2液の分離 (f) と、出口付近での十分な混合 (g) を確認することができた。

ファイバ内「らせん」「ねじれ型」流路 の実現

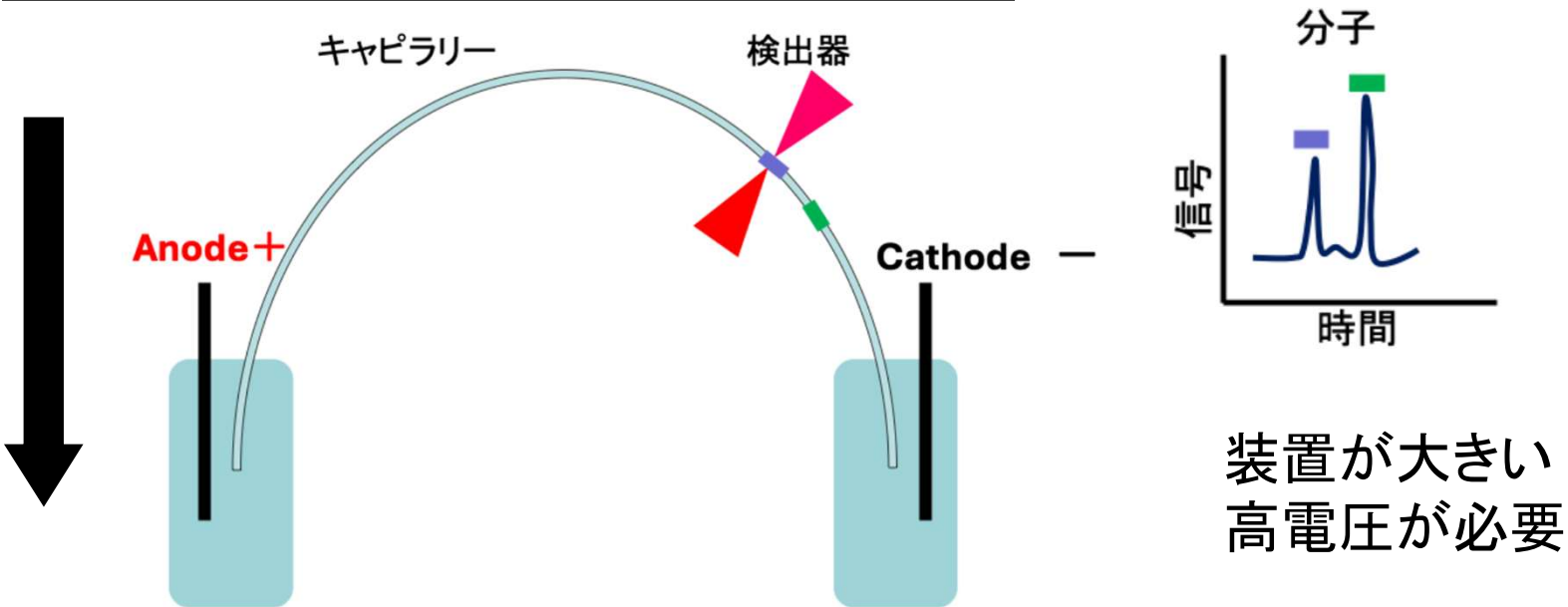
本技術は、熱延伸により作製されたファイバ構造内に、ソータ(細胞・粒子選別)およびマイクロミキサー機構を統合した連続フロー型のマイクロ流体デバイスである。

3次元構造ファイバの実現と新機能展開

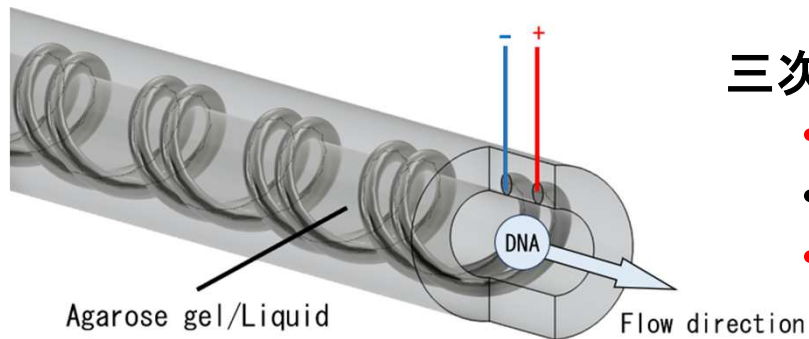
1. 薬剤混合や細胞分離を目的としたファイバ内らせん流路の実現
2. 多機能ファイバを用いたキャピラリー電気泳動デバイスの実現
3. 磁場発生・センシング用ファイバ内マイクロコイルの構築

キャピラリー電気泳動

従来のキャピラリー電気泳動デバイス



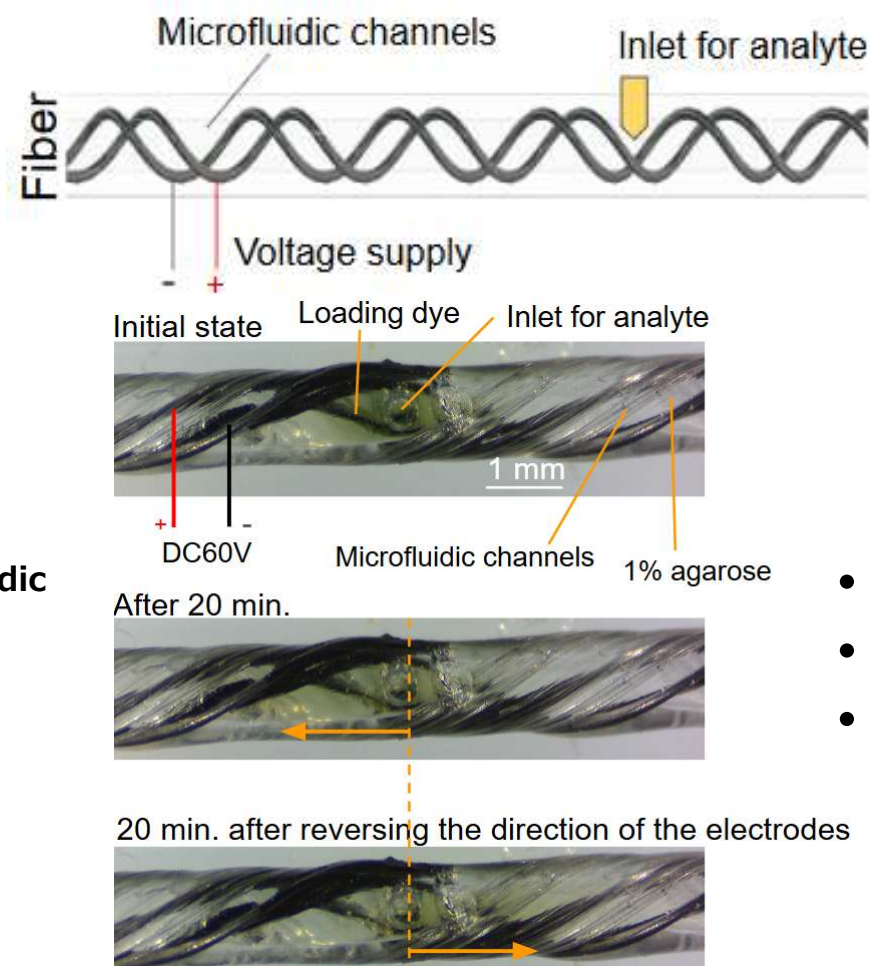
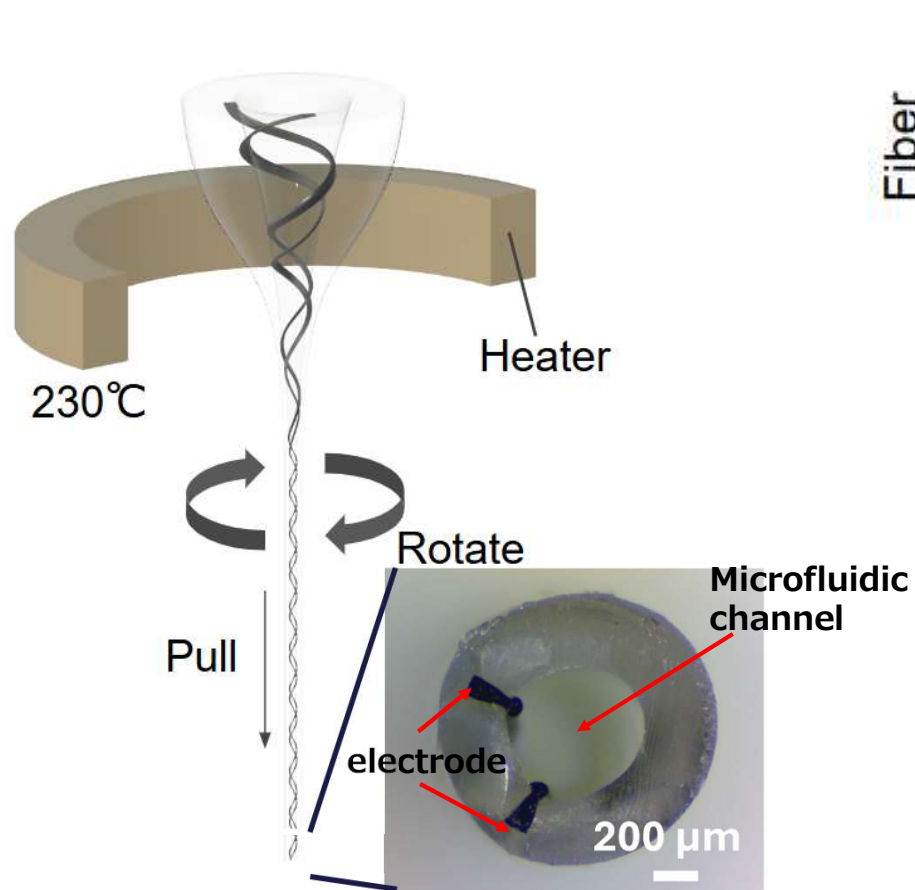
多機能ファイバを用いたキャピラリー電気泳動デバイス



三次元螺旋型機能を集積した多機能ファイバ：

- 低コストかつ迅速な分析
- 試薬の消費削減
- 小型・ポータブル化

キャピラリー電気泳動デバイスの実現



- 柔軟な統合性
- 小型化の実現
- 低電圧の使用

キャピラリー電気泳動デバイスの実現

本技術は、マイクロ流路・電極機構を一体化した多機能ファイバにより、タンパク質や核酸、神経伝達物質などの生体分子をin situで分離・分析できるキャピラリー電気泳動ファイバデバイスである。

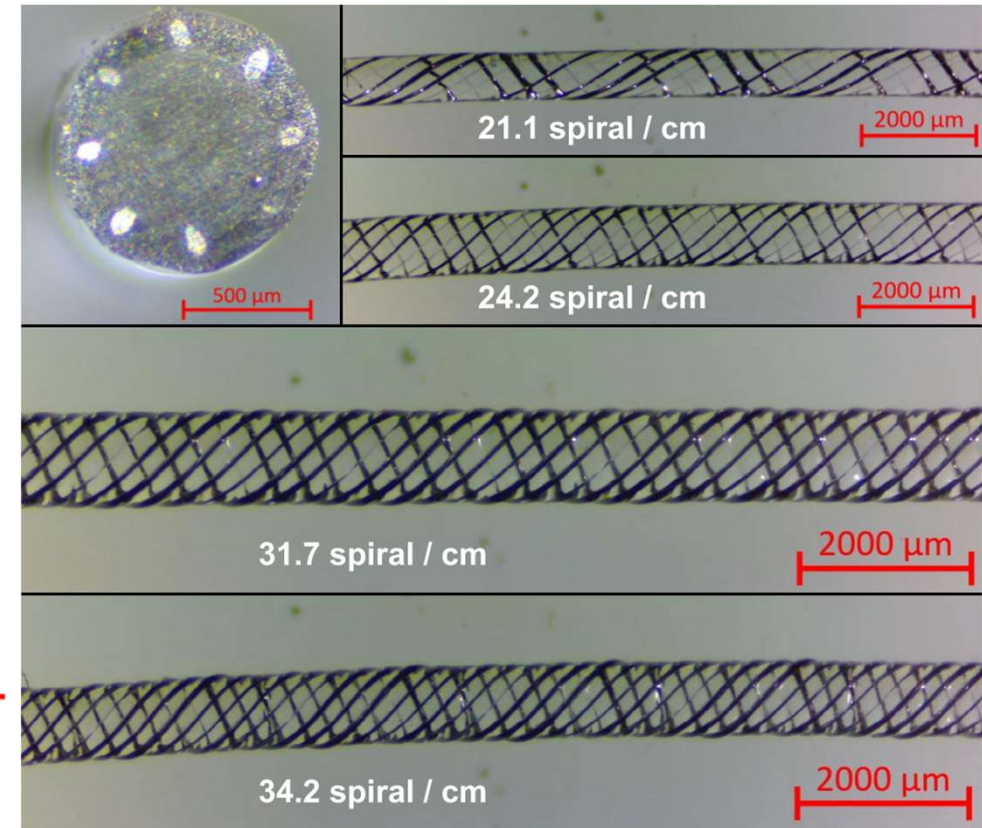
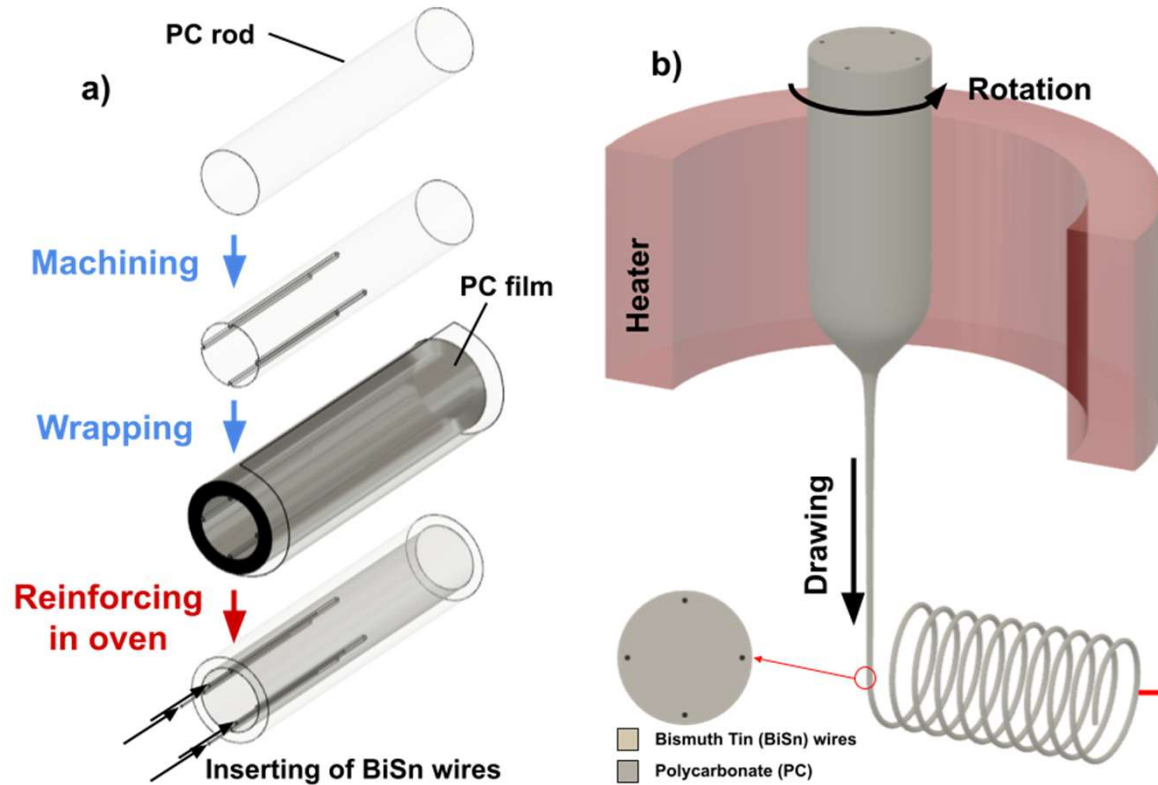
3次元構造ファイバの実現と新機能展開

1. 薬剤混合や細胞分離を目的としたファイバ内らせん流路の実現
2. 多機能ファイバを用いたキャピラリー電気泳動デバイスの実現
3. 磁場発生・センシング用ファイバ内マイクロコイルの構築

従来のマイクロコイル製造法

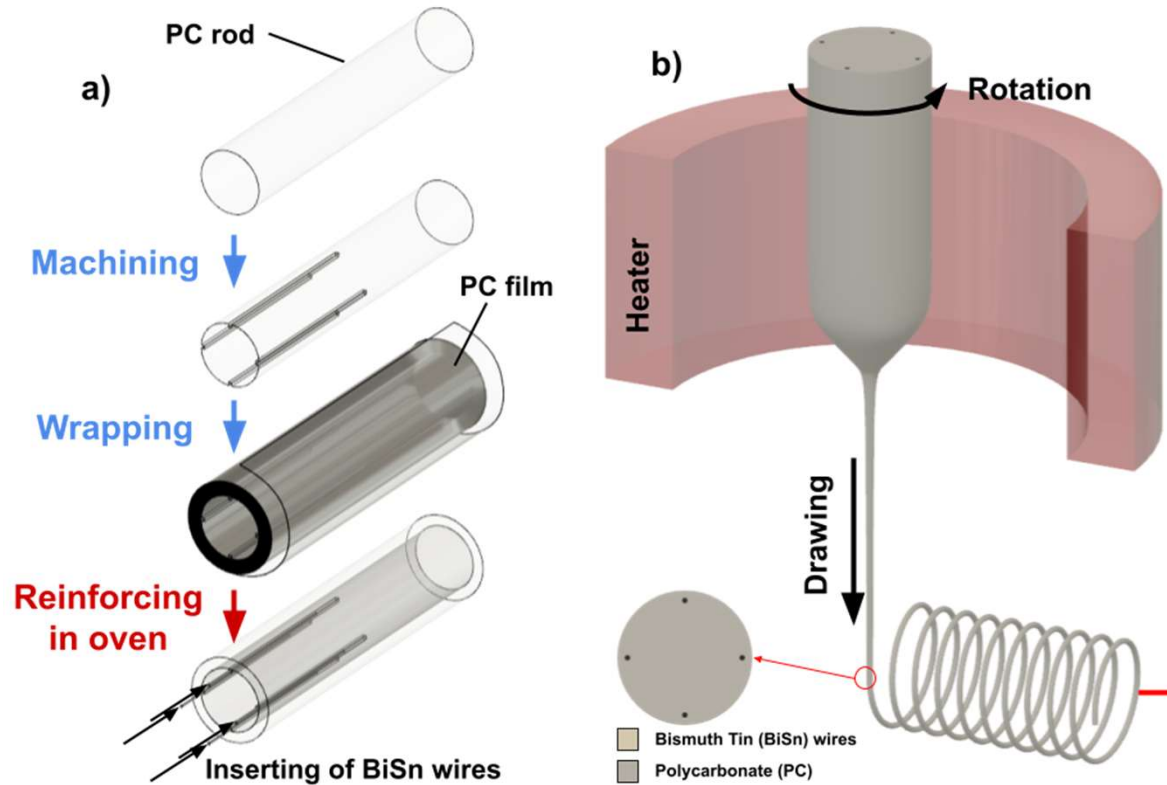
製造法	対応構造	長所	短所
フォトリソグラフィ	平面	高精度、量産性あり	平面構造に限定
ワイヤ巻線法	3次元	高インダクタンス構造が可能、単純な構造	微細化・自動化が困難、量産に不向き

ファイバ内マイクロコイルの構築

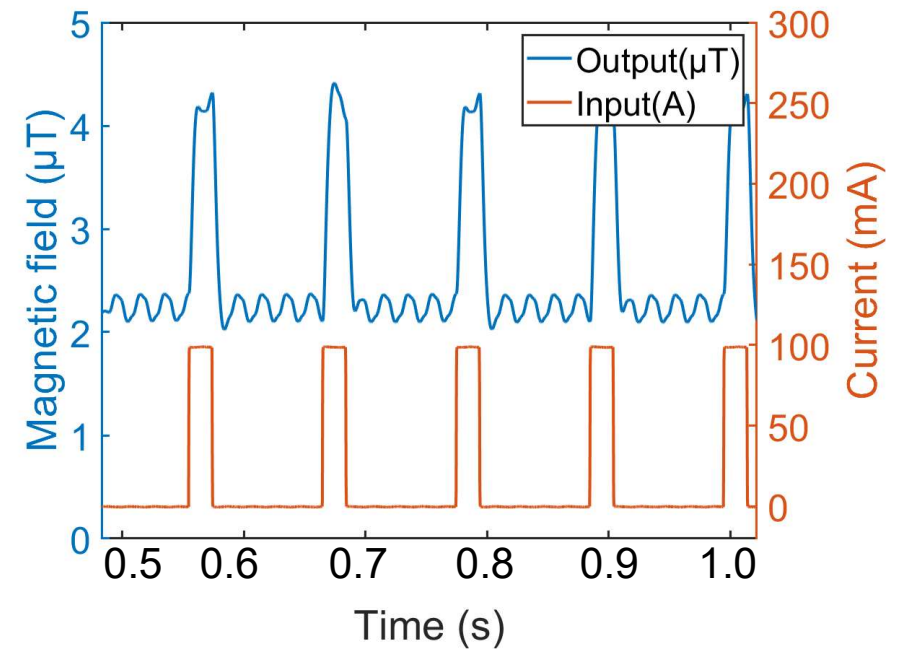


高性能マイクロコイル内蔵ファイバの製造方法に関する技術である。

ファイバ内マイクロコイルの構築



芯材なしの場合の一例



磁気刺激による培養神経活動のモジュレーション効果も確認できた。

高性能マイクロコイル内蔵ファイバの製造方法に関する技術である。

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来フォトリソグラフィやソフトリソグラフィの問題点であった、3次元構造の制作困難さを新たな熱延伸技術を改良することに成功した。
- 従来のマイクロ流体チップや電極・コイル単体デバイスは、大型・平面構造で柔軟性や多機能性に乏しく、迅速な診断には限界があった。
- 本技術は、電気泳動・マイクロミキシング・磁気刺激コイルを直径数百 μm ファイバ内に統合することで、空間効率・柔軟性・生体適合性に優れた迅速診断デバイスを実現する。

想定される用途

- ポータブル診断・迅速検査デバイスへの応用、簡易化・小型化・現場即応性の向上が期待。。
- 神経や筋への非侵襲的・局所的な磁気刺激によるニューロモジュレーションデバイスへの応用。
- 複雑構造を持つ機能性ファイバの生産装置としての産業利用。

実用化に向けた課題

- 現在、本技術では異種材料を集積した多機能ファイバの精密製造やin-fiber型の3次元電極・流路・コイル構造の形成が可能のところまで開発が進んでいる。しかしながら、各機能（電気泳動、流体操作、磁気発生）の定量評価が進行中である。
- 今後は、それらを医療診断や細胞操作等の具体的応用シナリオに適用するためのファイバ設定・操作条件の最適化を進めていく計画である。

企業への期待

現在医療用マイクロ流体デバイス・キャピラリ電気泳動・高感度磁気センサを開発中の企業や、ライフサイエンス、バイオ診断、医療分野への展開を検討している企業にとっても、本技術の導入は、製品競争力の向上や新規市場創出において極めて有効と考えられる。

企業への貢献、PRポイント

- 本技術は柔軟なファイバ中3次元的な構造を実現することが可能なため、ターゲット分野に特化した機能モジュールを設計・統合することでより企業に貢献できると考えている。
- 本技術の導入にあたり必要な追加実験を行うことで科学的な裏付けを行うことが可能。
- 本格導入にあたっての技術指導等

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称: 電気泳動装置、マイクロコイルファイバ、スウィーピング熱延伸装置、ファイバの製造方法、ファイバ
- 出願番号: 2024-198881
- 出願人: 東北大学
- 発明者: 郭 媛元、LE BOURDONNEC ETIENNE、狩俣 空、加藤 駿典
- 発明の名称: マイクロミキサー、ソータ装置、ファイバの製造方法
- 出願番号: 2024-198972
- 出願人: 国立大学法人東北大学、沖縄科学技術大学院大学
- 発明者: 郭 媛元、加藤 駿典、Amy Shen、Daniel Carlson

産学連携の経歴

- 2021年～ JST 創発的研究支援事業に採択
- 2024年～ 1社と共同研究実施

お問い合わせ先

東北大学 産学連携機構 ワンストップ窓口

問い合わせフォーム:

<https://www.rpip.tohoku.ac.jp/jp/aboutus/form/>

TEL: 022-795-5275

E-mail: sangaku-suishin@grp.tohoku.ac.jp