

研究部セミナー（第1回）

光渦の軌道角運動量と
物質の相互作用に基づく
新規アプリケーションの開拓

核融合科学研究所 研究部
可知化センシングユニット 助教
川口 晴生 (Haruki KAWAGUCHI)

OUTLINE

1. 自己紹介
2. これまでの研究内容
3. これからの研究計画
4. 研究の将来展望

OUTLINE

1. 自己紹介
2. これまでの研究内容
3. これからの研究計画
4. 研究の将来展望

はじめに 自己紹介

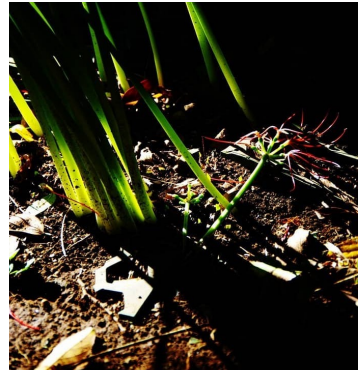
可知化センシング助教

川口 晴生 (かわぐち はるき)
1996年7月15日生 (26歳)

千葉県 香取郡多古町 出身



<https://www.town.tako.chiba.jp/ijyu/>



- 2015.3 千葉県立匝瑳高等学校 卒
- 2019.3 千葉大学 ナノサイエンス学科 卒
(2018~ 尾松・宮本研究室)
- 2021.3 千葉大学融合理工学府 修士 修
(融合理工学府長表彰 受賞)
- 2021.4 同 博士 進
- 2021.4~ 千葉大学量子フェローシップ
- 2022.4~ 日本学術振興会特別研究員DC2
- 2023.3 同 卒
- 2023.4~ 現職

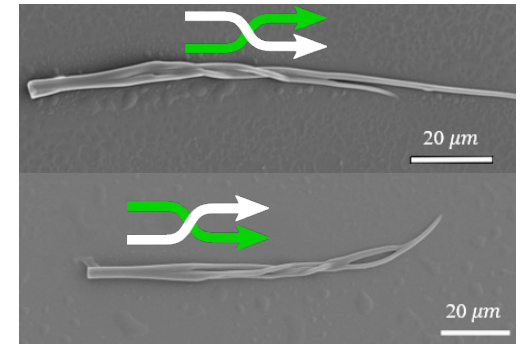
OUTLINE

1. 自己紹介
2. これまでの研究内容
3. これからの研究計画
4. 研究の将来展望

これまでの研究内容

～千葉大学 尾松・宮本研究室時代～
光渦と物質の相互作用に関する研究

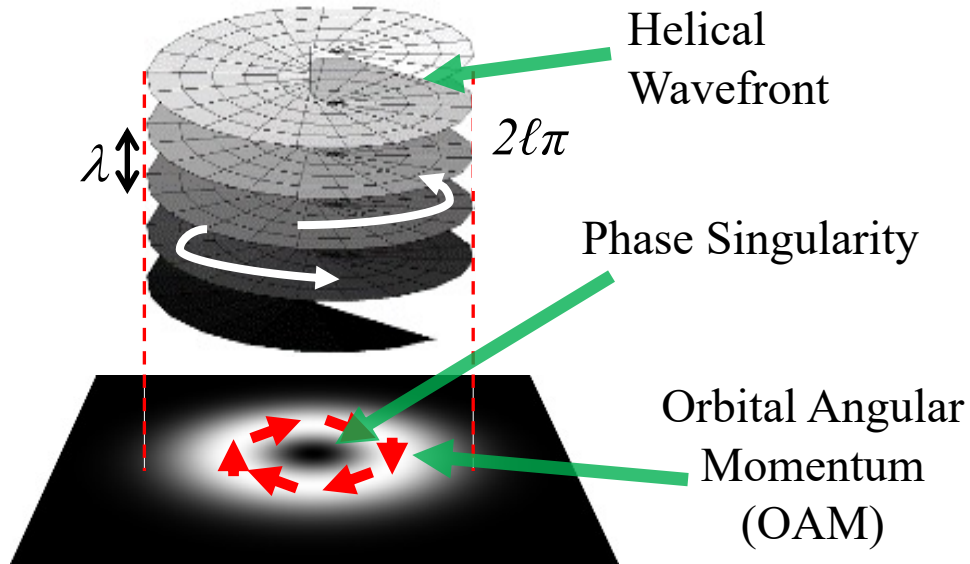
卒業論文(2019)
二光子吸収を介して光渦が創る螺旋ファイバー



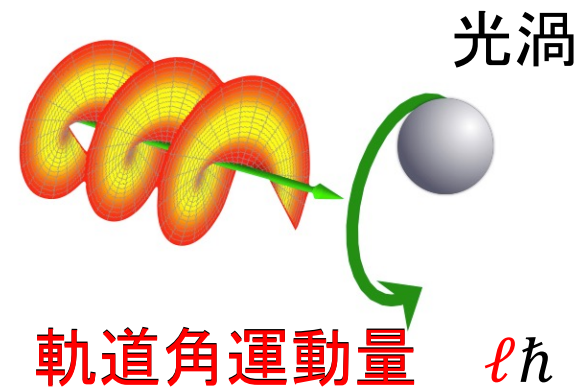
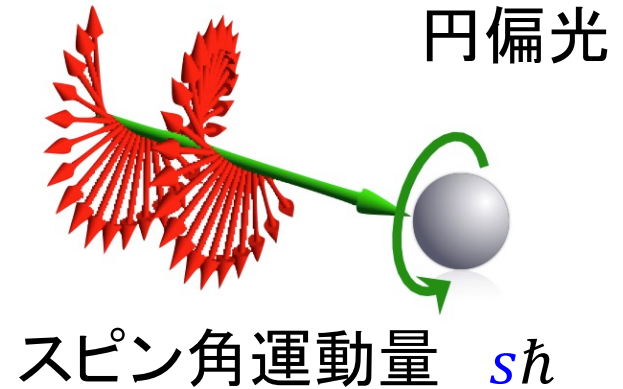
修士論文(2021)
光渦誘起前方転写法による金属微粒子パターンニング

学位論文(2023)
光渦レーザー誘起質量前方転写法による
液中ナノ微粒子の秩序制御

光渦とは

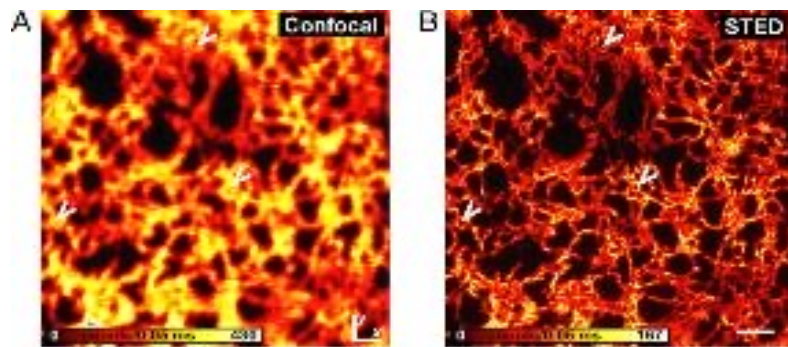
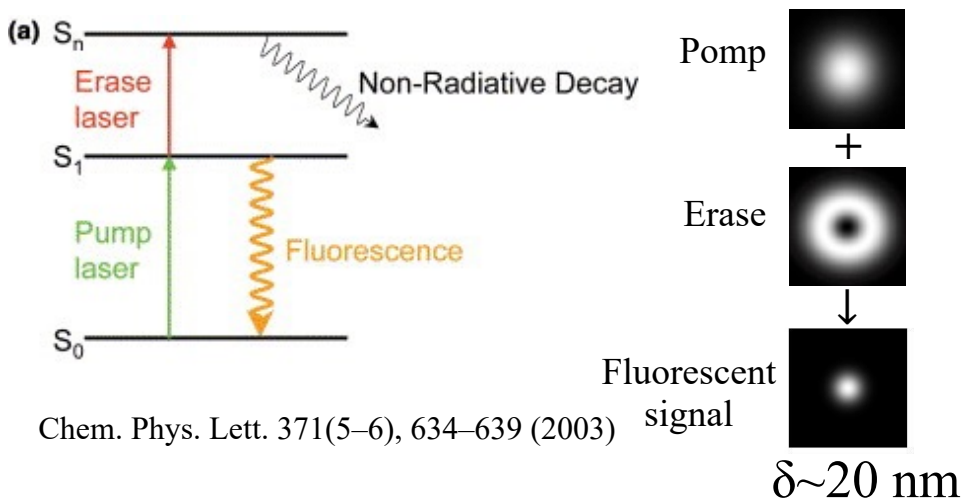


円環強度分布



光渦の応用展開

誘導放出抑制顕微鏡法 (STED microscopy)



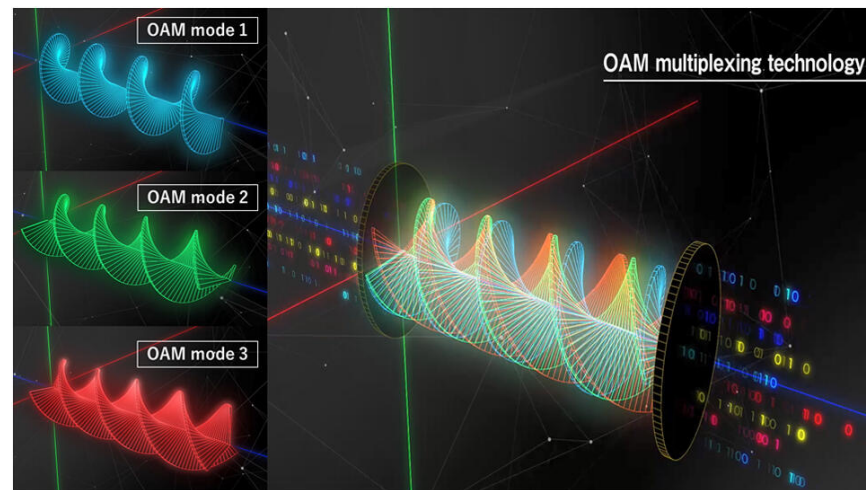
PNAS, 105 (38) 14271-14276 (2008)

円環状強度分布

軌道角運動量多重化通信

◆ Laguerre-Gaussianモード

$$u_\ell \propto \left(\frac{r\sqrt{2}}{\omega(z)} \right)^\ell \exp(i\ell\phi) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right)$$



NTT Technical Review, 17 (5), 34-39, (2019)

1Tbit/s

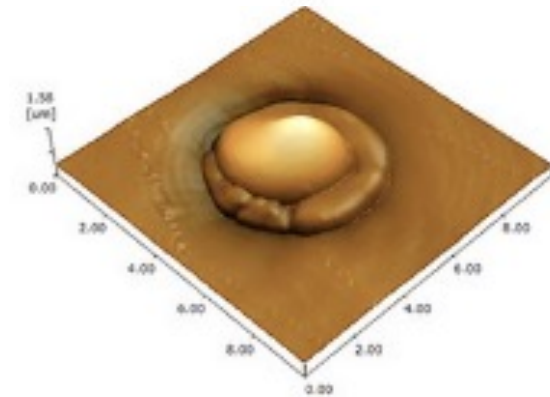
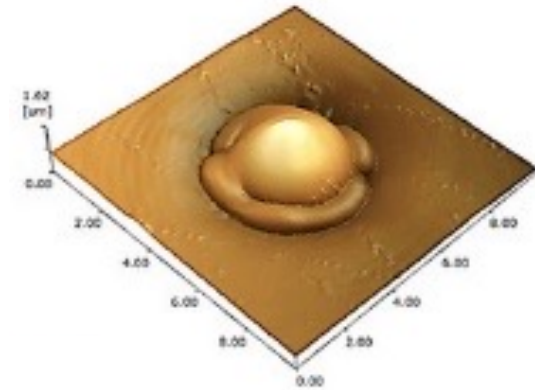
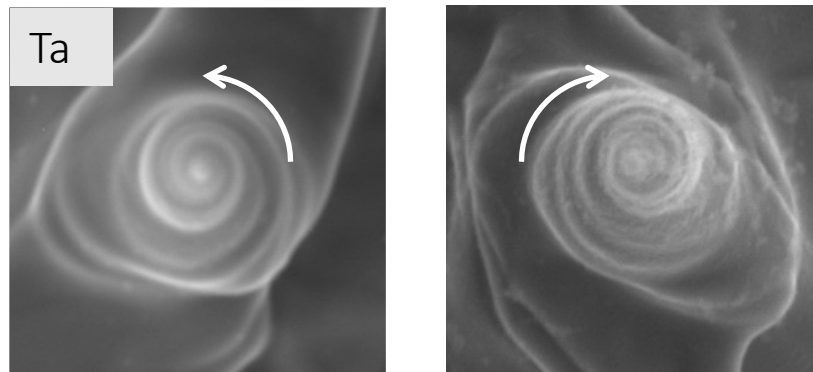
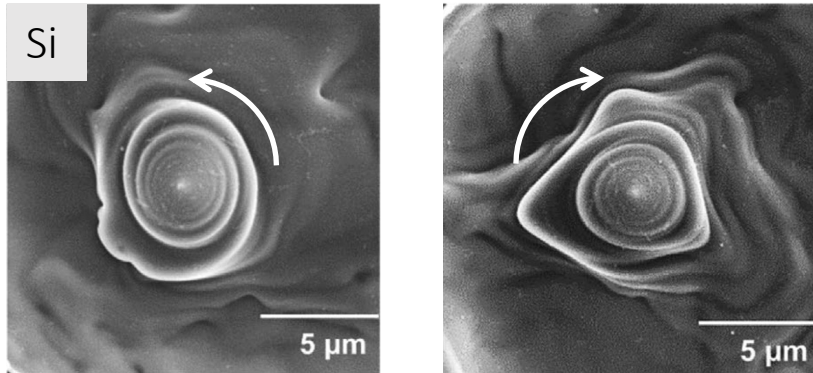
固有モード直交性

光渦の応用展開

キラル物質加工

レーザーアブレーション

ポリマー薄膜(Azopolymer)



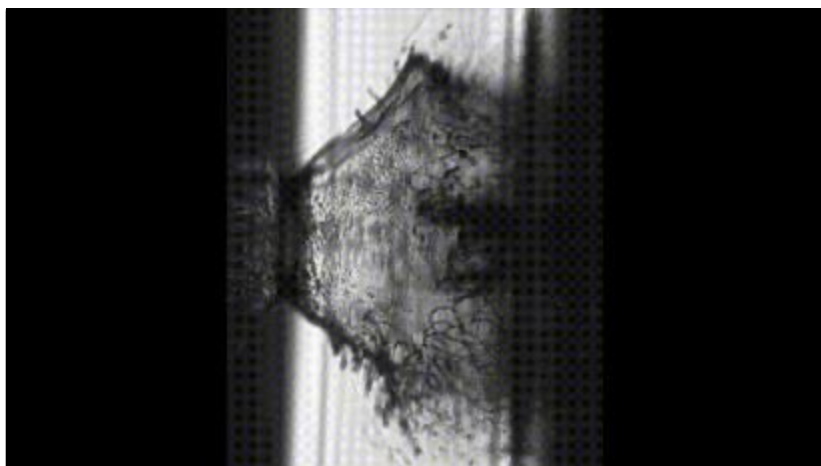
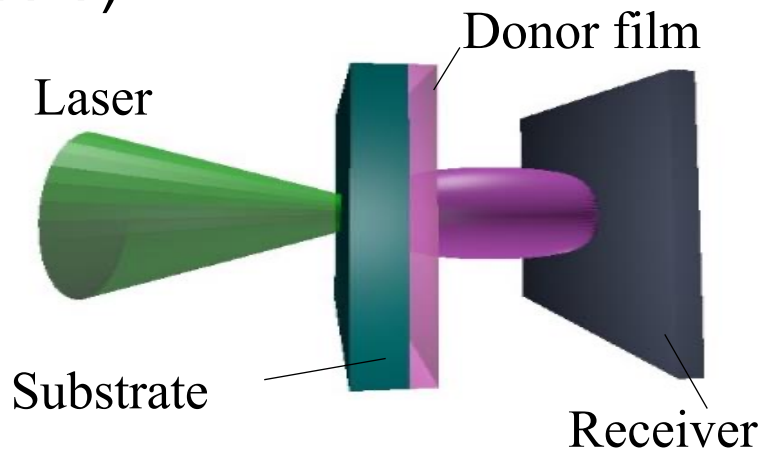
Phys. Status Solidi A, 1-6 (2015)

Sci. Rep. 4 4281 (2014)

光渦を用いた新たな印刷技術の提案

研究背景 LIFT

◆レーザー誘起前方転写 Laser induced forward transfer (LIFT)

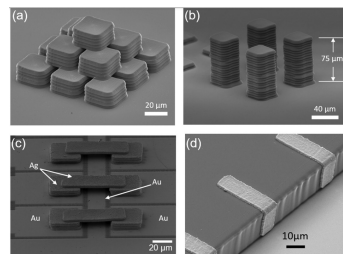


<https://www.psi.ch/de/lmx-interfaces/lift>

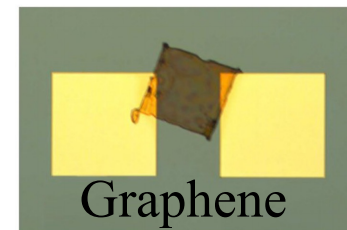
◆ マイクロ・ナノパターニング

金属

二次元材料

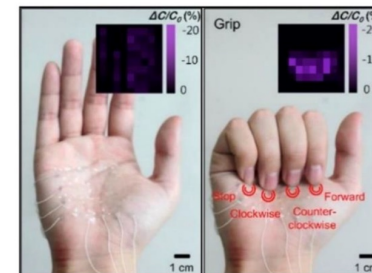
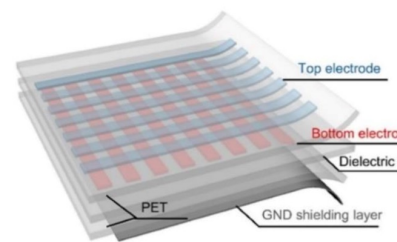


Serra, P. & Piqué, A., *Adv. Mater. Technol.* **4**, 1–33 (2019).



Smits, E. C. P., et al, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 2–5 (2017).

→ プリントブルデバイス開発



Kim, T., et al, *Materials (Basel)*. **11**, (2018).

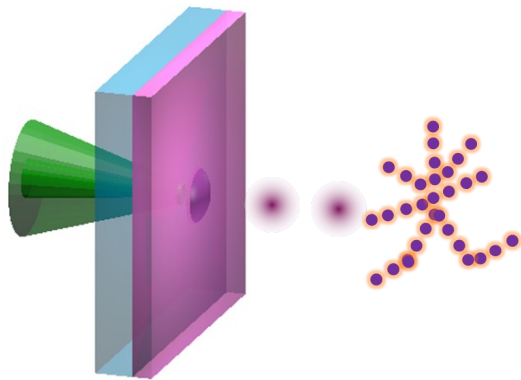
Grapheneベースウェアラブルセンサ

- 高粘度材料など様々な材料を扱える
- △ 回折限界を超えた構造作成は困難
- △ 転写距離は大きく制限される

光渦レーザー誘起前方転写法(OV-LIFT)

光渦レーザー誘起前方転写法
(OV-LIFT)

シリコンドロップレットの直線飛行

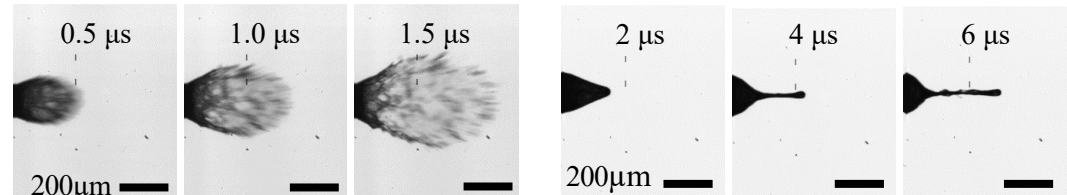
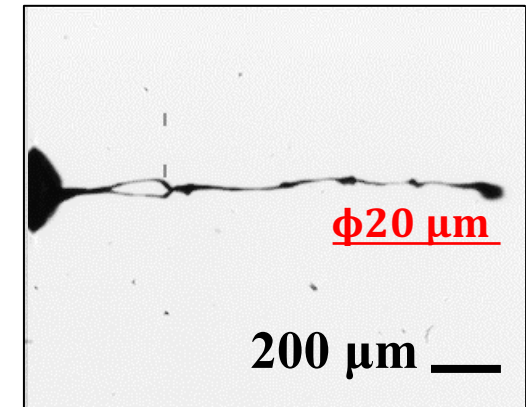
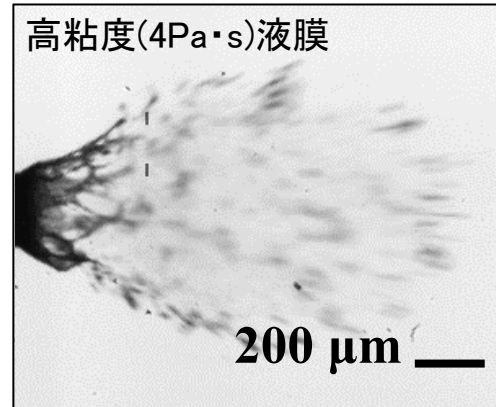


高精度なパターンニングの実現

高粘度顔料インクへのOV-LIFT
(色素ナノ微粒子の集合体)

Gaussian beam

Optical vortex



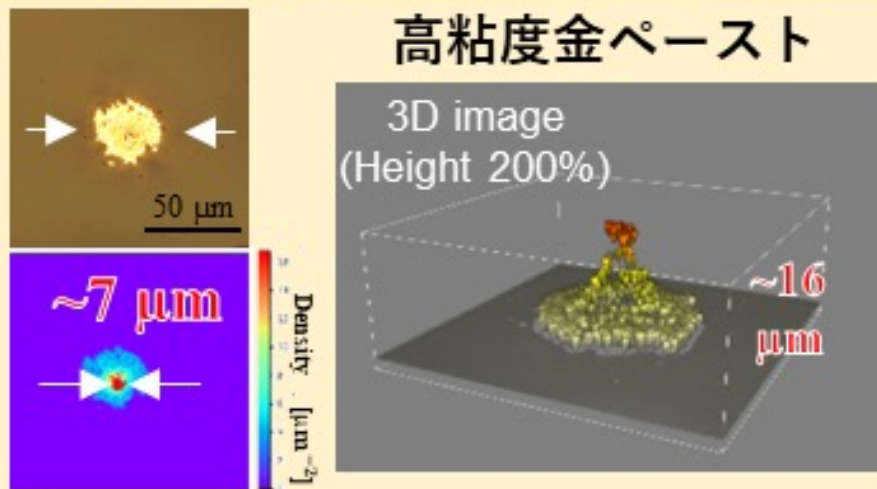
回転速度	実験値($J = 2$)	$1.1 \cdot 10^5$ rps
	計算値	$3 \cdot 10^5$ rps



軌道角運動量転写による自転運動
ピコリットルスケール液滴の安定的な直線飛行が可能

他にも。。。

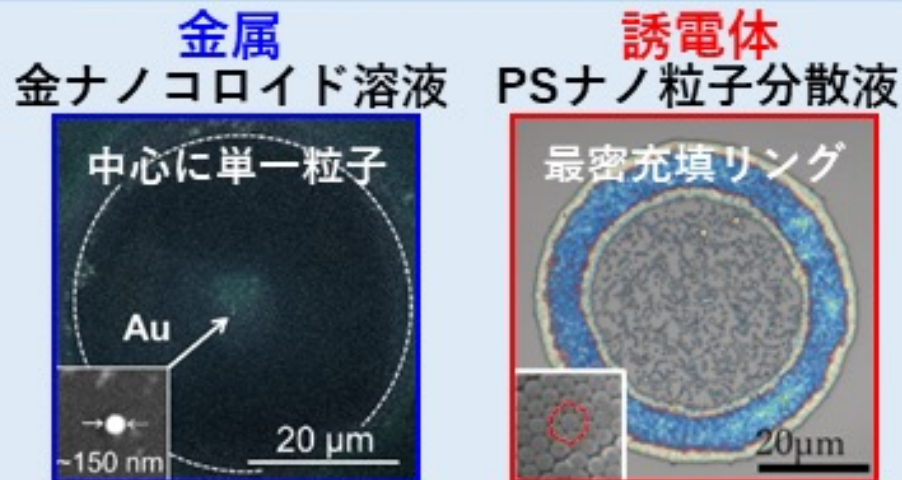
三次元的な構造創成・転写



光の輻射力由来の質量移動による
超解像突起状コア構造を形成

→ 単一の転写で三次元形状を形成
新たな印刷の枠組みを提供

物性を反映した構造制御



金属 : 超解像単一金属微粒子ナノコア
誘電体 : フォトニックマイクロリング構造
誘電率の符号により質量移動の向きが反転

→ 物質の光学特性を利用した
機能性パターンニングの開拓

中心方向への質量移動による流体運動制御
光の角運動量がもたらす転写構造制御

まとめ

- 光渦をレーザー誘起前方転写法に適用した新奇パターンニング技術「光渦レーザー誘起前方転写法」を提案

➡ 光渦によって全く異なる飛翔ダイナミクスが現れることを世界で初めて発見

- ナノ粒子分散液への光渦の適用により、フォトニックマイクロリング構造と高密度金属マイクロドット構造という、粒子の光学応答特性を反映した構造形成に成功

➡ 熱流体现象だけでなく
軌道角運動量による**流体の回転運動**が
内部粒子を操作し配列を秩序化することを発見

軌道角運動量による
飛翔ダイナミクス・転写ドット構造の秩序化



プリントドエレクトロニクス
プリントドフォトニクス
プリントドバイオテクノロジー への応用

OUTLINE

1. 自己紹介
2. これまでの研究内容
3. これからの研究計画
4. 研究の将来展望

レーザーによる構造形成の新しい形

光渦レーザー誘起前方転写法

円環強度分布

空間的に不均一な強度分布がもたらす質量移動現象
レーザーの暗点で行われる特異な構造化

軌道角運動量

物質の回転運動、螺旋構造化

光の不均一強度分布と軌道角運動量をもちいた
新しい光による構造形成現象・計測の提案

予定している研究テーマ

○液体媒質中における光渦構造形成現象
光渦が実現する液体への軌道角運動量転写による
流体渦の配向制御(科研費 研究活動スタート支援)

水中光渦レーザーアブレーションが誘起する流体現象に基づいた
新規微細構造形成の開拓(OMLスタート支援)

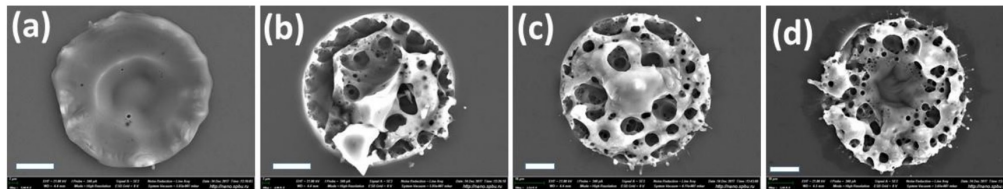
○光のモード性に基づく構造形成現象の開拓
トポロジカル光波によるレーザー微細構造形成の学理の探究
(若手研究者スタートアップ支援プログラム)

光の不均一強度分布に基づく
新しい構造形成現象を探求

液体中における光渦構造形成現象の開拓

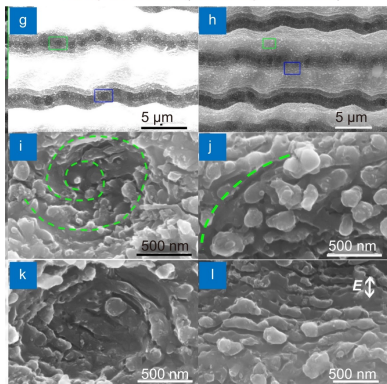
液体媒質中アブレーション

- ・媒質の密度に応じた
アブレーション閾値の低下
- ・流体力学特性による
不規則微細構造形成
× 構造の制御が不可能



<https://www.mdpi.com/1996-1944/12/4/562>

Low power fs-LAL (50 mW-5 μ m-0.5 mm/s)



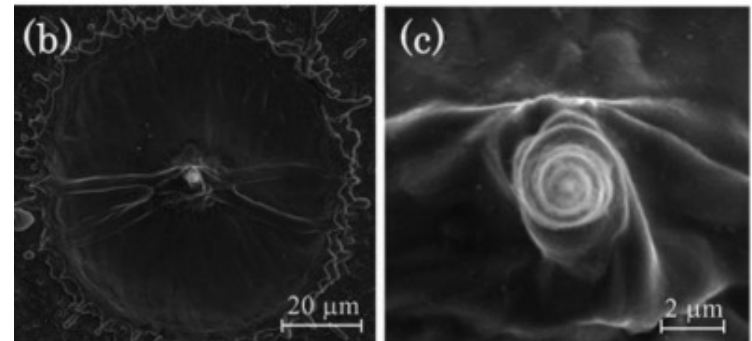
液体媒質の性質が
構造形成に反映

<https://www.ojournal.org/article/doi/10.29026/oea.2022.210066>

流体渦によるランダムな螺旋構造

光渦レーザーアブレーション

- ・螺旋構造形成



Phys. Rev. Lett. 110, 143603 (2013)

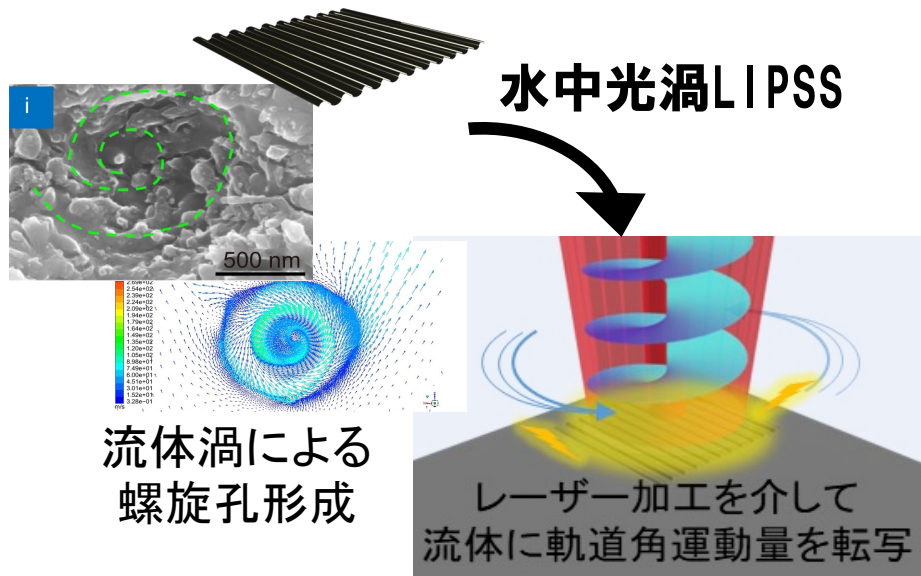
中心暗点へのマランゴニカ
軌道角運動量による螺旋化

× 形成条件が極めて限定的
⇒ 巻き数、大きさが制御不可

液中光渦レーザーアブレーションの提案

研究内容

光渦の軌道角運動量による 流体渦配向制御



流体渦による
螺旋孔形成

D. Zhang, et al. Opto-
electron, (2022)

液体媒質に軌道角運動量を転写し
液体媒質に発生する流体渦の配向を制御

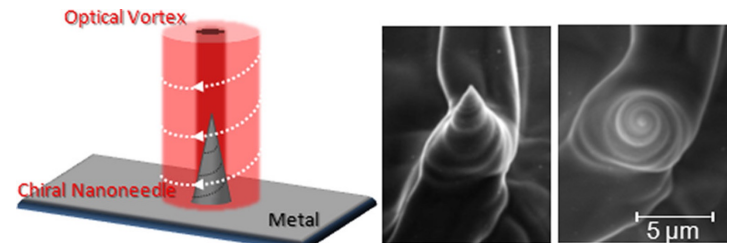
液体の流れに立脚した新しい構造体創成
光による液体の流れ制御の提案

液体媒質による螺旋構造制御 デバイス特性計測

媒質の密度に応じた
アブレーション閾値の低下

液体媒質の特性によって
エネルギーをパラメータ化

螺旋構造の
巻き数、大きさといった
細かいパラメータを調整可能に



Phys. Rev. Lett. 110, 143603 (2013)

光渦による螺旋構造のさらなる制御と
デバイス化に向けた計測技術の確立

トポロジカル光波によるレーザー微細構造形成

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

レーザー照射による固体の微細構造形成
体系的な解明は不十分

熱流体力学

×

光と物質の相互作用 (光圧)

トポロジカル光波によって力学的な効果から
レーザー微細構造形成の制御と学理の解明
新規微細構造を利用したデバイス創成

トポロジカル光波とは

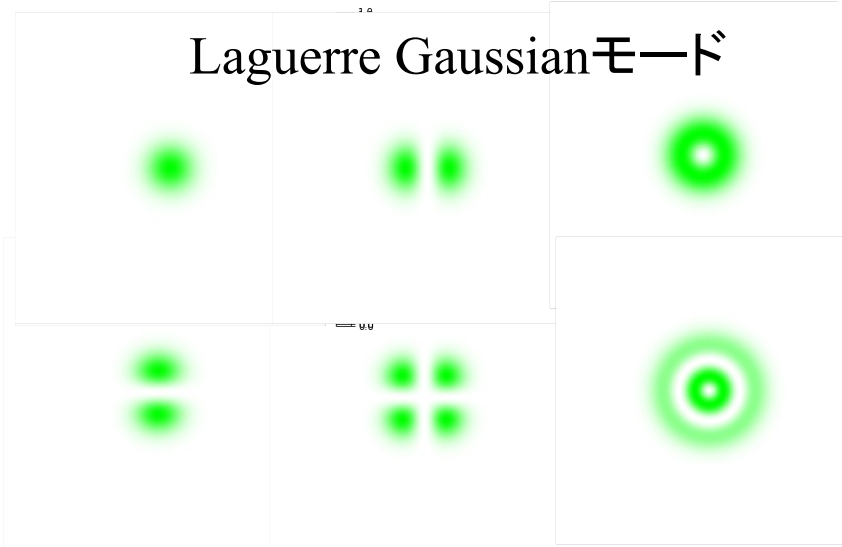
トポロジカル光波 = 位相・偏光の特異点構造を持つ光波
(本研究ではこれに加えて不均一な位相・偏光分布を持つ光波を扱う)

強度の二次元分布

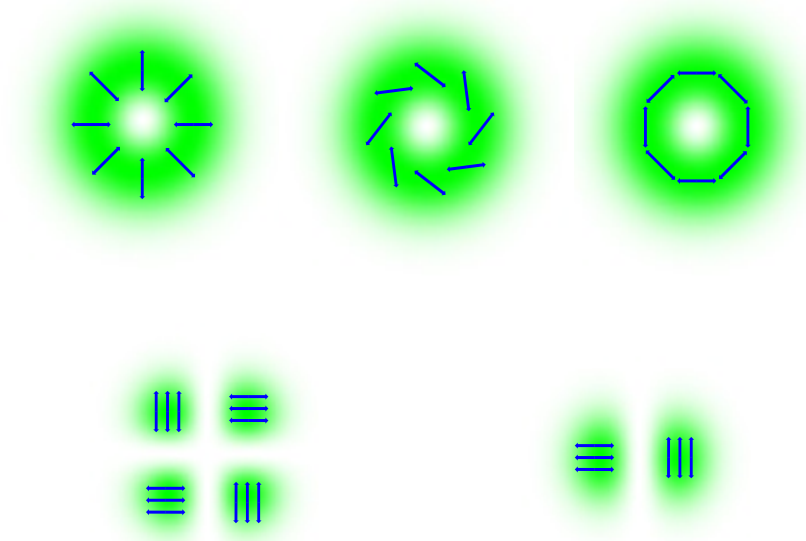
$$\nabla^2 u(\mathbf{r}, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(\mathbf{r}, t) = 0$$

Hermite-Gaussianモード

Laguerre Gaussianモード



偏光の二次元分布

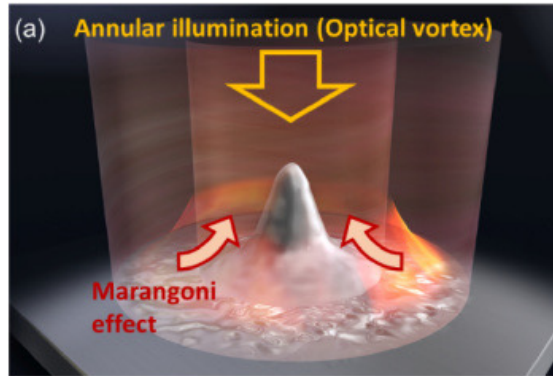


熱流体現象を制御

光圧を制御

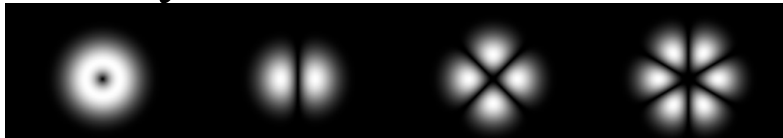
研究内容

高次Hermite-Gaussianモードによる 質量移動メカニズムの検証



明部から暗部への質量移動
(マランゴニ効果)

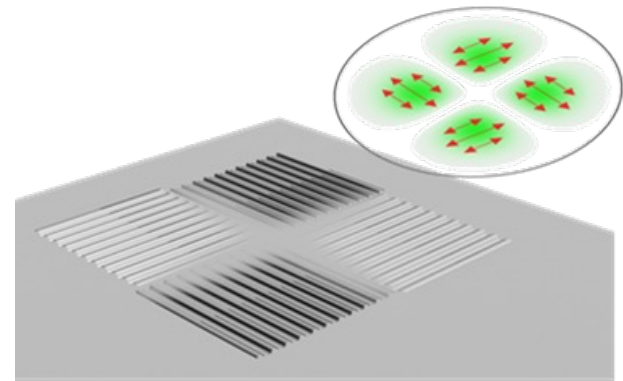
Cylindrical TEM mode



https://en.wikipedia.org/wiki/Transverse_mode

熱流体力学効果＋線形運動量に
よる構造形成の解明

メタサーフェスデバイスの開発



メタサーフェス特性の計測

- ・ 反射散乱計測
- ・ FDTEによるシミュレーション

トポロジカル光波による
デバイス開発の実証

光渦を用いたレーザープラズマ相互作用

数値計算により、プラズマに対して
渦の軌道角運動量 (OAM)
円偏光のスピン角運動量 (SAM)
が転写されることを実証

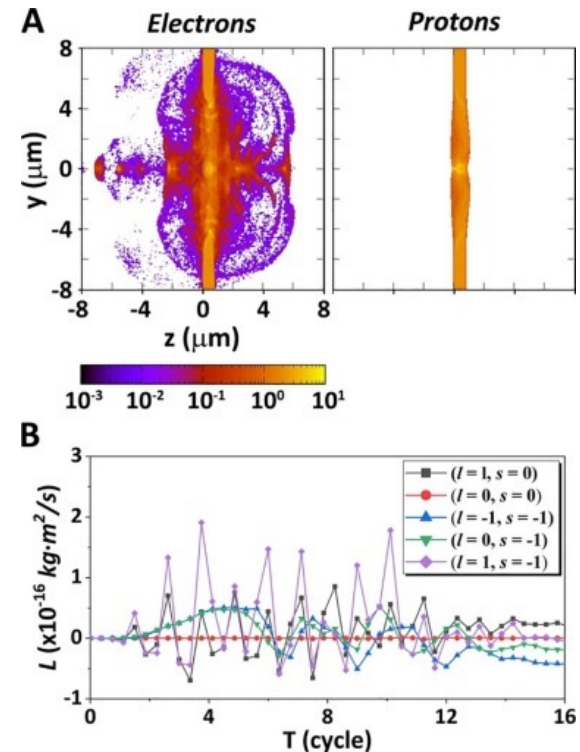
⇒ 実験的な検証はまだされていない。

角運動量を持つプラズマの生成・観測
+
プラズマの角運動量を利用した応用技術？

Generation of high-order optical vortices using directly machined spiral phase mirrors

Geoff Campbell, Boris Hage, Ben Buchler and Ping Koy Lam*
Centre for Quantum Computation and Communication Technology
Department of Quantum Sciences,
The Australian National University, Canberra, Australia
*Corresponding author: ping.lam@anu.edu.au

We report on the generation of high-order optical vortices by spiral phase mirrors. The phase mirrors are produced by direct machining with a diamond tool and are shown to produce high-quality optical vortices with topological charges ranging from 1 to 1000 at a wavelength of 532 nm. The direct machining technique is flexible and offers the promise of high-precision, large-diameter spiral phase mirrors that are compatible with high optical powers.



超高強度光渦照射による電子陽子分布と
角運動量密度

OUTLINE

1. 自己紹介
2. これまでの研究内容
3. これからの研究計画
4. 研究の将来展望

なぜ核融合科学研究所に来たのか

これまでやってきたこと

レーザー工学、レーザー応用、光渦、流体力学



核融合・プラズマとは全く無関係

可知化センシングユニット

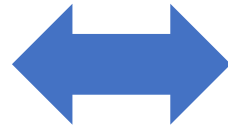
物理現象を人間が知ることができる形で表現する

直接的に社会に還元できる研究がしたい
今までの学際的な研究の感覚が活かせるのではないか
新しい分野にチャレンジしてみたい！

目指す研究者像

人の役に立つ研究 = 一般の人、企業、他の研究者

核融合に捉われない研究軸



核融合研究への貢献

レーザーモード制御、波面制御、
レーザー応用、光渦、流体力学、化学



加工、計測、基礎研究、、、

光のモード性、伝搬特性制御に
基づく新しいセンシングの提案

他分野だからこそ気づける
核融合・プラズマ研究の問題点

分野にとらわれない挑戦
自分にできることで核融合研究に貢献

ご清聴いただきありがとうございました

議論のほどよろしくお願いいたします