

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング



第67回 東北大学 多元物質科学研究所 (2023.12.1)

Institute of **M**ultidisciplinary **R**esearch for
Advanced **M**aterials (**IMRAM**), Tohoku University



12:05 – 12:10 : 研究所・センターの概要

12:10 – 12:25 : 空間構造を持つ光の応用展開
小澤祐市 准教授

12:25 – 12:45 : 質疑応答

IMRAMキャラクター
RAM ちゃん





多元物質科学研究所とは

平成13年 4月 国立学校設置法の改正により**素材工学**研究所（旧選鉱製錬研究所、S16設置）、**科学計測**研究所（S18設置）、**反応化学**研究所（旧非水溶液化学研究所、S19設置）を再編統合（異分野融合）し、**多元物質科学研究所**設置。

R5.4.1：48分野、142名

多元的に物質を科学する

物質創成科学

有機・無機、ハイブリッド
機能設計、物質変換、磁性材
デバイス、創薬

プロセス科学

超臨界、高温合成、粉体プロセス
製鉄プロセス、バックエンド工学
資源循環、固体合成プロセス

計測科学

X線、中性子、電子顕微鏡
レーザー、SPM、位相光学
4D計測、その場観察

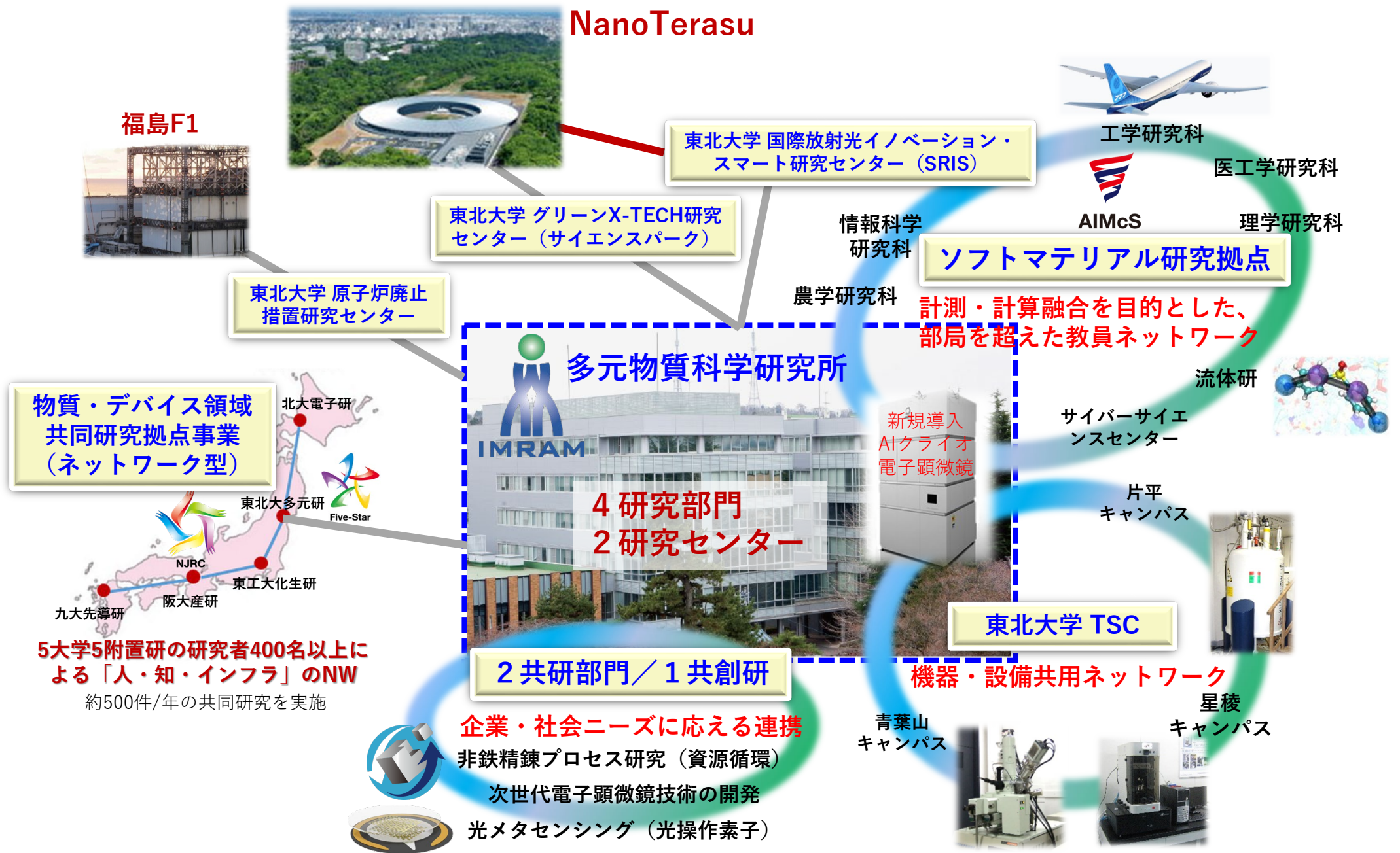
技術室

機械工場（設計、試作）、ガラス工場（特殊機器）、広報・情報室、共用機器管理

研究シーズを生かした連携事業

- ・ ソフトマテリアル研究拠点（企業、NanoTerasと連携）
- ・ 全国共同利用・共同研究拠点&アライアンス事業（MEXT事業）
- ・ 企業との共同研究部門（産学連携）

アカデミア・社会との連携ネットワーク

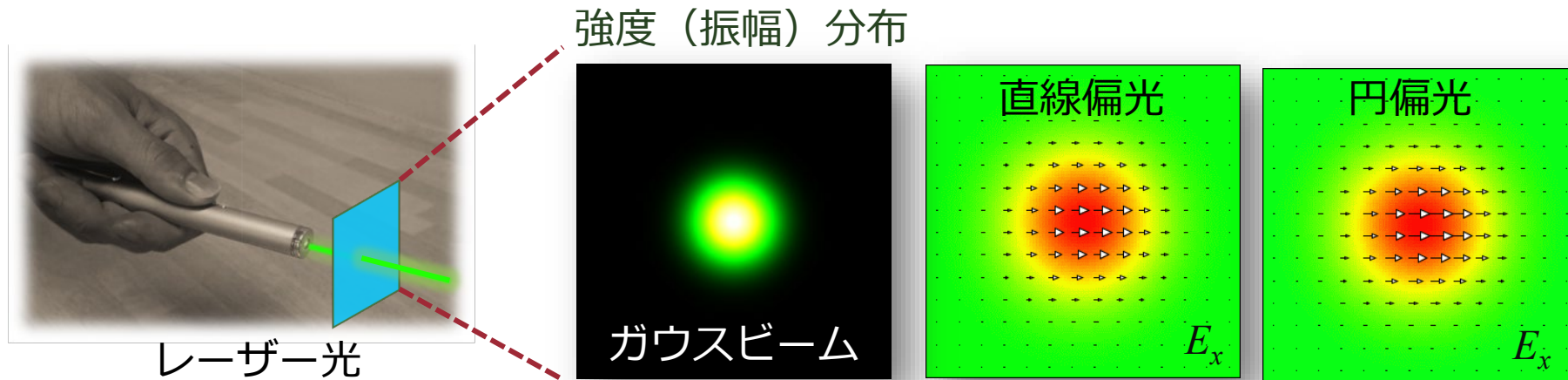


空間構造を持つ光の応用展開

小澤 祐市
(こざわ ゆういち)

東北大学多元物質科学研究所・准教授
光物質科学研究分野（佐藤（俊）研究室）

空間構造を持つ光ビームとは (Structured light beam)



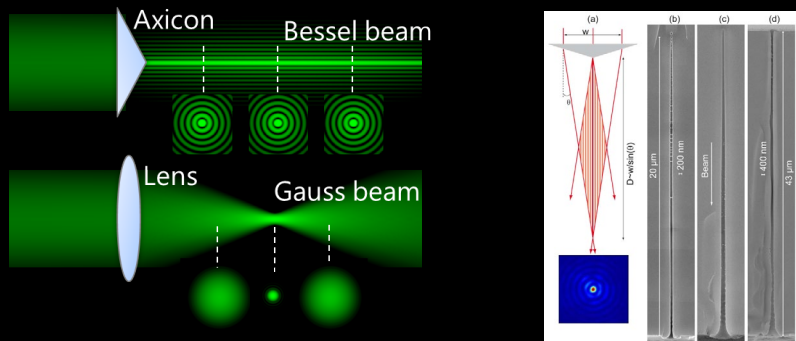
従来の光ビーム：“Conventional” beams
→ 振幅・偏光・位相（光を特徴づける基本的なパラメータ）
はビーム断面でほぼ一様



振幅・偏光・位相がビーム断面で分布（構造）を持つことができる
→空間的に不均一なビーム：**空間構造を持つ光**（ビーム）

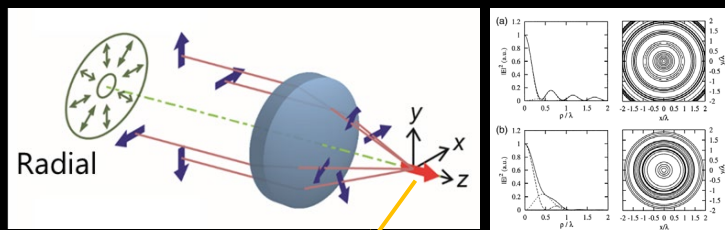
「空間構造を持つ光(Structured light)」で実現する驚くべき特性

- 伝搬しても“広がらない”非回折伝搬特性
ベッセルビーム



Appl. Phys. A 112, 20 (2013)

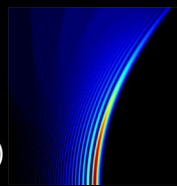
- 放射状の偏光分布を持つ径偏光ビーム
(軸方向電場の発生)



縦電場, E_z Opt. Commun. 179, 1 (2000)

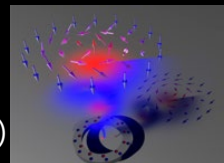
- 伝搬に伴い“曲がる”自己湾曲伝搬特性を持つエアリービーム

Phys. Rev. Lett. 99, 213901 (2007)

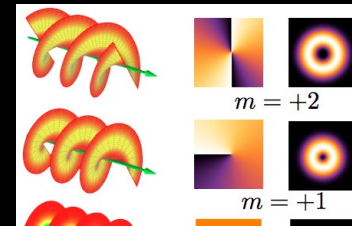


- 全ての偏光状態を持つフルポアンカレビーム

Phys. Rev. Res. 3, 023055 (2021)



- らせん波面により軌道角運動量を持つ光渦ビーム(Vortex beams)

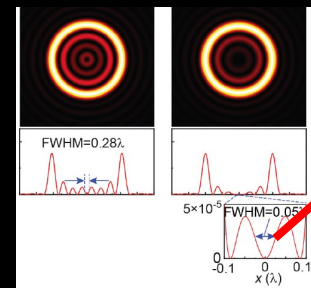


wikipedia.org



Vortex beam trapping recorded in our labs

- 中空状の集光スポットを生み出す方位偏光ビーム

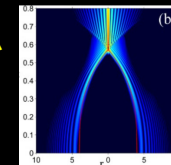


無限小の暗点!

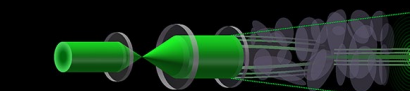
Prog. Opt. 66, 35 (2021)

- 突然集光する自動集光ビーム

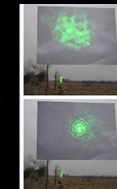
Opt. Lett. 35, 4045 (2010)



- 擾乱に対しても優れた伝搬をするピンビーム



APL Photon. 4, 076103 (2019)

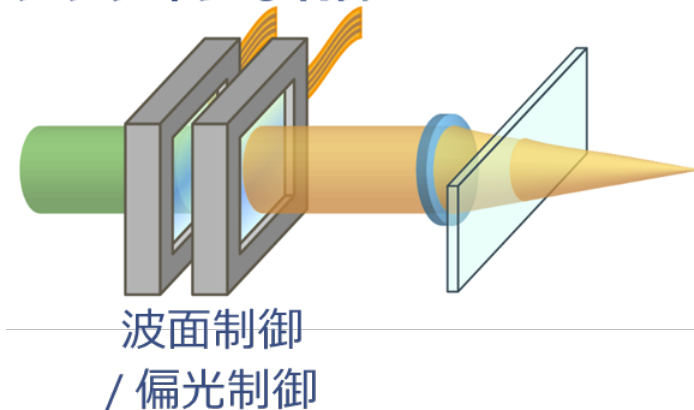


振幅・偏光・位相を空間的に構造を持つ（デザインする）ことで従来には無い機能や性能が発現
（2000年代以降に急速に研究が発展）

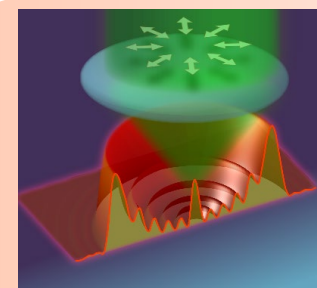
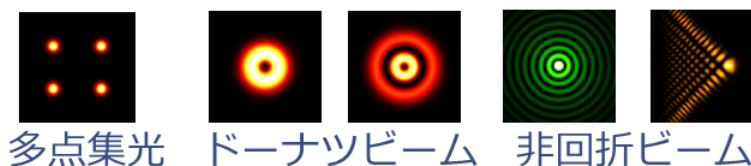
⇒光自身の特性を駆使した新たな応用展開

超解像イメージング, 3次元イメージング, レーザー加工, 光トラッピング, 量子光学, 光通信, 光記録, 粒子加速, 物質合成/反応制御, , , ,

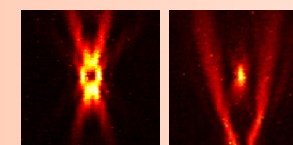
アクティブな制御



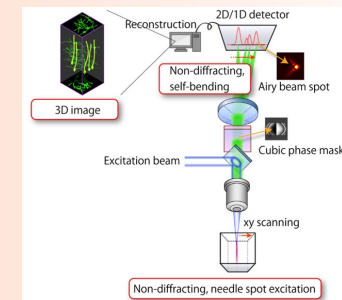
光の「空間構造」制御による
新しい機能性の発現



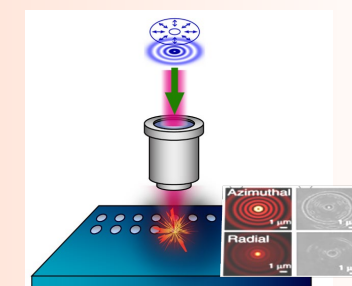
超解像・高精度
イメージング



微粒子操作



3次元イメージング



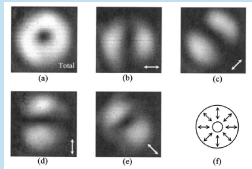
レーザー微細加工

光の本質的な性質に着目する独自のアプローチで研究を推進

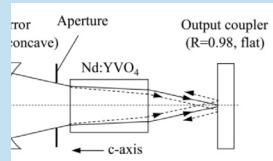
現在までに取り組んできた主な研究テーマ

「空間構造を持つ光」を生み出す

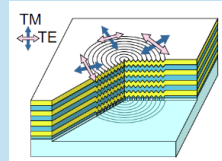
ベクトルビーム光源の開発



Opt. Lett. (2005)



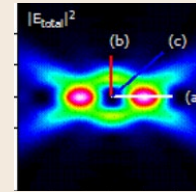
Opt. Lett. (2006)



APEX (2008)

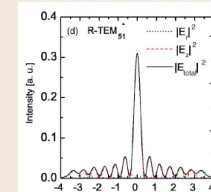
「空間構造を持つ光」を理解する

光ケージ



Opt. Lett. (2006)

微小集光



JOSA A (2007)

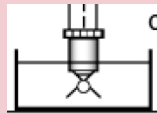
偏光特異点



Opt. Express (2013)

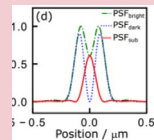
「空間構造を持つ光」を活用する

光トラッピング



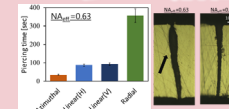
Opt. Express (2010)

差引イメージング



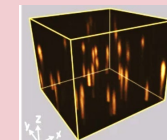
Opt. Lett. (2014)

レーザー加工



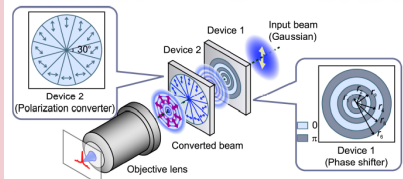
Opt. Lett. (2018)

3次元イメージング



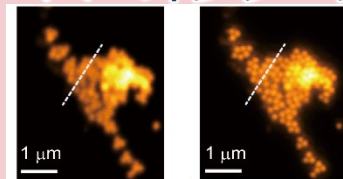
Sci. Rep. (2019)

共焦点レーザー顕微鏡



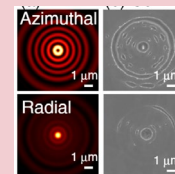
Opt. Express (2011)

スーパーオシレーション

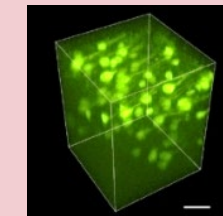


Optica (2018)

微細加工



Opt. Lett. (2020)



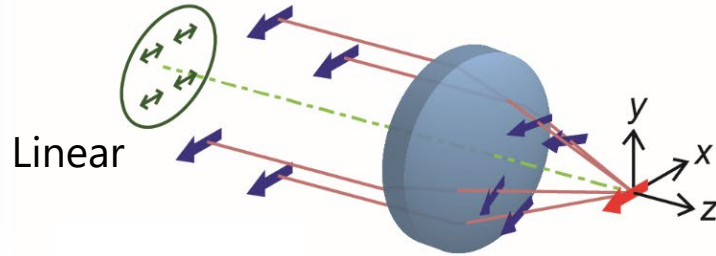
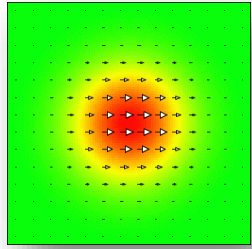
Biomed. Opt. Express (2022)

光の空間構造を制御することで光波/レーザー光の潜在的可能性を極限的に引き出す

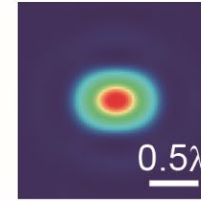
ベクトルビームは普通の光ビームと何が違う？

光ビームの強い集光 ⇒ 光のベクトル的性質が顕在化（高倍率な光学顕微鏡の対物レンズでの焦点など）

直線偏光
(従来の光)

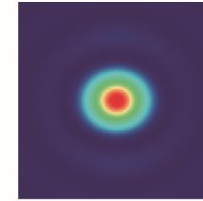


Total intensity distribution

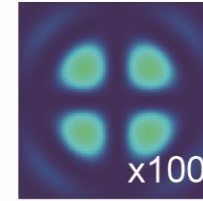


Polarization components

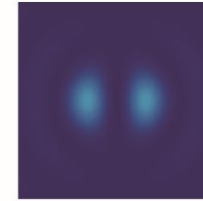
$|E_x|^2$



$|E_y|^2$

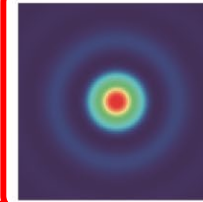
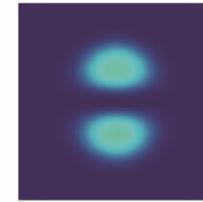
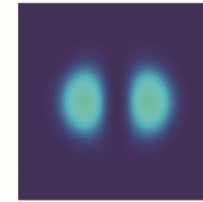
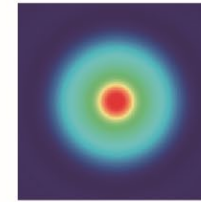
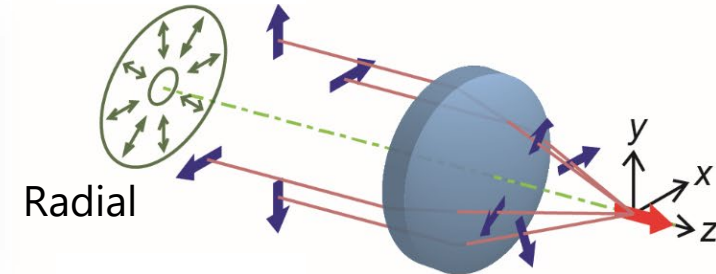
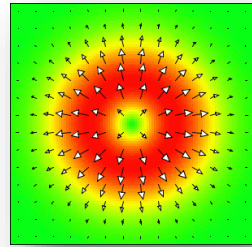


$|E_z|^2$

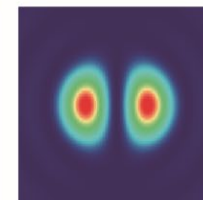
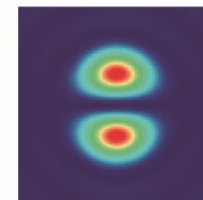
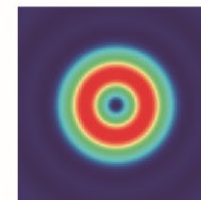
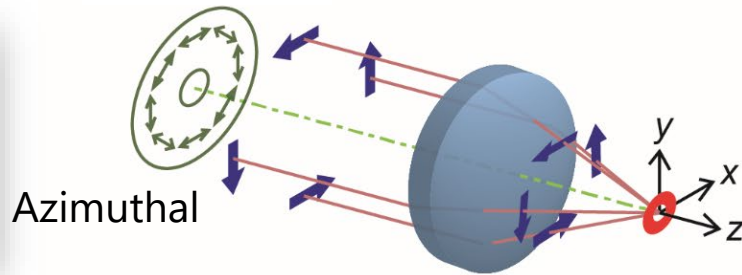
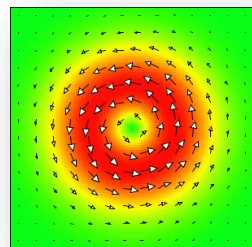


焦点では横電場が支配的（通常の集光）

ベクトルビーム
(軸対称な偏光分布)



軸方向電場（縦波成分）の発生（スポット状）



完全なダークスポットを維持

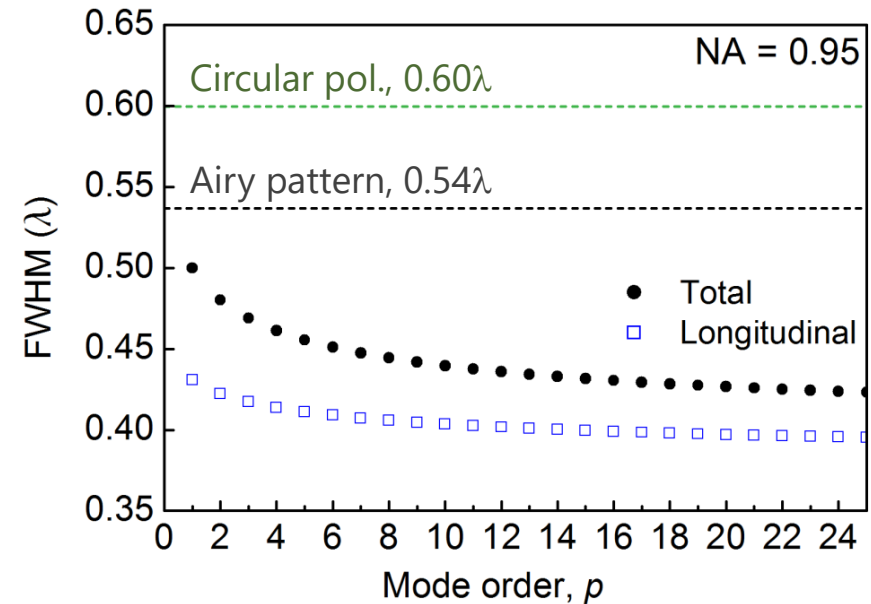
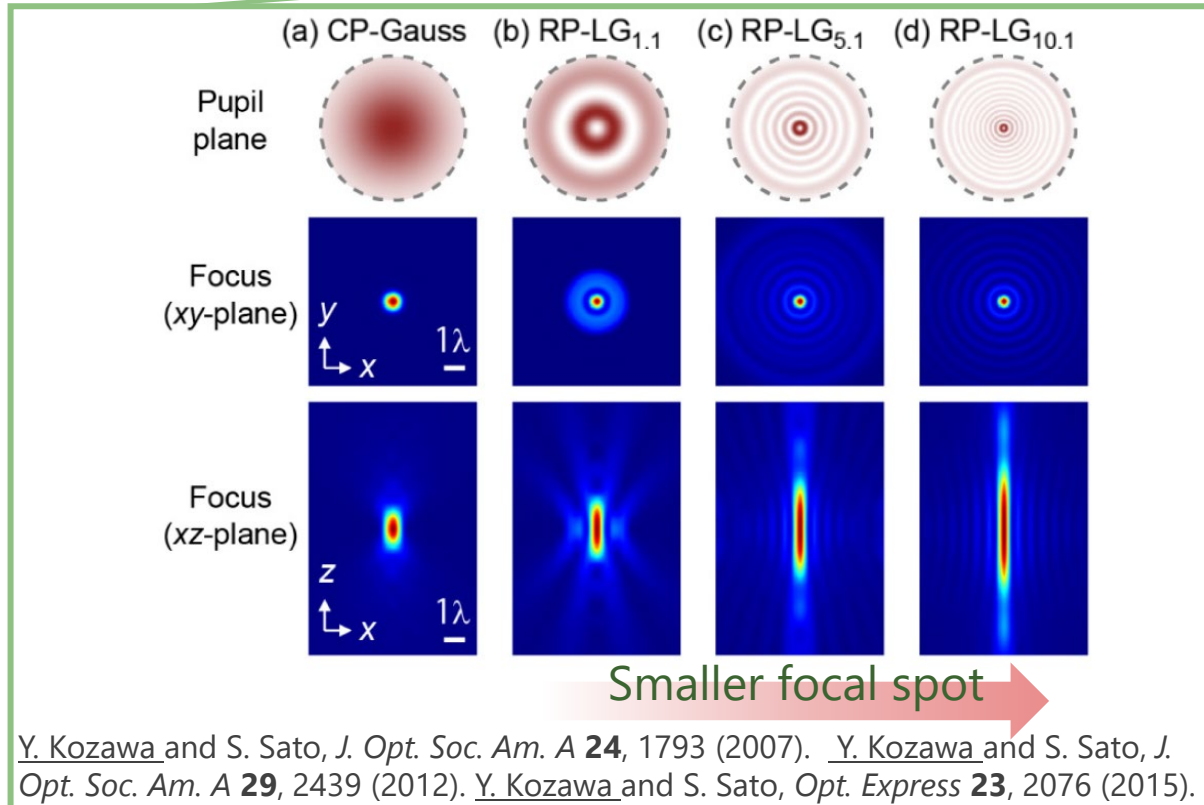
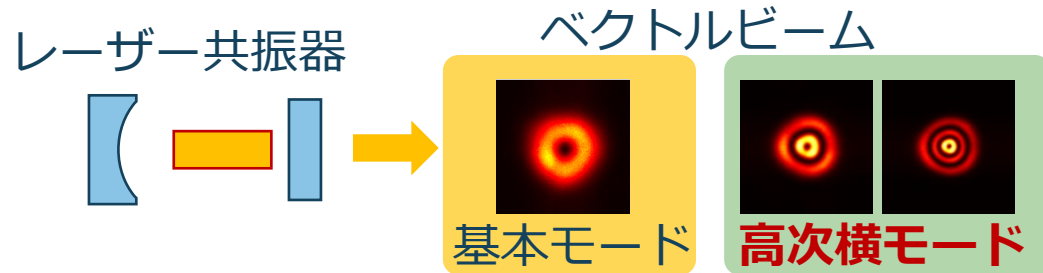
矢印：偏光方向

K. Otomo, T Hibi, Y. Kozawa et al., "10. Super-resolution two-photon excitation microscopy utilizing transmissive liquid crystal devices" (*Super-Resolution Imaging in Biomedicine*), CRC Press, pp.189-214 (2016)

偏光の軸対称性に起因して、従来の光ビームでは得られない特性が発現

強く集光した径偏光ビームの特異な性質

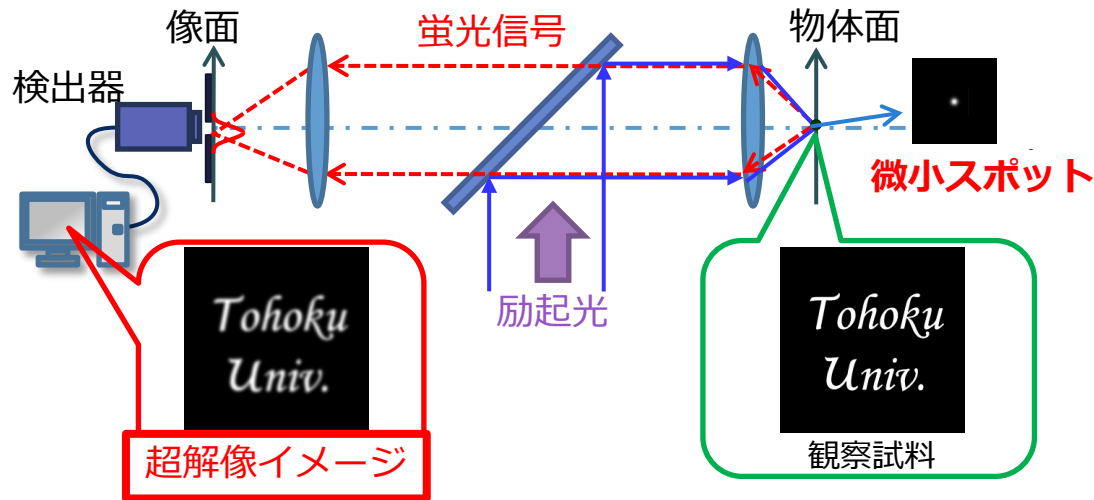
振幅および位相が分布を持つと焦点中央の集光スポットがさらに小さくなる



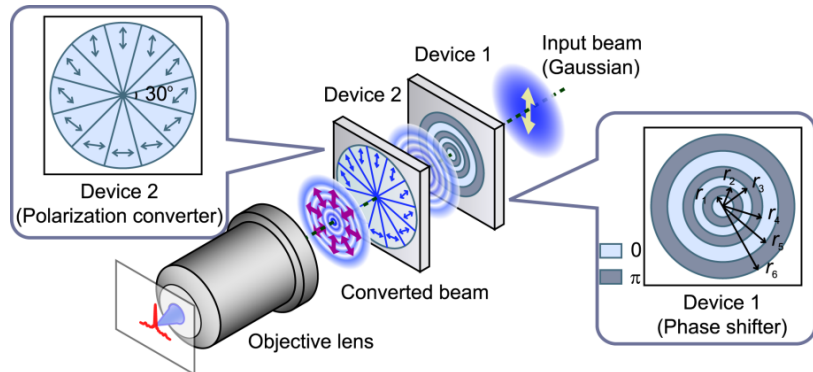
CP-Gauss: 230 nm (通常の光ビーム) → RP-LG_{5,1}: **171 nm** for 532 nm, NA = 1.4 ($n = 1.52$)

**高次径偏光ビームを集光するだけで
微小な集光スポットが発生**

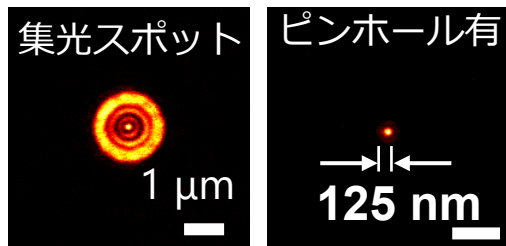
光イメージング（レーザー走査型顕蛍光微鏡法）への応用



- 空間分解能（解像限界）は走査励起光のスポットサイズに依存（ ~ 200 nm@可視光）
- スポットサイズが小さくできれば超解像効果が実現する⇒ベクトルビームが応用できる

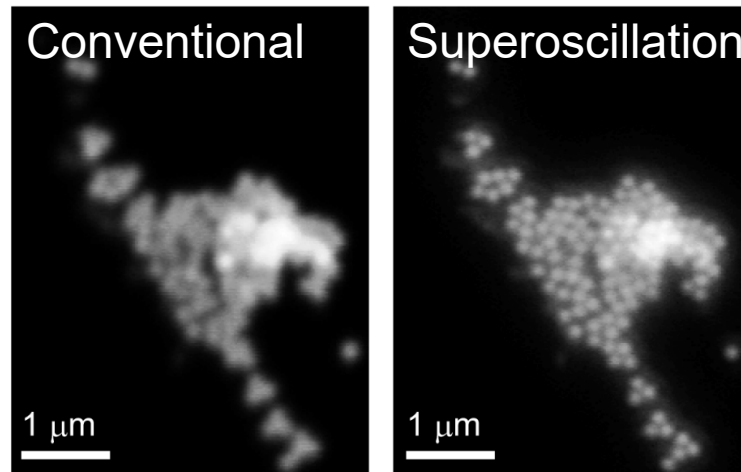


Y. Kozawa *et al.*, *Opt. Express* 19, 15947 (2011)

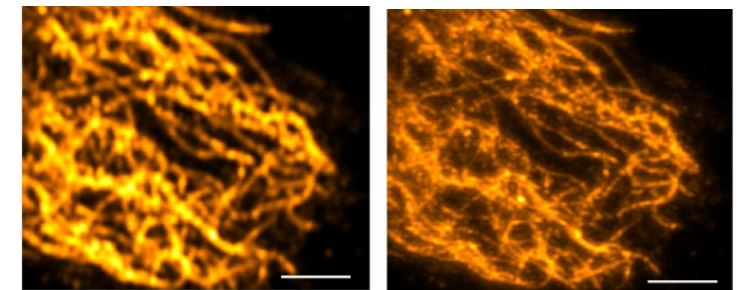


Y. Kozawa *et al.*, *Optica* 5, 86 (2018)

蛍光ビーズ(170 nm)の共焦点像



生体試料 (COS-7細胞・微小管)

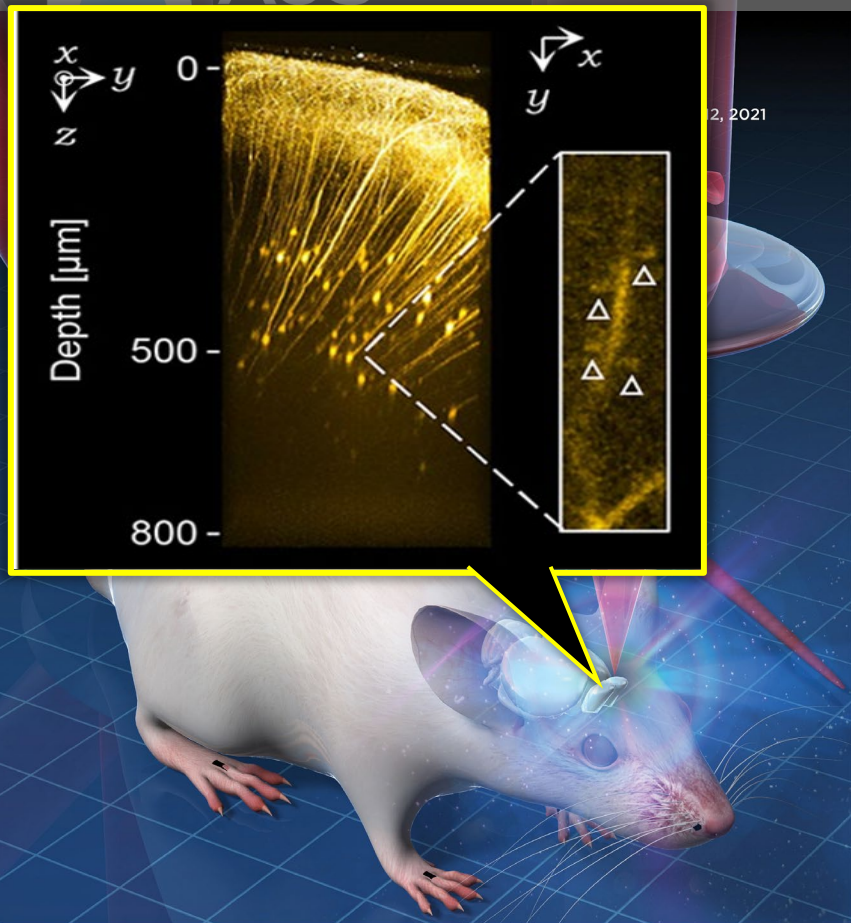


532 nm (NA = 1.4)

径偏光ビーム集光によるスーパーオシレーション集光スポットを利用した超解像蛍光イメージングを初めて実証

レーザー走査型顕微鏡技術における3次元画像構築と課題

補償光学2光子励起レーザー顕微鏡によるマウス脳深部の*in vivo*観察



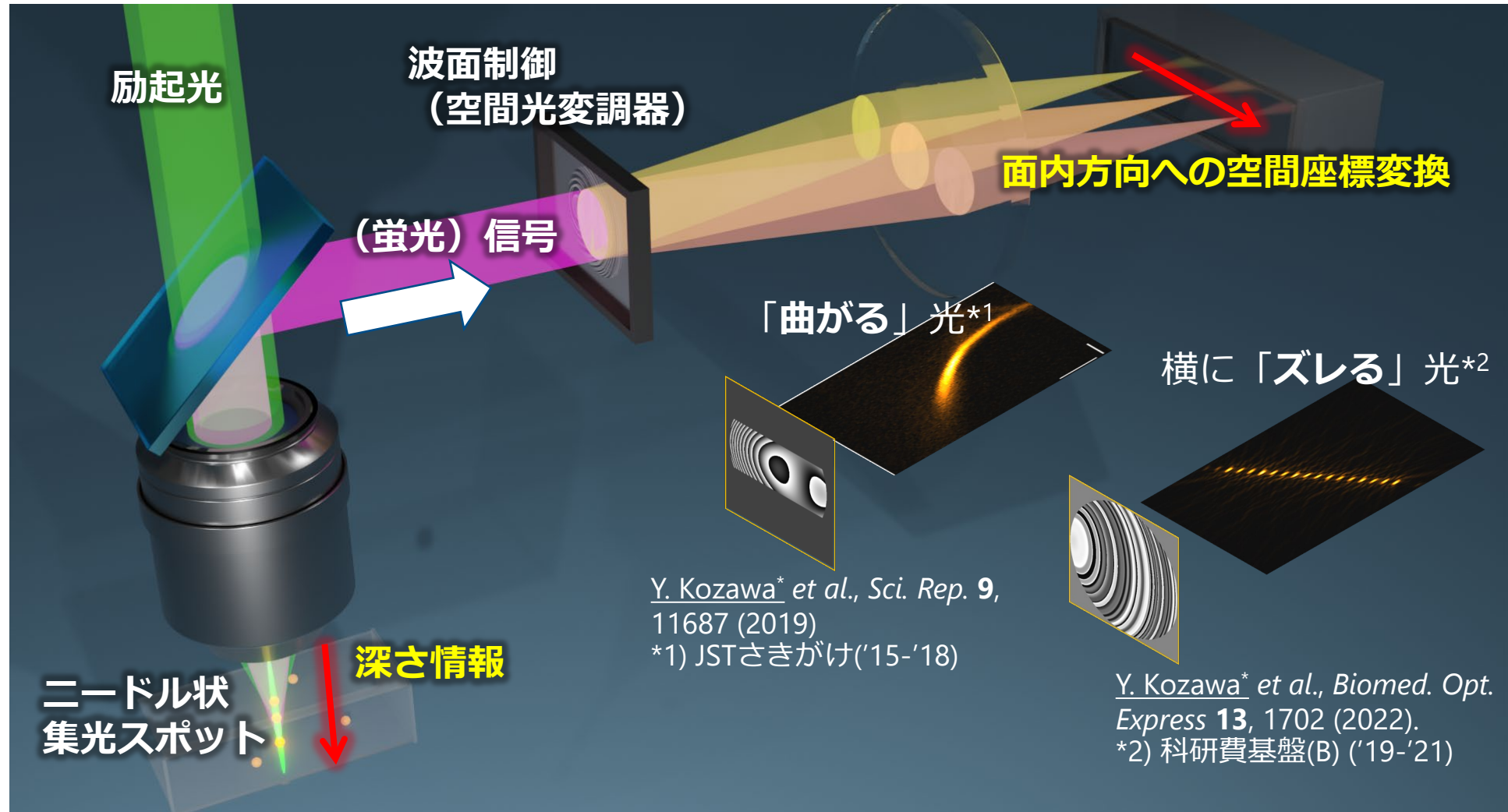
先端的な（レーザー走査型の）光イメージング技術

- 生体試料の深部を「生きたまま」で「3次元的に」可視化できる
- 生命科学研究では必要不可欠
⇒複雑な構造・ネットワーク・機能を「ありのまま」で理解したい

極めて時間の要するプロセス
(数十分～時間のオーダー)

3次元観察には観察面の移動が必須
⇒本質的に高速化が困難

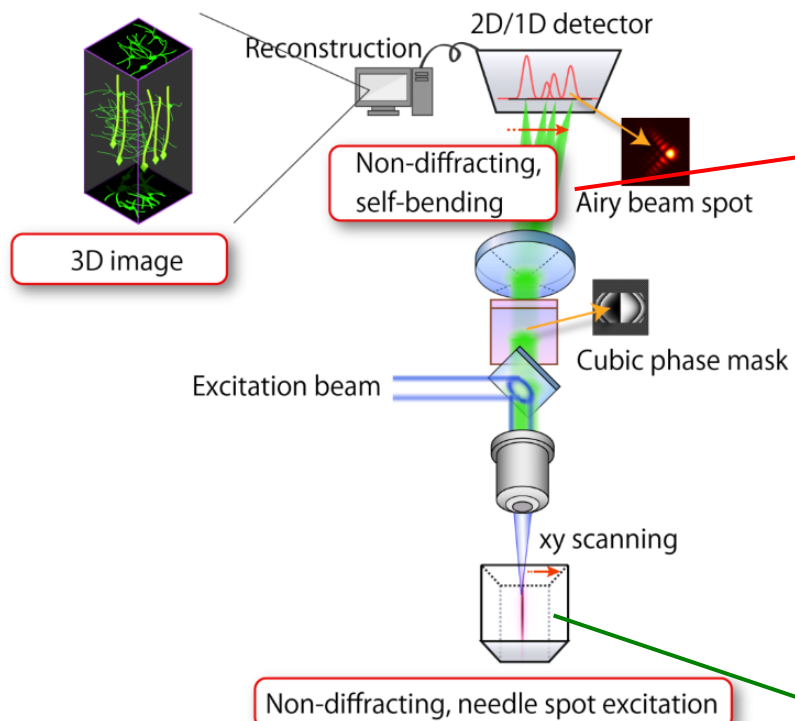
光の空間構造制御に基づく独自のアプローチを提案： ～空間転置検出型ニードル顕微鏡法



光ニードルの1回の2次元走査のみから、
観察面を移動すること無く3次元画像取得が可能！

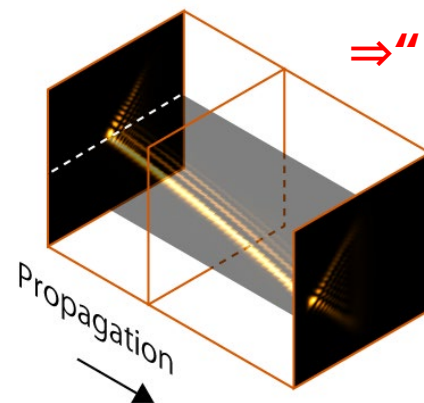
「伸びるビーム」と「曲がるビーム」で実現する3次元イメージング

顕微鏡システムのご概念図



検出光：非回折・自己湾曲性

⇒“曲がる”ビーム

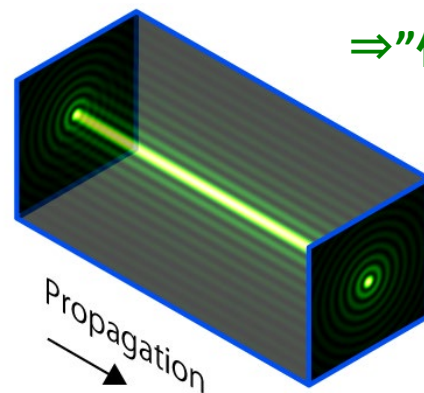


Airy beam

深さ位置分解

励起光：非回折・ニードルスポット

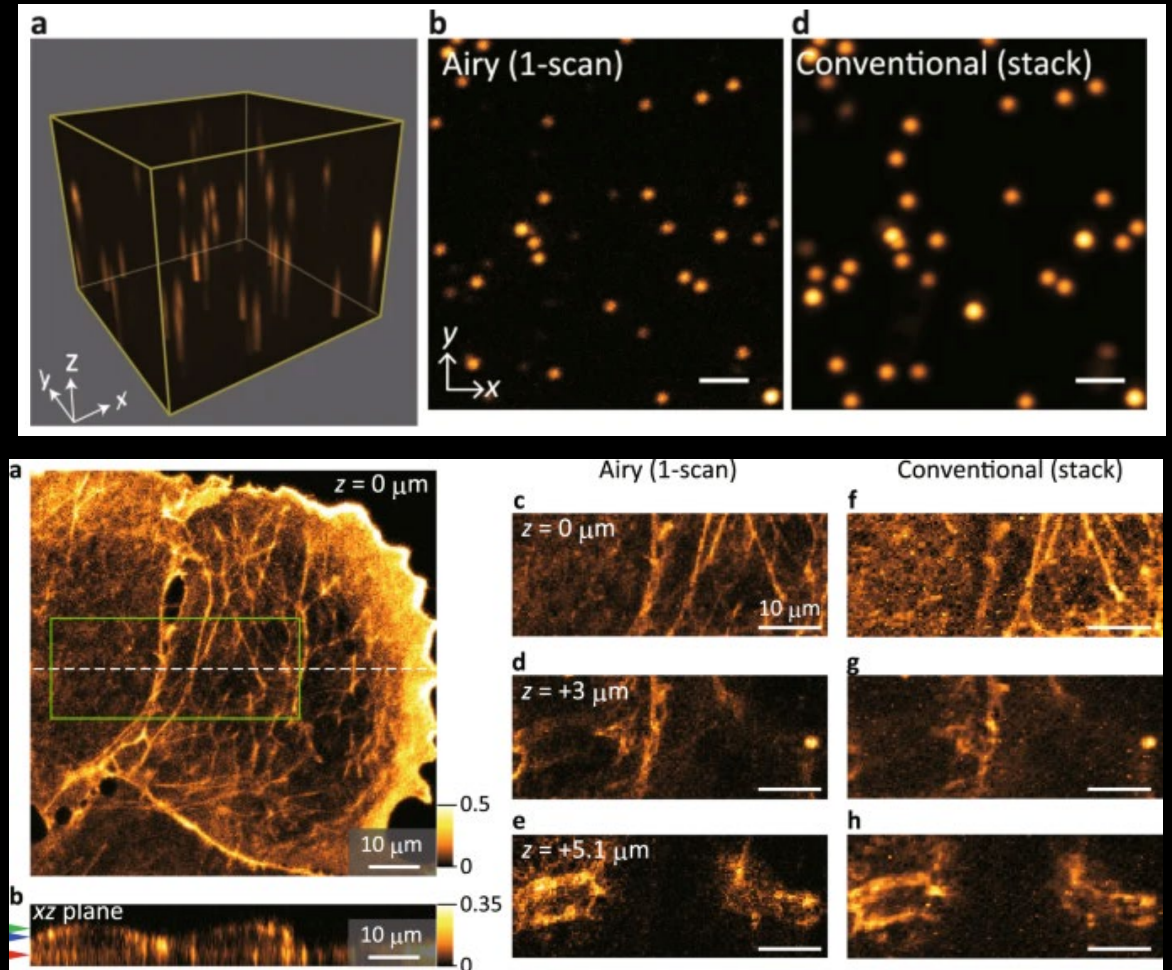
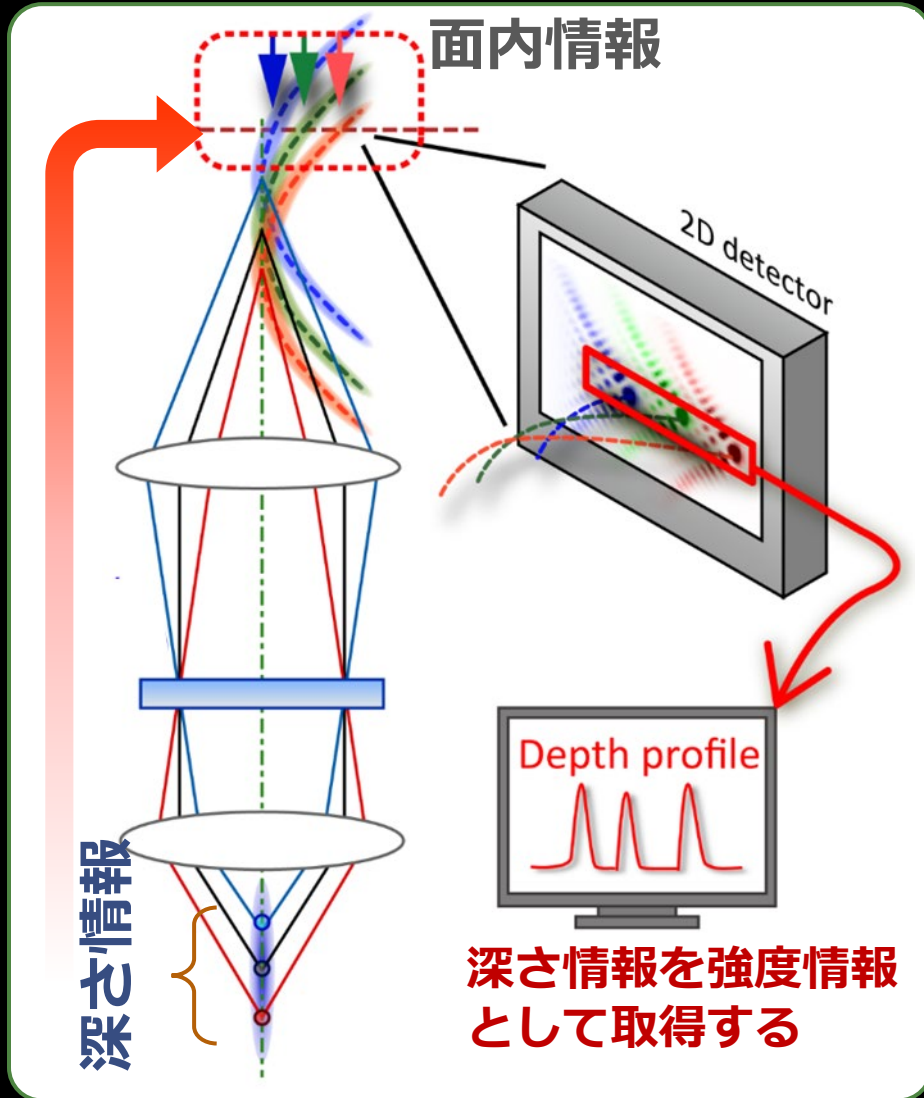
⇒“伸びる”ビーム



Bessel beam

長焦点深度
イメージング

なぜ深さ情報を取得できるのか？



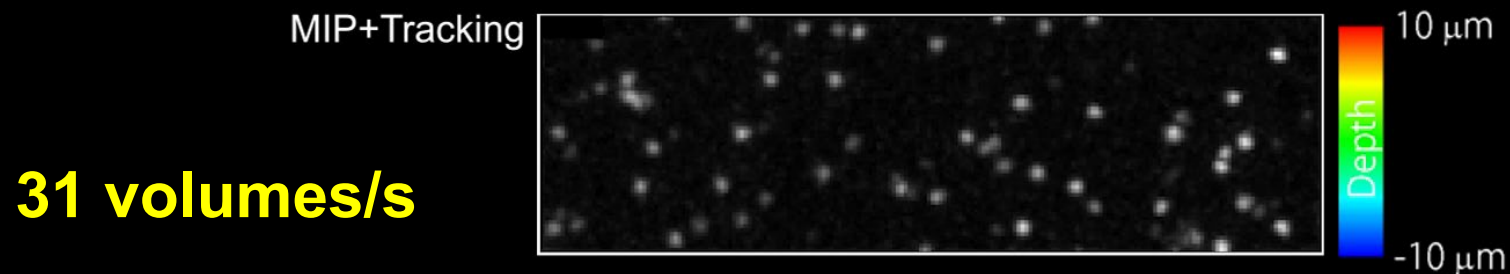
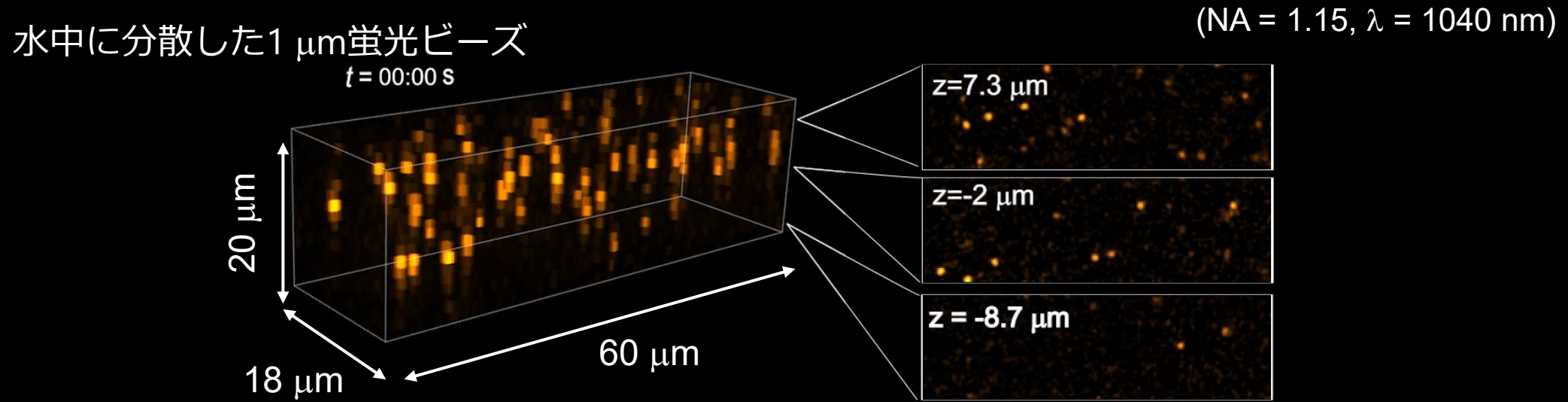
ニードルスポットの1回の2次元走査のみから3次元画像構築を実証

PCT/JP2017/021138 (JST出願支援採択), 日/米/独 特許登録済

Y. Kozawa* and S. Sato, *Sci. Rep.* **9**, 11687 (2019).

空間構造を持つ光でレーザー走査型顕微鏡の限界を超える

多重化計算機合成ホログラムの原理により生成した「ズれる」光による深さ位置分解

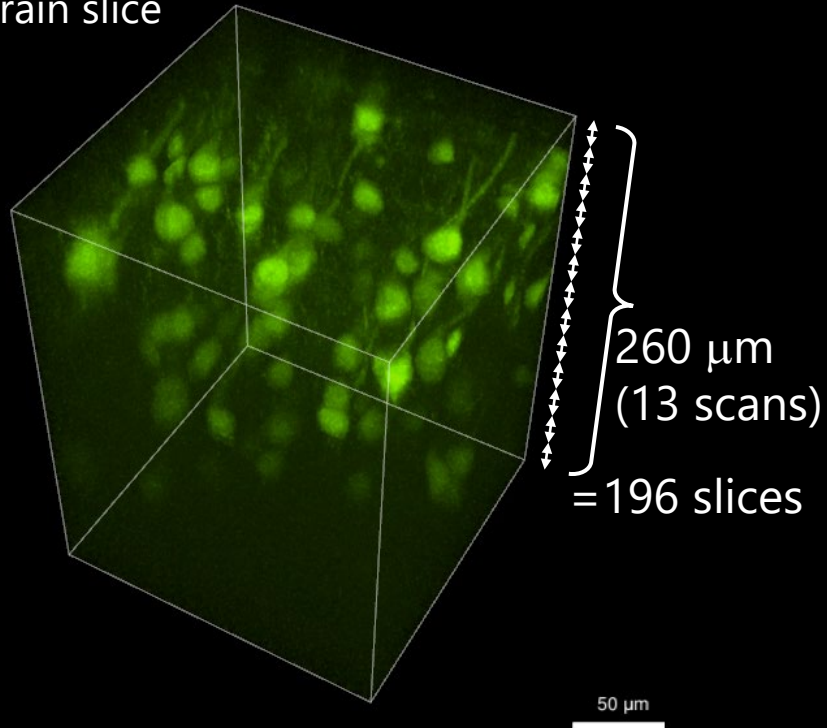


- ニードルスポットの連続2次元走査から**ビデオレート**かつ**リアルタイム**での3次元画像化
- 個々の粒子位置の3次元的なトラッキングをレーザー走査型顕微鏡技術として実現

厚みのある脳スライス標本の迅速可視化

(NA = 1.15, $\lambda = 1040$ nm)

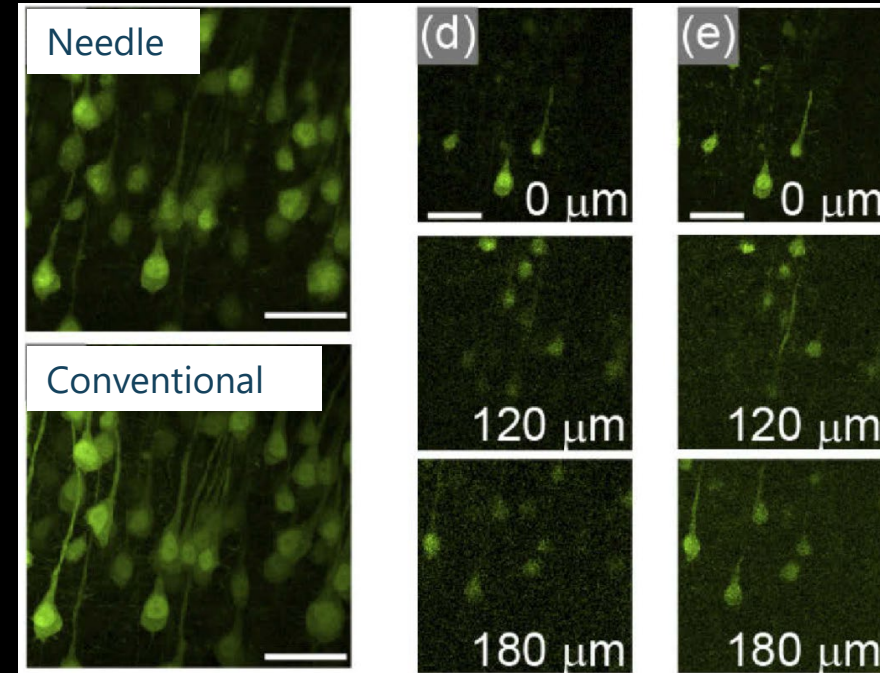
Pyramidal neurons in a fixed mouse brain slice



MIP image

Needle scan

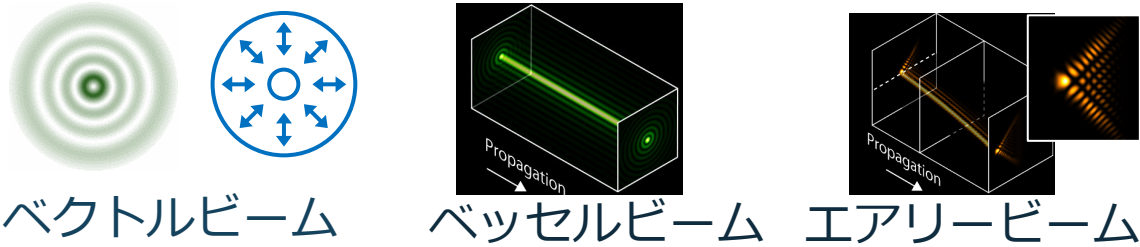
Gauss stack



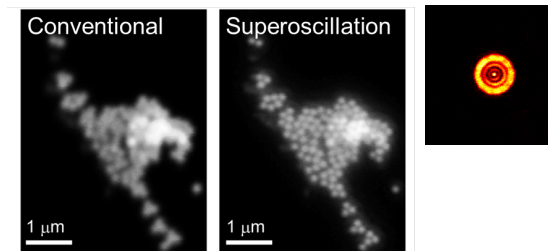
- 本提案⇒16多重焦点イメージング：厚みのある試料に対しても少ない走査回数（z位置移動）で迅速にサンプルを可視化できる
従来の顕微鏡法に比べて実計測で**~11倍の高速化**に成功

まとめ

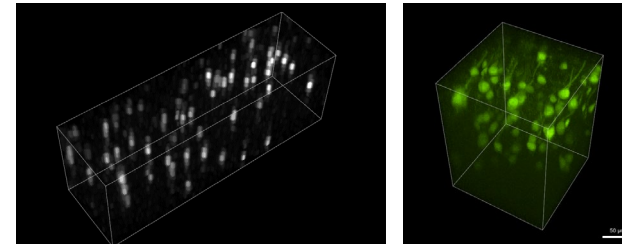
- ✓ 光の振幅・位相・偏光がビーム断面で不均一に分布した「空間構造を持つ光」は従来の光ビームでは得られない特異な性質を生み出す



- ✓ **ベクトルビームを用いた超解像イメージング**



- ✓ **ベッセルビームとエアリービームの伝搬特性（あるいはCGHによるデザイン）に基づくニードル走査型レーザー顕微鏡法における3次元高速イメージング**



光の振幅・位相・偏光の空間分布が持つ大きな設計自由度を駆使した新たな応用展開が期待

⇒ **空間構造を持つ光の可能性は無限大！**