

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
研究課題
「ベクトルビームの光科学とナノイメージング」

研究終了報告書

研究期間 平成20年10月～平成26年3月

研究代表者：佐藤俊一
(東北大学多元物質科学研究所、教授)

§1 研究実施の概要

(1) 実施概要

ビーム断面で不均一な偏光分布を有するベクトルビームは、レーザーが発明された直後に既に認識されていたものの、本格的な研究は今世紀になってようやく始まった、新しい光ビームである。それだけに、ベクトルビームには未解明な部分が多く、光ビームの本質的な特性を備えている可能性を大いに秘めている。例えば、光軸と平行な電場の形成、電場あるいは磁場成分の無い場の形成、微小スポット形成など、既に知られている性質だけでも、従来の光ビームでは実現が困難なものが多い。本研究では、光ビームの本質を可能な限り探究すべく、ベクトルビームの観点から研究を進めたものである。

研究の主眼を、ベクトルビームの性質を探る「ベクトルビームの光科学」と、応用のひとつとして期待されている「ナノイメージング」のふたつに絞って、研究を進めた。ベクトルビームの光科学に関しては、佐藤グループが担当した。まず、ベクトルビームとして代表的な円筒対称性を有する **Laguerre-Gaussian** および **Bessel-Gaussian** ビームを対象に、ベクトルビームの特性が著しく現われる、強く集光した焦点付近での電磁場の偏光、位相、強度分布をベクトル回折理論に基づいたシミュレーションを中心に行った。また、ベクトルビームの応用展開を図るため、共振器からの直接発生を中心に、高品質ベクトルビーム発生法の開発を進めた。

ベクトルビームの光科学に関しては、偏光特異点と位相特異点との関連性、ベクトルビームの自己治癒効果、偏光結合、**Bessel** ビームと **Laguerre-Gaussian** ビームとの類似性および集光特性などの、新しいベクトルビームの特性を見出した。ベクトルビーム発生に関しては、本グループらの独自開発技術である、c 軸カットレーザー結晶、点欠陥ミラー、フォトニック結晶ミラーなどを駆使することによって、**Laguerre-Gaussian** および **Bessel-Gaussian** ビームの低次から高次までの単一モードでの高品質ビーム発振を実現した。これらの成果により、ベクトルビームは特殊で奇異なビームではなく、自然に光共振器から発生する普遍的な光ビームであることが実証され、また、それらが有する様々な新しい特性を実際に活用できることを明らかにすることができた。

一方、ベクトルビームのナノイメージングに関しては、半導体量子井戸構造および生体試料を対象に、佐藤グループが液晶素子を用いて形成したベクトルビームを使用し、研究を進めた。まず、我々が直線偏光ビームよりも小さな光スポットを形成することを明らかにしていた多重リング径偏光ビームを、根本グループが共焦点顕微鏡および 2 光子顕微鏡に適用した。その結果、予測通り約 30%の空間分解能の向上が実現した。この値は、ベクトルビーム単独で達成できる分解能の限界と考えられる。また、ベクトルビームの形成に用いた液晶素子は小型・軽量などの特徴から既存のレーザー顕微鏡に容易に取り付けることが可能であり、超解像レーザー顕微鏡としての実用性も大いに期待できる。次に、さらなる分解能向上を目指して、**STED** 顕微鏡への適用を図った。横山および佐藤グループが、世界で初めての試みとして量子井戸構造を有する **InGaN** 半導体試料を対象に実験を進めた。誘導放出による消光効果が確認され、ベクトルビームによる **STED** 顕微鏡の分解能向上も認められた。生体試料に関しては、根本グループが実験を進めており、**STED** 効果の確認と 2 光子 **STED** 顕微鏡の開発に成功し 100nm の空間分解能を達成した。同様に軸性偏光ビームを用いた 2 光子 **STED** 顕微鏡法も完成し、分子配向の 3次元イメージングに応用を図った。さらに、佐藤グループは分解能の向上を目指して、ベクトルビームを用いた極めて簡単な差引法を考案し、100nm 近くの分解能を達成できることを示した。

これらの成果に加え、ナノイメージングに適したベクトルビームの実現を目指して、半導体レーザーをベースとしたピコ秒パルス光源の開発を進めていたが、これをマウス脳の 2 光子イメージングに適用したところ、予想以上の成果として、生きたマウス個体の脳内の神経細胞の断層像として世界最深部の 1.3mm 以上に到達し、海馬 CA1 領域の神経細胞の *in vivo* イメージングに世界で初めて成功した。さらに深部観察を実現するため、横山グループと佐藤グループが利得スイッチング半導体レーザーとその増幅による 5W を超えるピコ秒光源を開発した。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam (Optics Express, **19**, 15947-15954 (2011))

被引用件数: 9 件

概要: 直線偏光ビームに比べて、焦点でより小さな光スポットを形成することが予測されていた高次ラゲールガウス径偏光ビームを液晶デバイスを用いて作製し、共焦点顕微鏡の光源として利用した。蛍光ビーズや生体試料のイメージング実験によって、計算結果から予測された通り、約 30%の分解能向上を確認することができた。ベクトルビームが従来のスカラービームを凌駕する特性を有していることを実証するとともに、実験に使用した液晶デバイスの実用性の高さを証明することができた。

2. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams (Optics Express, **18**, 10828-10833 (2010))

被引用件数: 30 件

概要: ベクトルビーム応用のひとつとして期待されている、光トラッピングの実験的検証を行った。実験には 1W 以上でビーム品質の優れたベクトルレーザー光源が必要となるが、我々が本プロジェクトを通して培ってきたベクトルビーム発生技術を使うことで、はじめて実験が可能となった。径偏光と方位偏光のレーザービームを用いて、ミクロンオーダーの透明微粒子に対する光トラップ力を測定し、以前行った理論計算とほぼ一致することを確認した。

3. Focusing of higher-order radially polarized Laguerre-Gaussian beam (Journal of the Optical Society of America A, **29**, 2439-2443 (2012))

被引用件数: 5 件

概要: 我々が計算で見出していた高次ラゲールガウス径偏光ビームの微小光スポット形成特性を理論的に分析した。高次ラゲールガウス関数がベッセル関数に漸近することを指摘するとともに、ラゲールガウスビームの最外輪と、その内側の輪が協調的に干渉して、より小さな光スポットを形成することを見出した。これまで全く異なると考えられてきたふたつのベクトルビームの間の密接な関連性、位相、偏光、強度が重要な役割を果たす干渉効果に対するベクトルビームの高い寄与を初めて明らかにした。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 顕微鏡装置(特許出願番号:国内 2010-042763、国外PCT/JP2011/054819)

概要: 本プロジェクトでその有効性を実証した、ベクトルビームを用いた顕微鏡装置(上記文献番号1参照)に関する特許である。複数のセグメントに分割した液晶素子を使用して、低出力の直線偏光レーザービームの位相および偏光を円筒対称な空間分布に変換(ベクトル化)する。軽量・小型、広い波長範囲(可視から近赤外)のレーザー光に対応、直線偏光との併用が可能であるなどの優れた特性を持った、高い実用性を有する装置である。

2. Visualizing hippocampal neurons with *in vivo* two-photon microscopy using a 1030 nm picosecond pulse laser (Scientific Reports, **3**, 1014 (2013))

被引用件数: 5 件

概要: 本プロジェクトで開発した半導体レーザーベースのピコ秒パルス光源を用いて、マウス脳としては世界最深部の *in vivo* イメージングに成功した。レーザー波長が生体透過性に優れた近赤外域であるだけでなく、半導体レーザーの優れた特性のひとつであるパルス強度の安定性もたらす低ノイズ特性によって、生体深部からの微弱な発光でも、生体の構造を鮮明に判別できたと考えている。日本が誇る高度な半導体レーザー技術を十分に生かした新しい応用分野の創成に繋がるものと期待される。

3. 半導体レーザー装置および非線形光学効果利用機器(特許出願番号:国内 2012-018769、特許 5194179 (2013.2.8 取得))

概要:本プロジェクトでは半導体レーザーベースのモード同期ピコ秒パルス光源を用いて、マウス脳の世界最深部の *in vivo* イメージングを実現した。しかし、それ以上の結果を得る上で、また真に実用性に優れた光源を実現する上では、非線形光学効果の精妙なバランスが必要なモード同期によらず電氣的制御のみで同等の光パルスを発生させる技術の実現が望まれる。本特許は、それを可能にする内容であり、現在実際にこれに基づいて研究を進めて期待通りの成果が得られつつある。したがって、本特許は半導体レーザーを心臓部とする高機能光源とその応用技術の展開の上で中核技術を実現する知的財産になるものと考えられる。

§2. 研究構想

(1) 当初の研究構想

全体として、ベクトルビームの基本的な特性の探求や発生方法の開発、新しい応用研究の芽の探索などを中心とするベクトルビームの光科学に関する研究と、ベクトルビームの応用のひとつとして期待されているナノイメージングに関する研究を中心にプロジェクトを進める。

ベクトルビームの光科学においては、従来のスカラービームでは得られないような、光の新しい特性の発現が期待できる、焦点付近での位相、偏光、強度分布の振舞いを詳細に検討し、また高品質・高機能なベクトルビームの発生方法の開発を行い、さらに、これらの過程で得られるであろう知見を元に新しいベクトルビームの応用を探索することを目指す。ナノイメージングでは、ベクトルビームの微小スポット形成能力を生かすことによって、従来のスカラービームを用いたナノイメージングで得られる空間分解能の向上を目指す。量子井戸構造半導体と生体試料を対象として、それぞれの特性に対応した顕微鏡システムを構築してイメージングに取り組む。これと並行して、高機能・高性能なベクトルビームの実現を目指して、半導体レーザーベースのピコ秒光源の開発に取り組む。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

① 中間評価で受けた指摘や助言、それを踏まえて対応した結果について

ナノイメージングに関し、ベクトルビームの微小スポット形成特性を生かした分解能向上は実現できたものの、今後さらなる分解能向上の努力が必要であるとの指摘を受けた。これに対して、ベクトルビームの STED 顕微鏡への適用を加速するため、グループ内でのマンパワーの増強と、グループ間での協力関係をより強固にするとともに、新たに高分解能を実現する方法論について検討を進めた。また、研究成果の積極的な公表が望ましいとの指摘に対しては、プレスリリース発表やアウトリーチ活動への参加を通して実行した。

② 中間報告書§2. 当初の研究計画に対する進捗状況「(3) 今後の進め方、および研究成果の見通し」の記載事項に関し、研究を進めた結果について

ベクトルビームの光科学に関しては、順調に研究計画が進展しており、今後も継続的に探究を進める予定であることに対して、特異点光学の立場からの考察や高次ベッセルガウスビームの発振とそれに伴う偏光結合の実証などの新たな知見を得た。ナノイメージングに関しては、半導体および生体試料を対象としたイメージングを進める予定であることに対して、ベクトルビームの効果を反映したイメージング法の開発に取り組み、分解能向上と軸方向電場情報の取得などの成果を得た。

③ 上記①②以外で生まれた新たな展開について

新たな研究計画として進めている生体深部 *in vivo* 観察のための半導体レーザーベースのピコ秒光源開発に関して、利得スイッチングによる 10 ピコ秒以下のパルス発生に成功するとともに、光ファイバーを媒体とした増幅によって 5W 以上の出力を得た。

§3 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「東北大学Ⅰ」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
佐藤 俊一	東北大学多元物質科学 研究所	教授	H20.10～H26.3
中村 貴宏	同上	助教	H20.10～H26.3
小澤 祐市	同上	助教	H20.10～H26.3
大沼 ともみ	同上	技術補佐員	H22.5～H25.3
Sunil Vyas	同上	産学連携研究員	H22.8～H25.9
Yuliati Herbani	同上	D1～3 産学連携研究員	H21.4～H23.9 H23.9～H25.3
小関 千春	同上	技術補佐員	H20.10～H22.3
伊藤 暁彦	同上	助教(研究特任)	H20.10～H21.3

研究項目

・ベクトルビームの光科学とナノイメージング

② 「東北大学Ⅱ」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
横山 弘之	東北大学未来科学技術 共同研究センター	教授	H20.10～H26.3
田主 裕一郎	同上	助教	H25.10～H26.3
佐藤 綾耶	同上	助手	H20.10～H25.3
佐藤 喜市	同上	リサーチフェロー	H22.4～H26.3
草間 裕太	同上	研究支援者	H24.4～H26.3
石橋 孝介	同上	技術補佐員	H22.4～H25.3
郭 亨長	同上	助手	H23.10～H24.3
千葉 光子	同上	技術補佐員	H25.1～H25.3

研究項目

・ベクトルビーム開発と材料科学におけるナノイメージング

③ 「北海道大学」グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
根本 知己	北海道大学電子科学研 究所	教授	H20.10～H26.3
日比 輝正	同上	助教	H21.12～H26.3
川上 良介	同上	助教	H22.6～H26.3
小黒 真紀	同上	技術補佐員	H24.5～H26.3
武田 和樹	同上	M1～2	H23.4～H25.3
一本嶋 佐理	同上	M1～D1	H23.4～H26.3
青柳 佑佳	同上	M1～2	H24.4～H26.3
澤田 和明	同上	M1～2	H24.4～H26.3

洞内 響	同上	短時間勤務職員 (技術補助員)	H24.4~H26.3
------	----	--------------------	-------------

研究項目

・生命科学におけるナノイメージング

§4 研究実施内容及び成果

4.1 ベクトルビームの光科学とナノイメージング(東北大学佐藤グループ)

(1)研究実施内容及び成果

[1] ベクトルビームの発生方法の開発

熱複屈折および熱レンズ効果を利用した高出力ベクトルビームの発生

我々はレーザー媒質の熱複屈折に着目し、極めて簡便な共振器構成で径および方位偏光ビームを選択的に発振できることを実証した。レーザー媒質として、半導体レーザー側面励起のNd:YAGレーザーロッドを使用した。図1に示すように、用いたレーザー共振器は2枚の平面ミラーからなる極めて簡単な構成となっている。Nd:YAGロッドは複数の半導体レーザーによって側面から励起されており、熱複屈折および熱レンズ効果が発生する。熱レンズ効果により、Nd:YAGロッドは凸レンズとして機能する。レーザーの閾値付近では、出力ビームはランダム偏光のガウス型ビームであるが、ポンプ光強度を上げていくと方位偏光ビームとなった後、発振が停止する。さらに強度を上げると、径偏光ビーム、ランダム偏光、方位偏光ビームと変化し、再び発振が停止する。径および方位偏光ビームで発振したときのビームの強度分布の例を図2に示す。最大出力は共に約40Wであり、用いた励起光源の出力を考慮すると、単一横モードの出力としては十分な値であると考えられる。また、共振器長の変化に伴う偏光の変化は、Nd:YAGロッドの熱複屈折性と熱レンズ効果を考慮した光共振器の安定性ダイアグラムに基づいて説明することを示した。すなわち、まず、ポンプ光強度に応じて変化する熱レンズ効果のために、共振器は安定性ダイアグラム上を直線的に移動することになる。また、熱複屈折によって常光線と異常光線に対する屈折率が異なるため、径および方位偏光のみが安定になる領域が発生する。このため、閾値付近では、共振器は径および方位偏光の両方が安定な領域にあり、ランダム偏光であるが、ポンプ光強度の増加とともに常光線だけが安定になる領域に達し、方位偏光となる。その後は不安定領域に入り、レーザー発振が一度停止した後、異常光線だけが安定な領域に達して径偏光ビームとなる。さらにランダム偏光となった後、再び方位偏光になる。この説明に基づけば、最も出力の大きな径偏光あるいは方位偏光ビームを得るための共振器を容易に設計することができる。

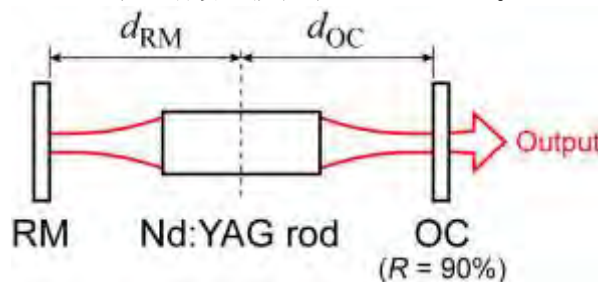


図1 熱効果を利用したNd:YAGレーザー共振器の概念図

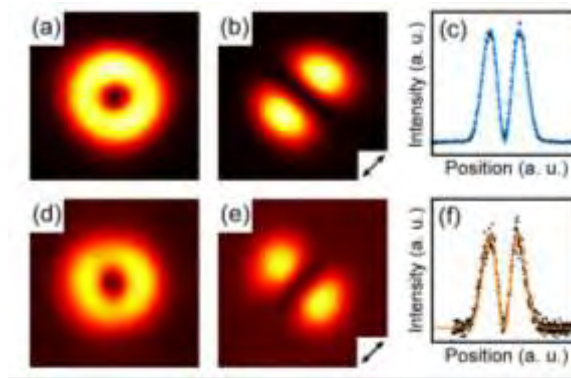


図 2 発振したレーザー光の強度分布。上段：径偏光、下段：方位偏光。(a)と(d)：前強度分布、(b)と(e)：直線偏光板透過後の強度分布、(c)と(f)：強度プロファイル。

光ファイバーによるベクトルビームの増幅

ビーム断面内において放射状に偏光が分布する径偏光ビームは、材料加工や穴あけ等の材料加工プロセス用光源として注目されている。我々は、十分な出力と高品質な径偏光レーザービームを得るため、Yb ドープダブルクラッドファイバーを用いることで径偏光ビームの増幅が可能であることを実証した。種光として用いる径偏光ビームは、c 軸カット Nd:YVO₄ レーザー共振器から発生させた。図 3 に示すように、径偏光ビームおよび半導体レーザー（波長 975 nm）による励起ビームを Yb ドープ光ファイバーに導入し、ファイバーからの出射ビームを観測した。波長 1066 nm のレーザー光に対して、径偏光ビームに相当する LP₁₁ モードが伝播するように、コア径 15 μm の光ファイバーを使用している。図 4 に、種光（上段）および半導体レーザー光を光ファイバーに導入して増幅した場合（下段）の強度分布を示す。図 4 より、増幅後も出射ビームの偏光および強度分布が維持され、径偏光であることが確認された。入射励起光の出力が 2.8 W の場合、種光の出力 100 mW に対して 1.1 W の出力が得られた。また、種光出力を大きくすることで、ASE の効果を低減できることが分かった。さらなる高出力化のため、シード光の高出力化が必須であるが、Nd:YAG レーザーからの 1W の出力をシード光として光ファイバーによる増幅を試みたところ、5W の出力を得ることができた。さらに、多モードファイバーの使用を試み、単一横モードで 21W の出力を得た。この値は、ポンプ光の出力で制限されているため、さらに高出力が得られるものと予測される。

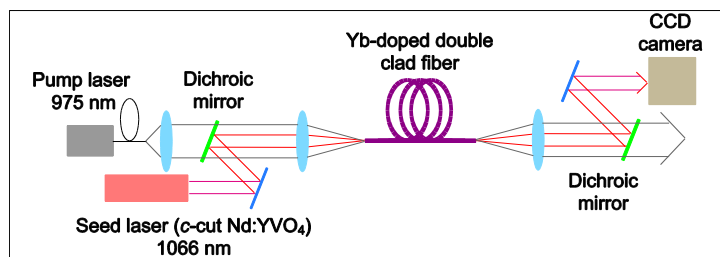


図 3 Yb ドープ光ファイバーを用いた径偏光ビーム増幅の装置の概念

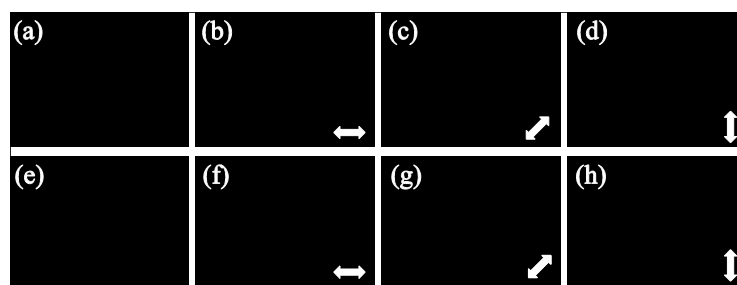


図 4 入射した径偏光ビーム(上段)と増幅されたビーム(下段)の強度分布。(a) および(e):全強度分布、(b)-(d)および(f)-(h):直線偏光板透過後の強度分布。矢印は直線偏光板の向きを示す。

フォトニック結晶ミラーを用いた Laguerre-Gaussian ビームの横モード制御

円筒対称な偏光分布を持つ光ビームは、ベクトル波動方程式の解として得られるが、考える座標系や対称性などによって複数の解が存在する。1990年代に Bessel-Gaussian および Laguerre-Gaussian ベクトルビームが理論的に見出され、最近では、Modified Bessel-Gaussian ベクトルビームも報告されている。いずれの場合にも、最低次の横モードはドーナツ型の強度分布を持つ径偏光および方位偏光ビームであり、実験的にも報告されているが、高次の横モードは複雑な強度と偏光分布を持ち、レーザー共振器からの直接発生は極めて少ない。

まず、円環状の低反射領域を持つ偏光選択性を持つフォトニック結晶ミラーを用いて、複数の円環構造からなる Laguerre-Gaussian ベクトルビーム発生を確認した。2重円環構造を持つベクトルビーム発生と同じミラーを用いているが、共振器設計を変えることにより、5次までの Laguerre-Gaussian ベクトルビームを得ることができた。図5は3次と4次のビームの強度および偏光分布の例である。このような高次横モードビームは、本研究者が既に報告しているように、従来の光ビームに比べ、より小さなスポット径が得られることが期待されている。

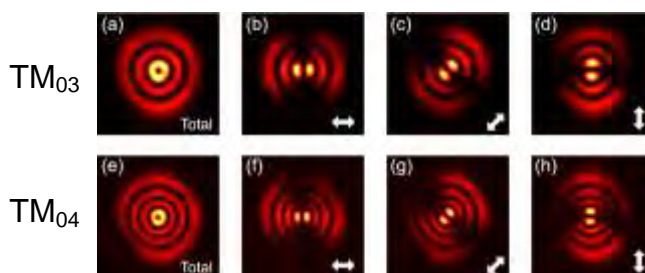


図 5 発生した3次および4次の多重リング状 Laguerre-Gaussian ベクトルビームの強度(左列)および偏光分布(右側3列)。

同一の光共振器からの様々なスカラーおよびベクトルビームの発生

偏光方向が方位角方向で回転する高次横モードの Laguerre-Gaussian ベクトルビームと、Bessel-Gaussian ベクトルビームの発生について述べる。いずれの場合も、予測される光ビームは光軸上での強度がゼロになることから、実験においては、共振器ミラーのひとつに中心に低反射領域を持つミラーを使用している。図6に示すように、強度分布は円環型であるが、偏光が方位角方向に回転していることがわかる。同様にして、花びら状の強度分布を持つ6次と7次の Bessel-Gaussian ベクトルビームの発生も確認された。図には示していないが、この共振器からはスカラー Laguerre-Gaussian ビームの発生も確認されており、点欠陥を有するミラーが高次横モードビーム発生に極めて有効であることを実証した。

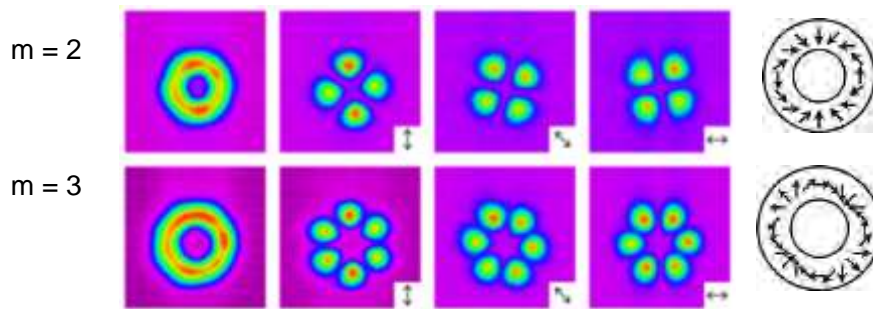


図6 発生した2次および3次の偏光回転型のLaguerre-Gaussianベクトルビームの強度（左列）および偏光分布（内側3列）。右列は偏光分布の模式図。

高次 Bessel-Gaussian ビームの発生と“偏光結合”の検証

ところで、周知のように本プロジェクトで取り扱っているベクトルビームは、円筒座標系におけるベクトル波動方程式の解として得られる。この際、物理的に興味深い性質として、Bessel-Gaussian ビームに対して、径偏光と方位偏光成分の波動方程式が結合微分方程式となっていることが挙げられる。このことは、光ビームの伝播とともにこれらの偏光成分間で受け渡しがあり、それぞれの振幅が変化することを意味している。ただし、低次のビームでは両方の偏光成分の比に大きな違いが無いため、実験的にこの”偏光結合”を観測するためには、高次横モードビーム単一モードとして得ることが必要となる。そのため、我々は高次横モードの強度分布と同じような円環状の利得分布を形成してレーザー共振器からの直接発生を試みた。その結果、30 次以上の高次 Bessel-Gaussian ビームの発生に成功した。このビームを緩く絞りながら偏光分布の測定を行ったところ、例えば径偏光が顕著であったビームが焦点付近では方位偏光成分が顕著となること、あるいはこの逆の現象が観測された。また、焦点を挟んで偏光および強度分布が左右対称となることも観測された。これらの現象は、理論的に期待されることであり、シミュレーションによっても確認している。このように、新しい光ビームの現象として、直交座標系では観測されることの無い偏光結合を実験的に実証した。

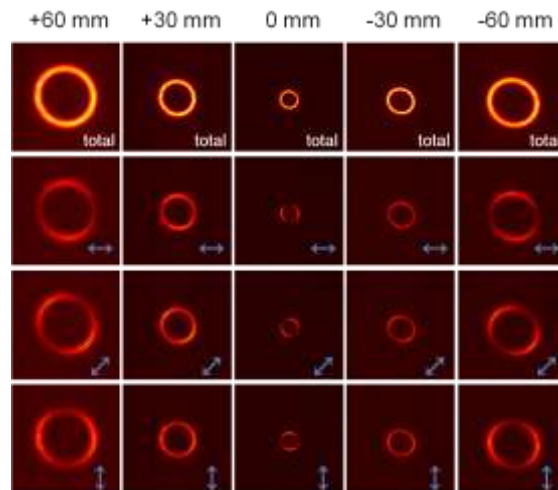


図7 38 次の Bessel-Gaussian ビームを集光した場合の強度及び偏光分布の変化

径偏光 Bessel-Gaussian ビームの発生

これまで述べたように、我々は Laguerre-Gaussian ビームと Bessel-Gaussian ビームを共振器からの直接発生を試みてきたが、唯一低次の Bessel-Gaussian ビームが残されている。特に、最低次のビームは偏光成分が純粋な径または方位偏光であり、応用上も興味深いビームである。これま

で我々が培ってきたベクトルビーム発生技術を活用して、低次 Bessel-Gaussian ビームの発生に取り組んだ。1 軸性のレーザー結晶と半球状レーザー共振器を採用し、結晶内に円錐状の利得分布を形成することによって発生するレーザービームの特性を調べた。その結果、凹面状の出力ミラー側から、円環状のレーザービームが発振し、その偏光分布は純粋な径偏光であった。さらにこのビームを緩く集光して焦点付近での強度と偏光分布を測定したところ、今後は複数の同心円状の強度分布を持つことが観測された。光軸上での強度はゼロであったが、偏光分布は純粋な径偏光であった。これらの観測事実から、発生したビームは最低次のベクトル Bessel-Gaussian であると考えられる。このビームはいわゆる非回折性と自己治癒効果を有することが期待されており、今後その実証実験を進める予定である。

He-Ne レーザーからのベクトルビームの発生

気体レーザーの代表格である He-Ne レーザーは、通常ランダム偏光あるいは Brewster 窓などによって直線偏光となる場合がほとんどである。しかし、基本的にレーザー共振器は円筒対称性を有しており、Brewster 窓などの偏光選択性のある光学素子が無ければ、He-Ne レーザー共振器からベクトルビームが発生する可能性も十分にある。我々は、点欠陥ミラーを用いた外部鏡型 He-Ne レーザーからのスカラーラゲールガウスビームの発生に成功しているが、ここでは、さらに内部共振器型の He-Ne レーザー共振器の全反射ミラーにレーザーアブレーションによって点欠陥を作製し、ドーナツ型レーザービームの発生を試みた。その結果、縦モードが単一である場合、ベクトルビームの一種であるハイブリッドモードビームの発生を確認することができた。さらに、縦モードが二つの場合は、偏光方向が直交した HG₀₁ および HG₁₀ モードビームが発生していることを確認できた。複数の縦モードで発振するガウス型の He-Ne レーザーでは、各々の縦モードの偏光が直交していることは良く知られているが、ここでは、高次横モードでも同様の偏光特性を有していることも実証できた。

第二高調波過程を用いた円環状径偏光ビームの発生

小さなスポット径は円環状の径偏光ビームによっても得られることが期待されている。本研究では、複屈折性結晶を用いる第2高調波発生過程における角度位相整合条件を利用することによって、極めて幅の狭い円環状径偏光ビームの発生を確認した。c軸カットの BBO 結晶に方位偏光のチタンサファイアレーザー光を照射すると、図 8(a)のように、ほぼ6回対称性を持つ円環状の第2高調波が観測された。基本波が径偏光の場合は、(b)のように予測通り円環状ビームの発生は観測されなかった。(c)は発生した第2高調波の偏光と位相分布の模式図であり、強度を含めた3つの光パラメータの分布がよく制御されていることがわかる。

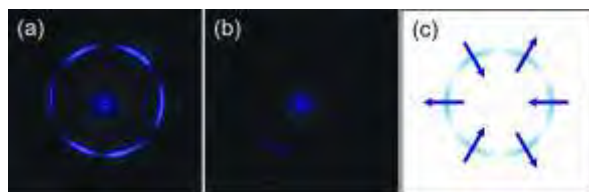


図 8 発生した第 2 高調波の強度分布。(a)および(b)は基本波がそれぞれ方位および径偏光の場合。(c)は偏光と位相、強度分布の模式図。

利得分布形成と高次横モードビーム発生

以上のように、ベクトルビームの発生のためには、適切な偏光選択方法と、利得あるいは損失分布の形成が重要である。以下では、新しい利得分布形成の試みを行った結果を示す。今のところ、ベクトルビーム発生には至っていないものの、将来的には有効な手段となることが期待される。ふたつの光ファイバーからの励起光を薄板状のレーザー媒質に照射することによって形成した利得分布に応じて、様々な高次横モードの光ビームが発振することを確認した。図 9 は、2 本の光ファイバーからの出射ビームを直接薄板状のレーザー媒質の側面から照射した場合に、その交差点

付近から発生したレーザービームの特性を示す。これより、発生した光ビームはスカラー Laguerre-Gaussian ビームであることがわかる。この方法の特徴は、励起光を移動することによって利得分布を変えることができる点であり、横モードの素早い選択が可能となると期待される。ここで偏光選択素子を加えることによって、ベクトルビームの発振も可能であると考えられる。

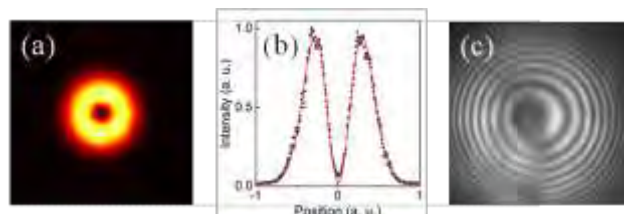


図9 2本の励起ビームが交差した付近から発生したビームの(a)強度分布、(b)強度プロファイルと(c)位相分布

[2] ベクトルビームの特性

らせん状位相を有するベクトルビームの集光特性

近年、光軸上の強度がゼロとなる中空のビームを利用した、原子レンズや超解像顕微鏡などの研究が活発に行われている。光軸上で位相や偏光の特異点を持つビームは、近軸近似では光軸上での強度がゼロとなる。しかし、直線偏光 Laguerre-Gaussian ビームや径偏光ビームを強く集光した場合には、光軸上で強度がゼロとならないことも知られている。また、螺旋状位相シフトを持つ径偏光ビームも中空ビームとならないことが実験および計算によって示されている。我々は、螺旋状位相シフトを持つ光ビームが中空ビームとなるトポロジカルチャージの値を解析的に求めた。任意のトポロジカルチャージを持つ径偏光および方位偏光ビームを集光した場合の電場は、ベクトル回折理論に基づいて求めることができる。その結果、方位方向に強度の変化が無い、すなわち光軸に関して円筒対称なビームの場合には、Bessel 関数を含んだ積分の形になることを見出した。0次の Bessel 関数だけが、変数がゼロの場合に値もゼロとなることを考慮すると、光軸上で必ず強度がゼロとなる中空ビームの条件を求めることができる。径偏光の場合、トポロジカルチャージ m が 0 および ± 1 の時は中空ビームとならないことが示され(図 10(a))、これまでの実験事実と一致する結果が得られた。方位偏光の場合は、 $m = \pm 1$ 以外の時に中空ビームとなることが示された(図 10(b))。特に $m = 0$ の時、電場の表式中の積分には 1 次の Bessel 関数のみが含まれており、光軸付近の暗い領域の幅が最も狭くなることが予測された。さらに、円偏光 Laguerre-Gaussian ビームが径偏光および方位偏光ビームの重ね合わせで表現できることを利用して、中空ビームとなる m の値を求めたところ、全軌道角運動量が 0 および ± 1 の時は中空ビームとならないことが示された。ハイブリッドモードビームや直線偏光 Laguerre および Hermite Gaussian ビームに対しても同様に議論できることが分かった。

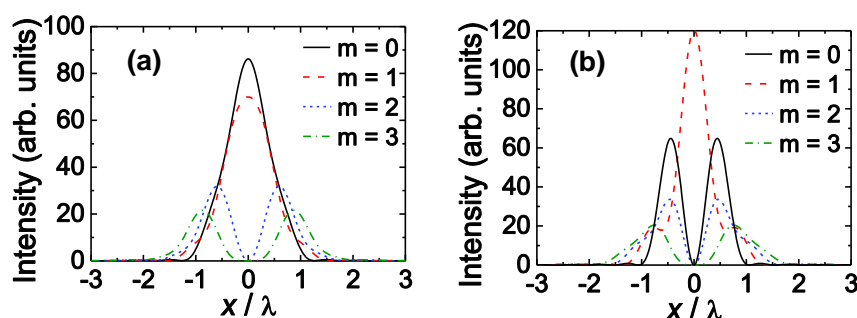


図10 トポロジカルチャージ m を持つ(a)径偏光および(b)方位偏光ビームの焦点での強度分布の計算結果

円環状ベクトルビームの集光特性

ベクトルビームの強度分布が幅の狭い単一の円環状である場合について、焦点付近での強度分布の計算をベクトル回折積分に基づいて行った。単一円環状の強度分布を持つ径偏光ビームは、既に実験的に得られており、ここではその集光特性を探る目的で行った。使用した BBO 結晶の非線形感受率のテンソル成分によって、実験で得られた径偏光ビームは 6 回対称性を持った強度分布となっている。計算ではこの 6 回対称性を仮定して行い、さらにらせん状位相分布に対する変化を調べた。図 11 はレンズの開口数が 0.95、円環幅がその半径の 40 分の 1 と仮定した時の

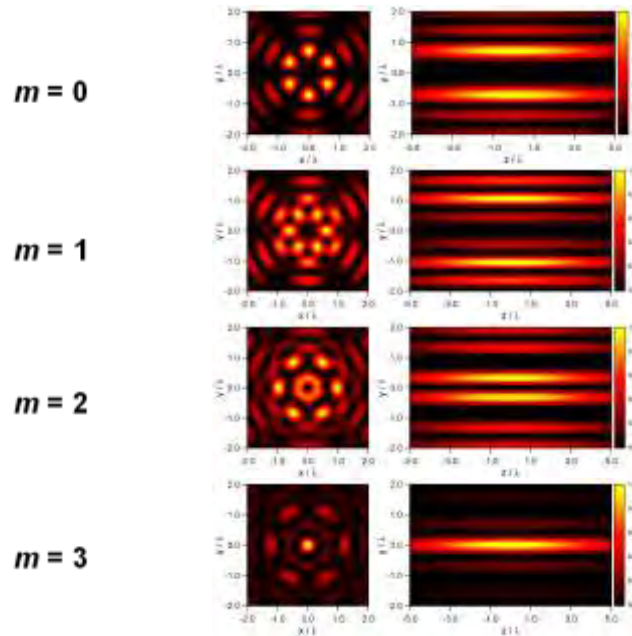


図 11 6 回対称性の強度分布を持つリング状径偏光ビームの集光特性。 m はらせん状位相分布の回転数を表す。

結果を示しているが、ここで m はらせん状位相分布の回転数 (Topological charge) である。 $m=0$ の場合には、6 回対称性を反映した強度分布が得られているが、 m が大きくなるにつれて、光軸に近い位置での光強度が強くなり、 m が 3 の時には光軸上で明るいスポットを形成することがわかる。このときの光軸付近のスポット径は軸方向電場成分で 0.386λ 、全強度でも 0.405λ となっており、この λ の理論的な極限值 0.379λ に非常に近いことが分かる。強度分布が m に依存する現象は、6 回対称な強度分布の起源となる位相分布と、らせん状位相分布との総和効果として理解することが出来る。つまり、 m が 3 の時にビームの位相回転成分のひとつがゼロとなるため、光軸上にピークを持つ強度分布が得られる。同時に位相が 6 回転する成分も発生するので、これに起因した回転対称な強度分布も並存する。ここで注目すべきは、図の右側に示した光軸を含む面内での強度分布が、光軸方向 (図では水平方向) に細長く、波長の 8 倍以上にも達することである。こういったベクトルビームに特有と思われる集光特性は、回転対称性をもたない円環状径偏光ビームで、より顕著に見出すことができ、さらに小さなスポット径を持つスポットおよびダークスポットが得られることが分かっている。これらの特性は、今後のナノイメージングにとって重要な役割を果たすと考えられる。

ベクトルビームの自己治癒効果

瞳面に障害物がある場合の Laguerre および Bessel-Gaussian ビームの集光特性を計算によって求めたところ、スカラービームに比べ自己治癒効果が高いことを見出した。これは、ベクトルビ

ームが強度だけでなく偏光も円筒対称性を有していることに起因しているためであると推察される。さらに Laguerre-Gaussian および Bessel-Gaussian ビームに対して、スカラービームとベクトルビームを表す式を変形することによって、高次のモードも含めてお互いに変換可能であることを証明した。式の変換においては、軌道角運動量を表すらせん状位相とスピン各運動量を表す円偏光との関連式が重要な役割を果たすことがわかった。

Laguerre-Gaussian ビームと Bessel ビームの関連性

ベクトルビームの代表例である径偏光ビームを強く集光すると、焦点付近に強い軸方向電場が発生し、アッペの分解能よりも小さな光スポットが形成されることが知られていた。最も小さなスポットは理想的な円環ビームによって形成されると予測されているが、我々のグループでは多重円環構造を持つ高次ラゲールガウスビームも、ほぼ同様の微小スポットを形成することを数値シミュレーションによって明らかにし、ナノイメージングで実証してきた。しかし、強度分布が全く異なる二つのビームが同じような強度分布を持つ機構はこれまで明らかでなかった。我々は、ベッセル関数とラゲール多項式との類似性に着目してラゲールガウスビームの表式を数学的に検討し、高次のラゲール多項式がひとつの円環とベッセル関数とに分離され、焦点では、それぞれが小さなスポットと大きな直径を持つ円環状の強度分布を形成することで、おおよそ説明できることを見出した。さらにこれらふたつの振幅分布が、光軸付近では位相が反転していることに起因して、中心スポットの幅をより小さくする協同的な現象が生じていることを見出した。この成果は、高次ラゲールガウス型径偏光ビームが、超解像顕微鏡用レーザー光源として実用性が高いことを裏付けるものと考えられる。

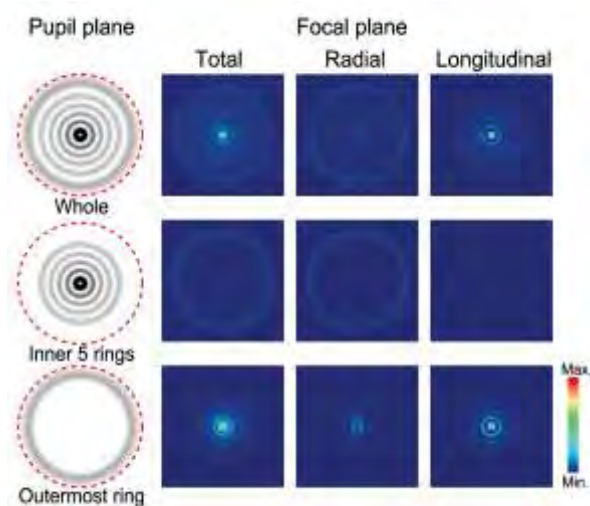


図 12 高次 Laguerre-Gaussian ビームの集光特性の解析。Bessel 分布と円環状分布に分離すると、集光特性がよく説明できる。

コヒーレントに合波したベクトルビームの集光特性

ベクトルビームの新たな機能や特性を探るため、ふたつの同種のベクトルビームを合波した場合と、ふたつの異種のベクトルビームを合波した場合の焦点での強度分布や伝搬特性を数値シミュレーションによって検討した。らせん状の位相分布を付加した同種のベクトルビームを合波すると、光波は軸対称な偏光、位相、強度分布を持ち、これらは伝搬とともに光軸を中心に回転することを見出した(図 13)。強度分布が円筒対称性を失うのは、不均一な偏光分布によって生じる干渉の

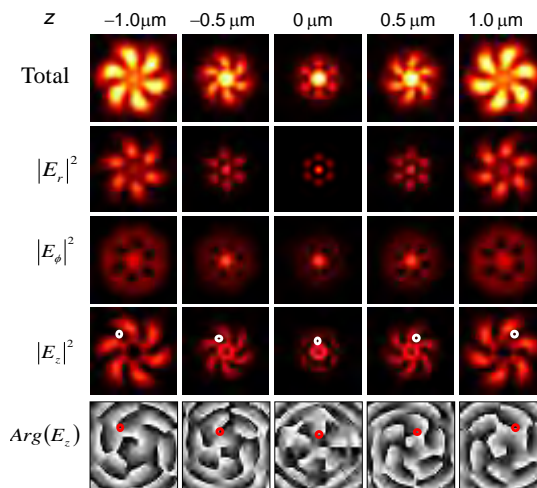


図13 らせん状位相分布を持つふたつの径偏光ビームを合波した場合の焦点前後での強度、偏光および位相分布の変化の例。

結果である。また、伝播に伴う偏光、位相、強度分布の回転は、それぞれの光波が持つ異なる Gouy 位相に起因しており、焦点付近で顕著に現れる。異種のベクトルビームを合波した場合、偏光の特異点として知られる c 点 (c-point)、l 線 (l-line) と v 点 (v-point) の発生とその位置および伝播に伴う移動と生成消滅について Stokes 場をもとに検討し、一般的な法則を見出した。特に興味深い現象として、符号の異なるふたつの c 点が合流すると v 点に転換することが挙げられる。ここで見出された現象は、ベクトルビームによって初めて生み出される特徴のひとつであり、偏光の特異点光学の発展にも大きく貢献するものと期待される。

光ビームのベクトル性と非線形感受率のテンソル性を用いた第 2 高調波発生

我々は、ベクトルビームを基本波とした場合、使用する複屈折性結晶への入射角に応じて、発生する第 2 高調波のパターンが大きく変化することを実験的に確認しており、そのパターンを計算によって求め、実験結果の妥当性を確認した。計算においては、従来個別に行われていた手法を統合し、ベクトルビームの焦点での電場分布、非線形分極分布および遠視野での第 2 高調波の分布を異なる方法で個別に求めた。その結果、非線形結晶の非線形感受率テンソルと入射したベクトルビームの偏光分布を考慮することによって、実験的に観測された第 2 高調波パターンをよく説明できることを明らかにした。

[3] ベクトルビームの応用

ベクトルビームを用いた光トラッピング

ベクトルビームの光トラッピングへの応用研究を行った。ビームを光軸に垂直な平面に集光した場合、径偏光および方位偏光ビームの光線は、それぞれ全て p 偏光および s 偏光に対応する。このことから、物体表面での反射率が異なるため光トラッピングに対しても異なる効果が得られることを我々は計算によって示していた。このことを実験的に検証するために、必要な数ワットの出力を持つベクトルビームを開発し、光学顕微鏡を用いて、微小粒子の光トラッピングを行い、トラップ力の測定を行った。その結果、光軸方向の力は径偏光ビームのほうが大きいこと、半径方向の力は方位偏光ビームのほうが大きいことがわかり、理論と良い一致を示すことが出来た。

ベクトルビームを用いた金属細線描画

生体試料のナノイメージングでも述べるように、ベクトルビームを強く集光すると微小光スポットの形成が期待される。一方で、フェムト秒レーザーパルスで貴金属イオンを含む水溶液中に照射すると還元反応によって貴金属ナノ粒子の形成が生じる。そこで、新しいベクトルビームの応用研究とし

て、フェムト秒レーザービームによる金属細線描画を試みた。直線偏光、円偏光、径偏光、方位偏光フェムト秒レーザーパルスを準備し、光学顕微鏡下で高 NA の対物レンズを使用して、できるだけ細い金属細線の形成を試みた。予測通り、径偏光の場合に最も細い金属線が形成されることが見出された。

4.2 ベクトルビーム開発と材料科学におけるナノイメージング(東北大学横山グループ) (1)研究実施内容及び成果

本グループは、小型・高安定で操作性に優れた光源技術を基盤として波長や時間の制御性に優れたパルス光源を開発するとともに、その応用としてベクトルビームによるナノイメージング技術を材料科学の領域において実現することを目指して研究を進めた。ビームのベクトル化に対しては、ビーム変換法を用いることとした。

[1] 半導体レーザーをベースとするイメージング用ピコ秒光源の開発 近紫外ピコ秒パルス発生

紫色・青色領域で発光する半導体量子構造の励起を目的として、近紫外線波長域での比較的高ピークパワーのピコ秒光パルスの発生に取り組んだ。波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯の GS 動作の LD (GSLD)により 6 ps 幅程度の光パルスを発生させた後に、非線形効果を低減した Er 添加ファイバー増幅器(EDFA)により、50 MHz 程度までの任意周波数で kW オーダーのピークパワーまで増幅することで、周期分極反転の Mg 添加ニオブ酸リチウム(PPMgLN)結晶により、最大 60%の変換効率で第2高調波(SHG)光(波長 774 nm)を得た。さらに、この SHG 光を、ベータバリウムボライト($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$:BBO)結晶、および周期分極反転のカリウムチタニルリン酸(KTiOpO₄:KTP)結晶によりさらに倍周波数化して第4高調波(FHG)光(波長 387 nm)を得た。FHG 光パルスは、最短の時間幅が 4 ps、最大ピークパワーが 200 W であり、紫色・青色の発光物質の時間分解分光用光源として十分な特性を有する。また、ピークパワーが高いために、紫外領域で発光する物質(具体的には GaN 半導体:発光波長 ~ 350 nm)の2光子励起も可能であることがわかった。

モード同期半導体レーザー光とその増幅、脳イメージングへの応用

これまでに実績のあるモード同期方式の $1\mu\text{m}$ 帯半導体レーザー(MLLD)を発振器とする1kWピークパワーのパルス光源技術をベースとして、その出力増大を図った。具体的には、1-GHzで動作する1030nm帯のMLLDと分周周波数で動作する半導体レーザー増幅器(SOA)により、10-MHzで動作する光源基本部を構築した後、数ps幅の光パルスを時間およびスペクトル歪みなくマルチkWのピークパワーに増幅するためのYb添加のファイバー増幅器(YDFA)の試作を行った。その結果、ML動作ベースの発振器を心臓部とする光源により、時間幅が5-7psで、最大ピークパワーが10kWに達する特性を得た。また、この光源が2光子蛍光バイオイメージングに有用であることを実験的に確認した(図14)。

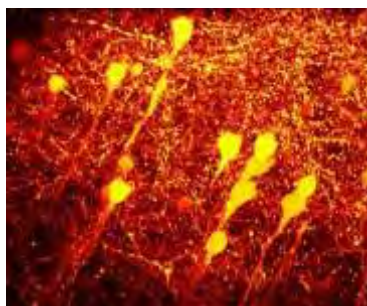


図14 試作した1030nm超短パルス光源による2光子バイオイメージングの機能実証例。試料は黄色蛍光蛋白(YFP)が発現したマウスの脳切片をプレパラート上に固定したもの。

さらに、ピークパワーが10-20 kWで平均パワーが2 Wまで性能が向上した、この試作光源を北海道大学に移設してバイオイメージングに使用したところ、神経細胞に黄色蛍光タンパク質 (EYFP) を発現しているマウスの生体脳の *in vivo* イメージングにおいて、脳表から1.4 mmもの深部まで 2光子蛍光 (TPF) および第二高調波 (SHG) イメージングが可能であることがわかった。これは、光源のパワーとビームの安定性と1 μm という波長に負うところが大きい。しかし、より深部まで観測するためには、光源の温度に対する安定性や平均パワーのいっそうの向上が望まれることもわかってきた。また、現状は発振器にMLの技術を用いてピコ秒光パルスを生成しているが、この部分は、動作の安定性・再現性、さらに繰り返し任意性を重視すると、GS方式による実現が理想的であるという再認識を得た。このために、波長1 μm 帯の新規構造のLDの設計および試作を進めた。まずは、構造改良前の分布帰還型単一縦モード半導体レーザー (DFB-LD) を用いての予備的な利得スイッチング動作実験を進めたが、そこでは、発生した光パルスの時間幅は45 ps程度に留まることがわかった。これにより、10 ps以下の時間幅の光パルスを得るためには、電氣的応答特性を大幅に改良したDFB-LDの実現が必須であることが確認された。

利得スイッチング半導体レーザーの短パルス化と増幅

前述のように、北海道大学グループによるマウス脳 *in vivo* イメージングにおいて、世界で初めて海馬までが見えるに至ったが、これは、生体侵入長が大きい1 μm という波長とともに光源のパワーおよびビームの安定性をもたらした成果である。したがって、より深部まで観測するために、光源の温度に対する安定性や平均パワーをさらに向上させることが有効であると予測された。そこで、まず、ピコ秒光パルスを生成するレーザー発振器を、電気パルス駆動のGSLDで置き換えるために、新規デバイス試作およびその高速変調モジュール実装を行った。また、出力光パルスの増幅における光雑音の抑制および高出力化の目的から、波長を1030nm帯から1060nm帯にシフトさせることにした。LD設計の要は、InGaAs量子井戸の歪みや層数を制御して光増幅の微分利得を極力大きくすること、光子寿命の短縮、そして高速の電氣的励起下での応答速度低下要因の排除である。この基本的な設計指針に沿って新規LDおよびそのモジュールの作製を行った。また、これまでの研究結果をも踏まえて、光フィルタによるスペクトル制御の効果も利用して、GSLDからの光パルスの時間幅は10psを切るまでに短くなった。

光増幅については、前置増幅器についてはYDFAを用いるのを最適解としてその試作導入を図った。しかし、主増幅器については増幅媒質内の非線形光学効果によるスペクトルおよび時間波形歪みの影響を極力除去するために大口径YDFAの他に固体レーザー結晶 (Nd: YVO₄) 増幅器を用いる方式も重要であると判断されその導入を行った。目標とした最終平均光パワーは4Wであるが、YDFA前置増幅器とNd: YVO₄増幅器との組み合わせで平均パワー2W超までの特性が確認された。所定の光平均パワーを得るにはYDFA前置増幅器の出力増大が必要であることがわかったが、現状パワーの新方式光源によりマウス大脳皮質の *in vivo* 観察への適用性評価を進めた。

2光子吸収によって明るい発光画像を得るために重要なポイントは、4W以上の高平均光パワーとともに、パルス幅の短縮である。取得済み基本特許のスペクトル制御の手法により発生する光パルスの時間幅を、7ps程度にまで短くすることができた (図15)。前置光増幅器としてのYDFAにより平均光パワーを10 mW程度にまで増幅して主光増幅器の光入力とした。この、主光増幅器開発については、佐藤グループが開発を進めて来た大口径YDFAを主体的に用いることにした。これにより、最終的な平均光パワーは最大で5 W以上に達することが確認された。ここで、このパルス光源は世界に先駆けて開発されたもので、既存の超短パルス発生法では達成できない超安定な光

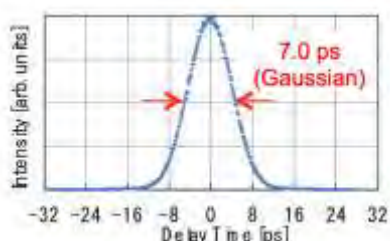


図 15 波長 1064 nm の GSLD からの 7 ps 時間幅光パルスの発生を示す強度相関波形。

源であり、精密計測用ピコ秒光源として、バイオイメージングに限らず、広い分野での活用が期待されることを強調したい。この試作光源系を北海道大学に移設して、EYFP発現マウスの大脳皮質の2光子蛍光イメージング(TPI)により海馬領域全体を観測する実験を開始した。また、さらにLDの特性向上を目指して新規デバイス・モジュールの設計・製作を進めた。これにより、光パルスの時間幅は最終的に5 ps以下まで短くできる予定である。

[2] 量子井戸構造のナノイメージング

窒化物半導体の量子井戸構造の時間分解分光

ナノイメージングの研究対象となる窒化物半導体の量子閉じ込め構造につき、サファイア基板への結晶成長によるInGaN単一量子井戸(SQW)構造の試料作製を行い、定常的フォトルミネセンス(PL)分光および時間分解PL分光を行った。作製したInGaN-SQW構造は、図16に示すように、ストリークカメラによる時間分解PL分光では、高エネルギー(短波長)のPL成分が低エネルギー(長波長)のPL成分に比して速く減衰することから、構造中でサブナノ秒程度の時間スケールでのエネルギー緩和が生じていることを明らかにした。

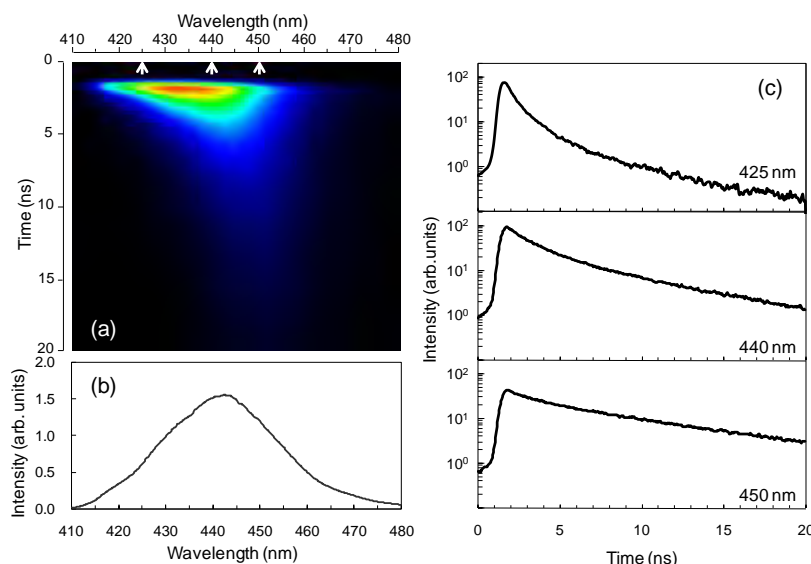


図 16 近紫外線ピコ秒パルス光源を励起源としてストリークカメラによりサファイア基板上に成長したInGaN-SQW構造の時間分解PL分光測定を行った結果。(a) 時間分解のスペクトログラム、(b) 時間積分したPLの発光スペクトル、(c) 異なった3つの波長成分で見たPLの時間的変化。

STED効果の確認

半導体材料のナノイメージングに向けて、光源開発と、イメージング実験系の構築した。ナノイメージングの主たる研究対象となる窒化物半導体の量子閉じ込め構造の1つであるInGaN-SQWのフォトルミネセンス(PL)について、上述した通り、励起光に比して長波長の光の照射によりPL強度が低減することを確認しているが、さらに、ピコ秒制御半導体レーザーを励起光源とする時間分解分光の手法により、PL減衰速度の増大が観測され、これより長波長光が脱励起光として誘導放出を引き起こしたため(STED効果)であることのほぼ決定的な裏付けを得た(図17)。この作用の確認により、今後、半導体レーザー光のベクトルビーム化によってナノイメージングが可能になると予測された。また、光学的作用の評価実験に基づいて、機能的には10 nmの空間分解能を得る設計で、ステージスキャン型ナノイメージングの実験系を構築した。イメージングにおいても、STED効果による画像パターンの変化を確認した。

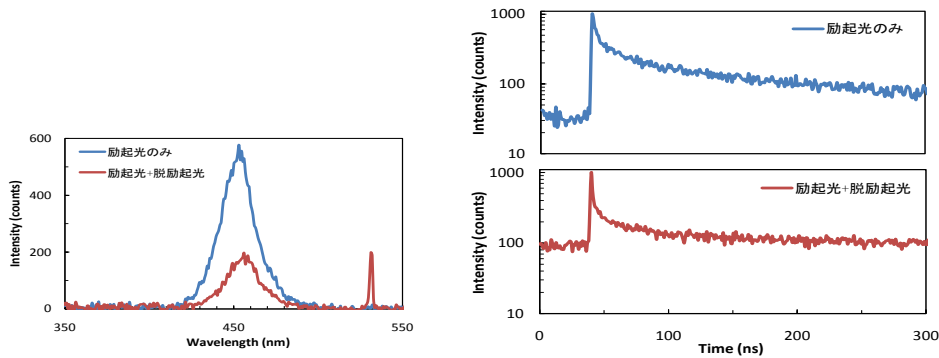


図 17 (a)STED 光による PL 強度変化. 励起光パワー $1 \mu\text{W}$, STED 光パワー 15.5 mW . (b)および(c) STED 光による PL 寿命変化. 励起光パルス繰返し周波数 1 MHz , パルス平均パワー 90 nW , STED 光パワー 20 mW .

STEDイメージング

前述のように、実験的研究によるSTED効果が確認されたことに基づいて、ナノイメージングの上で障害となる顕微光学系の微小振動の除去を図りながら、LD光源を用いて、ベクトルビームによるInGaN半導体量子構造のナノイメージング実証の実験的研究を行った。その結果、中空レーザービームのSTED効果により、顕微光学系による通常イメージングに比して約30%の分解能の向上(超解像効果)が認められた(図18、19)。この効果の定量的評価には、観測部位を特定するための標準的ナノ構造試料を作製することが必要となる。このために、リソグラフィの手法により、InGaN-SQW構造の試料表面に蒸着した金薄膜にサブ μm ~ $2\mu\text{m}$ サイズの矩形開口パターンを作製した。そして、その試料の評価を進めた結果、現在のInGaN半導体量子構造では空間的な不均一性が大きく、上記のリソグラフィによるナノ加工による標準的ナノ構造作製が容易でないことが判明した。このために、空間的均一性の高いInGaN半導体量子井戸の成長と評価を図った。

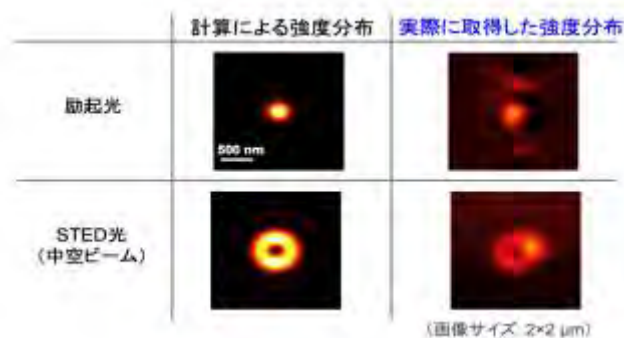


図 18 励起光 (ガウスビーム) と脱励起光 (中空ビーム) の顕微鏡焦点面における強度分布パターンの計算結果と実験結果との比較.

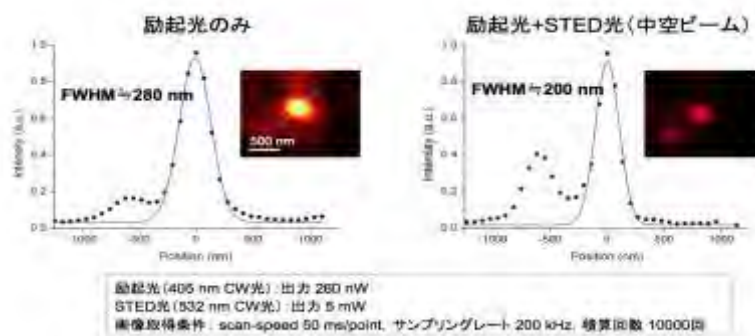


図 19 中空ビーム脱励起光 (STED 光) の照射による青色発光 InGaN 単一量子井戸 (SQW) 構造試料内の発光パターンの超解像効果の実測例。

STEDイメージング 分解能向上

前述のように、集光点でドーナツ状パターンとなる脱励起光のSTED効果による分解能の向上が認められた。しかし、この効果の再現性・信頼性を含めての定量的評価には、観測部位を特定するための標準的ナノ構造試料を得ることが必要であると判断して、その作製を行った。具体的には、SQW試料表面に80nm厚の金薄膜を蒸着し、この膜に電子ビームリソグラフィにより最小で100 nm²、最大で2μm²のナノスケール孔をマトリクス状に形成した。なお、複数のSQW試料を成長してそのSTED効果を調べたが、最初に成長したSQW試料が最も顕著にSTED効果が見られたことから、空間的な不均一性が大きく標準的ナノ構造として難しい側面を有するものの、この試料上にナノスケール孔を形成して超解像イメージング実験に注力することにした。この結果、図20に示すように、イメージングの際に特定のパターンを同定することができるようになり、STEDによる超解像イメージング効果の再現性ととも、50%に近い超解像効果を確認することができた。

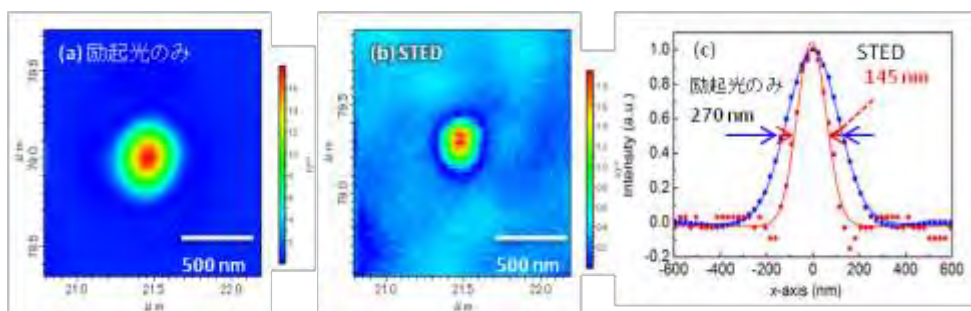


図 20 (a),(b) InGaN 単一量子井戸構造に対する STED 顕微鏡によるイメージと(c)分解能の比較

STEDイメージング 多重リングビームによる分解能向上

新たな取り組みとして、STED光を、理論計算に基づいて焦点においてより微小なダークスポットが期待される多重リング状を用いて実験を行ったところ、約5%の分解能の向上が認められた。また、このInGaN半導体量子構造のSTEDイメージングにおいては、試料内の位置によってSTED効果の有無に差異があることが見いだされている。これは、発光検出のスペクトル窓内ではほぼ同等の発光強度を示しても、スペクトルの全体形状や裾部分の形状が異なることに起因している可能性が高い。これを詳細に調べることにより、InGaN量子ナノ構造の組成およびサイズによるキャリアエネルギーの分布関数やキャリアの空間移動について材料物理的な知見が得られるものと期待される。

4.3 生命科学におけるナノイメージング(北海道大学根本グループ)

(1)研究実施内容及び成果

生体における生理機能の創発原理やその破綻としての病理の解明のためには、分子、細胞、臓器といった各層に固有の現象や情報がどのように縮約されているかを解明することが重要である。特に生体分子のダイナミクスを高い時間分解能で捉えることが、旧来の生化学的手法を越えた新しい細胞像の構築には不可欠である。その実現のための方途の一つとして超解像イメージングが期待されている。現在、数多くの超解像顕微鏡が開発、提案されており、その一部は実際に市販されている。しかし、その多くは生組織、生細胞のライブイメージングには適用しにくいという問題や、特殊な蛍光色素を使用する必要があるなどの制限がある場合が多い。また、誘導放出抑制(STED)効果を用いた蛍光顕微鏡(STED 顕微鏡)は、超解像顕微鏡としては最も良く知られたものであり、非常に高い空間分解能を有するものの、大規模なレーザーシステムが必用であり、一般的な生物科学、基礎医学研究者にとっては操作性や利便性に劣ることが問題であった。そこで我々は、ベクトルビームによって初めて実現する焦点付近での特異的な偏光と強度分布を利用して、生命科学における新しいナノイメージング法の開発に取り組むことを目標とした。特に、空間分解能の向上(超解像イメージング)、生体分子機能の可視化及び光操作を目指した。本件研究項目は、主として佐藤グループにおいて理論的に計算されていた結果を、根本グループが実際に今までのノウハウを生かして、実際に使用されている最先端の生物用 2 光子励起レーザー顕微鏡や共焦点レーザー顕微鏡において、実験的に証明するという形で推進した。デバイスの作成については、その設計や実装装置等については、佐藤チームと根本チームが中心となって実施した。遺伝子改変動物など生物系のサイクルや新しい蛍光タンパク質に関する実験は、根本チームの認可施設内において、所属機関の実験委員会の認可の元、厳重に実施した。

高次径偏光ビームを用いたナノイメージング

まず、新規ベクトルビーム導入と、ナノイメージングの実施に必要な光学顕微鏡システムの構築を実施した。具体的には、旧来の共焦点型レーザー蛍光顕微鏡システムを改良することにより、ベクトルビームを励起光源として導入することが可能な空間伝送式のレーザー स्कаниング型蛍光顕微鏡システムを構築した。ここに顕微鏡は生物個体を観察対象とすることが重要であるので、正立型顕微鏡システムを採用した。また、液晶デバイスを用いて既設の半導体レーザー(共焦点観察用)及び Ti: Sapphire レーザー(2 光子顕微鏡用)からベクトルビームを生成させる装置を完成させた。実際に使用している生物用レーザー走査型顕微鏡にアドイン可能とし、最適なベクトルビームの生成のための条件を検討した。特に、佐藤グループと共に、液晶デバイスをレボルバーと対物レンズに、簡便に挿入するシステムを開発した(図 21)。一方で、さらなる空間分解の向上を目指して、実際に生物系の観察で用いられている多様な高 NA の対物レンズに於いて多様なベクトルビームの焦点位置におけるパターンを計測した。また、共焦点顕微鏡においてピンホール直径の点像分布関数への影響について詳細に検討し、集光スポットのサイドローブの低減が可能であることを見いだした。

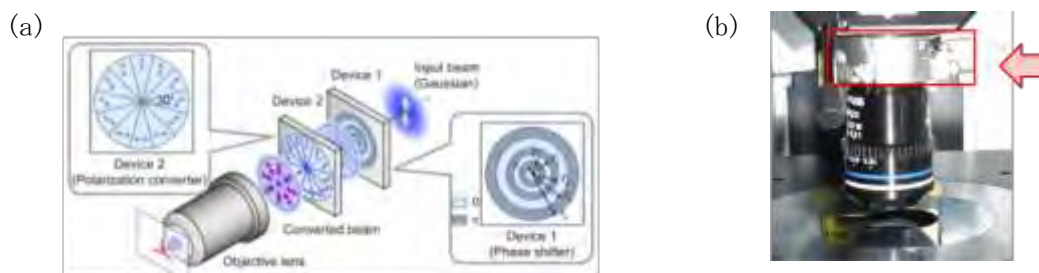


図 21：液晶素子を用いたベクトルビーム変換装置。(a)概略図、(b)液晶素子ホルダー(矢印)による対物レンズとレボルバー間への設置の様子

これらの検討の結果、ベクトルビームの中でも特に高次径偏光ビームを用いることで、生物用共焦点顕微鏡や2光子顕微鏡において、空間分解能が向上することを世界で初めて実験的に実証することに成功した。共焦点顕微鏡においては、微小な蛍光ビーズや固定培養細胞標本を用いてその効果を例示した。さらに、2光子顕微鏡での生体サンプル観察においても、高解像化が有効となる条件を検索し、培養神経細胞やCOS7の系において細胞骨格系(微小管)のネットワーク構造を明瞭に撮像することが可能になった(図 22)。また、アクチンを可視化するため Lifeact 発現系を確立し、高次系偏光ビームの超被写界深度効果と相まって、全焦点投影イメージングに成功し、生細胞の細胞運動を長時間安定的に観察することが可能であることも見出した。さらに2光子顕微鏡の特徴である多様な蛍光分子への適用可能性を確かめた。さらにデータの解析を進め、収差の影響などを検討した。これらの成果の一部は、第20回日本バイオイメージング学会学術集会において「ベストイメージ賞」を受賞した。

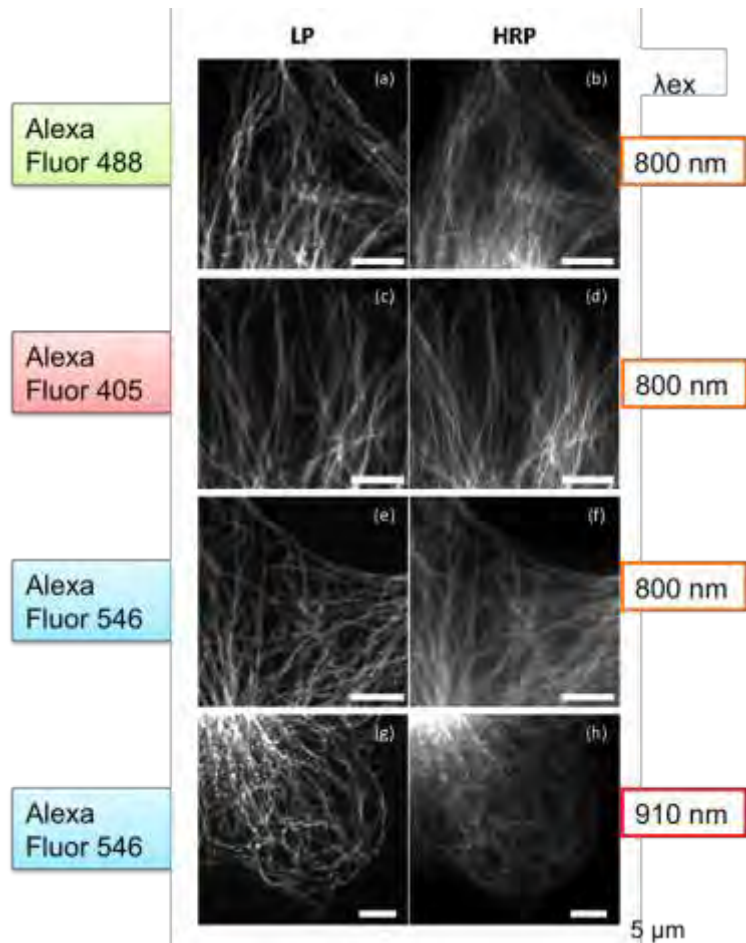
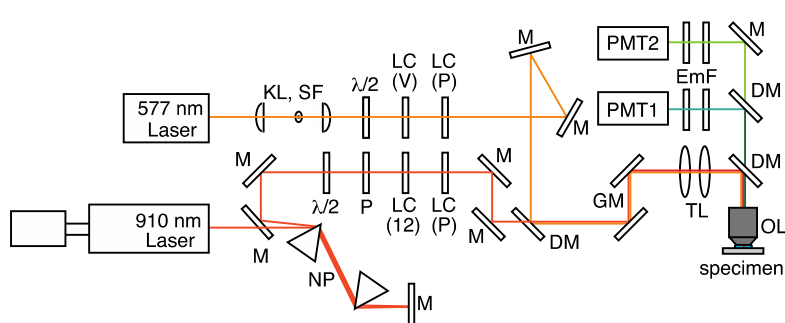


図 22 LP(直線偏光)と HRP を用いた2光子顕微鏡の比較。同一視野で LP から HRP に変更することで、細胞内の微細な構造が明瞭に可視化されている。固定した COS7 細胞の微小管を、左カラムの様々な蛍光色素の2次抗体で蛍光抗体染色した。右カラムは励起波長。

ベクトルビームを用いた2光子STED顕微鏡の開発

現在、一般的に市販されている STED は非常に大規模なレーザーシステムを用いており、極めて高額であることに加え、生命科学、基礎医学研究者にとっては操作性などが余り優れているとは言えない。佐藤グループの理論的な検証から、STED 顕微鏡の要となるドーナツ状の誘導放出抑制光の発生が、高次径偏光を発生させるための液晶デバイスの使用により、極めて簡便に実現されることが期待された。さらに旧来の横方向電場の STED のみならず軸性方向電場 STED の実現可能性が理論的に示された。そこで、根本グループでは実際の生きた生物標本での超解像イメージングを最終的な目標とするために、蛍光発生過程は通常の2光子顕微鏡を用いる2光子 STED 顕微鏡を開発の目標とした。まず正立型2光子顕微鏡のガルバノスキャナーを改造し、励起用の近赤外超短光パルスレーザー光と STED 用レーザー光を同軸で操作可能とした。本システムの概要を図 23 に示す。



DM: Dichroic Mirror, EmF: Emission Filters, GM: Galvano Mirrors, KL: Kepler's Lens pair, LC(P): Liquid Crystal device (Plain), LC(V): Liquid Crystal device (Vortex), LC(12): Liquid Crystal device (12 div.), M: Mirror, NP: Negative Chirper, OL: Objective Lens, P: Polarizer, PMT: Photo-Multiplier Tube, SF: Spacial Filter, TL: Tube Lenses, $\lambda/2$: $\lambda/2$ plate

図 23 : 2 光子 STED 顕微鏡の構成

STED 光の光源としては、様々なものを比較検討した結果、最終的には、波長 577nm の CW レーザー (Coherent, Genesis MX577 MTM) を使用した。まず STED 光のドーナツ化試験を実施したところ、光学顕微鏡の持つ固有の反射特性、偏光特性や収差のために液晶デバイスの調整が必要であることが判明したが、液晶デバイス動

作が印可 AC 電圧の調整で容易に行えることから、柔軟性を持ってその場で調整が可能であることが判明した。ドーナツ STED 光としては $m=+/-1, +/-2$ の vortex ビームについて検討し、(1) 横電場方向 STED では励起: 円偏光-STED: 円偏光・Vortex ($m=1$)、(2) 軸電場方向 STED では励起: 径偏光-STED: 円偏光・Vortex ($m=-2$)、の組み合わせにおいて最適化を行った。

その結果、100nm 径の微小な蛍光ビーズが、通常の 2 光子顕微鏡では、300nm の FWHM を持って観察されていたが、横方向電場 STED 光をその場で重畳させることで直ちに、FWHM: 128nm として観察された。即ち、これは空間分解能の著しい向上が認められたことを意味し、この FWHM の値は、100nm 近くの空間分解能が達成されたと数値計算から評価された (図 24)。

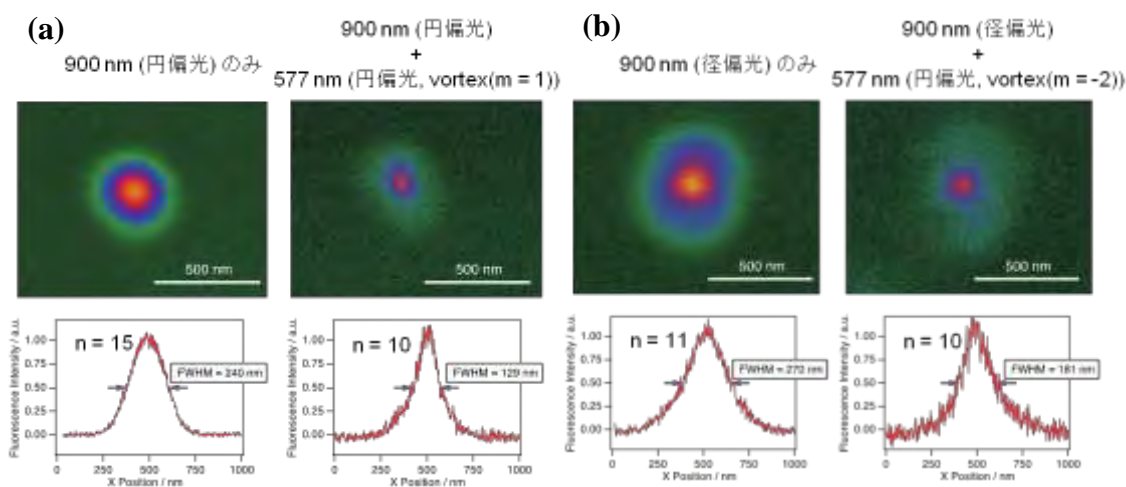


図 24 (a)横方向電場 STED および(b)軸方向電場 STED における PSF の評価。

同様に軸方向電場 STED についても空間分解能の顕著な向上が確認できた。

実際の生物系サンプルへの適用可能性も検討した結果、固定した COS7細胞の微小管の蛍光抗体染色の観察では、ネットワーク構造を明瞭に撮像することが可能になった(図 25)。

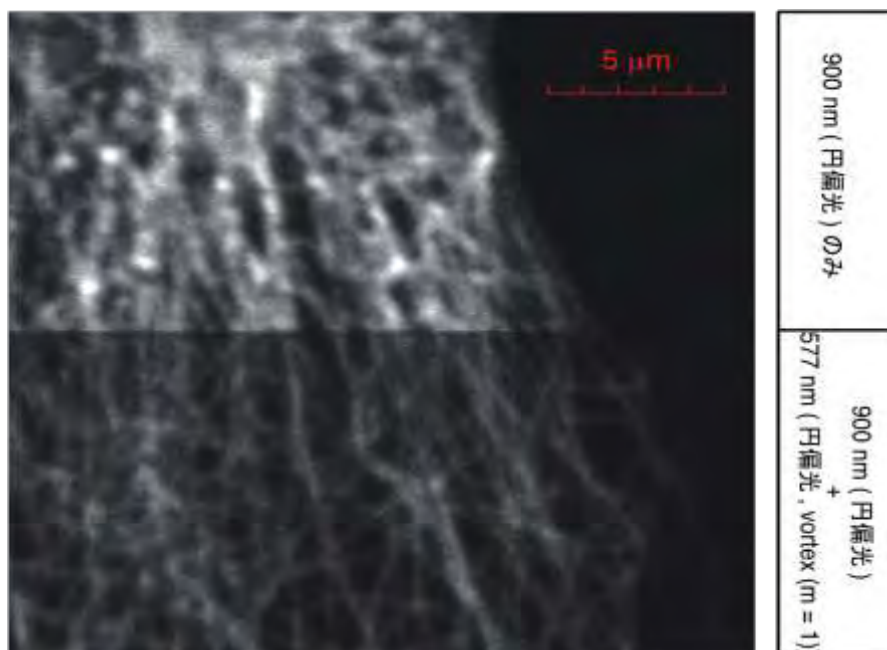


図 25 ベクトルビーム STED 法による固定 COS7 細胞の微小管のイメージング。上半分は 2 光子励起用レーザーのみでスキャンをしており、下半分はさらに STED 光を重畳した。微小管のネットワーク構造が明確に可視化されている。

本システムは小型で簡便なシステムであるにも関わらず、市販の STED 顕微鏡同様に高い空間分解能を実現することができたという特徴を有するが、これらが本 CREST 課題を通じて日本で独自に開発できたシステムであることも重要なポイントである。今後、本システムについて、実際の生物系の研究現場との密接な交流により、さらなる基本性能の向上やバイオイメージングへの応用可能性を拡大することが可能であれば、超解像イメージングという重要分野で、ドイツに対して技術的なビハインドを負ってしまった日本の産業への強力なカンフル剤となることが期待できる。

新規開発レーザーによる生体深部イメージングの高度化

本研究課題の進捗の過程で、新たに横山グループが主となって開発してきた新規レーザー光源のバイオイメージングへの応用の可能性を検討することが認められた。その結果、新規 *in vivo* 2 光子顕微鏡の開発により、マウス生体脳の *in vivo* 蛍光断層イメージングに成功し、世界最深部の神経細胞像を撮像することに成功した。本研究計画で整備してきた正立型光学顕微鏡(オリンパス・BX)に、横山グループが開発した波長 1030nm、パルス幅 5ps の新規光繰り返し近赤外超短光パルスレーザーを励起光源として導入した。一方、麻酔下のマウスの保定方法をさらに改良し、同一のマウス生体脳中の同一部位について、安定的に *in vivo* イメージングを実行することを可能とした。その結果、4週令の H-line マウスにおいて、世界で初めて、海馬 CA1 ニューロンの *in vivo* 観察に世界で初めて成功した。即ち、脳表から 1.3mm を越える深部到達性を実現し、その結果、大脳新皮質全層 (I-VI)、及び白質、白板の観察が可能となった(図 26)。この限界は、対物レンズの作動距離が 2mm 程度しか無いことが原因であるので、より長い作動距離の対物レンズの導入について、特別注文も視野に入れて検討を行う。そこで本年度は、さらに画像データ等を解析し、研究成果をまとめ原著論文として *Scientific Reports* (Nature 姉妹誌) に発表した。新聞(読売新聞、北海道新聞他) 5 件、ネットニュース(マイナビ excite) 1 件で報道されたほか、NPG ネイチャー アジア「注目の論文」に選定された。

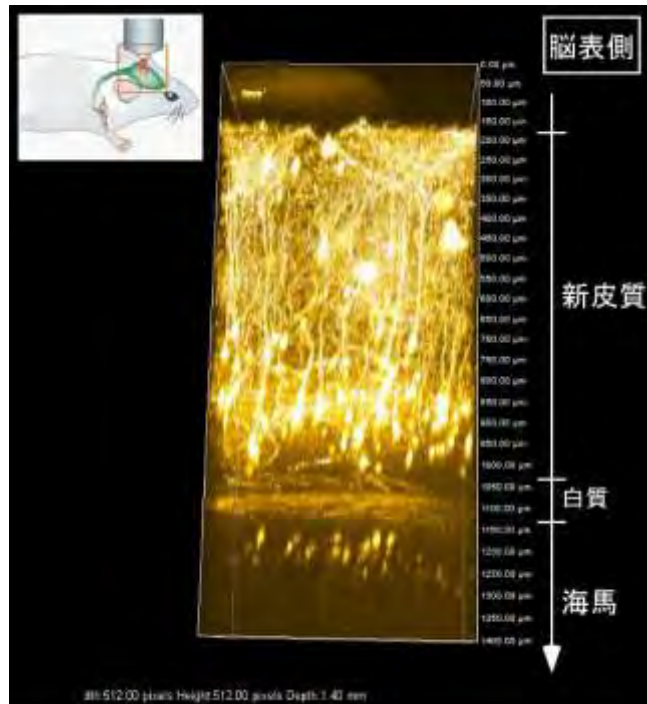


図 26 麻酔下の生体マウス脳の *in vivo* イメージング。今までは観察不可能な深部に存在する海馬 CA1 ニューロンを世界で初めて *in vivo* 観察できた。

このように本 CREST 研究において新規開発した生体用 *in vivo*2 光子顕微鏡を用い、生きたままのマウスの脳の *in vivo* イメージングを行ったところ、海馬 CA1 錐体細胞を観察することに成功した。これは、知る限り、世界で初めての快挙であったといえる。何故ならば、今までの世界最深部の報告は、根本グループを含め数グループが報告しているが、1mm 程度であった。それが、大脳新皮質を越え、更に深部の海馬の細胞の観察が出来たと言うことは、世界最深部の *in vivo* イメージングの記録更新という意味のみにとどまらない。特に、脳機能研究において「記憶のメカニズム」を解明するために、最も重要な研究対象がまさに海馬であり、それを生きた生物個体中でありのまま観察することを可能とする方途の出現は、今後の脳生理学や臨床的な神経外科など研究手法に変革をもたらすと考えられる。現在、生体深部の光イメージングや光操作は、ライフサイエンスの領域においてマルチモーダル医療革命のキーワードとなっていることを考慮すれば、がん、免疫などの基礎研究や臨床応用においても極めてインパクトが大きいと考える。

その他

- ・ 新規蛍光タンパク質発現系や新規蛍光プローブ

HRP による高解像イメージングや STED 顕微鏡のため、新規蛍光タンパク質発現系や新規蛍光プローブの検索を継続して実施した。その結果、アクチン骨格系と微小管系を同時可視化するための最適の色素の組み合わせを決定し、同時高解像イメージングに成功した。一方、生細胞中での F アクチン動態を明らかにするために、多種類の蛍光タンパク質タグ化-Lifeact の発現系を構築し比較検討を行った。その結果、mTFP タグが有効であることが明らかになった。

- ・ デジタルデコンボリューションの検討

デジタルデコンボリューションは線形応答理論に基づき、高い空間周波数成分を回復する手法であるので、本研究計画において成果を得てきた光学的な高解像化の方法と、両立することが予想されていた。そこで、ベクトルビームによる観察時の理論的 PSF を計算し、デジタルデコンボリューションへ用いたところ、その有効性を確認した。

§5 成果発表等

(1) 原著論文発表(国内(和文)誌 1件、国際(欧文)誌 30件)

1. Shunichi Sato and Yuichi Kozawa, "Hollow vortex beams," *Journal of Optical Society of America A* **26** (1), 142-146 (2009) (doi:10.1364/JOSAA.26.000142).
2. Tatsuya Chubachi, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, "Amplification of a radially polarized laser beam using an Yb-doped double-clad fiber," *Optics Letters*, **34** (6), 716-718 (2009) (doi:10.1364/OL.34.000716).
3. Akihiko Ito, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, "Selective oscillation of radially polarized laser beam induced by thermal birefringence and lensing," *Journal of Optical Society of America B*, **26** (4), 708-712 (2009) (doi:10.1364/JOSAB.26.000708).
4. W. Tomosugi, T. Matsuda, T. Tani, I. Kotera, K. Saito, K. Horikawa, T. Nemoto, and T. Nagai, "An ultramarine fluorescent protein with high photostability and pH insensitivity", *Nature Methods*, **6** (5), 351-353 (2009) (doi:10.1038/nmeth.1317).
5. Y. Takatsuru, M. Yoshitomo, T. Nemoto, K. Eto, J. Nabekura, "Maternal separation decreases the stability of mushroom spines in adult mice somatosensory cortex", *Brain Research*, **1294**, 45-51 (2009) (doi:10.1016/j.brainres.2009.07.092).
6. Y. Takatsuru, D. Fukumoto, M. Yoshitomo, T. Nemoto, H. Tsukada, J. Nabekura, "Neuronal circuit remodeling in the contralateral cortical hemisphere during functional recovery from cerebral infarction", *Journal of Neuroscience*, **29** (32), 10081-6 (2009), (doi: 10.1523/JNEUROSCI.1638-09.2009).
7. S. Sato and Y. Kozawa, "Radially polarized annular beam generated through a second-harmonic-generation process", *Optics Letters*, **34** (20), 3166-3168 (2009), (doi:10.1364/OL.34.003166).
8. N. Matsuda, H. Lu, Y. Fukata, J. Noritake, H. Gao, S. Mukherjee, T. Nemoto, M. Fukata, M. Poo, "Differential Activity-Dependent Secretion of Brain-Derived Neurotrophic Factor from Axon and Dendrite", *Journal of Neuroscience*. **29** (45), 14185-98. (2009), (doi: 10.1523/JNEUROSCI.1863-09.2009).
9. E. Ohta, T. Itoh, T. Nemoto, J. Kumagai, S. B. H. Ko, K. Ishibashi, M. Ohno, K. Uchida, A. Ohta, E. Sohara, S. Uchida S. Sasaki, T. Rai, "Pancreas-specific aquaporin 12 null mice showed increased susceptibility to caerulein-induced acute pancreatitis", *American Journal of Physiology - Cell Physiology*, **297** (6), C1368-78. (2009), (doi: 10.1152/ajpcell.00117.2009).
10. Y. Ebisuno, K. Katagiri, T. Katakai, Y. Ueda, T. Nemoto, H. Inada, J. Nabekura, T. Okada, R. Kannagi, T. Tanaka, M. Miyasaka, N. Hogg, T. Kinashi "Rap1 controls lymphocyte adhesion cascade and interstitial migration within lymph nodes in a RAP1-dependent and -independent manner.", *Blood*, **115** (4), 804-814 (2010), (doi: 10.1182/blood-2009-03-211979).
11. A. Sato, K. Kono, K. Saito, K. Sato, and H. Yokoyama, "A high-peak-power UV picosecond light pulse source based on a gain-switched 1.55 μm laser diode and its application for time-resolved spectroscopy of blue-violet materials," *Optics Express*, **18** (3), 2522-2527 (2010), (doi: 10.1364/OE.18.002522).
12. A. Ohtsu, Y. Kozawa, and S. Sato, "Calculation of second-harmonic wave

- pattern generated by focused cylindrical vector beams”, *Applied Physics B*, **98** (4), 851-855 (2010), (doi: 10.1007/s00340-009-3833-0).
13. Y. Kozawa and S. Sato, “Demonstration and selection of a single-transverse higher-order-mode beam with radial polarization,” *Journal of Optical Society of America. A*, **27** (3), 399-403, (2010), (doi:10.1364/JOSAA.27.000399).
 14. Akihiko Ito, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror”, *Journal of Optical Society of America A*, **27** (9), 2072-2077 (2010) (doi:10.1364/JOSAA.27.002072)
 15. W. C. Shen, C. W. Cheng, M. C. Yang, Y. Kozawa, S. Sato, “Fabrication of novel structures on silicon with femtosecond laser pulses”, *Journal of Laser Micro/nanoengineering*, **5** (3), 229-232 (2010), (doi: 10.2961/jlmn.2010.03.0009)
 16. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Self-healing of tightly focused scalar and vector Bessel–Gauss beams at the focal plane”, *Journal of Optical Society of America A*, **28**(5), 837-843 (2011), (doi:10.1364/JOSAA.28.000837)
 17. Sunil Vyas, Masato Niwa, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Diffractive properties of obstructed vector Laguerre–Gaussian beam under tight focusing condition”, *Journal of Optical Society of America A*, **28** (7), 1387-1394 (2011), (doi:10.1364/JOSAA.28.001387)
 18. Yuichi Kozawa, Terumasa Hibi, Aya Sato, Hibiki Horanai, Makoto Kurihara, Nobuyuki Hashimoto, Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, Shunichi Sato, “Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam”, *Optics Express*, **19** (17), 15947-15954 (2011), (doi:10.1364/OE.19.015947)
 19. Paramasivam Senthilkumaran, Jan Masajada, and Shunichi Sato, “Interferometry with Vortices”, *International Journal of Optics*, **2012**, 517591 (2012), (doi:10.1155/20120517591).
 20. Ken Kano, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, “Generation of a purely single transverse mode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror”, *International Journal of Optics*, **2012**, 359141 (2012) (doi:10.1155/2012/359141).
 21. Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Focusing of higher-order radially polarized Laguerre-Gaussian beam”, *Journal of Optical Society of America A*, **29** (11), 2439-2443 (2012), (doi: 10.1364/JOSAA.29.002439)
 22. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, “Twisted longitudinally polarized field in the focal region”, *Applied Physics B*, **110** (1), 7-14 (2013), (doi: 10.1007/s00340-012-5239-7)
 23. Ayano Tanabe, Yuka Saito, Makoto Kurihara, Nobuyuki Hashimoto, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Terumasa Hibi, Tomomi Nemoto, “Observation of PDLCs by SHG laser scanning microscopy using a liquid crystal vector beam generator”, *Proc. SPIE*, pp. 8279-20 (2012)
 24. Ryosuke Kawakami, Kazuaki Sawada, Aya Sato, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Hiroyuki Yokoyama, and Tomomi Nemoto, “Visualizing hippocampal neurons with in vivo two-photon microscopy using a 1030 nm picosecond pulse laser”, *Scientific Reports*, **3**, 1014 (2013), (doi: 10.1038/srep01014)
 25. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, “Polarization singularities in superposition of vector beams”, *Optics Express*, **21**(7), 8972-8986 (2013), (doi: 10.1364/OE.21.008972)
 26. Ryushi Takeuchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Polarization coupling of vector Bessel-Gaussian beams”, *Journal of Optics*, **15**(7), 075710 (2013), (doi:10.1088/2040-8978/15/7/075710)

27. Sari Ipponjima, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Hibiki Horanai, Hiroyuki Yokoyama, Shunichi Sato and Tomomi Nemoto, "Improvement of lateral resolution and extension of depth of field in two-photon microscopy by a higher-order radially polarized beam", *Microscopy*, **63**(1), 32-32 (2014), (doi: 10.1093/jmicro/dft041).
28. 横山弘之,「半導体レーザーによる高機能超短パルス光源」電子情報通信学会:和文論文誌C, **J97-C**(1), 1-8 (2014)
29. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, "Generation of radially polarized Bessel-Gaussian beams from c -cut Nd:YVO₄ laser," *Optics Letters*, **39**(4), 1101-1104 (2014), (doi: 10.1364/OL.39.001101)
30. Yuta Kusama, Yuichiro Tanushi, Masami Yokoyama, Ryosuke Kawakami, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Tomomi Nemoto, Shunichi Sato, and Hiroyuki Yokoyama, "7-ps optical pulse generation from a 1064-nm gain-switched laser diode and its application for two-photon microscopy," *Optics Express*, **22**(5), 5746-5753 (2014), (doi: 10.1364/OE.22.005746).
31. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, "Generation of a vector doughnut beam from internal mirror He-Ne laser," *Optics Letters*, **39**(7), 2080-2082 (2014), (doi: 10.1364/OL.39.002080).

(2)その他の著作物(原著論文以外の総説、解説、単行本など書籍)

1. 根本知己,「光の回折限界を超える蛍光イメージング技術」、ぶんせき、日本分析化学会、東京、Vol. 409, No.1, pp.8-13 (2009)
2. 横山弘之,「高機能ピコ秒半導体レーザーによる多光子バイオイメージング」、月刊オプトロニクス、第28巻12号,(2009年12月号)。
3. 根本知己「レーザーを用いた開口放出や細胞膜機能・形態の新規的な可視化手法」、膜、Vol. 35 pp. 57-62 (2010)
4. Tomomi Nemoto, "Potential of "in vivo" two-photon microscopy in visualization of 3D structure and functional information in living body", *Journal of Pharmacological Sciences*, Vol. 112, p. 45P, (2010)
5. Tomomi Nemoto, Ch.18: "Two Photon Microscopy for in vivo Analysis of Neural and Secretory Activities", "Nanomedicine Design of Particles, Sensors, Motors, Implants, Robots, and Devices"(ed. M. J. Schulz, et al.), Artech House, Inc. (2009).
6. 根本知己「光の回折限界を超える細胞機能イメージングの試み」、物性研究、Vol. 94, pp. 242-244 (2010)
7. 佐藤俊一「ベクトルビームの発生と光ファイバー増幅」、O plus E、Vol.32, No.11、pp.1304-1308 (2010)
8. 根本知己「超短光パルスレーザーによる細胞、生体分子の動態の可視化解析」、日本レーザー医学会誌、Vol.30, No.4、pp.435-440 (2010)
9. 根本知己、日比輝正、川上良介「多光子顕微鏡による生体機能の可視化解析技術」オプトデザイン、No.45, pp.33-39 (2010)
10. 根本知己「細胞生物学における超解像撮像技術」、パリティ、Vol. 26, pp. 44-49, (2011)
11. 佐藤俊一「ベクトルビーム」、日本学術振興会 光エレクトロニクス第130委員会編、「光エレクトロニクスとその応用」、オーム社 (2011)
12. 佐藤俊一,「光ファイバーを用いたベクトルビームの増幅」、光アライアンス、23(3), 33-37 (2012)
13. 根本知己、川上良介、日比輝正、「ニューロフォトンクスのための多光子顕微鏡技術の基礎と展開」、レーザー研究、レーザー学会第437回研究報告、. 9-13(2012)
14. 横山弘之,「超短光パルス半導体レーザー」、O plus E, 34(10), 942-948 (2012)
15. Tomomi Nemoto, Terumasa Hibi, Sari Ipponjima, "Confocal and

multi-photon laser microscopy using liquid crystal devices and vector beams”, SPIE Newsroom, 10 December 2012, SPIE Newsroom, 2012 (DOI: 10.1117/2.1201211.004549)

16. 根本知己、「生命機能の創発を理解する光操作とイメージングの最前線」、レーザー研究、41, 84-85 (2013)
17. 根本知己、川上良介、日比輝正、「多光子励起レーザー顕微鏡の高深度化・超解像化」、レーザー研究、41, 107-112 (2013)
18. 小澤祐市、佐藤俊一、「ベクトルビーム 覚醒する光波の潜在能力」、応用物理、82(1), 27-32 (2013)
19. 日比輝正、一本嶋佐理、根本知己、「ベクトルビームによるレーザー顕微鏡の超解像化の試み」、光技術コンタクト、2013年4月号, (2013)
20. 根本知己、日比輝正、「超短光パルスレーザーによる非線形光学過程を用いた超解像イメージング」、光アライアンス、2013年4月号, (2013)
21. 佐藤俊一、「ベクトルビーム超解像顕微鏡」、現代化学、507, 48-49 (2013)
22. 川上良介、日比輝正、根本知己、「2光子顕微鏡による大脳新皮質全層と海馬 CA1 錐体細胞の *in vivo* イメージング」生物物理、54(1), 35-38 (2014)

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 49 件、国際会議 24 件)

1. Tomomi Nemoto, *in vivo* functional imaging for secretion and neural activities by two-photon microscopy”, The 9th international congress of cell biology, Seoul, Korea, (2008.10.11)
2. 佐藤俊一、小澤祐市、「偏光、位相、強度分布を制御した光ビーム発生」、Optics and Photonics Japan 2008, つくば, 2008年11月6日
3. Tomomi Nemoto, Invited Speaker :”Potential of two-photon microscopy for analysis of living organ” 39th NIPS international Symposium & 7th OIB Symposium, Okazaki conference center, Okazaki, Japan, 2008年11月10日
4. 根本知己、「2光子顕微鏡による神経グリア細胞動態のニューロフォトンクス」第29回日本レーザー医学会総会、東京工科大学、八王子市、2008年11月15-16日
5. Tomomi Nemoto, “Development in imaging and stimulation by using multi-photon excitation process”, 2008 Annual Meeting of the Spectroscopical Society of Japan, Sendai, Japan, 2008年11月21日
6. 横山弘之、「半導体レーザによる高ピークパワー超短光パルスの生成と非線形フォトンクスへの展開」、第6回超高速光エレクトロニクス研究会、(独)情報通信研究機構、東京都小金井市、2008年11月25日
7. 根本知己「非線形光学と細胞機能計測」、多次元共同脳科学推進センターシンポジウム、虎ノ門パストラル、東京都、2008年12月6日
8. 根本知己, ” Two-photon microscopy for *in-vivo* molecular cell biology of neural and secretory function”, 国立遺伝学研究所, NIG Biological Symposium、三島市、2008年12月24日
9. Tomomi Nemoto, Invited Speaker :” Neural and secretory activities revealed by by two-photon microscopy”, The 6th Asian Biophysical Association (ABA) Symposium, Hong Kong University of Science and Technology, Hong-Kong, China, 2009年1月11-14日
10. Tomomi Nemoto, Invited Speaker :”Recent development in microscopic analysis using two-photon excitation and non-linear process”, ISNM2009 and Asian Core Symposium-Nano and Biomedical Molecular Science, Okazaki, Japan, 2009年2月6日
11. 根本知己「多光子励起過程を用いた細胞機能・動態の *in vivo* 可視化」環境医学研究所合同シンポジウム、名古屋大学環境医学研究所、2009年2月16日

12. 根本知己「2光子顕微鏡を用いた細胞機能計測と in vivo イメージング」、防衛医科大学「バイオを考える」シンポジウム、2009年2月27日
13. 根本知己「非線形光学を利用したバイオ分子イメージング～2光子顕微鏡による in vivo イメージングの展開」ソニーオープンラボ第3回講演会、東京医科歯科大学、2009年3月4日
14. 佐藤俊一、「軸対称偏光レーザービーム」、光科学談話会、仙台、2009年5月27日
15. 根本知己、「カルシウム依存性開口放出の可視化解析」日本薬学会東海支部特別講演会、名古屋市立大学薬学部、名古屋市、2009年5月21日
16. 根本知己、「多光子励起顕微鏡法による細胞機能の分子イメージング」、金沢大学十全医学会年次集会、金沢大学、2009年7月25日
17. 根本知己、「光の回折限界を超える細胞機能イメージングの試み」生物物理若手の会第49回夏の学校、支笏湖ユースホステル、2009年8月1日
18. 根本知己、「非侵襲的なバイオ分子機能イメージングを可能とするパルスレーザーを用いた光学顕微鏡法の開発」、第1回 BioOpto Japan カンファレンス、パシフィコ横浜、2009年9月17日
19. 根本知己、「超短光パルスレーザーを用いた細胞生理機能の可視化解析技術の展開」若手研究者支援のための産学協同 GCOE シンポジウム 2009、札幌京王ホテル、2009年10月1日
20. 根本知己、「多光子顕微鏡による深部組織の in vivo (生きたまま) イメージングの技術」レーザー学会東京支部秋セミナー、慶應大学理工学部、2009年10月30日
21. 根本知己、「二光子顕微鏡による生体計測」第7回医用分光科学研究会、東邦大学大橋病院、2009年11月7日
22. 根本知己、「多光子顕微鏡による細胞機能 in vivo イメージング技術」、第32回日本分子生物学会年会ワークショップ、2009年12月12日
23. 根本知己、「多光子顕微鏡を用いた生きた個体内部での細胞機能・活性の in vivo 可視化解析」、第83回日本薬理学会年会、2010年3月18日
24. 根本知己、「輸送小胞、膜融合の生理機能における多光子イメージングの展開」、「生体膜輸送体」公開シンポジウム、大阪市、2010年3月19日
25. 根本知己、「超短光パルスレーザーを用いた小胞膜動態、開口放出の可視化」日本膜学会第32年会、生体膜シンポジウム、産業技術総合研究所臨海副都心センター、2010年5月14日
26. 根本知己、「多光子顕微鏡による開口放出現象の可視化解析」、第87回日本生理学会シンポジウム“Exocrine protein secretion and signal transduction”岩手県盛岡市、2010年5月19日-21日。
27. Tomomi Nemoto, “Fundamentals and application of "in vivo" two-photon microscopy for investigation of nerve and secretory activities”, Nikon imaging symposium, Southern Medical University, China, Jun. 2, 2010
28. 根本知己、日比輝正「近赤外超短光パルスレーザーによる細胞や生体分子のイメージング法の展開」、第5回日本分子イメージング学会学術集会、天津市、2010年5月22日
29. 根本知己「非線形光学を用いて、生きたまま神経細胞機能を可視化する」第30回「生命をはかる」研究会、東京都、2010年6月21日
30. 根本知己「最先端の生物用光学顕微鏡の原理と応用」Neuro2010 連携レクチャー：In vivo 細胞機能計測・操作技術、生理学研究所、2010年8月30日
31. 根本知己、日比輝正「生体高分子複合体や細胞の機能解明を目指す非線形光学イメージング」第59回高分子討論会(高分子学会) サッポロピリカコタン、2010年9月18日
32. 根本知己、「多光子顕微鏡による生体 in vivo イメージング技術の基礎と可能性」第2回 BioOpto カンファレンス、パシフィコ横浜、2010年9月29-31日

33. 根本知己、日比輝正、川上良介「新規レーザー光を用いた生体 *in vivo* イメージング法・超解像イメージング法の開発」平成 22 年度生理学研究所研究会「電子顕微鏡機能イメージングの医学・生物学への応用－電顕・光顕による統合イメージング」、岡崎カンファレンスセンター、2010 年 10 月 5 日
34. H. Yokoyama, “Development of highly functional semiconductor lasers and application for nonlinear-optic imaging and processing,” IEEE Photonics Society Singapore Chapter Seminar, Nanyang Technological University, Singapore, Nov. 10, 2010.
35. 横山弘之, 「産学共同研究による高機能半導体レーザーの開発」第 4 回多元技術融合プロセス研究会, 仙台, 2010 年 11 月 26 日.
36. 根本知己、日比輝正、川上良介「多光子顕微鏡による生体機能の可視化解析技術」日本光学会(応用物理学会)光設計研究グループ 第45回研究会「生体イメージングの新しい展開」、東京都、2010 年 11 月 26 日
37. 根本知己「2 光子顕微鏡を用いた光・細胞生物学について」広島大学歯学部平成22年度特別講義、広島大学歯学部、広島市、2010 年 12 月 17 日
38. Tomomi Nemoto, “Development in laser scanning microscopy using two-photon excitation process and vector beam”, International Symposium on Photonic Bioimaging 2011, Hilton Niseko Village, Niseko, Japan, Feb. 8, 2011
39. 熊谷修, 横山弘之, 「世界初 100 ワット出力青紫色超短パルス半導体レーザーの共同開発」第 3 回東北大学国際産学連携シンポジウム, 東京, 2011 年 3 月 7 日
40. 佐藤俊一, 「ベクトルビームの集光特性」, 応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
41. Tomomi Nemoto, “*in vivo* functional imaging of cell physiology by using multi-photon excitation process”, ETH seminar, Die Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Switzerland, Apr. 21, 2011
42. 横山弘之, 「半導体レーザーの高機能光源への展開」第 30 回電子材料シンポジウム, 守山, 2011 年 6 月 30 日.
43. 横山弘之, 「極限機能半導体レーザー」東京大学物性研究所分光ゼミ, 東京, 2011 年 7 月
44. 根本知己「非線形光学過程による生体深部イメージングとその超解像化への試み」、第 15 回 NMR マイクロイメージング研究会、自然科学研究機構岡崎カンファレンスセンター、2011 年 8 月 4 日
45. 佐藤俊一, 「スカラービームとベクトルビーム」, 応用物理学学会学術講演会, 山形, 2011 年 9 月 1 日
46. Ryosuke Kawakami, Terumasa Hibi, Tomomi Nemoto, “Development of “*in vivo*” multi-photon and super-resolution microscopy for elucidation of neural activity”, “The France-Japan workshop “Bio-inspired approaches : Micro- and Nano- Architectures, Materials & Imaging”, the Institut Européen de Chimie et Biologie (IECB), Bordeaux, France, Oct. 11-12, 2011.
47. Tomomi Nemoto, " Development of “*in vivo*” multi-photon and super-resolution microscopy for elucidation of neural and secretory activities", 理研 ASI 細胞システムコロキウム, Jan. 13, 2012
48. 横山弘之, 「産学連携による高機能半導体レーザーの研究開発」レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会公開特別講演(基調講演), 仙台, 2012 年 1 月 30 日
49. 横山弘之, 「超短パルス半導体レーザーのデバイス物理と先端フォトニクス応用」第 4 回超高速光エレクトロニクス研究会, 横浜, 2012 年 6 月 8 日
50. 根本知己, 「二光子励起顕微鏡による *in vivo* イメージングの展開」、ニコンイメージングセンターセミナー「蛍光バイオイメージング・ミニシンポジウム」、北海道大学、2012 年 8 月 8 日

51. 横山弘之、「利得スイッチング半導体レーザーの高速ダイナミクス」、応用物理学会学術講演会、松山、2012年9月11日
52. 根本知己、「脳機能を解明するための *in vivo* 多光子顕微鏡の開発」、文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」、第2回複雑系数理とその応用に関するシンポジウム、北海道大学電子科学研究所、2012年11月13日
53. 根本知己、「ニューロフォトニクスのための多光子顕微鏡技術」、ニューロフォトニクス研究会、グランドヒル市ヶ谷、東京都、2012年12月7日
54. 川上良介、日比輝正、根本知己、「2光子励起顕微鏡による生体脳深部観察の最前線」、平成24年度日本分光学会生細胞分光部会シンポジウム、2013年1月25日
55. 日比輝正、「液晶位相変調素子を用いたベクトルビームによるレーザー顕微鏡の高解像化」、2012年度日本分光学会北海道支部シンポジウム、札幌、2013年3月1日
56. 佐藤俊一、「ベクトルビームを用いた超解像顕微鏡」、応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学、厚木、2013年3月27日
57. H. Yokoyama, "Spontaneous emission and stimulated emission in InGaN lasers," DYCE-ASIA Workshop 2012, Tokyo, Japan, Apr. 24, 2012
58. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "Vector beams with spiral phase front", Topological lightwave synthesis and its applications 2012, Chiba, Japan, July 5, 2012
59. Tomomi Nemoto, "Improvement of penetration depth and spatial resolution in "in vivo" two-photon microscopy", JSAP-OSA Joint Symposia, Matsuyama, Japan, Sep. 11, 2012
60. Tomomi Nemoto, Terumasa Hibi, Ryosuke Kawakami, "Improvement of depth penetration and spatial resolution of two-photon microscopy for brain research", RIES-CIS symposium. Sapporo, Japan, Oct. 25, 2012
61. H. Yokoyama, "Dynamics in Gain-Switched Semiconductor Lasers Generating Ultrashort Optical Pulses," Optic 2012, Taipei, Taiwan, Dec. 8, 2012
62. Shunichi Sato, "Controlling amplitude, phase and polarization distributions of light field", The 13th RIES-Hokudai International Symposium, Sapporo, Japan Dec. 13, 2012
63. 根本知己、「新規可視化技術をもちいた細胞生理機能の解析」、ナノマクロ物質・デバイス・システム創製アライアンス平成24年度報告会、北海道大学、札幌市、2013年4月23日
64. Tomomi Nemoto, Terumasa Hibi, Sari Ipponjima "Resolution improvement of multi-photon and confocal microscopy with vector beam", The 69th Annual Meeting of the Japanese Society of Microscopy, ホテル阪急エキスポパーク(吹田市) 2013年5月20日
65. 根本知己、「新規光学技術を用いた"*in vivo*"2光子顕微鏡と神経・分泌の可視化解析」、東京工業大学生命理工学部、横浜市、2013年7月5日
66. 根本知己、「2光子顕微鏡による *in vivo* イメージングと細胞生理機能の解析」、第53回生命科学夏の学校、熱川ハイツ、静岡県賀茂郡伊豆町、2013年8月31日
67. 根本知己、「2光子顕微鏡を用いた生体脳深部観察法 -植物組織・細胞への応用可能性」、日本植物学会第77回大会、北海道大学、札幌、2013年9月14日
68. 佐藤俊一、「ベクトルビームの光科学」、新しい光科学の創成とナノ情報デバイスへの展開研究会、東北大学、仙台、2013年10月15日
69. Tomomi Nemoto, "in vivo imaging of live brain by using novel two-photon microscopy", 7th Internal Symposium on Nanomedicine, Kyushu Institute of Technology, Kita-kyushu, Japan, Nov. 8, 2013
70. T. Nemoto, R. Kawakami, T. Hibi, S. Ipponjima, K. Sawada, K. Iijima, "Improvement of confocal and multi-photon laser microscopy with

- novel lasers”, CIS-RIES symposium. Hsinchu, Taiwan, Dec. 5, 2013
71. H. Yokoyama, “Semiconductor laser light pulse sources for two-photon microscopy,” 2nd DYCE-ASIA Workshop, Kashiwa, Japan, Dec.18, 2013
 72. Tomomi Nemono, Ryosuke Kawakami, Terumasa Hibi, Sari Ipponjima, Kazuaki Sawada, Kohei Otomo, Koichiro Iijima, Yuichi Kozawa, Yuta Kusama, Shunichi Sato, Hiriyoyuki Yokoyama, “Improving *in vivo* two-photon microscopy with novel laser technology,” 2nd DYCE-ASIA Workshop, Kashiwa, Dec. 18, 2013.
 73. Tomomi Nemoto, “Improving *in vivo* two-photon and confocal microscopy with novel laser technology”, PSI seminar, The Paul Scherrer Institute, Switzerland, Mar. 11, 2014

② 口頭発表 (国内会議 78 件、国際会議 26 件)

1. Yusuke Takatsuru, Tomomi Nemoto, Junichi Nabekura, “The dendritic spine of layer V pyramidal neuron in contralateral area of focal ischemia was actively remodeling in somatosensory cortex”. Neuroscience2008, Washington DC, United States, (2008.11)
2. 伊藤暁彦, 小澤祐市, 佐藤俊一、「熱複屈折を用いた軸対称偏光ビームの発生」、第2回東北大学光科学技術フォーラム, 仙台, (2008.11.6)
3. 中鉢達也, 小澤祐市, 佐藤俊一、「ファイバーレーザーによる径偏光ビームの増幅」、応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, (2008.12.4-2008.12.5)
4. 大津暁彦, 小澤祐市, 佐藤俊一、「フォトニック結晶分割波長板を用いた狭線幅な軸対称偏光ビームの発生」、応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, (2008.12.4-2008.12.5)
5. Takashi Kanematsu, Tomomi Nemoto, Masato Hirata, “Deficiency of PRIP gene in mice exhibits a phenotype of hyperinsulinemia”, 第82回薬理学会年会、パシフィコ横浜、(2008.3.16-18)
6. 鍋倉淳一、和氣弘明、高鶴祐介、江藤圭、稲田浩之、Sun Kwang Kim, 根本知己「ニューロンとグリアの生体イメージング」第4回イメージングサイエンスシンポジウム、自然科学研究機構、岡崎コンファレンスセンター、岡崎、(2009.3.24)
7. 中鉢達也, 小澤祐市, 佐藤俊一、「Ybドープ光ファイバーによる径偏光ビームの増幅」、応用物理学関係連合講演会、つくば、(2009.3.30-4.2)
8. 小澤祐市, 佐藤俊一、「高次径偏光ビームの選択的単一横モード発振」、応用物理学関係連合講演会、つくば、(2009.3.30-4.2)
9. 佐藤俊一, 小澤祐市、「線形光学過程を用いた円環状径偏光ビームの発生」、応用物理学関係連合講演会、つくば、(2009.3.30-4.2)
10. 佐藤綾耶, 河野俊介, 横山弘之、「波長 1.55 μm 帯利得スイッチング半導体レーザを用いた紫外域ピコ秒パルス光源」第56回応用物理学会関係連合講演会、つくば、(2009.3.30-4.2)
11. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Optical trapping efficiency measured for dielectric particles by using cylindrical vector beams”, Optical Trapping Applications, Canada, Vancouver, (2009.4.26-4.30)
12. Shunichi Sato, Yuichi Kozawa, “Spatial resolution for fluorescence depletion microscopy using axial electric field generated by focused radially polarized beams”, Novel Techniques in Microscopy, Canada, Vancouver, (2009.4.26-4.30)
13. Eriko Ohta, Tomohiro Itoh, Tomomi Nemoto, Jiro Kumagai, Shigeru B.H. Ko, Kenichi Ishibashi, Mayuko Ohno, Keiko Uchida, Akihito Ohta, Shinichi Uchida, Sei Sasaki, Tatemitsu Rai, “Pancreas-specific aquaporin 12 null mice showed increased susceptibility to Caerulein acute pancreatitis”, World Congress of Nephrology 2009, Milan, Italy, (2009.5.22-5.26)

14. Akihiko Ito, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "Selective TM01 and TE01 mode operation of Nd:YAG laser based on cavity stability incorporating thermal effects", Conference on Laser and Electro-Optics, USA, Baltimore, (2009.6.1-6.5)
15. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "Selective generation of radially polarized Nd:YAG laser beams of higher-order transverse mode", Conference on Laser and Electro-Optics, USA, Baltimore, (2009.6.1-6.5)
16. Tatsuya Chubachi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "TM01 mode operation of an Yb-doped double-clad fiber amplifier", Conference on Laser and Electro-Optics, USA, Baltimore, (2009.6.1-6.5)
17. Eriko Ohta, Tomohiro Itoh, Tomomi Nemoto, Jiro Kumagai, Shigeru B.H. Ko, Kenichi Ishibashi, Mayuko Ohno, Keiko Uchida, Akihito Ohta, Shinichi Uchida, Sei Sasaki, Tatemitsu Rai, "PANCREAS-SPECIFIC AQUAPORIN 12 NULL MICE SHOWED INCREASED SUSCEPTIBILITY TO CAERULEIN-INDUCED ACUTE PANCREATITIS", 第52回日本腎臓学会学術総会, パシフィコ横浜, 横浜市, (2009.6.3-6.5)
18. H. Yokoyama, S. Kono, and A. Sato, "A 200-W peak-power ultraviolet picosecond light pulse source based on a gain-switched 1.55 μ m laser diode," Nonlinear Optics 2009, NThC6, USA, Honolulu, (2009.7.13-7.16).
19. Eriko Ohta, Tomohiro Itoh, Tomomi Nemoto, Jiro Kumagai, Shigeru B.H. Ko, Kenichi Ishibashi, Mayuko Ohno, Keiko Uchida, Akihito Ohta, Shinichi Uchida, Sei Sasaki, Tatemitsu Rai, "Pancreas-specific aquaporin 12 null mice showed increased susceptibility to Caerulein-induced acute pancreatitis", The 36th Congress of the International Union of Physiological Sciences, Kyoto International Conference Center, Kyoto, Japan (2009.7.28-8.1)
20. 小澤 祐市、大津 暁彦、佐藤 俊一、「軸対称偏光レーザービームを用いた ZnSe(100)からの第 2 高調波発生」、第 70 回応用物理学会学術講演会、日本、富山、(2009.9.8-9.11)
21. 佐藤俊一、小澤祐市、中村貴宏、「軸対称偏光白色光の発生」、第 70 回応用物理学会学術講演会、富山、(2009.9.8-9.11)
22. 伊藤暁彦、小澤祐市、佐藤俊一、「反射率変調ミラーを用いた円筒対称レーザービームの発生 1. Laguerre-Gaussian beams」、第 70 回応用物理学会学術講演会、富山、(2009.9.8-9.11)
23. 伊藤暁彦、小澤祐市、佐藤俊一、「反射率変調ミラーを用いた円筒対称レーザービームの発生 2. Vector beams」、第 70 回応用物理学会学術講演会、富山、(2009.9.8-9.11)
24. Masato Sawada, Naoko Kaneko, Hiroaki Wake, Hiroyuki Inada, Yasuko Kato, Yuchio Yanagawa, Tomomi Nemoto, Junichi Nabekura and Kazunobu Sawamoto, "Sensory input-dependent remodeling of cell composition in the adult olfactory bulb glomeruli", 第 32 回日本神経科学大会、名古屋国際会議場、名古屋、(2009.9.16-9.18)
25. 米本和希、小澤祐市、佐藤俊一、「SESAM を用いた受動モード同期径偏光 Nd:YAG レーザー」、応用物理学会東北支部学術講演会、郡山、(2009.12.3-12.4)
26. 下平幸輝、小澤祐市、佐藤俊一、「利得分布制御された Yb:YAG セラミックレーザーからの高次横モード発振」、応用物理学会東北支部学術講演会、郡山、(2009.12.3-12.4)
27. 佐藤綾耶、齊藤恭介、横山弘之、「光パルス注入による青色 GaInN 半導体レーザーのキャリア寿命の評価」、第 57 回応用物理学会関係連合講演会、平塚、(2010.3.17-3.20)
28. 米本和希、小澤祐市、佐藤俊一、「利得分布を制御した Yb:YAG レーザーの高次横

- モード動作」、第 57 回応用物理学会関係連合講演会、平塚、(2010.3.17-3.20)
29. 下平幸輝,小澤祐市, 佐藤俊一、「利得分布を制御した Yb:YAG レーザーの高次横モード動作」、第 57 回応用物理学会関係連合講演会、平塚、(2010.3.17-3.20)
 30. 丹羽正人, 小澤祐市, 佐藤俊一、「六回対称な強度分布を持つ径偏光ビームの集光特性」、第 57 回応用物理学会関係連合講演会、平塚、(2010.3.17-3.20)
 31. 根本知己, 岸本拓哉, 大西通博, 鍋倉淳一 安田章夫「多光子励起法による初代培養肝細胞内CYP酵素活性の測定」日本薬学会第130回年会、岡山 (2010.3.28-3.30)
 32. 栗原誠, 齋藤友香, 田辺綾乃, 橋本信幸, 小澤祐市, 佐藤俊一, 日比輝正, 根本知己, 液晶偏光モードコンバータとレーザー顕微鏡への応用, 光学シンポジウム, 東京, 2010 年 7 月 8 日
 33. 田辺綾乃, 齋藤友香, 栗原誠, 橋本信幸, 小澤祐市, 佐藤俊一, 日比輝正, 根本知己:「レーザーSHG 顕微鏡による高分子分散液晶の観察」日本液晶学会講演会・討論会, 九州大学医学部百年講堂, 2010 年 9 月 5-8 日
 34. 丹羽正人, 小澤祐市, 佐藤俊一, 円環状の強度分布を持つ径偏光ビームの集光特性計算, 応用物理学会学術講演会, 長崎, 2010 年 9 月 14 日
 35. 小澤祐市, 佐藤俊一, 集光した直線偏光ビームの軸方向電場の第 2 高調波発生による観測, 円環状の強度分布を持つ径偏光ビームの集光特性計算, 応用物理学会学術講演会, 長崎, 2010 年 9 月 14 日
 36. 山岸和史, 小澤祐市, 佐藤俊一, 端面励起型 c-cut Nd:YVO₄ レーザー共振器からのベクトルビーム発生, 円環状の強度分布を持つ径偏光ビームの集光特性計算, 応用物理学会学術講演会, 長崎, 2010 年 9 月 16 日
 37. 日比輝正, 小澤祐市, 佐藤綾耶, 橋本信幸, 横山弘之, 佐藤俊一, 根本知己, 高次径偏光レーザービームを用いた超解像レーザー स्क्यान顕微鏡の開発, 日本生物物理学会年会, 仙台, 2010 年 9 月 20-22 日
 38. 加納顕, 小澤祐市, 佐藤俊一, 微小円形欠陥ミラーを用いた He-Ne レーザーからの Laguerre-Gaussian ビーム発振, 応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, 2010 年 11 月 26 日
 39. 竹内龍志, 小澤祐市, 佐藤俊一, 微小円形欠陥ミラーを用いた Nd:YVO₄ マイクロチップレーザーからの Laguerre-Gaussian ビーム発振, 応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, 2010 年 11 月 26 日
 40. Koki Shimohira, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Transverse Mode Control by a Crossing Pair of Linearly Pumped Regions in a Yb:YAG Ceramic Thin Disk, Advanced Solid State Photonics 2011, Turkey, Istanbul, (2011.2.13-2011.2.16)
 41. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Enhanced Detection of a Longitudinal Electric Field for a Linearly Polarized Gaussian Beam, Advanced Solid State Photonics 2011, Turkey, Istanbul, (2011.2.13-2011.2.16)
 42. Kazufumi Yamagishi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Generation of an Azimuthally Polarized Laser Beam from an End-pumped Laser Cavity with a c-cut Nd:YVO₄ Crystal, Advanced Solid State Photonics 2011, Turkey, Istanbul, (2011.2.13-2011.2.16)
 43. Shunichi Sato, Yuichi Kozawa, Takahiro Nakamura, Generation of White-Light Supercontinuum with Axially Symmetric Polarization, High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS), Turkey, Istanbul, (2011.2.16-2011.2.18)
 44. 陳少強, 吉田正裕, 望月敏光, 秋山英文, 横山弘之, Short pulse generation by gain switching in InGaAs QW ridge Laser under optical pumping, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟, 2011 年 3 月 25 日.
 45. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Self-Healing Property of Tightly

- Focused Vector Bessel-Gauss Beam, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
46. Sunil Vyas, Masato Niwa, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Self-Healing Property of Tightly Focused Vector Laguerre-Gauss Beam, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
 47. 小澤祐市, 佐藤俊一, 多重円環径偏光ビームを用いた共焦点レーザー顕微鏡における空間分解能の検討, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
 48. 小澤祐市, 佐藤俊一, 二重円環径偏光ビームによる光トラッピング法の開発, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
 49. 丹羽正人, 小澤祐市, 佐藤俊一, 二重円環径偏光ビームの焦点における強度分布の測定, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 25 日
 50. 山岸和史, 小澤祐市, 佐藤俊一, 端面励起型 c-cut Nd:YVO₄ レーザーからの方位偏光ビームの発生, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 26 日
 51. 加納頭, 小澤祐市, 佐藤俊一, 微小円形欠陥を有する He-Ne レーザー共振器からの Laguerre-Gauss ビームの発生, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 26 日
 52. 竹内龍志, 小澤祐市, 佐藤俊一, 微小円形欠陥を有する Nd:YVO₄ マイクロチップレーザー共振器からの Laguerre-Gauss ビームの発生, 春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 厚木, 2011 年 3 月 26 日
 53. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Dark Spot Trapping using a Double-Ring-Shaped Radially Polarized Beam, Optics in the Life Science (Optical Trapping Applications), United States, Monterey, (2011.4.4-2011.4.6)
 54. Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Resolution Enhancement in Confocal Scanning Microscopy by a Radially Polarized Beam with Phase Modulation, Optics in the Life Science (New Techniques in Microscopy), United States, Monterey, (2011.4.4-2011.4.6)
 55. M. Niwa, Y. Kozawa, S. Sato, Calculation of Focusing Properties of a Radially Polarized Beam with Annular Intensity Distribution, Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe, Germany, Munich, (2011.5.22-2011.5.26)
 56. S. Vyas, Y. Kozawa, S. Sato, Self-Healing of Vector Bessel-Gauss Beam in High Numerical Aperture Focusing, Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe, Germany, Munich, (2011.5.22-2011.5.26)
 57. S. Vyas, Y. Kozawa, S. Sato, Tight focusing of radially polarized Laguerre-Gaussian beam with spiral phase mask, 応用物理学会学術講演会, 山形, 2011 年 9 月 1 日
 58. 佐藤綾耶, 石橋孝介, 横山弘之, 青色発光 InGaN 量子井戸構造のサブミクロン空間分解能 PL イメージング, 応用物理学会学術講演会, 山形, 2011 年 9 月 1 日
 59. 陳少強, 吉田正裕, 伊藤隆, 横山冬矢, 金昌秀, 望月敏光, 福田圭介, 丸山俊, 秋山英文, 横山弘之, L. N. Pfeiffer, K. W. West, Wavelength-dependent short pulses generated by gain switching in optically pumped ridge quantum-well lasers, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 9 月 21 日 (予定).
 60. 上出健仁, 横山弘之, 陳少強, 吉田正裕, 秋山英文, 山口真, 小川哲生, 強励起利得スイッチング半導体レーザーの動的周波数シフト, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山, 2011 年 9 月 21 日 (予定).
 61. Ryushi Takeuchi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "Vector Bessel-Gaussian Beam Generation from a c-cut Nd:YVO₄ Crystal with an Annular-Shaped

- Gain”, Conference on Laser and Electro-Optics 2012, San Jose, USA, May 9, 2012
62. 佐藤綾耶, 横山弘之, 「1060nm 帯利得スイッチング半導体レーザーを用いた高ピークパワーピコ秒光パルスの発生」, 応用物理学会学術講演会, 松山, 2012年9月11日
 63. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Direct Generation of Scalar Doughnut Mode Beam from Internal Mirror He-Ne Laser”, 応用物理学会学術講演会, 松山, 2012年9月13日
 64. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Polarization Singularities in the Superposition of Vector Beams”, 応用物理学会学術講演会, 松山, 2012年9月14日
 65. Yusuke Okuhata, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Focusing property of tightly focused azimuthally polarized vortex beams”, Topological lightwave synthesis and its applications 2012, Chiba, Japan, July 5, 2012
 66. 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 「高次径偏光 Laguerre-Gauss ビームによる微小集光特性の検討」, 応用物理学会学術講演会, 松山, 2012年9月14日
 67. 奥畑佑介, 小澤祐市, 佐藤俊一, 「螺旋位相シフトを持つ方位偏光ビームの焦点における強度分布の測定」, 応用物理学会学術講演会, 松山, 2012年9月14日
 68. Ryosuke Kawakami, Kazuaki Sawada, Aya Sato, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, “Visualizing cortex and hippocampal pyramidal neurons in living mouse brain with in vivo two-photon microscopy using 1030 nm (high-peak-power) picosecond pulse laser”, G3 meeting International, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, Oct. 11, 2012
 69. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Tailoring of TwiSTED Longitudinally Polarized Field in Focal Region”, Frontiers in Optics 2012, Rochester, USA, Oct. 16, 2012
 70. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Generation of Robust Doughnut Mode Beam from Internal Mirror He-Ne Laser”, Frontiers in Optics 2012, Rochester, USA, Oct. 17, 2012
 71. 東海林辰也, 小澤祐市, 佐藤俊一, 「フォトリック結晶ミラーを用いたベクトルビームの発生と光ファイバー増幅」, 応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, 2012年12月6日
 72. 瀬川侑, 小澤祐市, 佐藤俊一, 「ベクトルビームを用いた差引法による共焦点レーザー顕微鏡の分解能の向上」, 応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, 2012年12月6日
 73. 奥畑佑介, 小澤祐市, 佐藤俊一, 「強く集光したベクトルビームによる Au ナノパタンのイメージング」, 応用物理学会東北支部学術講演会, 仙台, 2012年12月6日
 74. 佐藤 綾耶, 小澤 祐市, 草間 裕太, 佐藤 俊一, 横山 弘之, 「青色発光 InGaN 量子井戸構造上のナノパターンを用いた超解像イメージング」, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013年3月28日
 75. Yuliati Herbani, Yuichi Kozawa, Takahiro Nakamura, Shunichi Sato”, “Polarization Effect on Silver Nanolines Fabricated by Multiphoton-induced Reduction”, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013年3月29日
 76. 奥畑 佑介, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 「Au ナノパターンを用いたベクトルビームの集光特性評価」, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013年3月30日
 77. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Detailed Studies on Optical Singularities in the Superposition of two Vector Laguerre-Gaussian Beams”, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013年3月30日
 78. 東海林 辰也, 小澤 祐市, 佐藤 俊一, 「フォトリック結晶ミラーを用いた径偏光ビームの発生と光ファイバー増幅」, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013年3

月 30 日

79. 瀬川侑, 小澤祐市, 佐藤俊一, 「ベクトルビームを用いた差引法による 共焦点レーザー顕微鏡の空間分解能の向上」, 応用物理学会春季学術講演会, 厚木, 2013 年 3 月 30 日
80. Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Analysis of small focal spot formation by a higher-order radially polarized beam”, Optics in the Life Sciences, Hawaii, USA (2013.4.14)
81. 佐藤俊一、覚醒する光波の潜在能力とイメージング、CREST・さがけ光科学技術合同シンポジウム 進化する光イメージング技術, 東京, (2013.6.20)
82. Tomomi Nemoto, Ryosuke Kawakami, Kazuaki Sawada, Terumasa Hibi Yuta Kusama, Hiroyuki Yokoyama, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, "Improvement of resolution and penetration depth of two-photon microscopy with novel lasers, 2nd BioPhotonics Conference, National Taiwan University, Taipei, July 18, 2013.
83. H. Yokoyama, Y. Kusama, and M. Yokoyama, “Two-Photon Microscopy with Picosecond Light Pulse Sources Employing Gain-Switched Laser Diodes,” BioPhotonics 2013, Taipei, Taiwan, Jul. 2013.
84. 横山正史, 田辺綾乃, 松本健志, 栗原誠, 橋本信幸, 日比輝正, 一本嶋佐理, 根本知己, 「レーザー共焦点顕微鏡用液晶光学補正モジュールの開発」日本時計学会 2013 年度マイクロメカトロニクス学術講演会、中央大学理工学部、東京、2013 年 9 月 10 日
85. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Generation of a radially polarized Bessel-Gaussian beam from c -cut Nd:YVO₄ laser”, 応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 16 日
86. 小澤祐市、草間祐太、横山弘之、佐藤俊一、「青色発光 InGaN 量子井戸構造の STED 超解像イメージングにおける脱励起光中空ビームの位相変調効果」応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 17 日
87. 横山雅美、草間祐太、川上良介、小澤祐市、佐藤俊一、根本知己、横山弘之、「1□m 帯利得スイッチング LD ベースの高機能光源による 2 光子イメージング」応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 17 日
88. 瀬川侑、小澤祐市、佐藤俊一、「ベクトルビームを用いた差引法による共焦点レーザー顕微鏡の空間分解能向上効果の検証」応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 18 日
89. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Polarization singularities in a superposition of counter-propagating vector beams”, 応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 18 日
90. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Rotating longitudinally polarized field in the focal region”, 応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 18 日
91. 草間裕太, 横山弘之「1060 nm 帯利得スイッチング半導体レーザーからの 7 ps 時間幅光パルスの発生」応用物理学会秋季学術講演会、京田辺、2013 年 9 月 19 日.
92. Shunichi Sato, “Novel light field generation by controlling polarization, phase and polarization distributions,” RIEC-RLE Meeting, Boston, USA, Oct. 1, 2013
93. 金澤信哉、小澤祐市、佐藤俊一、“Yb ダブルクラッドファイバーを用いた径偏光ビームの増幅による高出力化の検討”、応用物理学会東北支部学術講演会、山形大学、米沢、2013 年 12 月 6 日
94. 瀬川侑、小澤祐市、佐藤俊一、“ベクトルビームを用いた差引法による空間分解能評価”、応用物理学会東北支部学術講演会、山形大学、米沢、2013 年 12 月 6 日
95. 大友康平、日比輝正、小澤祐市、横山弘之、佐藤俊一、根本知己, ”透過型液晶デ

バイスを用いた二光子 STED 顕微鏡の開発”、第4回 vivid workshop, 2014 年 2 月 21-22 日

96. 大友康平、日比輝正、小澤祐市、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、“透過型液晶デバイスを用いた二光子 STED 顕微鏡の開発”、ベクトルビームの光科学とナノイメージング研究会、ホテル大観荘、松島市、2014 年 2 月 28 日
97. 川上良介、澤田和明、日比輝正、小澤祐市、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、“新規 1 μ m 光源を用いた生体脳深部イメージング”、ベクトルビームの光科学とナノイメージング研究会、ホテル大観荘、松島市、2014 年 2 月 28 日
98. 一本嶋佐理、洞内響、日比輝正、小澤祐市、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、“HRP ビームを用いた2光子顕微鏡の高解像化”、ベクトルビームの光科学とナノイメージング研究会、ホテル大観荘、松島市、2014 年 2 月 28 日
99. 根本知己、日比輝正、川上良介、大友康平、一本嶋佐理、澤田和明、洞内響、“HRP ビームを用いた2光子顕微鏡の高解像化”、ベクトルビームの光科学とナノイメージング研究会、ホテル大観荘、松島市、2014 年 2 月 28 日
100. 小澤祐市、佐藤俊一、「ベクトルビームを用いた共焦点レーザー顕微鏡における光学伝達関数の評価」、応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日
101. 瀬川侑、小澤祐市、佐藤俊一、「ベクトルビームを用いた差引法の生体試料への適用」、応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日
102. 角剛、小澤祐市、佐藤俊一、「c 軸カット Nd:YVO₄ レーザー共振器からの高次ベクトルベッセルガウスビームの発生」、応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日
103. 佐藤拓海、小澤祐市、佐藤俊一、「高速スキャナーを用いた利得分布制御による Yb:YAG レーザー共振器からの高次単一横モードビームの発生」、応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 17 日
104. 金澤信哉、小澤祐市、佐藤俊一、「光ファイバー増幅による径偏光ビームの高出力化」、応用物理学会春季学術講演会、青山学院大学相模原キャンパス、2014 年 3 月 18 日

③ ポスター発表 (国内会議 8 件、国際会議 7 件)

1. T. Hibi, Y. Kozawa, A. Sato, H. Yokoyama, S. Sato and T. Nemoto, “Enhancement of lateral resolution of confocal and two-photon laser scanning microscopy by using higher-order radially polarized laser beams,” Focus On Microscopy Conference, Shanghai, China (2010. 3. 28-3.31)
2. T. Hibi, Y. Kozawa, A. Sato, H. Yokoyama, S. Sato and T. Nemoto, “Enhancement of lateral resolution of confocal and two-photon laser scanning microscopy by using higher-order radially polarized laser beams, The 16th Takeda Science Foundation symposium on Bioscience, Dec 1-3, 2010
3. 一本嶋佐理、日比輝正、小澤祐市、洞内響、佐藤綾耶、栗原誠、橋本信幸、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、ポスター発表「高次径偏光ビームによる超解像イメージング」第 20 回日本バイオイメージング学会学術集会、千歳科学技術大学、2011 年 9 月 2 日
4. S. Ipponjima, T. Terumasa, Y. Kozawa, H. Horanai, A. Sato, M. Kurihara, N. Hashimoto, H. Yokoyama, S. Sato, T. Nemoto, “Improvement of the spatial resolution in two-photon microscopy with a vector beam generated by liquid crystal devices”, Focus On Microscopy, Singapore, Republic of Singapore, Apr. 1-4, 2012
5. 紅林 広亮, 中尾 恵, 杉浦 忠男, 佐藤 哲大, 川上 良介, 根本 知己, 湊 小太郎,

「特微量空間を用いた二光子顕微鏡画像のボリューム可視化」生体医工学シンポジウム 2012、大阪大学、豊中、2012 年 9 月 7 日

6. 川上良介、澤田和明、佐藤綾耶、日比輝正、小澤祐市、佐藤俊一、横山弘之 “in vivo two-photon microscopy with a 1030 nm (high peak power) picosecond-pulse laser visualizing hippocampal pyramidal neurons in mouse brain”、第 35 回日本神経科学大会、名古屋国際会議場、名古屋、2012 年 9 月 19 日
7. 一本嶋佐理、日比輝正、小澤祐市、洞内響、佐藤綾耶、栗原誠、橋本信幸、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、“二光子顕微鏡における HRP ビームを使った高分解能イメージング”日本化学会、第 27 回生体機能関連化学部会若手フォーラム、北海道大学、札幌、2012 年 9 月 5 日
8. Ryosuke Kawakami, Kazuaki Sawada, Aya Sato, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, “In vivo two-photon microscopy with a 1030 nm (high-peak-power) picosecond-pulse laser to visualize the cortex and hippocampal pyramidal neurons in H-Line mice”, Society for Neuroscience, New Orleans, USA, Oct. 13-17, 2012
9. 澤田和明、川上良介、根本知己, “Optimization of laser illumination in two-photon microscopy for in vivo deep imaging in the mouse”, 第36回日本神経科学大会、国立京都国際会館、京都、2013 年 6 月 21 日
10. 田辺綾乃、横山正史、松本健志、栗原誠、橋本信幸、日比輝正、一本嶋佐理、根本知己、「レーザー顕微鏡用液晶収差補正素子の開発」第 22 回日本バイオイメージング学会学術集会、東京大学、東京、2013 年 9 月 14 日
11. 小澤祐市、佐藤俊一、“高次径偏光ビームによる微小集光スポット形成と高分解能レーザー顕微鏡への応用”、第 1 回アライアンス若手研究交流会、東北大学、仙台、2013 年 11 月 25 日
12. 大友康平、日比輝正、小澤祐市、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、“透過型液晶デバイスをを用いた二光子 STED 顕微鏡の開発”、第 1 回アライアンス若手研究交流会、東北大学、仙台、2013 年 11 月 25 日
13. Risa Ito, Terumasa Hibi, Tomomi, “Fluorescent spectroscopic imaging of epidermal structure with solvatochromic dye”, RIES international symposium 2013, Hotel Châteraisé Gateaux Kingdom Sapporo, Sapporo, Dec. 11, 2013
14. Y. Kusama, Y. Tanushi, M. Yokoyama, R. Kawakami T. Hibi, Y. Kozawa, T. Nemoto, S. Sato, H. Yokoyama, “Novel light pulse source for two-photon microscopy based on a 1064-nm gain-switched laser diode,” 2nd DYCE-ASIA Workshop, Kashiwa, Dec. 18, 2013.
15. Yuichi Kozawa, Yuta Kusama, Hiroyuki Yokoyama, Shunichi Sato, “Super-resolution imaging of a blue InGaN quantum well by STED microscopy,” 2nd DYCE-ASIA Workshop, Kashiwa, Dec. 18, 2013.

(4)知財出願

①国内出願 (5 件)

1. 光ビーム増幅方法および光ビーム増幅装置、佐藤俊一、小澤祐市、中鉢達也、国立大学法人東北大学、平成 21 年 7 月 31 日、特願 2008-307852、特許 5299959
2. 光ビーム発生方法および光ビーム発生装置、佐藤俊一、小澤祐市、国立大学法人東北大学、平成 21 年 9 月 16 日、特願 2009-213866、特許 5464415
3. 顕微鏡装置、佐藤俊一、小澤祐市、横山弘之、根本知己、日比輝正、橋本信幸、栗原誠、独立行政法人科学技術振興機構、シチズンホールディングス株式会社、平成 22 年 2 月 26 日、特願 2010-042763

4. 半導体レーザー装置および非線形光学効果利用機器、横山弘之、国立大学法人東北大学、平成 24 年 1 月 31 日、特願 2012-018769
5. イメージングの方法と顕微鏡、佐藤俊一、小澤祐市、国立大学法人東北大学、平成 24 年 11 月 29 日、特願 2012-260448

②海外出願 (1 件)

1. Microscope device, optical pickup device, and light irradiation device, Shunichi Sato, Yuichi Kozawa, Hiroyuki Yokoyama, Tomomi Nemoto, Terumasa Hibi, Nobuyuki Hashimoto, Makoto Kurihara, Japan Science And Technology Agency, Citizen Holdings Co., Ltd., 24. 2. 2011, PCT/JP2011/054819

(5)受賞・報道等

①受賞

1. 橋本信幸、齋藤友香、田辺綾乃、栗原誠、小澤祐市、佐藤俊一、日比輝正、根本知己、光学設計奨励賞、軸偏光超解像スポット生成用液晶ベクトルビーム素子の設計、日本光学会(2010.11.10)
2. 一本嶋佐理、日比輝正、小澤祐市、洞内響、佐藤綾耶、栗原誠、橋本信幸、横山弘之、佐藤俊一、根本知己、ベストイメージ賞、高次径偏光ビームによる超解像イメージング、第20回日本バイオイメージング学会学術集会(2011.9.2.)
3. 小澤祐市、科学計測振興賞、ベクトルビームによる超解像レーザー顕微鏡の開発、科学計測振興基金(2013.12.6)

②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 根本知己:中日新聞(平成 20 年 11 月 2 日朝刊)に研究内容に関する記事が掲載された。
2. 日経産業新聞、日刊工業新聞(平成 21 年 4 月 7 日朝刊)、科学新聞(平成 21 年 4 月 10 日)に Nature Methods 発表成果に関する記事が掲載された。
3. 科学新聞(平成 21 年 12 月 4 日)に、第 32 回日本分子生物学会年会でオーガナイズするワークショップについての記事が掲載された。
4. プレスリリース(平成 24 年 12 月 21 日、北海道大学および東北大学から)新規に開発したレーザー光源を用いてマウス脳の海馬を *in vivo* で観察したことを発表。
5. 読売新聞、脳内部を生体観察、2013 年 1 月 25 日
6. 北海道新聞、脳の海馬内部まで監察、2013 年 1 月 25 日
7. 科学新聞、世界初生きた脳深部の海馬を「そのまま」観察、2013 年 2 月 8 日
8. 北海道医療新聞、生きた「海馬」観察に成功、2013 年 2 月 8 日
9. 熊本日日新聞、「記憶の要を可視化」、2013 年 2 月 20 日
10. Nature Publishing Group-ネイチャーアジア・パシフィックウェブサイト、「注目の論文」。2013 年 3 月

§6 研究期間中の活動

6.1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2009 年 12 月 12 日	第 32 回日本分子生物学会年会・ワークショップ「インビボ分子生物学～光技術を駆使した新	パシフィコ横浜	200 名	レーザーや可視化技術の飛躍により進展する最新の生きた動物中での分子解析についてワークショップをオーガナイ

	「たな分子生物学～」			ズした(北大グループ)
2010年5月20日	第87回日本生理学会大会シンポジウム “Exocrine protein secretion and signal transduction”	アイーナ・いわて県民情報交流センター	100人	タンパク質外分泌と細胞内シグナルについての総合的なシンポジウム(北大グループ)
2012年12月13-14日	第13回北海道大学電子科学研究所国際シンポジウム	ホテル シャトレーザガトーキングダム サッポロ	200人	律というテーマで国内外の研究者らを招いたシンポジウム
2013年1月25日	日本分光学会生細胞分光部会平成24年度シンポジウム	北海道大学電子科学研究所	50人	生きた細胞をあるがままにその場計測する新しい手法の開発を目指したシンポジウム
2013年6月20日	CREST・さきがけ光科学技術合同シンポジウム 進化する光イメージング技術	東京大学一条ホール	約150人	覚醒する光波の潜在能力とイメージングについて発表
2014年2月27-28日	ベクトルビームの光科学とナノイメージング研究会	ホテル松島大観荘	27人	ベクトルビームの光科学とナノイメージングに関する最先端研究に関する討論会
2011年3月3,4日	チーム間ミーティング(非公開)	愛媛大学	約25人	今村チームと共同研究を模索するためのミーティング
2008年～現在	チーム内ミーティング(非公開)	東北大学等		研究チームの進捗状況報告など。計44回

§7 最後に

