

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00871

研究課題名(和文)デュアル光コム顕微鏡の開発～光コムは共焦点顕微鏡に革新的進展をもたらすか？～

研究課題名(英文)Dual-comb microscopy-Will optical frequency combs bring innovative advances to confocal microscopy?~

研究代表者

安井 武史 (YASUI, Takeshi)

徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・教授

研究者番号：70314408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：共焦点顕微鏡は、レーザーを光源として、バイオイメージングや非接触表面形状測定において幅広く利用されている。応用分野拡大のために、更なる高度化が求められているが、従来法の延長上にある性能改善のみでは限界があった。本研究では、次世代レーザーとして期待されている最先端光源「光コム」を導入し、これまでの『光周波数の物差し』として利用するのではなく、新奇特徴である『超マルチ離散チャンネル性』を、波長/2次元空間変換とデュアル光コム計測の併用でフル活用することにより、共焦点顕微鏡の大幅な高度化(スキャンレス高速性、フルフィールド共焦点性、光振幅・光位相デュアル画像コントラストなど)を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発したデュアル光コム顕微鏡により、表面形状測定(工業製品の微細化に必要なnmオーダーの深さ分解能)、透明・非蛍光性サンプル計測(ガラス部品や生細胞などの透明・非蛍光性に帯するイメージ・コントラスト)、細胞内部の時空間ダイナミクス観察(細胞内の分子や細胞小器官のダイナミクス対応可能な高速性)、といった事が可能になる。

研究成果の概要(英文)：Confocal microscopy, widely used for bioimaging and non-contact surface shape measurement, utilizes laser as the light source. Further advancements are sought for its expanded application areas, as performance improvements based on conventional methods alone have limitations. In this study, we introduced the state-of-the-art light source "optical comb" that is expected to be the next-generation laser. Instead of utilizing it as a "ruler of optical frequency" as done previously, we fully utilized its novel feature of "ultra-multi discrete channel nature" by combining wavelength/2D spatial conversion and dual optical comb measurements. This led to significant advancements in confocal microscopy, including scanless high-speed capability, full-field confocality, and dual image contrast of optical amplitude and phase.

研究分野：光工学

キーワード：光コム 共焦点顕微鏡 蛍光寿命顕微鏡 レーザー顕微鏡 スキャンレス

1. 研究開始当初の背景

共焦点顕微鏡 (CLM) [1]では、レーザー光を対物レンズによって測定対象物に点集光し、その拡散反射光や蛍光を焦点と共役な位置に配置された共焦点ピンホールに通して光検出することで、焦点以外で拡散反射した光や迷光をカットし、ある特定の深さの情報だけを選択的に抽出することができる。これにより、3次元イメージを得ることが可能になるため、非接触表面形状測定やバイオイメーキングの分野で広く使われている。CLMは点計測に基づいているため、画像取得には、共焦点ピンホールと共役な光学配置を維持しながら焦点位置を機械的に走査する必要がある。これまでに、ガルバノミラー[2]やポリゴンミラー[3]などの利用により、毎秒10フレーム程度のフレームレートが実現されているが、例えば高速現象や細胞内部ダイナミクスの観測には必ずしも十分でない。また、従来のCLMで得られる画像のコントラストは光強度に基づいているため、無色透明性や非蛍光性の測定対象物(細胞、ガラスなど)、あるいはサブ波長オーダー段差構造を有する反射物体の観測には向いていない。

共焦点イメージングを高速化する直接的なアプローチは、機械的走査機構の高速化である。例えば、共振型ガルバノミラー[4]やMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)ミラー[5]の利用により、毎秒100フレーム程度の高速化が可能である。更に、回転ニポウディスク方式では、マイクロレンズアレイディスクとピンホールアレイディスクの二対のディスクを高速回転させることで、毎秒1000フレーム程度までの高速化が実現されている[6]。しかし、これらの高速機械走査は、振動などの環境外乱に弱いため、実験室のような安定な測定環境が必要になる。共焦点イメージングを高速化するもう一つのアプローチは、スキャンレスイメージングの導入である。例えば、ライン照射型CLMでは、測定対象に対してレーザー光をライン照射し、それと共役な位置に共焦点スリットを配置して、カメラでラインイメージ取得を行うことにより、1次元のスキャンレス化が可能になる[7]。また、1次元スペクトルエンコーディング型CLM(1D-SE-CLM)では、波長分散素子で生成した虹色ビームをサンプルにライン集光してラインイメージ情報をスペクトルに重畳し、共焦点ピンホール通過光をスペクトル計測することにより、スキャンレスラインイメージングを可能にする[8]。更に、ライン照射型CLMと1D-SE-CLMを直交配置で融合することにより、2次元スキャンレスCLMが可能であるが、フレームレートは取り込みカメラの性能によって制限される[9]。2次元スペクトルエンコーディング型CLM(2D-SE-CLM)では、2次元波長分散素子で生成した2次元虹色ビームをサンプルにエリア照射して、イメージ情報をスペクトルに重畳し、共焦点ピンホール通過光をスペクトル計測することにより、スキャンレス2次元イメージングを可能にする[10]。2D-SE-CLMにより、毎秒1000フレーム以上の高速化がスキャンレスで可能になっているが、いずれの手法も画像コントラストは光強度に基づいている。もし、2D-SE-CLMに光位相コントラストを付与することが出来れば、無色透明性/非蛍光性の測定対象物や、サブ波長オーダーの段差構造を有する反射物体の計測が可能になり、CLMの応用範囲が更に広がると期待される。

2. 研究の目的

本研究では、2D-SE-CLMに光位相コントラストを付与する光源として、光周波数コム(光コム)[11]に着目する。光コムは、多数の光周波数モード列が繰り返し周波数(f_{rep})間隔で櫛の歯状に立ち並んだスペクトル構造を有し、周波数安定化制御によって、周波数標準にトレーサブルな光周波数の物差しとして利用することができる。更に、デュアル光コム分光法[12]を用いると、光コムのモード分解振幅スペクトルとモード分解位相スペクトルを、高速かつ高精度に取得できる。ここで、次元変換によって2次元空間情報をモード分解光コムスペクトルに重畳すると(次元変換光コム)、共焦点振幅イメージと共焦点位相イメージを同時に取得することができる。

本研究では、光コムの『超マルチ離散チャンネル性』という新奇特徴を、波長/2次元空間変換とデュアル光コム計測の併用でフル活用することにより、従来とは本質的に異なるアプローチで高度化されたデュアル光コム顕微鏡(DCM)を創出する。スキャンレス高速性、フルフィールド共焦点性、光振幅・光位相のデュアル画像コントラストを特徴したDCMを構築する。これにより、共焦点レーザー顕微鏡の性能を高度化する[13-16]。

3. 研究の方法

光コムの超離散マルチ・スペクトル構造は、「光周波数の物差し」としてだけでなく、「数十万の離散チャンネルを有する光キャリア」と見立てることも出来る。この光コムの新奇特徴『超マルチ離散チャンネル性』を、『次元変換』と融合すると、多種多様な物理量の一括・高速測定が可能になる。このような概念に基づいた次元変換光コムの概念図を図1に示す。まず、被測定物理量(例えば、空間)を、次元変換を介して光周波数(波長)へ変換し、光コムのスペクトルに重畳させる。ここで、光コムは圧倒的多数の離散チャンネル(光周波数モード列)を有する光キャリアであるので、膨大な量の被測定量を、独立かつ離散的に個々のコム・モードにスペクトル重畳できる。そして、デュアル光コム分光法を用いると、高速かつ正確にモード分解光コムスペクトルを取得することが可能であるので、次元変換された被測定量を、モード分解光コムスペク

トルから読み出すことにより、大量の情報を高速に一括取得できる。この場合、コムモード数がサンプリング点数に相当し、その点数は数万～数十万にも及ぶ。また、個々の光コム・モードの線幅はコム間隔や光コムスペクトル帯域に対して極めて狭いので、極小幅でクロストークの無い離散サンプリングが可能になる。更に、コム・モード間隔は周波数標準によって担保されているので、極限のサンプリング等間隔性が実現できる。

我々は、これまでに、次元変換光コム of 原理検証として、デュアル光コム顕微鏡を提案した。ここでは、波長/2次元空間変換を用いることにより、各光コムモードが2次元空間に展開された2次元スペクトログラフを生成する(図2)。この2次元スペクトログラフを2次元焦点群として照射することにより、サンプルのイメージ情報が光コムにスペクトル重畳され、コムモードとイメージ画素が1対1対応するので、フルフィールドイメージをモード分解光コムスペクトルから一括取得(スキャンレス・イメージング)することが出来る。また、共焦点光学系の導入により、フルフィールドイメージに共焦点性を付与できる。

このようにしてイメージ情報が重畳された光コム(イメージ転写光コム)に関して、デュアル光コム分光法を用いて、光振幅と光位相のモード分解光コムスペクトルを取得する(図3)。最終的に、コムモードとイメージ画素の1対1対応関係に基づいて、スペクトルから画像化することにより、共焦点光振幅イメージと共焦点光位相イメージの取得が可能になる。

4. 研究成果

図4に実験装置の概略図を示す。光源には、狭線幅のCWレーザーを介することによって高精度に相対ロック制御された測定用光コム(中心波長1550 nm, 繰り返し $f_{rep1} = 100,000,000$ Hz)及び参照用光コム(中心波長1550 nm, 繰り返し $f_{rep2} = f_{rep1} + \Delta f_{rep} = 100,001,234$ MHz)を用いている。測定用光コムから出射した光は、バンドパスフィルターによって帯域制限がかけられた後、ピンホールを通過することによって点光源化される。ビームスプリッターを通過した成分は、シリンドリカルレンズによって線集光され、VIPA(FSR = 15 GHz、フィネス = 110)と回折格子(1200 lp/mm)からなる2次元波長/空間変換素子に入射する。これにより、個々のコムモードが異なる角度で2次元空間分散されたレインボービームが生成され、リレーレンズと対物レンズ(NA=0.25)を経て、2次元の焦点スポット群としてサンプル上に照射される。この際に、反射/吸収/散乱または位相変化といったサンプルの光学特性空間分布は、スペクトル変調されて測定用光コムにエンコードされる。サンプルから戻ってきた光は、逆方向から同一の2次元波長/空間変換素子を通過することにより、空間的に分散したそれぞれのコムモードは再び重ね合わせられる。ビームスプリッターによって反射した成分は、共焦点性付与のためのピンホールを通過した後、デュアル光コム分光のための参照用光コムと空間的に重ね合わせられ、発生したインターフェログラムをフォトディテクターと高速デジタイザー(サンプリング周波数= f_{rep2})によって計測する。このインターフェログラムをフーリエ変換することによって得られた振幅・位相スペクトルとイメージ画素の1対1対応関係を用いて、共焦点振幅および位相イメージを取得する。

はじめに、テストチャートを測定対象に用いて本手法の原理確認実験を行った。用いたテストチャートは、ガラス基板の上にテストパターン反射クロムコート(厚さ約100 nm)が施されているポジティブタイプであり、パターンに対応した反射率(振幅)および表面凹凸が空間分布している。図5(a)および図5(b)は、パターン構造がない全反射部分におけるモード分解光振幅スペクトルとモード分解光位相スペクトルをそれぞれ示している。スペクトル帯域は192.8 THzから194.3 THzまでの1.5 THzであり、 $f_{rep} = 100$ MHzであることから、15000本のコムモードから構成されている。ここで、図5(a)の光振幅スペクトルにおける微細構造は、VIPAの共鳴透過ピークを示している。次に、チャート構造が存在する部分におけるモード分解光振幅スペクトルとモード分解光位相スペクトルを、図5(c)および図5(d)に示す。図5(a)と図5(c)の光振幅スペクトルの比較から、図5(c)のチャート構造がある部分では、構造を反映してスペクトルに変調がかかっていることが確認できる。同様に、図5(b)と図5(d)の光位相スペクトルの比較からも、チャート構造を反映して、光位相スペクトルに変調されていることが分かる。

測定SN比が良好な12382本のコムモードを抽出した後、コムモードとイメージ画素が1対1対応関係に基づいて、イメージの再構成を行った結果を図5(e)と図5(f)に示す。画像のピクセル数は、コムモード本数と等しく、 82×151 ピクセルで構成されている。図5(e)が共焦点光振幅イメージ、図5(f)が共焦点光位相イメージにそれぞれ対応している。これらの画像の面内空間分解能は回折限界によって制限されており、実測値は理論値(回折限界)と良く一致した。共焦点光振幅イメージと共焦点光位相イメージのどちらにおいても、テストチャートの構造を反映した結果が得られていることを確認できた。しかし、イメージコントラストのメカニズムは両者で異なり、図5(e)はサンプル反射率を反映しているのに対し、図5(f)はサンプル表面形状を反映している。図5(f)の位相分布は、テストチャート反射クロムコートの膜厚に良く一致していた。100回の共焦点位相イメージを計測し、同一ピクセルにおける位相値の標準偏差を位相分解能と定義すると、位相分解能は 0.028 rad ($=\lambda/224$)であった。これは、 3.5 nmの高さ測定分解能に対応している。

次に、共焦点特性の評価を行った。ここでは、テストチャートの位置を光軸方向に走査しながら共焦点光振幅イメージを取得した。その時の深さプロファイルが図5(g)であり、良好な共焦点特性が得られている。深さ分解能は $61\mu\text{m}$ となり、理論値と良く一致した。

共焦点光位相イメージングにおける高い深さ分解能の有償性を実証するため、表面プロファイロメトリーへの応用例を示す。ここでは、nm オーダーの3段階ステップ形状サンプルを計測した。取得した共焦点光振幅イメージ及び共焦点光位相イメージを図 6(a)及び図 6(b)に示す。図 6(a)の共焦点光振幅イメージでは、共焦点性による深さ分解能 ($61\mu\text{m}$) が不十分なため nm 段差を分解すること出来ておらず、エッジ部分のみが光散乱によりコントラストが得られている。一方、図 6(b)の共焦点光位相イメージでは、nm 段差を反映した位相分布を取得できている。この共焦点光位相イメージから算出した3次元形状を図 6(c)に示す。取得された表面形状は、原子間力顕微鏡で取得した結果とよく一致していた。ここで、nm~サブ μm の深さ範囲は共焦点位相イメージで、 μm 以上の深さ範囲は共焦点振幅イメージで取得できるので、両者をシームレスに接続することにより、深さ計測のダイナミックレンジを大幅に拡大することが可能になると考えられる。

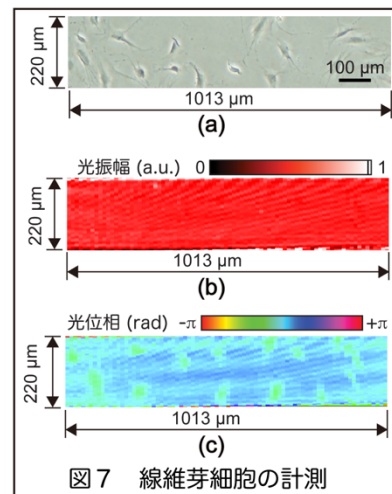
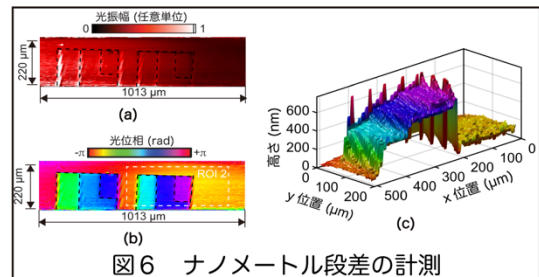
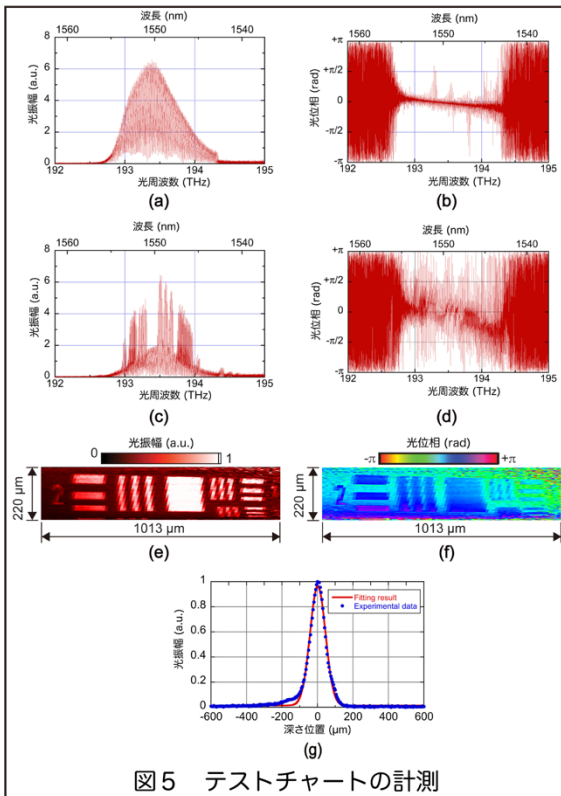
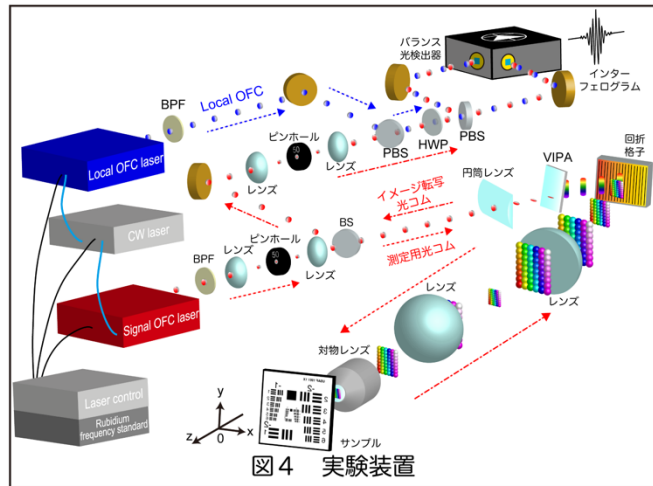
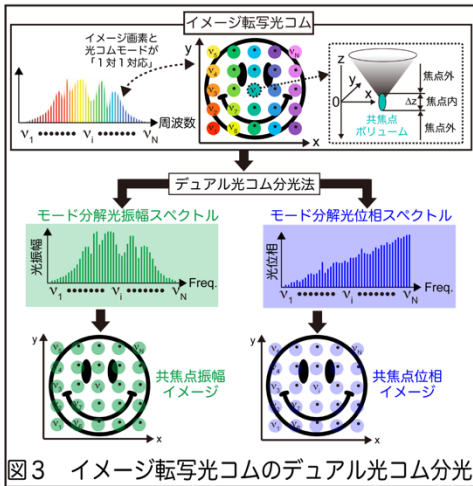
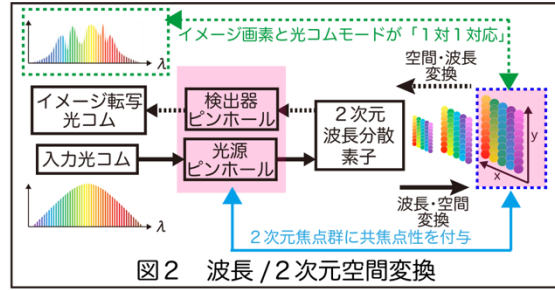
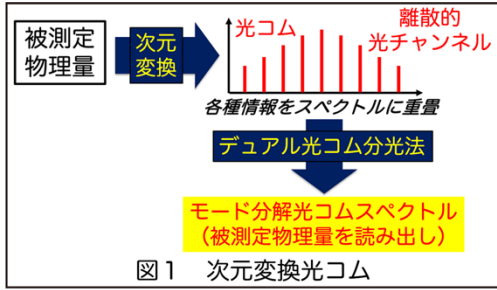
共焦点光位相イメージングによる透明物体の可視化デモンストレーションとして、線維芽細胞の計測を行った。はじめに、細胞接着たんぱくでコートしたスライドガラス上に細胞を播種し、位相差顕微鏡で観察した際の結果を図 7(a)に示す。イメージから、視野内において細胞が点在している様子が確認できる。金コートしたスライドガラス上に同様の密度で細胞を播種して計測を行った。まず、図 7(b)の共焦点光振幅イメージでは、イメージコントラストは光振幅に基づくことから、光強度で画像化する従来 CLM と同様、視野内において何も構造が確認できておらず、細胞のような透明物体の測定は困難であることが分かる。一方、図 7(c)の共焦点光位相イメージでは、細胞の光学的厚さによって、イメージにコントラストが付与されている。共焦点位相イメージで可視化された構造は、図 7(a)の位相差顕微鏡を用いた場合のイメージと類似していることから細胞の輪郭が可視化出来ていると考えられ、本手法によって共焦点性を付与しながら透明物体の計測が可能であることが確認できた。

先進的な光計測の推進力は言うまでもなく光源であり、極限的あるいは革新的性能を有する最先端光源が新しい光計測や光応用を切り拓く。『光周波数の物差し』として 1999 年の発明後わずか 6 年でノーベル物理学賞に至った光コムは、まぎれもなく最先端光源である。今回紹介した「次元変換光コム」は、光計測に計測対象の多様性、高速性あるいは高機能性を付与する。このような新しい研究ベクトルを光コムに持たせることができれば、『次世代のレーザー』として、光計測に新しい局面を展開することが可能になると期待される。次世代のレーザーとして、我々がいま現在は想像もできないエポックメイキングなイノベーションや技術を創出していくためには、様々な分野のフォトニクス研究者が手軽に光コムを使える環境が必要不可欠であり、単純・小型・低価格な実用的光コム光源が強く望まれる。幸いにも、この要求は最先端の光コム光源により満たされつつある。将来、様々な分野で利用されてきたレーザーを、光コムに置き換えることにより、我が国が得意とする光産業が刷新され再び活性化することを願う。

- [1] C. J. Sheppard and D. M. Shotton, *Confocal laser scanning microscopy* (BIOS Scientific Publishers, Oxford, 1997).
- [2] S. W. Paddock, "Confocal laser scanning microscopy," *BioTech.* **27**, 992 (1999).
- [3] S. Choi, P. Kim, R. Boutilier, M. Y. Kim, Y. J. Lee, and H. Lee, "Development of a high speed laser scanning confocal microscope with an acquisition rate up to 200 frames per second," *Opt. Express* **21**, 23611-23618 (2013).
- [4] J. Cushion, F. N. Reinholz, and B. A. Patterson, "General purpose control system for scanning laser ophthalmoscopes," *Clin. Exp. Ophthalmol.* **31**, 241-245 (2003).
- [5] D. Lellouchi, F. Beaudoin, C. Le Touze, P. Perdu and R. Desplats, "IR confocal laser microscopy for MEMS technological evaluation," *Microelectronics Reliability* **42**, 1815-1817 (2002).
- [6] T. Tanaami, S. Otsuki, N. Tomosada, Y. Kosugi, M. Shimizu, and H. Ishida, "High-speed 1-frame/ms scanning confocal microscope with a microlens and Nipkow disks," *Appl. Opt.* **41**, 4704-4708 (2002).
- [7] Y. S. Sabharwal, A. R. Rouse, L. Donaldson, M. F. Hopkins, and A. F. Gmitro, "Slit-scanning confocal microendoscope for high-resolution in vivo imaging," *Appl. Opt.* **38**, 7133-7144 (1997).
- [8] G. J. Tearney, R. H. Webb, and B. E. Bouma, "Spectrally encoded confocal microscopy," *Opt. Lett.* **23**, 1152-1154 (1998).
- [9] E. Hase, T. Minamikawa, S. Miyamoto, Y. Mizutani, T. Iwata, H. Yamamoto, and T. Yasui, "Application of scan-less two-dimensional confocal microscopy based on a combination of confocal slit with wavelength/space conversion," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **25**, 7101407 (2019).
- [10] K. K. Tsia, K. Goda, D. Capewell, and B. Jalali, "Simultaneous mechanical-scan-free confocal microscopy and laser microsurgery," *Opt. Lett.* **34**, 2099-2101 (2009).
- [11] Th., Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature* **416**, 233-237 (2002).
- [12] I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica* **3**, 414-426 (2016).
- [13] E. Hase, T. Minamikawa, T. Mizuno, S. Miyamoto, R. Ichikawa, Y.-D. Hsieh, K. Shibuya, K. Sato, Y. Nakajima, A. Asahara, K. Minoshima, Y. Mizutani, T. Iwata, H. Yamamoto, and T. Yasui, "Scan-less confocal phase imaging based on dual-comb microscopy," *Optica* **5**, 634-643 (2018).
- [14] E. Hase, T. Minamikawa, S. Miyamoto, R. Ichikawa, Y.-D. Hsieh, Y. Mizutani, T. Iwata, H. Yamamoto, and T. Yasui, "Scan-less, kilo-pixel, line-field confocal phase imaging with spectrally encoded dual-

comb microscopy," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **25**, 6801408 (2019).

- [15] T. Mizuno, T. Tsuda, E. Hase, Y. Tokizane, R. Oe, H. Koresawa, H. Yamamoto, T. Minamikawa, and T. Yasui, "Optical image amplification in dual-comb microscopy," Sci. Rep. **10**, 8338 (2020).
- [16] T. Mizuno, E. Hase, T. Minamikawa, Y. Tokizane, R. Oe, H. Koresawa, H. Yamamoto, and T. Yasui, "Full-field fluorescence lifetime dual-comb microscopy using spectral mapping and frequency multiplexing of dual-comb optical beats," Sci. Adv. **7**, eabd2102(2021).



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Mizuno Takahiko, Tsuda Takuya, Hase Eiji, Tokizane Yu, Oe Ryo, Koresawa Hidenori, Yamamoto Hirotsugu, Minamikawa Takeo, Yasui Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Optical image amplification in dual-comb microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8338 ~ 8338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-64927-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Chen Jie, Nitta Kazuki, Zhao Xin, Mizuno Takahiko, Minamikawa Takeo, Hindle Francis, Zheng Zheng, Yasui Takeshi	4. 巻 2
2. 論文標題 Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Photonics	6. 最初と最後の頁 36004 ~ 36004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.AP.2.3.036004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Nishimoto Kenji, Minoshima Kaoru, Yasui Takeshi, Kuse Naoya	4. 巻 28
2. 論文標題 Investigation of the phase noise of a microresonator soliton comb	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19295 ~ 19303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.395436	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Koresawa Hidenori, Gouryeb Marc, Shibuya Kyuki, Mizuno Takahiko, Hase Eiji, Tokizane Yu, Oe Ryo, Minamikawa Takeo, Yasui Takeshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Dynamic characterization of polarization property in liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator using dual-comb spectroscopic polarimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 23584 ~ 23593
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.399200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishimoto Kenji, Minoshima Kaoru, Yasui Takeshi, Kuse Naoya	4. 巻 3
2. 論文標題 Generation of a microresonator soliton comb via current modulation of a DFB laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 OSA Continuum	6. 最初と最後の頁 3218 ~ 3224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OSAC.409885	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mizuno T., Hase E., Minamikawa T., Tokizane Y., Oe R., Koresawa H., Yamamoto H., Yasui T.	4. 巻 7
2. 論文標題 Full-field fluorescence lifetime dual-comb microscopy using spectral mapping and frequency multiplexing of dual-comb optical beats	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabd2102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abd2102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mizuno Takahiko, Nakajima Yoshiaki, Hata Yuya, Tsuda Takuya, Asahara Akifumi, Kato Takashi, Minamikawa Takeo, Yasui Takeshi, Minoshima Kaoru	4. 巻 29
2. 論文標題 Computationally image-corrected dual-comb microscopy with a free-running single-cavity dual-comb fiber laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 5018 ~ 5032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.415242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hase Eiji, Tokizane Yu, Yamagiwa Masatomo, Minamikawa Takeo, Yamamoto Hirotsugu, Morohashi Isao, Yasui Takeshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Multicascade-linked synthetic-wavelength digital holography using a line-by-line spectral-shaped optical frequency comb	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 15772 ~ 15772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.424458	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tokizane Yu, Yamaguchi Takayoshi, Minamikawa Takeo, Hase Eiji, Yamaguchi Kenzo, Suzuki Akihiro, Ueda Takao, Yasui Takeshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Ultralow-frequency ultranarrow-bandwidth coherent terahertz imaging for nondestructive testing of mortar material	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4392 ~ 4392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.449092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hase Eiji, Tokizane Yu, Sadahiro Kazuki, Minamikawa Takeo, Morohashi Isao, Yasui Takeshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Nanometer-precision surface metrology of millimeter-sized stepped objects using full-cascade-linked synthetic-wavelength digital holography using a line-by-line full-mode-extracted optical frequency comb	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18088 ~ 18088
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.483408	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 K. Nishimoto, K. Minoshima, T. Yasui, N. Kuse
2. 発表標題 Generation of a dissipative Kerr-microresonator soliton comb pumped by a MHz linewidth DFB laser
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Mizuno, E. Hase, T. Minamikawa, H. Yamamoto, T. Yasui
2. 発表標題 Scan-less full-field fluorescence lifetime imaging by 2D spectral encoding and dual-comb heterodyne-beating
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Nakahara, R. Oe, T. Kajisa, S. Taue, T. Minamikawa, T. Yasui
2 . 発表標題 Refractive-index-sensing optical comb using intra-cavity multi-mode-interference fiber sensor and its application for bio-sensing
3 . 学会等名 OSA Optical Sensors and Sensing (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Nakahara, R. Oe, T. Minamikawa, S. Taue, T. Kajisa, T. Yasui
2 . 発表標題 Intra-cavity biosensing in refractive- index-sensing optical comb
3 . 学会等名 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Nakahara, R. Oe, T. Minamikawa, S. Taue, T. Kajisa, T. Yasui
2 . 発表標題 Fiber biosensor based on a combination of refractive-index-sensing optical comb with chemical surface modification
3 . 学会等名 BiOS2021 in Photonics West 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Koresawa, M. Gouryeb, K. Shibuya, T. Mizuno, E. Hase, Y. Tokizane, R. Oe, T. Minamikawa, T. Yasui
2 . 発表標題 Dual-comb spectroscopic polarimetry for dynamic characterization of polarization property
3 . 学会等名 LASE2021 in Photonics West 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Yasui
2. 発表標題 Dual-Comb Microscopy
3. 学会等名 OSA Frontiers in Optics/Laser Science APS/DLS (FiO+LS2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安井 武史
2. 発表標題 目に見えない光が切り拓く「光の世紀」～次世代のレーザー「光コム」～
3. 学会等名 光産業技術マンスリーセミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安井 武史
2. 発表標題 デュアル光コム顕微鏡
3. 学会等名 レーザー学会 学術講演会 第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向島 直哉, 八杉 公基, 水谷 康弘, 安井 武史, 山本 裕紹
2. 発表標題 シングルピクセルイメージング再構成データの形式で見た復元画像の構造類似性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西本 健司、美濃島 薫、安井 武史、久世 直也
2. 発表標題 マイクロ・ソリトンコムの位相雑音測定
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 時実 悠, 西本 健司, 久世 直也, 美濃島 薫, 安井 武史
2. 発表標題 マイクロソリトンコムを用いたテラヘルツ波発生(2)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麻植 凌, 南川 丈夫, 田上 周路, 楠美 友悟, 中嶋 善晶, 美濃島 薫, 安井 武史
2. 発表標題 デュアル屈折率センシング光コム
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲原 拓弥, 麻植 凌, 南川 丈夫, 田上 周路, 加治佐 平, 安井 武史
2. 発表標題 屈折率センシング光コムの共振器ファイバー表面修飾を用いたバイオセンシング
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大谷圭史郎, 南川丈夫, 中野 祥太, 長谷 栄治, 安井武史
2. 発表標題 レーザー走査型光コム分顕微鏡による生体イメージング
3. 学会等名 LED総合フォーラム2021 in 徳島
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西本健司, 美濃島薫, 安井武史, 久世直也
2. 発表標題 DFBレーザーの電流変調によるマイクロ-ソリトン光周波数コムの発生
3. 学会等名 LED総合フォーラム2021 in 徳島
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大谷 圭史郎、南川 丈夫、中野 祥太、長谷 栄治、安井 武史
2. 発表標題 透過型光コム分光顕微鏡の開発
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 仲原 拓弥、南川 丈夫、田上 周路、加治佐 平、安井 武史
2. 発表標題 屈折率センシング光コムを用いたバイオセンシングに関する検討(3) ~アビジン/ビオチン抗体抗原反応の検出~
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 是澤 秀紀、前田 耕祐、南川 丈夫、安井 武史
2. 発表標題 デュアルコム分光ジョーンズ行列偏光計
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安井 武史
2. 発表標題 光コムを用いた高性能光学顕微鏡 ~スキャンレスで生きた細胞の動態観察に向けて~
3. 学会等名 バイオインダストリー協会 "未来へのバイオ技術" 勉強会「細胞ダイナミクス・イメージング」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安井 武史
2. 発表標題 デュアル光コム顕微鏡
3. 学会等名 第8回精密計測を元に科学技術に変革をもたらす回路技術調査専門委員会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野 孝彦、長谷 栄治、南川 丈夫、時実 悠、麻植 凌、是澤 秀紀、山本 裕紹、安井 武史
2. 発表標題 全視野デュアル光コム蛍光寿命顕微鏡の開発
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

光のストップウォッチで、蛍光寿命画像を一括測定 ～焦点走査の不要な光学顕微鏡を開発～
<https://www.tokushima-u.ac.jp/docs/23844.html>

徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 安井/南川研究室 WEB
<https://femto.me.tokushima-u.ac.jp/index.html>

徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所 安井/南川研究室 YouTube
<https://www.youtube.com/@takeshiyasui2792>

徳島大学ポストLEDフォトンクス研究所
<https://www.pled.tokushima-u.ac.jp>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 裕紹 (YAMAMOTO Hirotsugu) (00284315)	宇都宮大学・工学部・教授 (12201)	
研究分担者	南川 丈夫 (MINAMIKAWA Takeo) (10637193)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・准教授 (16101)	
研究分担者	長谷 栄治 (HASE Eiji) (50805512)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・特任助教 (16101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------