

# スキャンレス共焦点 デュアル光コム顕微鏡

徳島大学  
安井 武史

## 1 はじめに

光周波数コム（光コム）<sup>1)</sup>は、多数の安定な光周波数モード列が一定間隔で規則的に櫛（コム）の歯状で並んだ超離散マルチ・スペクトル構造を示す光源である。更に、レーザー制御により、各光周波数モードの絶対周波数を極めて正確に決定できるので、「光周波数の物差し」として利用できる。2000年に光コムを用いた光周波数測定が初めて報告されて以降、光周波数標準や分光計測に革命的進展をもたらし、2005年ノーベル物理学賞に繋がった。これは、光コムの極限的光源としての特徴が、それまでの常識を大きく打ち破ったからであると言える。

光コムの『周波数精緻性』と『極めて広い周波数ダイナミックレンジ』は、モード分解光コムスペクトルの取得により始めて利用可能になるが、従来の分光器では分解能不足で取得できなかった。近年、光コムのレプリカをRF帯に生成することにより、モード分解光コムスペクトルを高精度・高速に計測するデュアル光コム分光法<sup>2)</sup>が開発された。更に、実用的な光コム光源（ファイバーレーザー光コム、電気光学変調器光コム、量子カスケードレーザー光コム、マイクロ光コムなど）の技術的成熟や、光コム及びデュアル光コム分光法の波長多様性を背景に、分光計測や距離計測といった応用分野で研究開発が活発化している。

しかし、世界における光コムの利用は「光周波数の物差し」に基づいた分光計測や距離計測に限定され、その高い光源ポテンシャルを活かした光計測は、十分には開

拓されたとは言い難い。もし、まだ世界の誰もが利用していない光コムの新しい特徴を光計測に上手く利用できれば、レーザー計測の本質的限界が散見され始めてきた光計測の現状をブレイクスルーできるかもしれない。そこで、本稿では、光コムの新奇特徴に着目した光計測として、スキャンレス共焦点デュアル光コム顕微鏡<sup>3~6)</sup>を紹介する。

## 2 測定原理

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

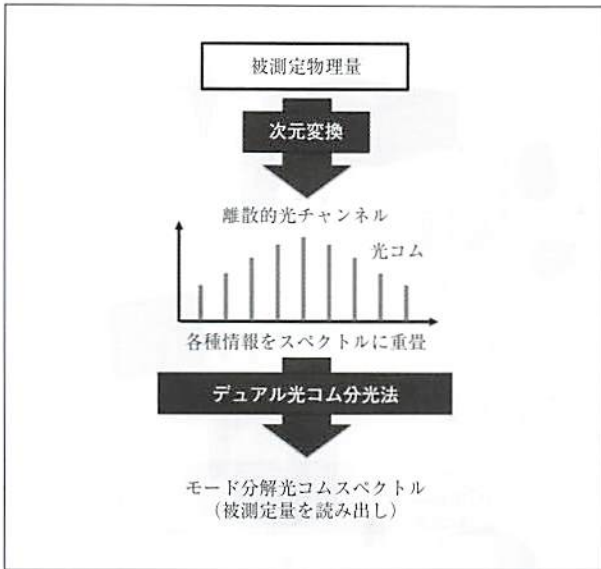


図1 次元変換光コム

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、次元変換光コムの原理検証として、デュアル光コム顕微鏡<sup>3~6)</sup>を提案している。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

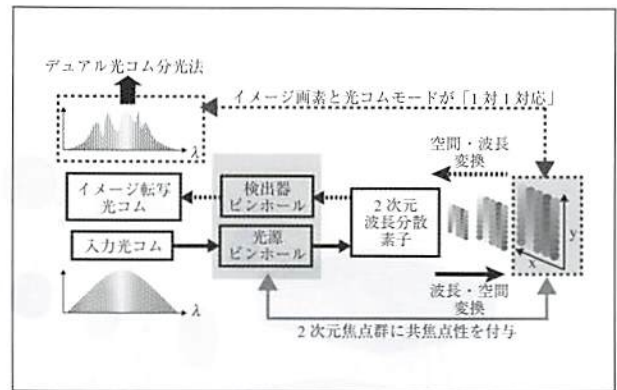


図2 波長/2次元空間変換

※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>)に掲載しています。

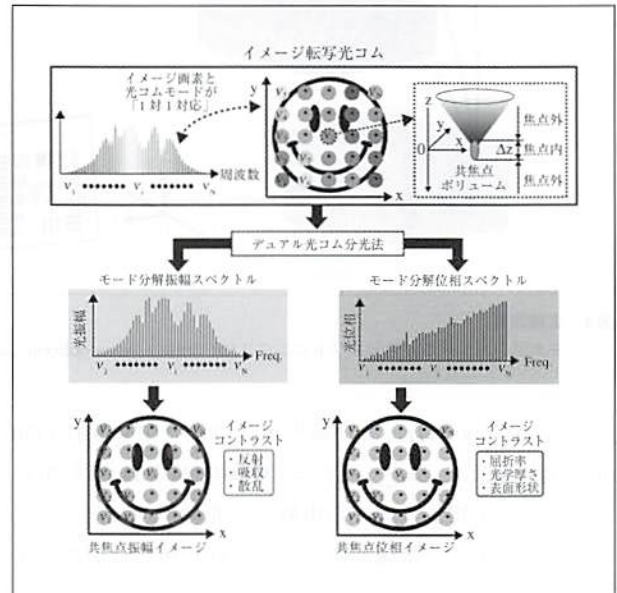


図3 イメージ転写光コムのデュアル光コム分光

※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>)に掲載しています。

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。

### 3 実験装置

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

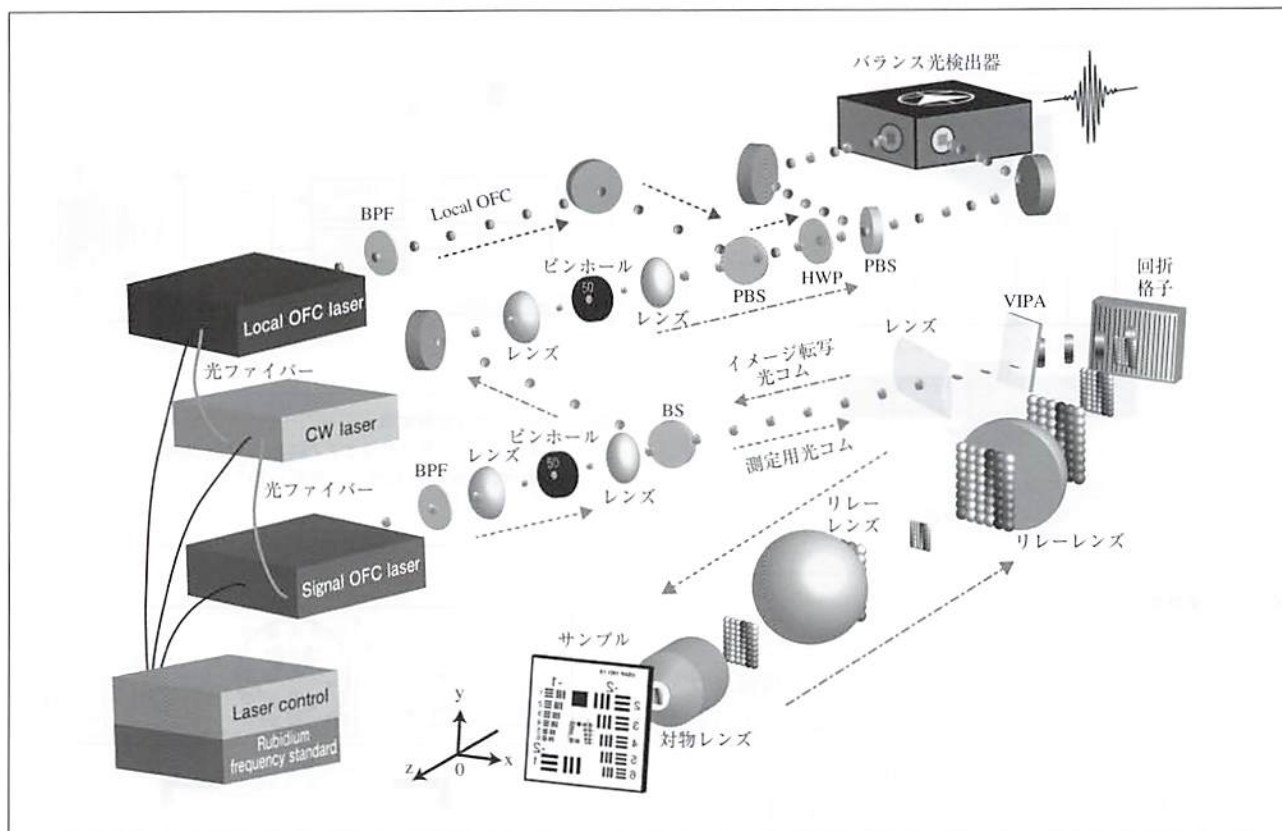


図4 実験装置

※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>) に掲載しています。

$f_{rep1} = 100,000,000$  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。

## 4 実験結果

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

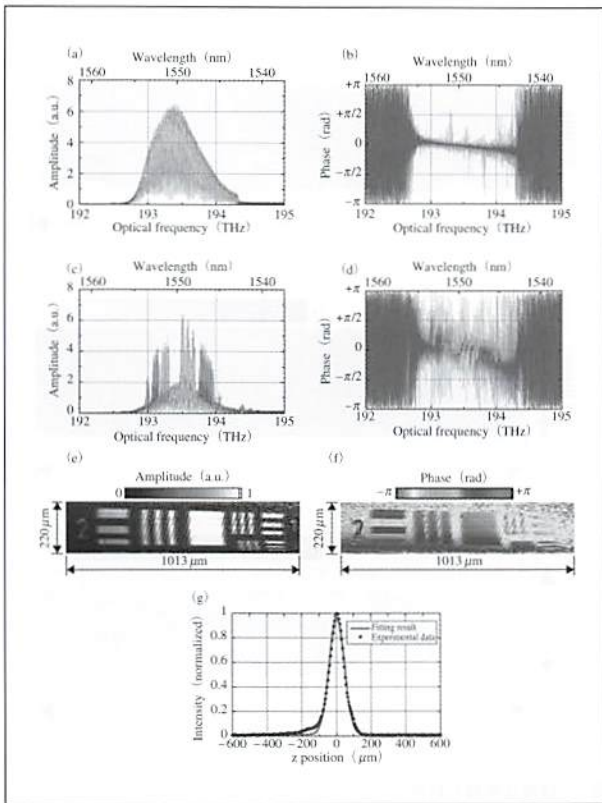


図5 テストチャートの計測

※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>) に掲載しています。

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、光位相スペクトルが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、 $82 \times 151$  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) とよく一致した。共焦点光振幅イメージと共焦点光振幅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用性を実証するため、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

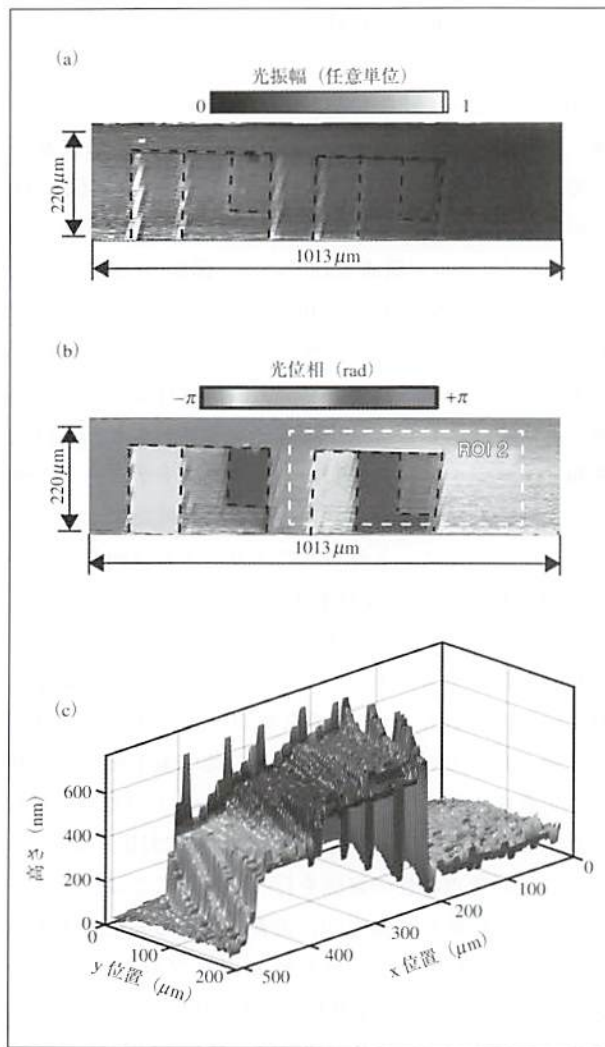


図6 ナノメートル段差の計測  
 ※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>) に掲載しています。

で、nm～サブ $\mu\text{m}$ の深さ範囲は共焦点位相イメージで、 $\mu\text{m}$ 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。

共焦点位相イメージ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、細胞接着たんば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

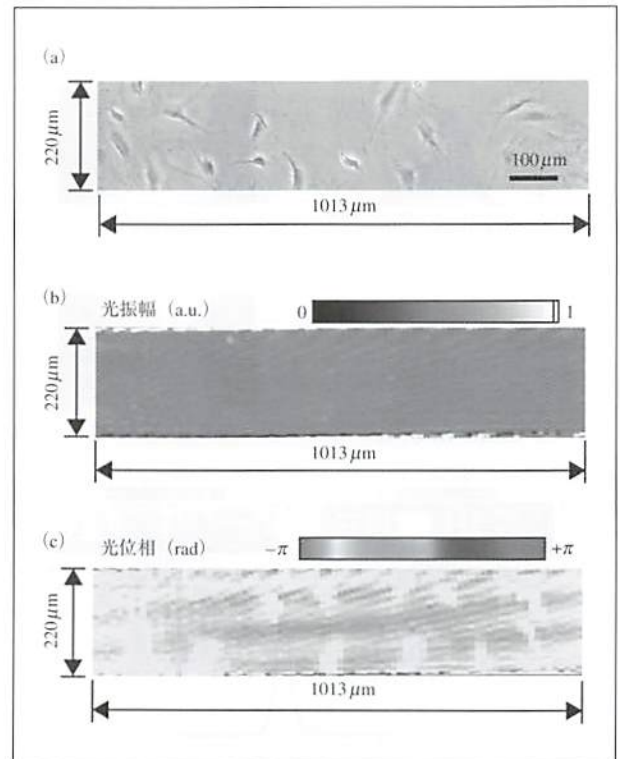


図7 線維芽細胞の計測  
 ※本図のカラー版は月刊オプトロニクスHP (<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php>) に掲載しています。

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。

## 5 まとめ

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ン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再び活性化することを願う。

### 参考文献

- 1) Th., Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," *Nature* **416** (6877), 233-237 (2002).
- 2) I. Coddington, N. Newbury, and W. Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica* **3** (4), 414-426 (2016).
- 3) 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** (5), 634-643 (2018).
- 4) 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** (1), 6801408 (2019).
- 5) T. Mizuno, T. Tsuda, E. Hase, Y. Tokizane, R. Oe, H. Koresawa, H. Yamamoto, T. Minamikawa, and T. Yasu, "Optical image amplification in dual-comb microscopy," *Sci. Rep.* **10**, 8338 (2020).
- 6) T. Mizuno, Y. Nakajima, Y. Hata, T. Tsuda, A. Asahara, T. Kato, T. Minamikawa, T. Yasui, and K. Minoshima, "Computationally image-corrected dual-comb microscopy with a free-running single-cavity dual-comb fiber laser," *Opt. Express* **29** (4), 5018-5032 (2021).

#### ■ Scan-less, confocal, dual-comb microscopy

■ Takeshi Yasui

■ Institute of Post-LED Photonics, Tokushima University

ヤスイ タケシ

所属：徳島大学 ポストLEDフォトンクス研究所

OPTRONICS 特許調査報告書

2017年8月刊行

特許情報からみる

# 赤外線技術の動向調査

好評発売中

- 調査：株式会社プライムネット、特許事務所グリーンワールド
- 体裁：紙版(A4判)+ PDF版 + 付録データ
- 定価：165,000 円 (税込)

※詳細は光のオンライン書店をご覧ください。

光のオンライン書店  
<http://shop.optronics.co.jp/>