

令和元年6月22日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03164

研究課題名(和文) 周波数可変広帯域光コムを用いた生体3次元断層振動撮像装置の開発

研究課題名(英文) 3D optical coherence tomography using frequency-tunable broadband optical comb for biological measurement

研究代表者

崔 森悦 (CHOI, SAMUEL)

新潟大学・自然科学系・研究准教授

研究者番号：60568418

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生体内のナノ精度の高精度断層撮像と振動計測可視化を目指し、医工連携によって「en-face多波長走査型光断層振動撮像装置」を開発した。光源として超広帯域光源(Supercontinuum光)を導入し、多波長走査方式の干渉計測手法を取り入れたen-face撮像装置を製作した。断層像の深さ分解能 $2.7\mu\text{m}$ 、及びx-y軸平面画像の分解能 $3.5\mu\text{m}$ を達成し、生きたモルモットの感覚上皮帯振動を 10nm 程度の感度で検知することができた。また、多波長走査機構を全電子的に行える「光コム」光源の導入を検討し、より高速かつ正確な断層像と振動分布の可視化が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本格的な高齢化社会の到来に伴い、難聴を患う高齢者の増加が想定される。聴覚は、3層の異なる細胞層からなっている感覚上皮帯のナノ振動により惹起される。この内耳の感覚上皮帯の機能不全が難聴の原因となる。従って、その振動様態のメカニズムを解明することが急務である。本研究では、生きた動物の感覚上皮帯をターゲットとして新しい光断層撮像装置を開発した。新しい計測手法と特殊なレーザ光源を導入することで、生きた状態の感覚上皮帯において、従来のレーザ振動計よりも詳細かつ広範囲に振動様態を可視化することが可能になった。従って、本研究により開発された機器は難聴の解明などの内耳医療に貢献することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have developed an "en-face multi-frequency swept optical coherence microscopic vibrometer" for high-precision tomographic imaging and visualization of living biological tissues by medical engineering collaboration. An ultra-broadband light source (Supercontinuum) was introduced as a light source with an en-face imaging optical system utilizing a multi-wavelength scanning interference measurement method was produced. We achieved depth resolution of $2.7\mu\text{m}$ in tomographic imaging with resolution of $3.5\mu\text{m}$ in x-y axis of the microscopic image. Furthermore, we could detect the vibration of sensory epithelium of a living guinea pig with a sensitivity of about 10nm .

In addition, we examined the validity of the "optical comb" light source that can perform multi-wavelength scanning all-electronically. This novel light source showed that it is possible to visualize a faster tomographic image and vibration distribution more accurately.

研究分野：光計測

キーワード：光コヒーレンストモグラフィー 内耳感覚上皮帯 光計測

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

本研究では、内耳蝸牛感覚上皮帯の振動様態を可視化する光計測装置を構築する。ターゲットとなる蝸牛感覚上皮帯は、音刺激によって振幅数 nm の微小振動が惹起され、観測部位での周波数は $20\text{-}30\text{ kHz}$ に達する。従来からレーザー振動計やホログラム干渉手法が用いられているが、レーザー振動計では光ビームの空間走査によって1点ずつ計測するため、観測時間が長くなる。そのため、蝸牛内の波の伝搬を示す空間的に連動する振動の様子を可視化することが難しい。また、ホログラム干渉法では、測定面の振幅分布を得るにとどまり、振動の位相は計測できない。また、装置構成が複雑で、*in-vivo* 生体計測には向かない。さらに、これらの技術では、生体断層内の深さ方向に垂直な面内の振動分布を計測することが困難である。

これらの背景に鑑み、本研究では、生体内の微細構造の計測と微小振動の可視化を同時に行える生体光断層撮像装置を開発する。

2. 研究の目的

内耳蝸牛など生体内における細胞の動き、特に微小振動を可視化できれば、組織の仕組みとその破綻である病態の理解が大幅に進むことが期待される。本研究では、生体内の微細構造と微小振動の観察を同時に行える、「光コム」を用いた生体光断層撮像装置の開発を目的とする。

細胞レベルの3次元断層可視化と微小振動計測を両立するため、周波数可変なコム光源を導入し、光コムの間隔と中心周波数を精密に制御する。コム間隔掃引による「 μm 精度の主尺=干渉ピーク」に加えて、中心周波数掃引による「 nm 精度副尺=位相」を導入することで、 $1\ \mu\text{m}$ の限界を超えた高解像とナノ振動計測を実現する。最終的に、微小振動が機能を司る内耳蝸牛をターゲットとして本技術の有効性を確認するために「広帯域で周波数可変な光コム」と高感度 CMOS イメージセンサを導入した *en-face* 干渉顕微鏡振動計測システムを構築する。

3. 研究の方法

本研究では、①広帯域な光コム的高速で正確な周波数掃引、②コム間隔掃引による μm の主尺と nm 副尺を導入した新しい光コム測定法の開拓、③生体計測を実現できる干渉光学系の構築と有効性の確認を主眼に段階的に遂行された。具体的には、次のような方法で進めた。

【H28年度】コム間隔可変の位相変調器型光コムを製作し、中心周波数掃引の手法をSSB変調器などで検討するとともに、コム均一化、広帯域化を図った。しかし、研究期間内に光コム十分な広帯域化の達成が困難であることが判明したので、目的である蝸牛感覚上皮帯計測の実現を優先させるために当初の計画を変更し、Supercontinuum(SC)光源を導入した。

【H29年度】周波数掃引可能な光コムを用いた断層計測実験を行った。この光コムはSC光から多波長成分を取り出した疑似的光コムである。高分解能の生体計測の達成と、ナノオーダーの *en-face* 振動計測を実現した。

【H30年度】前年度までに開発した装置を用いて内耳蝸牛をターゲットに、構築した装置の特性と有効性を確認した。

4. 研究成果

本研究では、生体内における細胞の動き、特に生きた動物の感覚上皮帯の微小振動を可視化するために、SC光源をベースとした「光コム」を用いた新規生体光断層撮像 (Optical coherence tomography: OCT) 装置を製作した。

初年度は、東京農工大学田中洋介准教授との協働により、コム間隔可変の位相変調器型光コムを製作し、中心周波数掃引の手法を検討した。モード間隔 12.5GHz の $1100\text{-}1700\text{nm}$ に及ぶコムを生成することができた。また全域で $3.5\text{-}16.5\text{ GHz}$ 周波数シフトを確認でき、モード間隔分の波長掃引ができることが実証された。しかし、光コムを用いたOCTの原理確認実験では、上記の理由により当初の研究計画を変更し第一段階として、広帯域スーパーミネッセントダイオード(SLD)とファブリペローフィルタを用いた疑似的光コム光源を製作した。

研究代表者(崔)は、疑似光コムOCTの基盤技術を基に、研究協力者の日比野浩教授、任書晃准教授との協働により、生動物の感覚上皮帯の振動を「細胞レベルで明確に」捉える新規断層イメージング装置「MS *en-face* OCT」の開発を進めた(図1)。ここでは、 205 mm の長作動距離レンズを有した顕微鏡に、自製のマイケルソン型偏光干渉計を組み合わせた。光源として、SLD(最大 15 mW 、帯域 $760\text{ - }920\text{ nm}$)を用いた。また、撮像系として、 $1000\text{ - }6400\text{ fps}$ (frame per second) で高速撮像ができる高感度・ハイスピード CMOS カメラを導入した。ガラス板を用いた評価実験では、表2の通り高性能な3次元断層撮像を得た。モルモット鼓膜を用いた撮像では、 $533\text{ x }533\text{ x }800\ \mu\text{m}$ の3次元データを約 2 sec の短時間で取得できた。MS *en-face* OCT は以下の特徴がある。

- ① xy平面一括撮像：一般的なOCTは、線状の1次元光を使うため、xy平面像の取得にはスキャンに時間がかかり分解能も約 $10\ \mu\text{m}$ と悪い。MS *en-face* OCT では、最大 $2088\text{ x }2088\ \mu\text{m}$ ($1024\text{ x }1024\text{ pixel}$) の平面範囲を一括して撮像でき、画像分解能も最良で 2.0



図1 MS *en-face* OCT 装置

μm/pixel と優れる。

- ② 光コム採用：光源からの光を共振器長可変のファブリペロフィルタに通すことで、図2のように櫛状に並ぶスペクトル特性を生じさせる。この光コムのコム間隔をフィルタの機械的制御により変化させると、深さ(z軸)方向に断層スキャンができる。フィルタは顕微鏡の外部に独立して設置されているため(図1)、動かしてもノイズ源に殆どならず、振動計測の正確性の向上に貢献する。この成果は、Choi et al. Biomed Opt Express, 8 (2), pp. 608-621 (2017) に掲載した。

表2 ガラス板による MS en-face OCT の性能評価

深さ(z軸)方向の分解能	1.8 μm
深さ(z軸)方向の到達深度	200 μm
干渉信号のSN比	45 dB
平面(xy軸)方向の分解能	3.6 μm(顕微鏡依存)

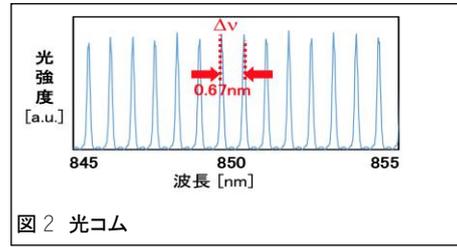


図2 光コム

次に、「nm 精度副尺=位相」となる振動計測技術である「広視野ヘテロダイン検波法」を MS en-face OCT 装置へ追加した。ここでは、上記の計画の変更に伴い、中心周波数を変化させる方式ではなく、確実に振動計測が行えるために干渉計の参照ミラーを直接変調する方式へ変更した。実験では、10 kHz・90 dB の音をモルモット鼓膜に与え、その振動を異なった断面において計測すると、振幅と位相の xy 平面分布が一括して取得できた(図3)。位相の同時計測が可能となり、振幅は 250 nm 程度でほぼ一様であった。さらに検波法を改良したところ、検出感度は 1 nm 程度になった。

本干渉計を介した標本の振動計測には、より検出感度を上げて微小な振動を捉える必要があった。そこで、検波法を改良し、参照ミラーへさらに低周波数の振動を加える「オフセット変調」を施した。この改良により、感覚上皮帯の数ナノメートル程度の微小な振動の検知が可能となった。

以上の基礎実験ののち、生きたモルモットの感覚上皮帯を MS en-face OCT 装置で観測したが、干渉像が得られなかった。上皮帯の反射率が、0.003%と極めて弱いためであった。そこで、SLD 光源からより高出力の SC 光を導入した多波長光源(最大 2 W; 帯域幅 400–2400 nm)に入れ替えた。これに伴い、装置内の干渉計の構成を見直し、表3に示す通り、以前の装置よりも性能を向上させた。光源パワーの上昇により計測時間を短縮できたため、撮像に関して、生きた動物のモーション・アーチファクトの影響を受けにくい高速計測(1秒に 2×10^9 pixel³ の3次元データを取得)も実現した。

改良した MS en-face OCT を用いて、再度、20 kHz 以上の高周波に反応する領域の感覚上皮帯を観測すると、明確な干渉信号と共に組織の3次元画像を得た。実験では、音刺激時における生モルモット感覚上皮帯を観測した。まず、3次元撮像を実行し上皮帯の構造を確認した。

上皮帯には細胞がないトンネル空間が複数あるが、それが xz の断面像で観測でき(図4)、大まかな細胞構築も判別できた。次に、音圧 70–90 dB・周波数 23 kHz の音を与え、細胞外基質層のレベルで振動を計測した(図5)。xy 平面上の振幅と位相の2次元分布が可視化できた。両者の不均一性も確認された。これらデータの2次元一括取得は、世界初であり、

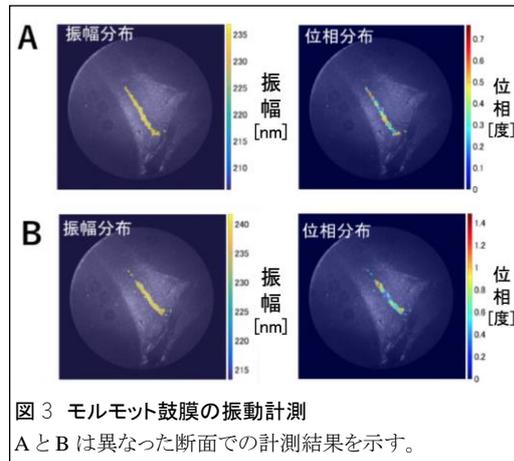


図3 モルモット鼓膜の振動計測

AとBは異なった断面での計測結果を示す。

表3 MS en-face OCT の性能向上

	改良前	改良後
光源	SLD(最大 15 mW)	SC(最大 2 W)
標本への入射光	0.9 mW	37 mW
スキャン範囲	180 μm	980 μm
深さ方向分解能	1.8 μm	2.7 μm
振動計測制度	1.2 nm(ミラー)	1.1 nm(ミラー)
感覚上皮帯計測	不可	可

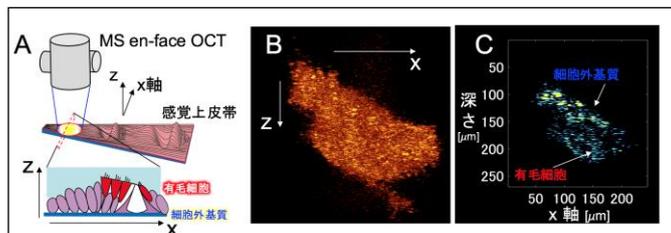


図4 感覚上皮帯の3次元撮像

(A) 上皮帯とその断面。MS en-face OCT による照射部位も示す。

(B) 得られた上皮帯の3次元像(B)と、そのxz断面像(C)。

Aの断面と上下が逆になっていることに注意。

今まで達成されてこなかった。計測結果によると、振幅は音圧が上がるほど大きくなり、振幅の平均値を計算すると、死後より生存時の方が大きかった。つまり、「音刺激が小さいほど振動が大きく増幅される」という特徴が観察され、蝸牛内のトラベリングウェーブによる空間的な位相スロープも観測された。以上の結果より、計測の妥当性が確認された。以上の成果は Choi et al. *Biomed Opt Express*, 7(10), pp.3317-3342 (2019).に掲載した。さらに最終的には、作動距離が 10 cm と短い対物レンズを導入し（以前は約 20 cm）、xy 軸方向の解像度を 2 倍向上させた（xy 平面分解能: 約 2 μm ）。干渉計のコンパクト化も完了し、計測はより安定化した。

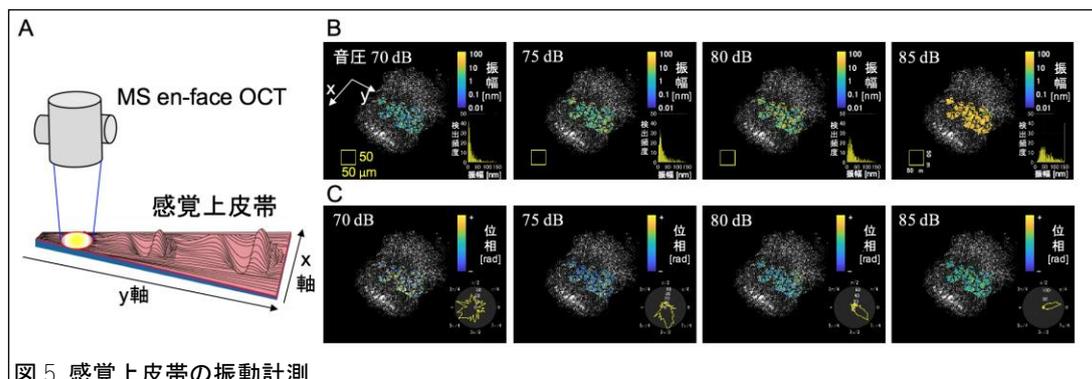


図5 感覚上皮帯の振動計測

さらに、本研究では 3 次元信号処理法の開発も並行で進めた。即ち、非分離冗長重複変換

(NSOLT) と繰返しハード閾値処理 (IHT) を利用したデータノイズ除去法を開発した。自動構築して得た、なるべく単純で疎、つまりは“スペース”な表現で画像を表すパラメータ群（特徴的な干渉信号の形）を探し、決定する「NSOLT」を採用し、IHT 法による逐次計算を実行した。図 6 に、感覚上皮帯の測定に対し最適化した 3 次元画像を復元した例を示す。

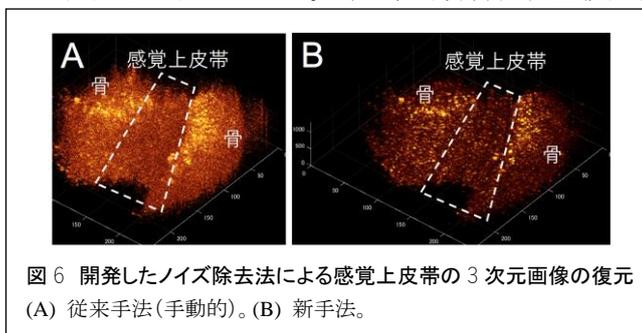


図6 開発したノイズ除去法による感覚上皮帯の 3 次元画像の復元 (A) 従来手法(手動的)。(B) 新手法。

この手法は、人の手によらない画像の先鋭化とノイズ除去を可能とした。

本研究で開発した断層イメージングと振動計測は、(1) xy 平面の 2 次元“一括”撮像、(2) xy 平面の高分解描出（最良 2 μm ; 従来法 10 μm ）、(3) 深さ (z 軸) 方向スキャン時の低ノイズ性など、市販の OCT には無い特徴がある。現在までに、医学的知見が得られる高精度な振動計測を目指し、新規機能の追加と統合的な処理プログラムを構築した。さらに、当初計画の位相変調器ベースの光コムについても、超広帯域光コムの基盤技術を用いた新しい撮像装置のプロトタイプ製作に着手した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

[1] S. Luo, T. Suzuki, O. Sasaki, S. Choi, Z. Chen, and J. Pu, “Signal correction by detection of scanning position in a white-light interferometer for exact surface profile measurement,” *Appl. Opt.*, 58 (13), 3544-3558 (2019).

[2] S. Luo, O. Sasaki, Z. Chen, S. Choi, J. Pu, “Exact surface profile measurement without subtracting dispersion phase through Fourier transform in a white-light scanning interferometer,” *Applied Optics*, 57 (4), 894-89410 (2018). 1364/AO.57.000894.

[3] M. P. Sato, T. Higuchi, F. Nin, G. Ogata, S. Sawamura, T. Yoshida, T. Ota, K. Hori, S. Komune, S. Uetsuka, S. Choi, et. al., “Hearing Loss Controlled by Optogenetic Stimulation of Nonexcitable Nonglial Cells in the Cochlea of the Inner Ear,” *Frontiers in Molecular Neuroscience*, 10, 300 (2017). 10.3389/fnmol.2017.00300

[4] F. Nin, T. Yoshida, S. Murakami, G. Ogata, S. Uetsuka, S. Choi, K. Doi, S. Sawamura, H. Inohara, S. Komune, Y. Kurachi, H. Hibino, “Computer modeling defines the system driving a constant current crucial for homeostasis in the mammalian cochlea by integrating unique ion transports,” *npj Systems Biology and Applications*, 3, 24, (2017). 10.1038/s41540-017-0025-0

[5] T. Serizawa, T. Suzuki, S. Choi, O. Sasaki, “3-D surface profile measurement using spectral interferometry based on continuous wavelet transform,” *Opt. Commun.*, 396, 216-220, (2017).

[6] S. Choi, K. Sato, T. Ota, F. Nin, S. Muramatsu, H. Hibino, “Multifrequency-swept optical coherence microscopy for highspeed full-field tomographic vibrometry in biological tissues,” *Biomed. Opt. express*, 8 (2), 608-621 (2017).

〔学会発表〕(計 39 件)

[1] 太田 岳、任 書晃、崔 森悦、日比野 浩、内耳の感覚上皮帯に生じるナノ振動の抽出とその調節機構の検討、第 92 回日本薬理学会年会, 2019

- [2] 任 書晃、太田 岳、崔 森悦、日比野 浩、改良型イメージング振動計測装置による内耳感覚上皮帯ナノ振動の深度分布, 第 92 回日本薬理学会年会, 2019
- [3] 太田 岳、任 書晃、崔 森悦、日比野 浩、聴覚の特徴に資する内耳感覚上皮帯のナノ振動の同定 解剖学会-生理学会 連携シンポジウム: 「内耳蝸牛・聴覚伝導路に置ける音信号伝達・処理メカニズムの形態学的・生理学的基盤」, 第124回日本解剖学会総会全国学術集会, 2019
- [4] Ota T, Nin F, Choi S, Hibino H, Detection of an atypical motion in cochlear sensory epithelium, 9th Federation of the Asian and Oceanian Physiological Societies Congress in conjunction with The 96th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan (国際学会), 2019
- [5] Nin F, Choi S, Ota T, Hibino H, An imaging system for 3D detection of nano-vibrations in sensory epithelium of the inner ear., 9th FAOPS Federation of the Asian and Oceanian Physiological Societies Congress. (国際学会), 2019
- [6] Hibino H, Ota T, Choi S, Nin F, Analysis of nanoscale vibrations in the inner ear by advanced vibrometries, 9th Federation of the Asian and Oceanian Physiological Societies Congress in conjunction with The 96th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan. (国際学会) 2019
- [7] S. Muramatsu, S. Choi, S. Ono, T. Ota, F. Nin, H. Hibino, OCT Volumetric Data Restoration via Primal-Dual Plug-and-Play Method, 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (国際学会) 2018
- [8] 崔 森悦, 任 書晃, 太田 岳, 日比野 浩, 先端のイメージング振動計測装置による内耳の感覚上皮帯ナノ振動の平面分布, 日本薬理学会第 92 回年会, 2018
- [9] 崔 森悦, 任 書晃, 太田 岳, 佐藤 洗平, 日比野 浩, 改良型広視野ヘテロダイン干渉振動法による 2 次元面の一括振動計測, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2018, 2018
- [10] 長谷川 陽平, 崔 森悦, 鈴木 孝昌, 任 書晃, 日比野 浩, 位相変調型デュアルファイバープローブによるフリンジプロジェクション法, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2018, 2018
- [11] 崔 森悦, 任 書晃, 太田 岳, 佐藤 洗平, 村松 正吾, 日比野 浩, 多波長走査型光コヒーレンス顕微鏡を用いた内耳感覚上皮帯振動計, 日本光学会年次学術講演会 OPJ2018, 2018
- [12] 藤井 元暉, 村松 正吾, 崔 森悦, 小野 峻佑, 太田 岳, 任 書晃, 日比野 浩, 階層的スパース正則化とハード制約を利用した OCT ボリュームデータ復元の実データ検証, 電子情報通信学会信号処理研究会, 2018
- [13] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、内耳のナノ振動計測を標的とした改良型レーザ干渉法の創出, 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018
- [14] 任 書晃、崔 森悦、太田 岳、日比野 浩、内耳の感覚上皮ナノ振動の 3 次元計測を志向した新規光干渉顕微鏡の創製, 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018
- [15] 崔 森悦、任 書晃、太田 岳、日比野 浩、内耳の感覚上皮ナノ振動の 3 次元計測を志向した新規光干渉顕微鏡の創製, 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018
- [16] 日比野 浩、太田 岳、崔 森悦、任 書晃、改良型振動計による内耳ナノ振動の測定と解析シンポジウム「分子から個体のメカノバイオ: 多様な物理刺激とその応答」, 第 56 回日本生物物理学会年会, 2018
- [17] 任 書晃、崔 森悦、太田 岳、日比野 浩、内耳の感覚上皮ナノ振動の 3 次元計測を志向した新規光干渉顕微鏡の創製, 第 28 回日本耳科学会総会・学術講演会, 2018
- [18] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、改良型レーザ干渉計による内耳蝸牛の感覚上皮帯ナノ振動測定, 第 28 回日本耳科学会総会・学術講演会, 2018
- [19] 太田 岳、任 書晃、崔 森悦、日比野 浩、感覚上皮帯の非典型的な動きの同定と分析, 第 65 回中部日本生理学会, 2018
- [20] 任 書晃、崔 森悦、太田 岳、日比野 浩、内耳の感覚上皮ナノ振動の 3 次元計測を志向した光干渉顕微鏡の創製, 第 65 回中部日本生理学会, 2018
- [21] S. Choi, F. Nin, T. Ota, K. Sato, T. Suzuki, H. Hibino, Multi-frequency swept en-face optical coherence microscopy with supercontinuum comb for in-vivo measurement of inner ear, The Twelfth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE17) (招待講演) (国際学会) 2017
- [22] 崔 森悦, 任 書晃, 太田 岳, 佐藤 敬太, 日比野 浩, 生きた感覚上皮帯の 3 次元振動分布計測のためのスーパーコンティニウム多波長走査型 en-face OCT 顕微鏡, 日本光学会 OPJ2017, 2017
- [23] S. Choi, F. Nin, T. Ota, K. Sato, T. Suzuki, H. Hibino, Multi-frequency swept en-face optical coherence microscopy with supercontinuum comb for in-vivo measurement of inner ear, The 7th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2017) (招待講演) (国際学会)
- [24] 崔 森悦, 任 書晃, 太田 岳, 佐藤 敬太, 日比野 浩, 多波長走査型干渉顕微鏡を用いた広視野 in-vivo 蝸牛基底板の振動計測, 応用物理学会春季学術講演会, 2018
- [25] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、内耳ナノ振動を標的としたレーザ干渉計の作製と技術展開, 第 68 回日本薬理学会北部会, 2017

- [26] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、内耳ナノ振動を標的としたレーザ干渉計の作製と技術展開、第 64 回中部日本生理学会、2017
- [27] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、内耳蝸牛の感覚上皮帯に生じるナノ振動の特性：改良型レーザ干渉計による検討、第 95 回日本生理学会大会、2018
- [28] 村松 正吾、崔 森悦、小野 峻佑、伊藤 迅平、太田 岳、任 書晃、日比野 浩、非負制約を利用した en-face OCT ボリュームデータ信号復元、第 32 回信号処理シンポジウム、2017
- [29] 崔 森悦、任 書晃、太田 岳、日比野 浩、多波長走査型 OCT による生体内振動計測（招待講演）、レーザ学会学術講演会第 37 回年次大会（招待講演）、2017
- [30] S. choi, F. nin, K. Sato, H. Hibino, 3D Tomographic Measurement of Interior Surface Vibrations in Thick Biological Tissues Using Multifrequency Sweepable Optical Comb, 2016 Collaborative Conference on 3D & Materials Research（招待講演）（国際学会）,2016
- [31] 伊藤 迅平、村松 正吾、崔 森悦、パラメータ最適化による en-face OCT の観測過程推定、第 31 回信号処理シンポジウム、2016
- [32] 菅野 光成、黒川 隆志、塩田 達俊、田中 洋介、変調器を用いた光パルスと周波数コムの生成、平成28 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会、2017
- [33] 郡場 元太、小久 保幸、森 貴宏、田中 洋介、黒川 隆志、塩田 達俊、柏木 謙、波長可変な広帯域コムの生成と精密分光へ応用 波長可変な広帯域コムの生成と精密分光へ応用 波長可変な広帯域コムの生成と精密分光へ応用、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017.
- [34] 太田 岳、崔 森悦、任 書晃、日比野 浩、二重正弦波位相変調法を用いた生体ナノ振動計測技術の開発、第 58 回光波センシング技術研究会、2016
- [35] 崔 森悦、任 書晃、太田 岳、日比野 浩、生体内ナノ振動計測を目指した多波長走査型 en-face OCT の開発、第 58 回光波センシング技術研究会、2016
- [36] S. Choi, F. Nin, T. Suzuki, H. Hibino, Wide-field Heterodyne Vibrometry for Measurement of Surface Vibrations in Biological Tissues, IEEE OMN2016（国際学会）, 2016
- [37] 崔 森悦、鈴木 孝昌、任 書晃、日比野 浩、広視野ヘテロダイン干渉振動計測法による生体表面の高速振動計測、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016
- [38] 宗村 章平、崔 森悦、鈴木 孝昌、佐々木 修己、2 波長合成レーザ干渉計測法による段差計測、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016.
- [39] 佐藤 敬太、任 書晃、日比野 浩、崔 森悦、多波長走査型 en-face 干渉顕微鏡による生体内部の形状計測、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：田中 洋介

ローマ字氏名：Yosuke TANAKA

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：工学（系）研究科（研究院）

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：20283343

研究分担者氏名：村松 正吾

ローマ字氏名：Shogo Muramatsu

所属研究機関名：新潟大学

部局名：自然科学系

職名：教授

研究者番号（8 桁）：30295472

(2)研究協力者

研究協力者氏名：日比野 浩

ローマ字氏名：Hibino Hiroshi

研究協力者氏名：任 書晃

ローマ字氏名：Fumiaki Nin

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。