

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19913

研究課題名（和文）デュアルコム分光法を応用した細胞膜電位の非接触・非標識測定技術の新規開発

研究課題名（英文）Development of Contactless and Label-free Measurement of Membrane Potential Using Dual-Comb Spectroscopy

研究代表者

高成 広起（TAKANARI, Hiroki）

徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・准教授

研究者番号：70723253

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：細胞は電気的活動を介して生理学的に機能する。細胞の電気的活動に対して電極による接触計測や、電位感受性色素による光学マッピングが行われるが、単一細胞や摘出臓器にしか用いることができず、臨床応用できない。我々はサンプルに光周波数コムを透過させ、参照用の光周波数コムとの干渉波を解析するデュアルコム干渉計を構築した。生体計測の前段階として、細胞膜を模してガラスの両面に導電性薄膜コーティングしたサンプルを作成し、導電性薄膜間に電位差を印加してデュアルコム干渉計で計測を行ったところ、電位依存性に干渉波の位相が変化した。本実験により、細胞膜の電位変化を非接触・非標識で計測できる可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで細胞膜電位の変化は電極による接触計測や、電位感受性色素による光学マッピングによって達成されてきたが、前者は単一細胞にしか応用できず、後者は色素の毒性のため生体に直接用いることができない。このため、人体で細胞の電気的活動を直接知る方法が存在しない。我々は非生体試料ではあるが細胞膜を模したサンプルを作成し、2枚の薄膜間で電位差を生じた時に透過光の微細な位相変化が生じることを示した。今後、反射光学系での検証など改良を必要とするが、我々の研究成果が生体で応用されれば、神経や筋肉など多くの細胞の電気的活動を非接触・非標識で計測出来るようになる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Cells function physiologically via electrical activity. Contact measurement using electrodes and optical mapping using voltage-sensitive dyes are commonly used to measure the electrical activity of the cells. However, these techniques can only be used on single cells or excised organs and are not clinically applicable. We constructed a dual-comb interferometer that transmits an optical frequency comb through a sample and analyzes the interference waves with a reference optical frequency comb. As a preliminary step of the in vivo measurement, we prepared a sample with conductive thin films coated on both sides of glass to imitate a cell membrane, and applied a potential difference between the conductive films to measure the interference wave with the dual-comb interferometer. This experiment demonstrated the possibility of contactless, label-free measurement of potential changes inside and outside the cytoplasmic membranes.

研究分野：生体医工学

キーワード：デュアルコム干渉計 活動電位 細胞膜電位 非標識測定 非標識イメージング

1. 研究開始当初の背景

神経細胞や筋肉細胞など多くの細胞は、電氣的に興奮することで生理学的に機能する(神経刺激の伝達や筋肉の収縮など)。細胞膜は、静止時には細胞内外のカリウムイオンの濃度勾配によって $-60\sim-90$ mVの静止膜電位を維持する。細胞に刺激が加わると細胞膜のイオンチャネルを開いて細胞外のナトリウムイオンを細胞内に汲み入れることで、数ミリ秒の間に膜電位を $0\sim10$ mVまで脱分極させて活動電位を形成する。その後、膜電位は静止膜電位まで戻って次の刺激に備える。かつて細胞膜電位は細胞に直接電極を接着させて記録されていた。1970年代にパッチクランプ法が開発されると、細胞膜電位だけでなく細胞膜のイオンチャネルを流れるイオン電流の詳細な計測も可能となり、細胞電気生理学が飛躍的に発展した。しかしパッチクランプ法は単一の細胞にしか用いることができないため、組織全体の電氣的活動を観察しうる手法の確立が求められた。2000年に入って電位感受性蛍光色素が開発され、組織の電氣的活動をハイスピードカメラによる蛍光マッピング画像で観察できるようになり、組織の中の電氣的伝播が可視化されるようになった。しかし蛍光色素の毒性のため生体に直接用いることはできず、臨床にも応用されない。また蛍光マッピングでは膜電位の変化は捉えられても、膜電位の絶対値までは分からないことも一つの問題である。このような背景から、基礎あるいは臨床の電気生理学の分野では、非接触・非標識で膜電位を計測・観察しうる新しい手法の開発が望まれている。

光周波数コムは時間領域で数百フェムト秒ごとに繰り返されるパルス光で、時間領域のスペクトルをフーリエ変換すると周波数領域で等間隔のスペクトル線が形成され、その形状が櫛(コム: Comb)のように見えることから光周波数コムと呼ばれる。周波数領域のスペクトル間隔(櫛の歯の間隔)が一定であるため、微細な変化であっても極めて精密に計測できる。また二つの光周波数コムを用いて、一方(シグナルコム)をサンプルに照射し、もう一方(ローカルコム)を参照光として干渉させるデュアルコム干渉計は、干渉波のうなり(ビート)をラジオは領域で高速取得することが可能であることから、微細な変化を高速記録するツールとして注目されている。我々はデュアルコム干渉計の技術によって膜電位計測が可能であると仮説を立て、以下の研究開発を実施した。

2. 研究の目的

我々は、細胞膜電位そのもの、あるいは細胞膜が脱分極した時に生じる微細な変化を、デュアルコム干渉計の原理を用いて計測・観察するための基盤技術の構築を目指して研究開発を行った。但し、最初から細胞を用いると、細胞の膜電位以外の情報(細胞内カルシウムの変化や細胞の形態変化など)による擾乱が生じる可能性があり、構築した光学系で真に膜電位の変化を捉えられているか分からない可能性があったため、本研究では細胞膜を模して作成した非細胞サンプルを用いて実験を行った。

3. 研究の方法

細胞膜はリン脂質で構成される脂質二重膜であり、活動電位が生じた際にはその内外で電位差を生じる。このような細胞の電氣的活動を等価回路で表現した場合には平行平板コンデンサとして表される(図1)。そこで我々は、光を透過して、なおかつサンプルの両面で電位差を作り出すことができるITO(インジウム、スズ、酸素)薄膜を両面蒸着したガラス板をサンプルとして用いた。厚さ 0.5 mmのカバーガラスにITOを電子ビーム蒸着し、厚さ約 200 ÅのITO薄膜でガラスの両面にコーティングした。その後、 520°C で10分のannealing処理を加えてITOを透明化し、波長 $1,500$ nmの近赤外周波数コムに対して透過率が 91.5% 、各面の電気抵抗が約 400 Ωの均一な両面ITOガラスを作成した(図2)。それぞれの面に銅線を接触させて、直流電源に接続してガラスの表裏で電位差がかけられるようにセッティングした。

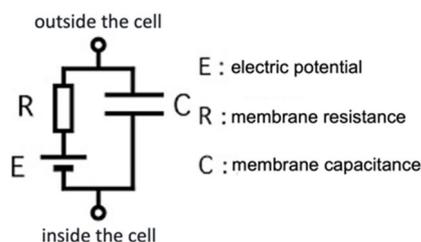


図1. 細胞膜の等価回路

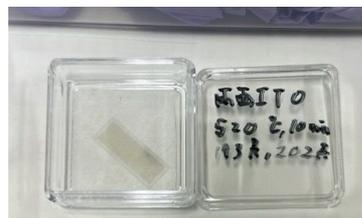


図2. 両面ITOコーティングガラス

本研究ではネオアーク社のモード同期Er光ファイバレーザによる光周波数コム(中心波長: $1,560 \pm 20$ nm、繰り返し周波数 f_{rep} : 100 MHz、パルス幅: 200 fs)を2台用いた。2台の繰り返し周波数の違い f_{rep} を 1 kHzで固定し、それぞれシグナルコムとローカルコムとして用いる干渉光学系を構築した。なお、最終的な臨床応用を見越して反射配置の光学系が望ましいが、本研究では光学系の構築や微調整が容易な透過光学系を採用した。また、当初はシグナルコムがサンプルを透過した後、偏光

ビームスプリッタを用いてローカルコムと合波・干渉させ、干渉波 (Interferogram) を差分増幅ディテクタ (ThorLabs 社製、PDB835C-AC) で検出し、干渉波のピークを RF 領域のオシロスコープで記録するシンプルな光学系 (図 3) を構築した。しかし、この設定ではオシロスコープでトリガーをかけて記録される Interferogram が一つであるため、Interferogram の振幅変化は捉えられるものの、電圧の on-off に伴う位相変化が捉えられない可能性が考えられた。そこで我々は偏光ビームスプリッタを用いてシグナルコムとローカルコムをそれぞれ分波し、サンプルを通さないシグナルコムとローカルコムを干渉させた参照用 Interferogram も同時に計測できる光学系を構築した (図 4)。これにより、参照用 Interferogram に対してオシロスコープのトリガーをかけて記録することで、サンプルを透過させて取得した Interferogram の位相変化も併せて記録できるようになった。以後、本光学系を用いて ITO ガラスの両面に電圧を印加した時の Interferogram の位相や振幅を比較する実験を行った。オシロスコープのサンプリング頻度は 1 GHz とし、1,000 回の加算平均を記録した。

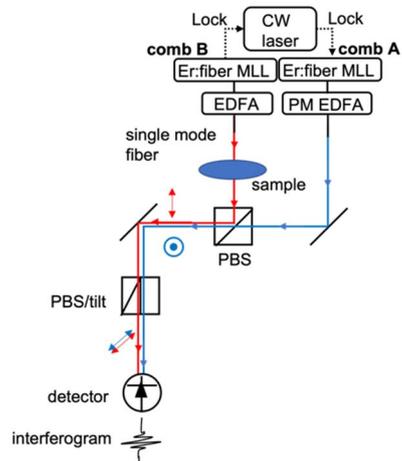


図 3. デュアルコム干渉計 (初期)

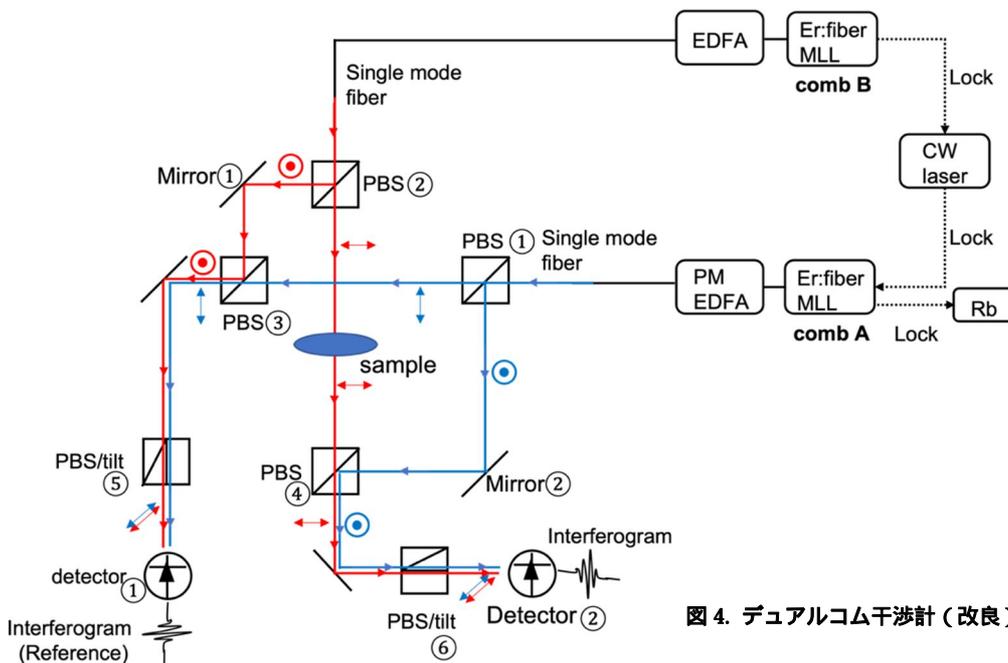


図 4. デュアルコム干渉計 (改良)

4. 研究成果

最初に位相変化が確実に生じるサンプルとして AR ウィンドウガラス (ThorLabs WG11010-C, 透過波長: 1,050~1,700 nm) を用いて、改良型デュアルコム干渉計の性能検証を行った。図 5 に示すように、サンプル光路内にウィンドウガラスを挿入する前 (赤) と後 (青) では、振幅の変化を伴わずに位相のみが左方シフトする様子が確認された。これにより、改良型デュアルコム干渉計によってサンプルを透過する光の位相変化を計測できることが証明された。

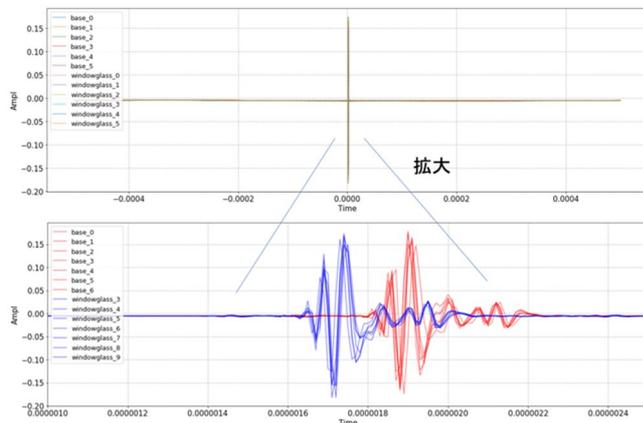


図 5. ウィンドウガラス挿入前後の Interferogram の変化 (赤: 挿入前, 青: 挿入後)

続いて、細胞膜を模した両面 ITO コーティングガラスをサンプル光路内に設置し、ITO 薄膜間に 3 V および 10 V の電位差を生じさせた際の Interferogram の変化を観察した。この時、参照用 Interferogram に対して両面 ITO ガラスを透過させて得た Interferogram

では、ITO 薄膜間に電位差を生じさせると全体的に左側にシフトし、また一部では位相の逆転などの変化も生じていることが観察された(図6)。

オシロスコープで取得した Interferogram を高速フーリエ変換(+unwrapping 処理)したところ、位相の傾き成分が電位依存的に増大し(図7 上段) また特定の周波数領域(10~20 MHz)においては振幅の変化も見られた(図7 下段)。

振幅あるいは振幅の変化が比較的大きい15~18 MHzの範囲における位相を最小二乗法で線形近似して傾きを算出し、複数回の実験で得られたデータをまとめたところ、位相の傾き変化は電位依存的かつ有意な変化であることが示された(図8:一元配置分散分析法 + Tukey's post-hoc test で $p < 0.01$)。

以上の結果から、Dual-Comb 干渉計によって透明な非生体サンプルにおける電位変化を、非接触・非標識で計測あるいは観察できる可能性が示された。特に電位依存的な位相の変化を計測できたことで、電位の絶対値(あるいは変化量)を計測できる可能性が示されたことは大きな発見であった。

今回はオシロスコープを用いた簡易的な計測装置のため、1,000 回平均のデータを用いて解析を行ったため、1回の計測に約5秒の計測時間を要している。このことは、デュアルコム干渉計の高速性を失わせていることに注意が必要である。我々はこの問題を解決するため、リアルタイムに位相と振幅を導出するためのプログラムを、LabView を用いて構築することも試みた(図9)。残念ながら本開発期間中にプログラムの完成に至らなかったが、試験運用で位相と振幅のリアルタイム計測に成功している。今後、本プログラムを導入することで極めて早い(ミリ秒単位の)電位変化を捉えられるようになることが期待される。

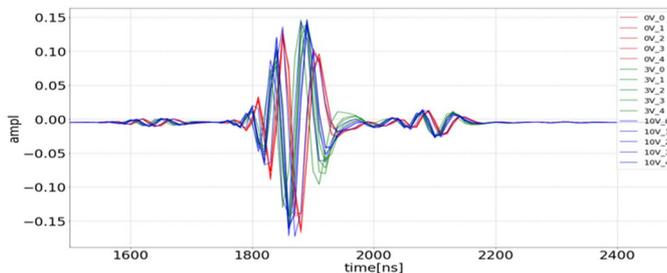


図6. ITO 薄膜間の電位差による Interferogram の変化 (赤: 0 V, 緑: 3 V, 青: 10 V)

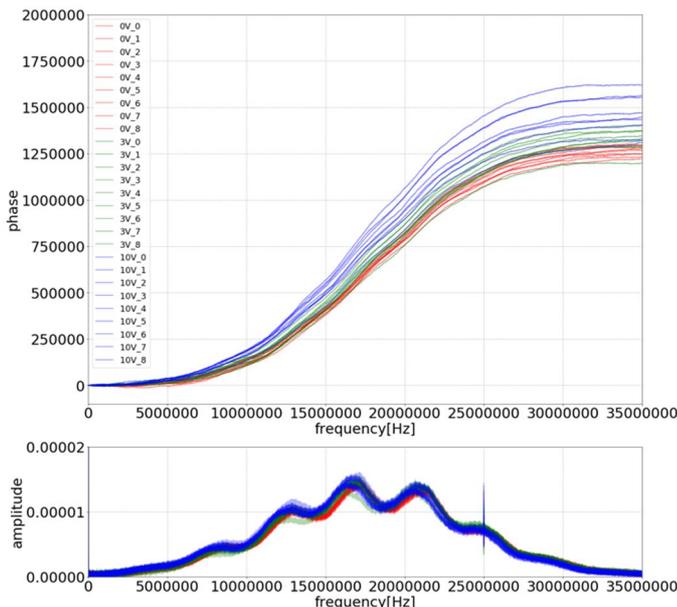


図7. Interferogram の高速フーリエ変換。上段: 位相, 下段: 振幅 (赤: 0 V, 緑: 3 V, 青: 10 V)

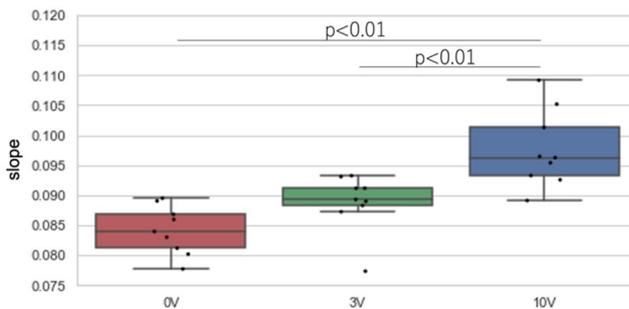


図8. Interferogram 位相の傾きのまとめデータ (赤: 0 V, 緑: 3 V, 青: 10 V)

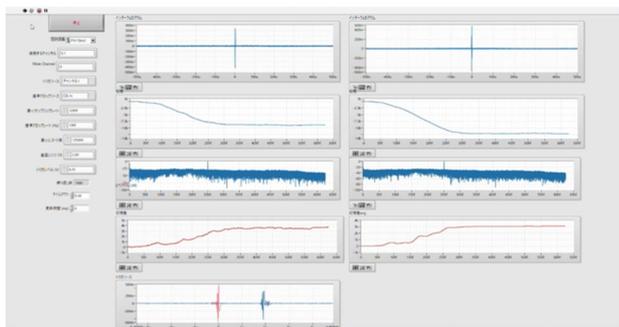


図9. Interferogram からリアルタイムに位相・振幅を計測するプログラム (Lab View)

本研究では細胞膜を模倣して、厚さ 0.5 mm のカバーガラスの両面に ITO 薄膜を蒸着したサ

ンプルを用いたが、最終的に標的とする細胞膜の厚さは 10 nm 程度である。また我々が ITO 薄膜間に印加した電位は 3, 10 V だったが、細胞が脱分極して発生する電位差は 100 mV 程度である。このような差が影響するのか、細胞膜でも電位差が計測できるか、といった検証が今後は必要である。なお、電界強度を計算したところ、10 nm の厚さの細胞膜で 100 mV の電位差の場合に電界強度は 1×10^7 V/m、一方 0.5 mm の厚さのガラスで 10 V の電位差では電界強度は 4×10^3 V/m となり、むしろ電界強度としては細胞膜の方が大きい。このため細胞膜のサイズであっても、より大きな電界強度をして十分に計測できる可能性があると考ええる。

細胞膜のサイズでの計測を考えた際にもう一つの問題となり得るのは空間分解能である。我々が用いた近赤外光（中心波長 1,560 nm）による計測の場合、空間分解能は最大限で 1 μ m 程度になる。これは近年めざましい発展を遂げている光学顕微鏡の空間分解能には遠く及ばない（共焦点レーザー顕微鏡で 200 nm、超解像顕微鏡で 30 nm）。従って、本技術は個々の細胞の電氣的活動と言うよりは組織の電氣的活動を観察するのに向いている可能性がある。例えば脳手術の際の脳神経の電氣的活動や、網膜視細胞の電氣的活動など、組織における大まかな電氣的活動や刺激伝播を観察することができれば、臨床におけるインパクトは非常に大きい物になると予想される。これらは透過配置の光学系では実現できない（組織に光を透過させることができない）ため、今後は反射配置光学系での検証を行う必要がある。また一点の計測では応用にも限界があるためにレーザースキャンを取り入れる必要もある。開発は道半ばではあるが、最初のステップとして「新しい技術によって電位変化を光学的に捉えることができる可能性が示された」ことは大きな一歩であったと考ええる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Naya Yuki、Takanari Hiroki	4. 巻 18
2. 論文標題 Elastin is responsible for the rigidity of the ligament under shear and rotational stress: a mathematical simulation study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Orthopaedic Surgery and Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s13018-023-03794-6	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 Takanari Hiroki、Okuyama Minami W、Kuroki Kohji、Kondo Hidekazu、Kira Shintaro、Miura Masahiro、Takahashi Naohiko、Okuda Takahisa	4. 巻 66
2. 論文標題 A Case Report of Acute Cardiac Tamponade Creation in a Macaque: Echo-Guided Catheter Manipulation to Perforate Coronary Artery	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Yonago Acta Medica	6. 最初と最後の頁 192 ~ 195
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.33160/yam.2023.02.022	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 Tie Jian、Takanari Hiroki、Ota Koya、Okuda Takahisa	4. 巻 14
2. 論文標題 Role of miR-143 and miR-146 in Risk Evaluation of Coronary Artery Diseases in Autopsied Samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Genes	6. 最初と最後の頁 471 ~ 471
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/genes14020471	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 Kanemura Yohei、Kanazawa Meiko、Hashimoto Satoru、Hayashi Yuri、Fujiwara Erina、Suzuki Ayako、Ishii Takashige、Goto Masakazu、Nozaki Hiroshi、Inoue Takanori、Takanari Hiroki	4. 巻 147
2. 論文標題 Assessment of skin inflammation using near-infrared Raman spectroscopy combined with artificial intelligence analysis in an animal model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Analyst	6. 最初と最後の頁 2843 ~ 2850
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D2AN00193D	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 Li Encan, Loen Vera, van Ham Willem B., Kool Willy, van der Heyden Marcel A. G., Takanari Hiroki	4. 巻 12
2. 論文標題 Quantitative Analysis of the Cytoskeleton's Role in Inward Rectifier KIR2.1 Forward and Backward Trafficking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 812572 ~ 812572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2021.812572	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 Yamazaki Masatoshi, Tomii Naoki, Tsuneyama Koichi, Takanari Hiroki, Niwa Ryoko, Honjo Haruo, Kodama Itsuo, Arafune Tatsuhiko, Makita Naomasa, Sakuma Ichiro, Dobrev Dobromir, Nattel Stanley, Tsuji Yukiomi	4. 巻 19
2. 論文標題 Rotors anchored by refractory islands drive torsades de pointes in an experimental model of electrical storm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Heart Rhythm	6. 最初と最後の頁 318 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.hrthm.2021.10.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Araoka S, Takanari H, Mitsumoto R, Emoto A, Yoshii K.
2. 発表標題 Label-free voltage measurement by dual-comb interferometry: a fundamental study for label-free imaging of action potentials.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shintani M, Yanagiya S, Takanari H.
2. 発表標題 Potential of a new photothermal therapy against amyloid- protein based on nanodiamonds.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Oshikata H, Matsuzaki S, Hase E, Takanari H, Kimura S, Tsuneyama K.
2. 発表標題 Assessment of collagen fiber orientation in alcoholic liver disease using polarization-resolved second harmonic generation microscopy.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahashi R, Takanari H, Terabayashi T, Ishizaki T.
2. 発表標題 The mechanisms of intracellular Ca ²⁺ increase by Timosaponin AIII in HeLa cells.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshimoto M, Honda T, Takanari H, Yanagiya S, Miki H.
2. 発表標題 Diagnosis of cardiac amyloidosis using Raman spectroscopy.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanada N, Takanari H.
2. 発表標題 SREBP1-mediated GJA5 expression in cholesterol excess and depletion.
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉井一倫, 光本涼, 久世直也, 井上一輝, 中嶋善晶, 安井武史, 美濃島薫.
2. 発表標題 導波路型PPLN結晶を用いた広帯域中赤外コムの開発とその応用
3. 学会等名 レーザー学会第570回研究会「次世代ファイバーレーザー技術」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 光本涼, 久世直也, 井上一輝, 中嶋善晶, 安井武史, 美濃島薫, 吉井一倫.
2. 発表標題 導波路型PPLN結晶を用いたシングルパス構成mW級広帯域中赤外コム
3. 学会等名 日本光学会 Optics & Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Araoka S, Takashima Y, Naoi Y, Emoto A, Yoshii K, Mitsumoto R, Takanari H.
2. 発表標題 Label-free detection of membrane potential using dual-comb interferometry.
3. 学会等名 第60回生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shintani M, Yanagiya S, Takanari H.
2. 発表標題 Verification of a new targeted therapy against amyloid- using nanodiamonds.
3. 学会等名 第60回生物物理学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉井一倫, 光本涼, 久世直也, 井上一輝, 中嶋善晶, 安井武史, 美濃島薫.
2. 発表標題 導波路型PPLN結晶を用いた広帯域中赤外デュアルコム分光計
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 光本涼, 久世直也, 井上一輝, 中嶋善晶, 安井武史, 美濃島薫, 吉井一倫.
2. 発表標題 導波路型PPLN結晶を用いた広帯域中赤外コム発生の高出力化
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumichi Yoshii, Naoya Kuse, Kazuki Inoue, Ryo Mitsumoto, Yoshiaki Nakajima, Takeshi Yasui, Kaoru Minoshima.
2. 発表標題 Generation of a mW-class broadband mid-infrared comb using a waveguide-type PPLN crystal and its application to dual-comb spectroscopy
3. 学会等名 Conference of Lasers and Electro-Optics, Pacific Rim 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 光本涼, 久世直也, 井上一輝, 中嶋善晶, 安井武史, 美濃島薫, 吉井一倫.
2. 発表標題 導波路型PPLN結晶を用いたmW級広帯域中赤外コム発生
3. 学会等名 2022年度応用物理・物理系学会 中四国支部合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 納谷友希、高成広起
2. 発表標題 Verification of mechanical load on ligament by mathematical model based on multiphoton microscope images
3. 学会等名 第99回日本生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木絢子、納谷友希、金村洋平、高成広起、井上高教
2. 発表標題 光分光法および画像解析を組み合わせた食品の非破壊分析
3. 学会等名 日本農芸化学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸山慧、江本顕雄
2. 発表標題 フォトポリマーの重合時交差拡散に伴う分子配向拡散様式の調査
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金村洋平、高成広起
2. 発表標題 皮膚ケラチノサイトの紫外線に対する光応答
3. 学会等名 第30回日本病態生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 納谷友希、高成広起
2. 発表標題 数理シミュレーションモデルを用いた靱帯主要構成要素における力学的応答の検証
3. 学会等名 第30回日本病態生理学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江本顕雄
2. 発表標題 フォトポリマーの重合時交差拡散を利用したオンデマンドのマイクロ流路デバイス作成技術
3. 学会等名 第172回ラドテック研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>画像処理・画像解析による医療支援 内視鏡と画像強調解析における画像センサの役割 (1) http://sensait.jp/21189/ 画像処理・画像解析による医療支援 内視鏡と画像強調解析における画像センサの役割(2) http://sensait.jp/21193/ 著者：納谷友希、高成広起 研究成果の一部をWebジャーナル「センサイト 2022年6月号」にて公開しました。</p>

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	江本 顕雄 (EMOTO Akira) (80509662)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・特任准教授 (16101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	吉井 一倫 (YOSHII Kazumichi) (90582627)	徳島大学・ポストLEDフォトンクス研究所・特任准教授 (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			
オランダ	UMC Utrecht			