

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05756

研究課題名（和文）高効率光熱変換タンパク質ヒーター創出に向けた分子内熱伝導機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of intramolecular heat transfer mechanism for construction of highly effective photothermal protein heaters

研究代表者

水野 操 (Mizuno, Misao)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：10464257

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 29,300,000円

研究成果の概要（和文）：ヘムタンパク質において、ヘムの光励起により生じた余剰振動エネルギーの散逸過程を、タンパク質に含まれるトリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱を分光学的プローブとして、アミノ酸残基単位で時空間マップした。タンパク質の特徴的な構造を利用して、エネルギーフローのヘムからの距離依存性を観測し、タンパク質が密なパッキングにより高い熱伝導性を持つことを明らかにした。また、トリプトファンのアンチストークスラマン散乱強度が、非平衡状態のタンパク質内局所温度を決定する優れた分光学的温度計になることを実証した。さらに、ヘムタンパク質がタンパク質ヒーターとして十分な加熱能を持つことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タンパク質を細胞中で分子ヒーターとして利用した熱シグナルによる細胞操作はこれまでに例がない。本研究では、ヘムタンパク質が高効率な光熱エネルギー変換分子ヒーターとして機能することを、分子内熱伝導機構の解明および水溶媒加熱能計測により明らかにした。タンパク質ヒーターは、生合成されるため生体への負荷が非常に小さく、遺伝子工学により細胞内の特定のオルガネラに局在できる。光熱変換タンパク質ヒーターを用いた細胞内熱シグナルの制御は、高い加熱効率かつ高い空間選択性という点で従来法に比べて優位性があり、オプトジェネティクスに比肩する革新的な細胞操作技術の創成に本研究成果は重要な知見を与えた。

研究成果の概要（英文）：Diffusion processes of excess vibrational energy generated by photoexcitation of heme in heme proteins were spatiotemporally mapped at the level of a single amino acid residue using the anti-Stokes Raman scattering of a tryptophan residue in the protein as a spectroscopic probe. Taking advantage of characteristic structures of proteins, we observed the dependence of the vibrational energy flow on the distance from the heme group and revealed that the protein is highly thermally conductive due to its dense packing. We also demonstrated that the anti-Stokes Raman intensity of tryptophan is an excellent spectroscopic thermometer to determine the local internal temperature in the protein in a nonequilibrium state. In addition, we demonstrated that heme proteins have sufficient heat releasability following photothermal energy conversion on heme as protein-based molecular heaters.

研究分野：生物物理化学

キーワード：タンパク質ヒーター 光熱エネルギー変換 振動エネルギー移動 アンチストークスラマン散乱

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 熱は変化を駆動するエネルギーであると同時に、環境を規定する情報でもある。生命現象における熱もこの二つの役割を担っている。細胞内の化学反応は熱エネルギーによって駆動される。一方、温度変化に対する細胞応答では熱は温度感受性タンパク質を作動させる情報として働く。熱シグナルによる情報伝達の機構解明と制御のためには、細胞内での効率的かつ部位選択的な加熱技術が求められている。熱シグナルを利用した細胞操作は、物質を利用した従来の技術とは本質的に異なる新しい生体操作技術を創出する。非侵襲的な細胞操作を行うために、外部から入力した光エネルギーを熱エネルギーへ変換する。光エネルギー入力によって熱シグナルを効率的に生み出す分子ヒーターとして働くタンパク質(タンパク質ヒーター)の開発、操作対象となる温度感受性タンパク質との効率的なカップリングが必要である。

(2) 研究代表者はこれまでに、タンパク質に含まれる芳香族アミノ酸残基の共鳴ラマンスペクトルを高感度に高速時間分解計測する分光システムを開発し、これを用いてヘムタンパク質における分子内振動エネルギー拡散の計測技術を構築した[1]。さらに、アミノ酸置換による改変ヘムタンパク質を用いて、光吸収したヘムで発生する余剰振動エネルギーのタンパク質分子内拡散の時空間マッピングに成功し、エネルギー移動を観測するに足る高い時間分解能、かつアミノ酸残基単位の空間分解能での計測を可能にした[2]。タンパク質分子内の余剰エネルギー分布の時空間マッピング観測により、ヘムタンパク質を高効率光熱エネルギー変換タンパク質ヒーターとして利用し、細胞局所加熱を行う着想を得た。分子ヒーターとしてのヘムタンパク質は、ヘムの高い可視光領域の吸光係数を利用した光熱変換によって高い加熱効率が望めるうえ、遺伝子工学により細胞中で空間選択的に発現させることが可能である。一方、光熱エネルギー変換による細胞加熱という観点では、金ナノロッドやグラフェンを分子ヒーターとして利用例があるが、この技術では生細胞への負荷が重く、またその加熱効率は十分に高くない。タンパク質の細胞内分子ヒーターとしての利用は、これまで類似研究はない。これらのことから、高効率光熱エネルギー変換タンパク質ヒーターの創成は、細胞操作のための全く新しい研究ツールを提供する。

## 2. 研究の目的

本研究では、タンパク質ヒーターのプロトタイプとして、ヘムタンパク質に着目する。それは、ヘムタンパク質がヒーターとなる高いポテンシャルを有しているからである。ヘムは可視光吸収により電子励起されると、100 フェムト秒以内で電子基底状態へ無輻射緩和する。このため、入射光のエネルギーは大きな損失なく、余剰振動エネルギーへ変換され、局所的な高温状態が発生する。すなわち、ヘムはタンパク質ヒーターにおける熱源となる高効率な光熱変換素子として働く。細胞操作に対して、温度感受性タンパク質と効率的にカップリングするために、ヘムで発生した熱シグナルのタンパク質分子内部での流れを明らかにする必要がある。そこで、高効率光熱エネルギー変換タンパク質ヒーターの設計基盤となるタンパク質分子内熱伝導機構を解明する。これを基に、タンパク質ヒーターによる革新的な細胞操作研究ツール開発に貢献する。

## 3. 研究の方法

### (1) タンパク質分子内熱伝導の解明(余剰振動エネルギーの時空間マッピング)

ヘムタンパク質は、振動エネルギー移動の観測に非常に適した分子系である。時間分解紫外共鳴アンチストークスラマン分光法を用いてヘムタンパク質における分子内エネルギーフローを観測した。第一のピコ秒可視光パルス(作動光)により、ヘムを電子励起した。ヘムから拡散するエネルギーフローは、第二のピコ秒紫外光パルス(スペクトル観測光)によって、タンパク質分子に含まれるトリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱をプローブに用いることで観測した。トリプトファンは紫外光領域に芳香環由来の遷移強度が大きい吸収帯を持つため、紫外光励起によるラマン散乱光の共鳴増大効果を利用して、タンパク質分子中のトリプトファン残基由来のラマンスペクトルを選択的に観測できる。アンチストークス散乱は振動励起状態の分子のみから発生するので、散乱光強度増加はヘムからトリプトファン残基へのエネルギー流入量を反映している。時間分解計測により散乱光強度を定量的に解析し、タンパク質分子中のトリプトファン残基の位置での余剰エネルギー分布の時間変化を調べた。

過渡的なエネルギー分布の時空間マッピングを行うために、構造既知の天然タンパク質を鋳型にして、余剰エネルギー分布のプローブとなるトリプトファン残基を、ヘムに対して系統的に異なる位置に1残基ずつ配置した改変タンパク質を作製した。各改変タンパク質について、時間分解紫外共鳴アンチストークスラマン分光法によって、それぞれの位置におけるトリプトファン残基へのエネルギー流入・流出に関するデータを測定した。これらのデータを統合することで行ったアミノ酸残基単位での余剰振動エネルギーフローの時空間マッピングに基づいて、タンパク質分子内熱伝導機構を明らかにした。

## (2) タンパク質ヒーターの開発 (タンパク質ヒーターの加熱能評価)

タンパク質ヒーター中のヘムに連続光を照射すると、定常的な光熱エネルギー変換が起きる。ヘムから放出されたエネルギーによるタンパク質周辺の水溶媒の温度上昇を、水溶媒のラマンバンド形状変化から観測した。

## 4. 研究成果

### (1) 分光システムの高感度化・高安定化

本研究では、ヘムに発生した余剰振動エネルギーが周囲へ散逸するときの時空間分布を、トリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱強度変化により検出する。微弱なアンチストークスラマン散乱光の高感度観測を行うための基盤として、安定な出力・幅広い波長選択性を有する光源を含む分光システムを構築した。これにより、ヘムを電子励起するピコ秒可視光パルス (400–600 nm)、およびトリプトファン残基の共鳴ラマン散乱を観測するピコ秒紫外光パルス (220–240 nm) を安定して得られるようになり、本研究を推進する分光計測基盤が整った。

### (2) タンパク質分子内エネルギーフローのヘムトリプトファン残基間距離依存性

先行研究において、ヘムタンパク質の一種であるミオグロビンにおけるヘムからの振動エネルギーフロー観測を行った[2]。ミオグロビンは、光に対して安定であり、構造やダイナミクスについてよく理解されている利点があるが、分子構造が複雑であるため、余剰エネルギー分布のプロブとなるトリプトファン残基の位置をヘムに対して系統的に変えることができない。これに対して本研究では、 $\alpha$ ヘリックスの周期構造を利用した。4本の $\alpha$ ヘリックスとヘムからなるシトクロム  $b_{562}$  を鋳型として、同じヘリックス上で1ターンずつ位置をずらしたトリプトファン残基を持つ改変タンパク質を作製した (図1A)。それぞれの改変タンパク質において、ヘムからの余剰エネルギー流入によるトリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱強度の時間変化を観測し、余剰エネルギーフローのヘムトリプトファン残基間距離依存性を調べた。ヘムからトリプトファン残基までの距離が長くなるほど、トリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱光の過渡的な強度増加が小さくなり、その強度増加の速度が遅くなった。加えて、10ピコ秒程度で溶媒へエネルギーが散逸することがわかった。ヘムから散逸した余剰エネルギーの時空間分布は、分子動力学シミュレーションによって得られた分子構造を基にして、古典的な熱拡散モデルで定量的によく再現できた (図1B)。この結果は、タンパク質内部が連続媒体として近似できることを示唆している。タンパク質は、密なパッキングにより高い熱伝導性を持つことを明らかにした。

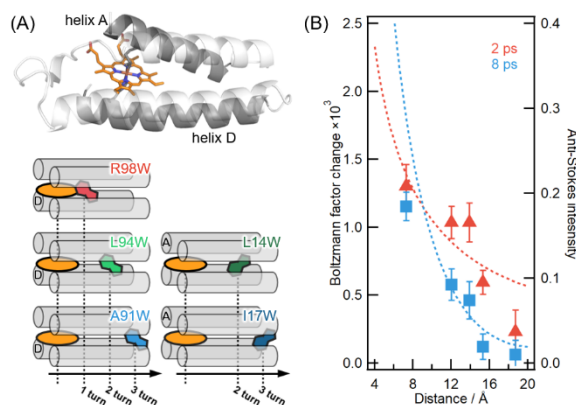


図1. シトクロム  $b_{562}$  におけるタンパク質分子内エネルギーフロー観測. (A) シトクロム  $b_{562}$  の結晶構造 (上) と変異導入したトリプトファン残基の位置 (下). A および D ヘリックス (濃いグレーで表示) にトリプトファン残基を導入した. (B) トリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱強度増加 (▲, ■) と熱拡散モデルによって算出したボルツマン因子変化 (破線) のヘムからの距離依存性.

### (3) 非平衡振動励起状態における内部温度プローブとしてのトリプトファンの優位性

タンパク質分子内エネルギーフロー研究において、アンチストークスラマン散乱強度は余剰エネルギーの割合に関する情報を提供する。任意の振動モードにおける振動励起の割合が、非平衡条件での分子全体の励起の割合を反映しているかは単純に表すことができない。本研究では、各アミノ酸モデル化合物について、平衡状態および非平衡状態における振動状態の占有確率を計算した。トリプトファンモデル化合物について、ある温度における非平衡状態での占有確率は、高温平衡状態の占有確率とほぼ一致した (図2)。これは、トリプトファンの高い振動状態密度に起因する。非平衡状態のトリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱強度は、平衡状態において同等のエネルギーをもつ分子の温度を示している。加えて、先行研究[1]で報告されたヘムの光励起に対するトリプトファン残基の時間分解共鳴アンチストークスラマン散乱強度より算出された過渡的な温度が、異なる振動モードで一致することがわかった。この結果から、トリプトファン残基のアンチストークスラマン散乱強度が、非平衡状態においてタンパク質の局所温度を決定するための優れた分光学的温度計として利用できることを実証した。

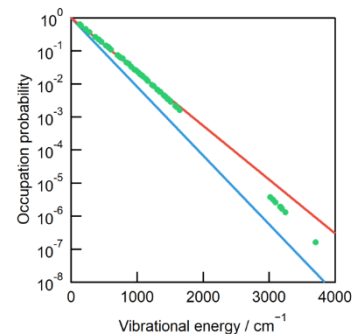


図2. トリプトファンモデル化合物における振動状態の占有確率. 青線: 室温平衡状態 (300 K)、赤線: 高温平衡状態 (499 K)、緑点: 室温にてエネルギー (1000  $\text{cm}^{-1}$ ) を与えられた非平衡状態のエネルギー分布から算出された占有確率.

#### (4) 光熱変換タンパク質ヒーターの溶媒加熱能評価

光吸収したヘムで発生した余剰エネルギーは、タンパク質構造の密なパッキングによる高い熱伝導性により水溶媒へすばやく散逸する。このことは、タンパク質は効率よく熱を放出し、分子ヒーターとして優れた可能性を持っていることを示唆している。先行研究では、ヘムをパルス光励起した時の光熱エネルギー変換による水溶媒の温度上昇は 0.4 度程度と見積もられている[3]。しかし、パルス光励起では加熱が断続的になり、過渡的な温度上昇があってもすぐに熱は拡散してしまう。そこで、連続光の加熱光照射によりヘムを継続的に励起することで効率的な加熱を行い、このときのタンパク質ヒーターの周辺水溶媒に対する加熱能を評価した。タンパク質ヒーターにおける光熱変換による水溶媒の温度上昇測定は、水溶媒のラマンバンド形状の温度依存性を利用した。スペクトル解析により、タンパク質ヒーターとしてのヘムタンパク質の溶媒加熱能は、温度感受性イオンチャネルタンパク質を作動させるのに十分であることがわかった(図 3)。この結果は、ヘムタンパク質がタンパク質ヒーターとして熱シグナル制御による細胞操作のツールとなりうることを示している。

また、同様の観測を蛍光量子収率が非常に低い GFP 様色素タンパク質を用いて行った。低い蛍光量子収率は、光励起後の無輻射緩和速度が速く、大きな余剰エネルギーが発生することを示している。ヘムタンパク質と同様の実験を行った結果、この色素タンパク質は分子ヒーターとして十分な溶媒加熱能を有することがわかった。

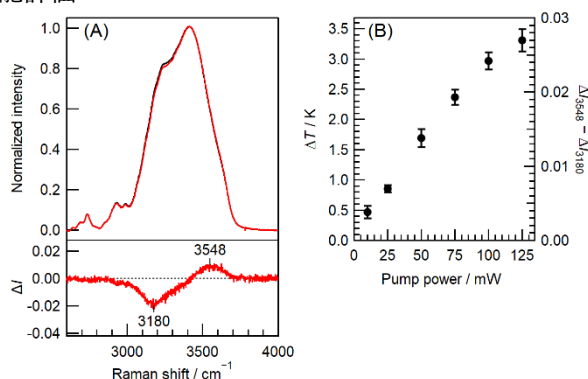


図 3. 光熱エネルギー変換によるミオグロビンの水溶媒加熱能評価. (A) 加熱光照射 (波長 532 nm、パワー 125 mW) によるタンパク質水溶液のラマンスペクトル変化 (上、赤:加熱光照射、黒:未照射) とその差スペクトル (下). (B) 加熱光照射による水溶媒温度上昇の加熱光強度依存性.

#### <引用文献>

- [1] Naoki Fujii, Misao Mizuno, and Yasuhisa Mizutani, *J. Phys. Chem. B* **115**, 13057-13064 (2011).
- [2] Naoki Fujii, Misao Mizuno, Haruto Ishikawa, and Yasuhisa Mizutani, *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 3269-3273 (2014).
- [3] Tianquan Lian, Bruce Locke, Yuriy Kholodenko, and Robin M. Hochstrasser, *J. Phys. Chem.* **98**, 11648-11656 (1994).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamashita Satoshi, Mizuno Misao, Takemura Kazuhiro, Kitao Akio, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 126
2. 論文標題 Dependence of Vibrational Energy Transfer on Distance in a Four-Helix Bundle Protein: Equidistant Increments with the Periodicity of Helices	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 3283 ~ 3290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.2c00956	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 -
1. 著者名 Hayashi Kouhei, Mizuno Misao, Kandori Hideki, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 61
2. 論文標題 Cis-Trans Reisomerization Precedes Reprotonation of the Retinal Chromophore in the Photocycle of Schizorhodopsin 4	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Angewandte Chemie International Edition	6. 最初と最後の頁 e202203149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/anie.202203149	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 -
1. 著者名 Shionoya Tomomi, Mizuno Misao, Kandori Hideki, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 126
2. 論文標題 Contact-Mediated Retinal-Opsin Coupling Enables Proton Pumping in Gloeobacter Rhodopsin	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 7857 ~ 7869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.2c04208	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 -
1. 著者名 Urui Taito, Das Ishita, Mizuno Misao, Sheves Mordechai, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 126
2. 論文標題 Origin of a Double-Band Feature in the Ethylenic C=C Stretching Modes of the Retinal Chromophore in Heliorhodopsins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 8680 ~ 8688
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpccb.2c04883	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

1. 著者名 Mizutani Yasuhisa, Mizuno Misao	4. 巻 157
2. 論文標題 Time-resolved spectroscopic mapping of vibrational energy flow in proteins: Understanding thermal diffusion at the nanoscale	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 240901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0116734	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 -

1. 著者名 水野 操	4. 巻 54
2. 論文標題 タンパク質分子内エネルギーフローの時間分解アンチストークスラマンマッピング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 月刊「細胞」	6. 最初と最後の頁 778 ~ 781
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Urui Taito, Mizuno Misao, Otomo Akihiro, Kandori Hideki, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 125
2. 論文標題 Resonance Raman Determination of Chromophore Structures of Heliorhodopsin Photointermediates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 7155 ~ 7162
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c04010	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 -

1. 著者名 Shionoya Tomomi, Singh Manish, Mizuno Misao, Kandori Hideki, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 60
2. 論文標題 Strongly Hydrogen-Bonded Schiff Base and Adjoining Polyene Twisting in the Retinal Chromophore of Schizorhodopsins	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biochemistry	6. 最初と最後の頁 3050 ~ 3057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.biochem.1c00529	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 -

1. 著者名 Yamashita Satoshi, Mizuno Misao, Mizutani Yasuhisa	4. 巻 156
2. 論文標題 High suitability of tryptophan residues as a spectroscopic thermometer for local temperature in proteins under nonequilibrium conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 75101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0079797	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 -

〔学会発表〕 計25件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 潤井 泰斗、林 航平、水野 操、井上 圭一、神取 秀樹、水谷 泰久
2. 発表標題 シゾロドプシンに共通する内向きプロトン輸送に重要な構造変化の同定
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zixuan Li, Misao Mizuno, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Time-resolved resonance Raman observation of the photoexcited retinal chromophore in halorhodopsin
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡瀬 太郎、水野 操、石川 春人、水谷 泰久
2. 発表標題 ヘムタンパク質を用いた分子ヒーターの開発
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入谷 悠、石川 春人、水野 操、水谷 泰久
2. 発表標題 祖先型グロビンフォールドタンパク質の構造ダイナミクスの解明
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野 操
2. 発表標題 Elucidation of intramolecular heat transfer mechanism for construction of highly effective photothermal protein heaters (高効率光熱変換タンパク質ヒーター創出に向けた分子内熱伝導機構の解明)
3. 学会等名 日本生物物理学会第60回年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Misao Mizuno
2. 発表標題 Time-resolved anti-Stokes Raman Study on vibrational energy flow in proteins
3. 学会等名 Taiwan-Japan International Symposium on Raman Spectroscopy / Development of Advanced Raman Spectroscopy in Japan and Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomomi Shionoya, Misao Mizuno, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Contact-Mediated Retinal-Opsin Coupling Enables Proton Pumping in Gloeobacter Rhodopsin
3. 学会等名 19th International Conference on Retinal Proteins (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Taito Urui, Kouhei Hayashi, Misao Mizuno, Keiichi Inoue, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Identification of Structural Changes Essential to Inward Proton Transport Common to Schizorhodopsins
3. 学会等名 19th International Conference on Retinal Proteins (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kouhei Hayashi, Taito Urui, Misao Mizuno, Hideki Kandori, Yuki Sudo, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Structural analysis on the M intermediates of inward proton-pumping xenorhodopsins
3. 学会等名 19th International Conference on Retinal Proteins (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野 操
2. 発表標題 時間分解共鳴ラマン分光法で観るタンパク質ダイナミクス
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 徳 さくらこ、水野 操、今村 博臣、村越 秀治、水谷 泰久
2. 発表標題 無蛍光性色素タンパク質による分子ヒーターの開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村 大輝、水野 操、大友 章裕、神取 秀樹、水谷 泰久
2. 発表標題 ナトリウムイオン輸送タンパク質の多量体形成に依存した分子内水素結合変化
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Misao Mizuno, Naito Isimoto, Sam-Yong Park, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Characterization of the chromophore structure in the photocycle of a new type of chloride ion-pumping rhodopsin
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomomi Shionoya, Misao Mizuno, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Interaction between retinal chromophore and opsin to enable proton transport in a light-driven proton pump GR
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taito Urui, Misao Mizuno, Akihiro Otomo, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Resonance Raman Determination of Chromophore Structures of Heliorhodopsin Photointermediates
3. 学会等名 Twentieth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水野操、石本 直偉士、朴 三用、水谷 泰久
2. 発表標題 新規光駆動塩化物イオンポンプの光反応中間体の発色団構造解析
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 潤井 泰斗、Das Ishita、Sheves Mordechai、水野 操、水谷 泰久
2. 発表標題 レチナルアナログ置換によるヘリオロドプシン発色団の構造特異性の解明
3. 学会等名 第15回分子科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Misao Mizuno
2. 発表標題 Role of atomic contacts in vibrational energy transfer in proteins
3. 学会等名 Pacifichem2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiang Gao, Misao Mizuno, Haruto Ishikawa, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Time-resolved Resonance Raman Observation of Quaternary Structural Changes of Dimeric Hemoglobin
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zixuan Li, Misao Mizuno, Hideki Kandori, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Time-resolved resonance Raman observation of the chromophore structure in primary intermediates of microbial rhodopsins
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 入谷 悠、石川 春人、水野 操、水谷 泰久
2. 発表標題 共鳴ラマン分光法による祖先型グロビンフォールドタンパク質のヘム-軸配位子構造の解明
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 航平、水野 操、神取 秀樹、水谷 泰久
2. 発表標題 内向きプロトンポンプシゾロドプシンにみられる複数のM中間体の発色団構造解析
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xiang Gao, Misao Mizuno, Haruto Ishikawa, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Ultrafast Dynamics in Dimeric Hemoglobin Probed by Time-Resolved Resonance Raman Spectroscopy
3. 学会等名 Asian Spectroscopy Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下 聡、水野 操、水谷 泰久
2. 発表標題 ヘリックスの周期性を利用したタンパク質内エネルギー移動の距離依存性の解明
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiang Gao, Misao Mizuno, Haruto Ishikawa, Yasuhisa Mizutani
2. 発表標題 Vibrational Energy Relaxation of Heme in Dimeric Hemoglobin
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学大学院理学研究科化学専攻生物物理化学研究室 <a href="http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/mizutani/index-jp.html">http://www.chem.sci.osaka-u.ac.jp/lab/mizutani/index-jp.html</a>
--

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

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			
イスラエル	Weizmann Institute of Science			