

平成 31 年 3 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26620005

研究課題名(和文) 分子生物学と構造解析の融合によるロドプシンの究極の長波長化への挑戦

研究課題名(英文) A challenge for the creation of extremely long-wavelength absorbing rhodopsin by molecular and structural biological approach

研究代表者

井上 圭一 (Inoue, Keiichi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90467001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではより組織透過性が高く、生体侵襲性の低い長波長光で動作が可能なオプトジェネティクスツールの実現のため、様々な微生物型ロドプシンの吸収波長の長波長化に取り組んだ。

その結果新たに既存の分子より長波長に吸収を持つ、内向きH⁺ポンプ型ロドプシン(PoXeR)を新たに深海性の細菌*P. oceanus*より発見した。

また比較的長波長に吸収を持つ分子に、本来短波長に吸収を持つ別の機能を持つロドプシンの重要なアミノ酸を導入することで、もともとのものよりもその吸収を長波長化できることを示した。また多くのロドプシンで高度に保存されているアミノ酸を変異することで、系統的に長波長化が可能である事を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では光受容型膜タンパク質であるロドプシンの吸収波長制御について調べ、これまでオプトジェネティクスなどの応用研究で求められていた吸収の長波長化を行う残基の同定に成功し、新たな分子ツール開発につながる、要素技術開発に成功した。また自然界において既知のものより長波長に吸収を持つナトリウムポンプ型ロドプシンを同定し、さらに機能転換によって進化の過程で保存されている構造エレメントの存在を明らかにするなど、微生物におけるタンパク質の分子進化についても知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, we tried the creation of a new type of rhodopsin absorbing longer-wavelength light. This is expected to be elementary technique to achieve new optogenetic biological tools which are controlled by red- or near-infrared light with higher tissue penetration depth and lower cellular toxicity.

As the results, we newly identified a new light-driven inward H⁺ pump rhodopsin (PoXeR) from deep-sea bacterium, *P. oceanus*, which has a longer absorption maximum wavelength compared to previously reported molecule.

We also showed that the absorption of rhodopsin with specific function can be red-shifted by introducing their important amino-acid residues to another longer-wavelength absorbing rhodopsin which has different function. In addition, we found a new technique which modifies a highly conserved residue among most of microbial rhodopsins and systematically red-shifts the absorption wavelength.

研究分野：物理化学、生物物理学

キーワード：ロドプシン レチナル 波長制御 機能転換 イオンポンプ 光反応 光受容タンパク質 フラッシュ ユフォトリシス

1. 研究開始当初の背景

微生物型ロドプシンは真正細菌や古細菌などの持つ光受容型の膜タンパク質であり、7回膜貫通型の構造と、共通の発色団である all-trans レチナルを持つ。微生物型ロドプシンの大部分は光駆動型外向き水素イオン (H^+) ポンプであり、特に研究が進んでいる古細菌の持つバクテリオロドプシン (BR) や真正細菌のプロテオロドプシン (PR) などがある。この他に光駆動型内向き塩化物イオン (Cl^-) ポンプや、細胞の走光性に関わるセンサー、もしくは光による遺伝子制御といった働きを持つロドプシンが知られている。また最近では光ゲート型のチャンネルとして働くロドプシンが藻類から発見されている (図1)。

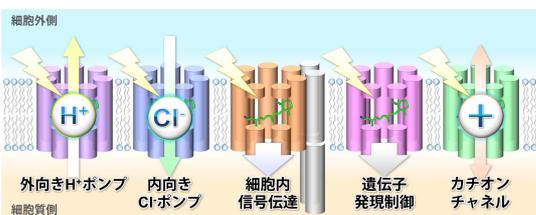


図1. 様々な微生物型ロドプシン

そしてこの中でチャンネル型やポンプ型などイオンを輸送するロドプシンは、神経細胞に発現させると、光でその神経活動を興奮/抑制することが可能になる。このような微生物型ロドプシンを使った生体操作技術はオプトジェネティクスと呼ばれ、神経科学分野で現在高い注目を浴びている。

2. 研究の目的

現在様々なオプトジェネティクス研究の場で微生物型ロドプシンが光生体分子ツールとして用いられている。しかしこの際に比較的短波長の光を吸収する分子を用いた場合、生体試料中では光の散乱が大きく、事実上表面近傍数 mm 以内に存在する神経にしか応用することができない。また短波長の光は生体へのダメージが大きいため、長時間の使用ができないという大きな問題点がある。そこで本研究では我々の持つ様々な種類のロドプシンをもとに、遺伝子改変を行うことで、より長波長の光で活性化が可能な、オプトジェネティクスの新しいツールとなる新規ロドプシンを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究ではまず長波長化のベースとなる、自然界に存在する様々なロドプシンの野生型遺伝子を受託サービスを通じて遺伝子合成した。さらにそれらの遺伝子を pET21a(+) もしくは pMS107 ベクターに導入して作製したプラスミドをタンパク質発現用の大腸菌

C41(DE3)および C43(DE3)株に形質転換し、さらに IPTG と all-trans レチナルを添加することで、ロドプシンタンパク質の発現誘導を行った。そして長波長化のための部位特異的アミノ酸変異体はクイックチェンジ法によって作製した。その様にして得られたロドプシン分子のイオン輸送活性については、pH メーターを用いて観察することで評価した。

また本研究で作製したロドプシンの光反応サイクルについては、ナノ秒パルスレーザーを励起光とし、一次元 CCD アレイもしくは光電子増倍管を用いてタンパク質の過渡吸収変化を観測することで、中間体の種類と減衰の時定数を求めた。またフーリエ変換赤外 (FTIR) 分光などにより、タンパク質の構造情報を得た。これら分光測定に用いるタンパク質の精製試料を得るため、ロドプシンを大量発現した大腸菌をフレンチプレスを用いて破碎後、界面活性剤を用いて可溶化した。その後不要膜画分を超遠心にて取り除いたあと、His タグ配列に対する Co-NTA クロマトグラフィーにより、精製を行った。

4. 研究成果

まず本研究で目指す長波長吸収型のロドプシンを作製するために、既存の分子の中でも比較的吸収波長が長波長側にあるものに、本来は短波長光を吸収する別のタンパク質の機能に重要な残基を導入することで、長波長化ができるかどうかを検討した。

例えばシアノバクテリア *Gloeobacter violaceus* PCC7421 の H^+ ポンプ型ロドプシン (GR) は、*Krokinobacter eikastus* の持つ Na^+ ポンプ型ロドプシン (KR2) よりも長波長に吸収を持つ (GR: 540 nm、KR2: 524 nm)。そこで KR2 の Na^+ 輸送に重要とされる NDQモチーフ (Asn112/Asp116/Gln123, Inoue et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* (2015)) の三つの残基を GR に導入したところ、86 nm もの極めて大きな長波長シフトが見られた (図2)。

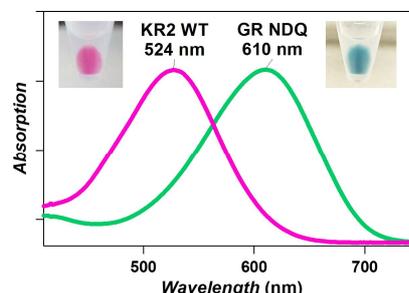


図2. 野生型 KR2 および GR D121N/T125D/E132Q (NDQ)変異体の吸収スペクトル
しかしこの GR NDQ 変異体については Na^+ 輸送活性が見られなかったことから、今後さらにアミノ酸変異を加えることで、長波長吸収特性を保持しながら、 Na^+ の輸送を行うこと

ができる分子が実現されると期待される。

一方で GR および KR2 に加え、海洋性真正細菌 *Fulvamarina pelagi* の持つ Cl⁻ポンプ型ロドプシンについて、機能の異なるポンプ間で互いの重要な残基を入れ換えることで、その機能も転換されるかを調べたところ、Na⁺ H⁺、Na⁺ Cl⁻、Cl⁻ H⁺についてはモチーフとさらに一残基の変異を導入することで容易に機能が転換される一方で、それらの逆向きの機能転換はより多くのアミノ酸変異を導入しても全く起こらない結果となった(図3)。

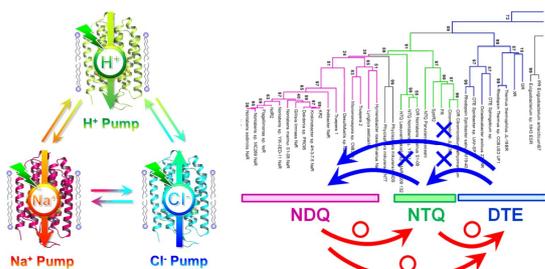


図3. 真正細菌型ロドプシンの機能転換研究 (Inoue et al. *J. Biol. Chem.* (2016))

この機能転換の成否と分子進化系統樹を比較したところ、興味深いことに『分子進化を逆行する機能転換は容易に達成されるが、分子進化に沿った機能転換は極めて困難である』ことが明らかとなった (Inoue et al. *J. Biol. Chem.* (2016))。このことは自然界におけるロドプシンの進化過程において、祖先型の分子の機能に重要な構造のエッセンスは、子孫の分子にも保存されており、容易にその機能が復元される一方で、新規機能の獲得には極めて多くのアミノ酸の変異が必要となることを示唆していると考えられる。この研究成果については世界的にも高い注目を集め、*J. Biol. Chem.*誌 “Highlights of 2016” に選出された (2016年の同誌掲載論文 2377 報中 23 報が Highlights に選出)。

一方で本研究で新奇ロドプシン遺伝子の探索を行ったところ、新たに深海性の細菌 *Parvularcula oceani* のゲノムより、光駆動型内向き H⁺ポンプロドプシン (PoXeR) を発見した (Inoue et al. *Nature Commun.* (2016)) (図4)。これまでに、我々の研究において人工的な内向き H⁺ポンプロドプシンの作製を達成していたが、その吸収波長は 552 nm であり、本研究において発見した PoXeR の吸収波長はそれよりも 17 nm 長波長側 (λ = 569 nm) に吸収極大が存在し、より長波長での光操作に適している。この PoXeR の近縁にはより多くの内向き H⁺ポンプと思われるロドプシン遺伝子が存在しており、今後それらを網羅的に解析することで、より長波長に吸収を持つタンパク質の発見が期待される。

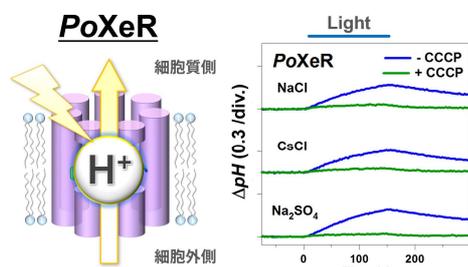


図4. 新規内向き H⁺ポンプ (PoXeR)

さらに本研究において、新たに多くのロドプシンで保存された特定のアミノ酸を変異することで、KR2 の Na⁺輸送機能を保持しながら、その吸収波長を系統的に 40 nm 程度長波長シフトさせることが可能である事が見出された (図5、論文投稿中)。

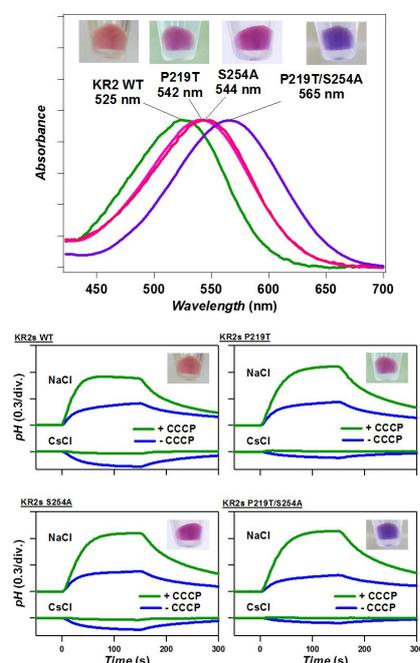


図5. P219T および S254A 変異による KR2 の 40-nm 長波長化

同様の変異による長波長化は他のロドプシンでも可能であることが確認されており、今後本技術を応用することで、様々なオプトジェネティクスツールを系統的に長波長シフトさせることが可能になると期待される。

この様に本研究によって多様なロドプシンに応用可能な吸収の長波長化手法や、新奇長波長吸収型ロドプシンの存在を明らかにすることができた。今後これらの知見を併せることで、これまでない長波長の光で操作可能なロドプシンを実現し、オプトジェネティクスツールとしてのその応用に向けた技術的基盤の確立がなされると期待される。

5.

主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 20 件)

1. Functional characterization of sodium-pumping rhodopsins with different pumping properties Satoshi P. Tsunoda, Matthias Prigge, Rei Abe-Yoshizumi, **Keiichi Inoue**, Yuko Kozaki, Toru Ishizuka, Hiromu Yawo, Ofer Yizhar, Hideki Kandori*. *PLOS ONE*, **12**, pp 3165-3171 DOI: 10.1371/journal.pone.0179232
2. Molecular properties of a DTD channelrhodopsin from *Guillardia theta* Yumeka Yamauchi, Masae Konno, Shota Ito, Satoshi P. Tsunoda, **Keiichi Inoue**, and Hideki Kandori*. *Biophysics and Physicobiology*, **14**, pp 57-66 DOI: 10.2142/biophysico.14.0_57
3. FTIR Analysis of a Light-driven Inward Proton Pumping Rhodopsin at 77 K Shota Ito, Shinya Sugita, **Keiichi Inoue**, Hideki Kandori*. (2017, April 5) *Photochemistry and Photobiology*, in press DOI: 10.1111/php.12771
4. Solid-state NMR Structural Study of the Retinal-binding Pocket in Sodium Ion Pump Rhodopsin Arisu Shigeta, Shota Ito, **Keiichi Inoue**, Takashi Okitsu, Akimori Wada, Hideki Kandori, Izuru Kawamura*. (2017) *Biochemistry*, **56**, issue 4, pp 543-550 DOI: 10.1021/acs.biochem.6b00999
5. A Chimera Na⁺-pump Rhodopsin as an Effective Optogenetic Silencer Mohammad Razuanul Hoque, Toru Ishizuka, **Keiichi Inoue**, Rei Abe-Yoshizumi, Hiroyuki Igarashi, Takaaki Mishima, Hideki Kandori, Hiromu Yawo*. (2016) *PLOS ONE*, **11**, issue 11, e0166820 DOI: 10.1371/journal.pone.0166820
6. Natural Light-driven Inward Proton Pump **Keiichi Inoue**, Shota Ito, Yoshitaka Kato, Yurika Nomura, Mikihiro Shibata, Takayuki Uchihashi, Satoshi P. Tsunoda, Hideki Kandori*. (2016) *Nature Communications*, **7**, Article number:13415 DOI: 10.1038/ncomms13415
7. Role of Asn112 in a Light-driven Sodium Ion-pumping Rhodopsin Rei Abe-Yoshizumi, **Keiichi Inoue**, Hideaki E. Kato, Osamu Nureki, Hideki Kandori*. (2016) *Biochemistry*, **55**, issue 41, pp 5790-5797 DOI: 10.1021/acs.biochem.6b00741
8. Primary Photocycle of Na⁺ Pump Rhodopsin Probed by Baseline-free Femto- to Submillisecond Stimulated Raman Spectroscopy Yusaku Hontani[†], **Keiichi Inoue**[†], Miroslav Kloz, Yoshitaka Kato, Hideki Kandori, John T.M. Kennis*. (2016) *Physical Chemistry Chemical Physics*, **18**, issue 35, pp 24729-24736 DOI: 10.1039/C6CP05240A
9. Asymmetric Functional Conversion of Eubacterial Light-driven Ion Pumps **Keiichi Inoue**, Yurika Nomura, Hideki Kandori*. (2016) *The Journal of Biological Chemistry*, **291**, issue 19, pp 9883-9893 (Selected for “Highlights of 2016” in the Journal) DOI: 0.1074/jbc.M116.716498/jbc.M116.716498.
10. Mutant of a Light-Driven Sodium Ion Pump Can Transport Cesium Ions Masae Konno, Yoshitaka Kato, Hideaki Kato, **Keiichi Inoue**, Osamu Nureki, Hideki Kandori*. (2016) *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **7**, issue 1, pp 51-55 DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b02385
11. Kinetic Analysis of H⁺ - Na⁺ Selectivity in a Light-Driven Na⁺ Pumping Rhodopsin Yoshitaka Kato, **Keiichi Inoue**, Hideki Kandori*. (2015) *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **6**, issue 24, pp 5111-5115 DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b02371
12. Ultrafast Photoreaction Dynamics of a Light-driven Sodium-ion-pumping Retinal Protein from *Krokinobacter eikastus* Revealed by Femtosecond Time-resolved Absorption Spectroscopy Shinya Tahara, Satoshi Takeuchi, Rei Abe-Yoshizumi, **Keiichi Inoue**, Hiroyuki Ohtani, Hideki Kandori*, Tahei Tahara*. (2015) *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **6**, issue 22, pp 4481-4486 DOI: 10.1021/acs.jpcclett.5b01994
13. A New Group of Eubacterial Light-driven Retinal-binding Proton Pumps with an Unusual Cytoplasmic Proton Donor Andrew Harris, Milena Ljumovic, Ana-Nicoleta Bondar, Yohei Shibata, Shota Ito, **Keiichi Inoue**, Hideki Kandori*, Leonid S. Brown*. (2015) *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, **1847**, issue 12, pp 1518-1529 DOI: 10.1016/j.bbabi.2015.08.003
14. The Role of the NDQ-motif in Sodium Pump Rhodopsin **Keiichi Inoue**, Masae Konno, Rei Abe-Yoshizumi, Hideki Kandori*. (2015) *Angewandte Chemie International Edition*, **54**, issue 39, pp 11536-11539 DOI: 10.1002/anie.201504549
15. Structural Basis for Na⁺ Transport Mechanism by a Light-Driven Na⁺ Pump Hideaki E. Kato, **Keiichi Inoue**, Rei Abe-Yoshizumi, Yoshitaka Kato, Hikaru Ono, Masae Konno, Toru Ishizuka, Mohammad Razuanul Hoque, Shoko Hososhima, Hirohumi Kunitomo, Jumpei Ito, Susumu Yoshizawa, Keitaro Yamashita, Mizuki Takemoto, Tomohiro Nishizawa, Reiya Taniguchi, Kazuhiro Kogure, Andrés D. Maturana, Yuichi Iino, Hiromu Yawo, Ryuichiro Ishitani, Hideki Kandori*, Osamu Nureki*. (2015) *Nature*, **521**, Number 7550, 48–53 DOI: 10.1038/nature14322
16. Converting a Light-driven Proton Pump into a Light-gated Proton Channel **Keiichi Inoue**, Takashi Tsukamoto, Kazumi Shimono, Yuto Suzuki, Seiji Miyauchi, Shigehiko Hayashi, Hideki Kandori, Yuki Sudo*. (2015) *Journal of the American Chemical Society*, **137**, issue 9, pp 3291-3299 DOI: 10.1021/ja511788f
17. Na⁺ Transport by Sodium Ion Pump Rhodopsin is Resistant to Environmental Change - A Comparison of Photocycles of Na⁺ and Li⁺ Transport Processes **Keiichi Inoue**, Hikaru Ono,

- Hideki Kandori*. (2014) *Chemistry Letters*, **44**, No. 3, 294-296 DOI: 10.1246/cl.141023
18. Spectroscopic Study of a Light-Driven Chloride Ion Pump from Marine Bacteria **Keiichi Inoue**, Faisal Hammad Mekky Koua, Yoshitaka Kato, Rei Abe-Yoshizumi, Hideki Kandori*. (2014) *The Journal of Physical Chemistry B*, **118**, issue 38, pp 11190-11199 DOI: 10.1021/jp507219q
19. FTIR Spectroscopy of a Light-Driven Compatible Sodium Ion-Proton Pumping Rhodopsin at 77 K Hikaru Ono, **Keiichi Inoue**, Rei Abe-Yoshizumi, Hideki Kandori*. (2014) *The Journal of Physical Chemistry B*, **118**, issue 18, pp 4784-4792 DOI: 10.1021/jp500756f
20. Chimeric Proton-Pumping Rhodopsins Containing the Cytoplasmic Loop of Bovine Rhodopsin Kengo Sasaki, Takahiro Yamashita, Kazuho Yoshida, **Keiichi Inoue**, Yoshinori Shichida, Hideki Kandori*. (2014) *PLoS ONE*, **9**, issue 3, e91323 DOI: 10.1371/journal.pone.0091323

〔学会発表〕(計 125 件)

【口頭発表(受賞講演)】

1. 光駆動ナトリウムポンプロドプシンのイオン輸送メカニズムの解明と新規機能性分子創成 The study on the ion-transport mechanism of light-driven sodium pump rhodopsin and the creation of new functional molecules **井上圭一** 第 10 回分子科学討論会・奨励賞受賞講演 2016 年 9 月 15 日 神戸
2. 光受容膜タンパク質ロドプシンの光化学の基礎研究と応用 The Study on Photoreceptive Membrane Protein, Rhodopsin, and the Application **井上圭一** 日本化学会第 96 春季年会(2016)・進歩賞受賞講演 2016 年 3 月 24 日 京田辺

【口頭発表(基調講演, Keynote lecture)】

3. Microbial rhodopsins of marine bacteria: Nano-scale biological light-driven ion pumps **Keiichi Inoue** 25th 2014 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, November 12, 2014, Nagoya, Japan

【口頭発表(招待講演)】

4. タンパク質の動的構造研究とミュオン科学の融合に向けて **井上圭一** 日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年) 2017 年 3 月 19 日 豊中
5. 微生物型ロドプシンの光化学研究 **井上圭一** 第 2 回光生物学協会研究講演会 2017 年 1 月 28 日 大阪
6. 細菌の持つ光受容膜タンパク質・ロドプシンとオプトジェネティクスへの応用 **井上圭一** 日本機械学会・バイオエンジニアリング部門・第 47 回バイオサロン 2017 年 1 月 18 日 名古屋
7. Physicochemical study on the ion-transport mechanism of light-driven ion pump rhodopsins

- 光駆動型イオンポンプロドプシンのイオン輸送メカニズムの物理化学的研究 **Keiichi Inoue** ITbM/IGER Chemistry Workshop 2016 ~student-centered symposium of forefront chemistry~, December 19, 2016, Nagoya, Japan
8. 新規微生物型ロドプシンを用いたオプトジェネティクス技術基盤開発 **井上圭一** 第 39 回日本分子生物学会年会・シンポジウム「バイオイメージングの技術躍進と医学生物学への応用最前線」 2016 年 12 月 1 日 横浜
9. Exploration of new optogenetic tools: natural and artificial microbial rhodopsins **Keiichi Inoue** The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, November 26, 2016, Tsukuba, Japan
10. 光を使う微生物のタンパク質『ロドプシン』の多様性とメカニズム、生体光操作への応用 **井上圭一** 第 1 回ポスト JFFoS の会 2016 年 10 月 22 日 東京
11. Spectroscopic study on the ion-transport mechanism of eubacterial light-driven ion pumps **Keiichi Inoue** Satellite Symposium of the Retinal Protein Conference 2016 on the Molecular Reaction Mechanism of Retinal Proteins, October 2, 2016, Potsdam, Germany
12. 海洋性細菌の持つ新規光駆動型イオンポンプと光操作への応用の可能性 **井上圭一** 第 8 回光操作研究会 2016 年 9 月 29 日 東京
13. 光駆動イオンポンプ・微生物型ロドプシンのイオン輸送メカニズム **井上圭一** 第 89 回日本生化学会大会・シンポジウム「膜輸送体学の「温故知新」~長年の謎の解明をめざして」 2016 年 9 月 27 日 仙台
14. 広がる微生物型ロドプシンの機能バラエティ: そのメカニズム研究と機能デザイン **井上圭一** 光科学異分野横断萌芽研究会 2016 年 8 月 18 日 伊豆
15. 海洋性細菌から広がるロドプシン・ツールボックス **井上圭一** ルミノジェネティクス研究会 2016 年 7 月 23 日 熱海
16. Light-driven sodium pump rhodopsins for optogenetics **Keiichi Inoue** Symposium “New probes and new light: evolution of optogenetics for neuroscientific revolution” The 39th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, July 21, 2016, Yokohama, Japan
17. 時間分解分光計測と構造研究で迫る光駆動型イオンポンプの機能メカニズム **井上圭一** 最先端光計測とライフサイエンスの近未来 - Bio. Phys. Chem. の三重点の探索 - 2016 年 6 月 18 日 仙台
18. Light-driven sodium pump rhodopsin and its transport mechanism **Keiichi Inoue** OWLS (Optics Within Life Sciences) 2016, March 18, 2016, Mumbai, India
19. 光で Na⁺イオンを運ぶ: Na⁺ポンプ型ロドプシンの発見とメカニズム研究 **井上圭一** 金沢大学理工研究域公開セミナー 2015 年 12 月 11 日 金沢
20. Spectroscopic study on the photo-reaction

dynamics of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** The seminar of the SFB 1078, Freie Universität Berlin, October 13, 2015, Berlin, Germany

21. Photochemistry of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** DFG-Rundgespräch Photoreceptors, October 12, 2015, Frauenchiemsee, Germany

22. Infrared spectroscopic study on the structure and dynamics of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** SCIX 2015, The Great Scientific Exchange Meeting, September 28, 2015, Providence, USA

23. The role of proton on the function of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** The 53rd Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, September 14, 2015, Kanazawa, Japan

24. 時間分解分光法でせまる、タンパク質のイオン輸送メカニズム：光駆動型イオンポンプロドプシンの分光研究 **井上圭一** 2015年先端光科学若手研究会 2015年6月14日 東京

25. Microbial rhodopsins: Light-driven biological proton, chloride and sodium transporters **Keiichi Inoue** BIT's 4th Annual World Congress of Advanced Materials-2015, May 29, 2015, Chongqing, China

26. H⁺ポンプとNa⁺ポンプ：2つのロドプシンから見えるもの **井上圭一** 分子研研究会「膜タンパク質内部のプロトン透過を考える」2015年4月21日 岡崎

27. Spectroscopic study on the dynamics and structure of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** 日本化学会第95春季年会(2015)・アジア国際シンポジウム 2015年3月27日 船橋

28. 光駆動ナトリウムポンプ型ロドプシンの発見と輸送メカニズム **井上圭一** 機能物性融合科学研究会シリーズ(1)「光機能」2014年12月4日 柏

29. Function and mechanism of sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue** 16th International Conference on Retinal Proteins, October, 7, 2014, Nagahama, Japan

【国際会議における口頭発表】

30. Inward light-driven proton pump rhodopsin found in marine bacterium **Keiichi Inoue**, Shota Ito, Yoshitaka Kato, Yurika Nomura, Mikihiro Shibata, Takayuki Uchihashi, Satoshi Tsunoda, Hideki Kandori 17th International Conference on Retinal Proteins, October, 4, 2016, Potsdam, Germany

31. Spectroscopic and structural studies on light-driven sodium pump rhodopsin **Keiichi Inoue**, Hideki Kandori (Young researcher oral presentation awards) The 26th IUPAC Symposium on Photochemistry, April, 8, 2016, Osaka, Japan (他7件)

【国際会議におけるポスター発表】

39. Functional conversion and mechanism of eubacterial pump rhodopsins Yurika Nomura, **Keiichi Inoue**, Shota Ito, Hideki Kandori The 54th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan, November, 25, 2016, Tsukuba, Japan(学生発表賞受賞) (他37件)

【国内学会における口頭発表】

77. ナトリウムポンプ型ロドプシンのナトリウム輸送メカニズムについての分光研究 **井上圭一**、加藤 善隆、吉住 玲、神取 秀樹 日本化学会第95春季年会 2015年3月26日 船橋(優秀講演賞(学術)受賞) (他22件)

【国内学会におけるポスター発表】

100. 真正細菌の光駆動イオンポンプの機能転換とその分子解析 野村 祐梨香、**井上圭一**、伊藤 奨太、神取 秀樹 第19回日本光生物学協会年会 2016年7月28日 東京(ポスター賞受賞)

101. H⁺ポンプ型ロドプシン AR3 のチャネルへの機能転換メカニズムの研究 鈴木 悠斗、**井上圭一**、谷ヶ崎 仁、下野 和実、宮内 正二、林 重彦、須藤 雄気、神取 秀樹 第9回トランスポーター研究会 2014年6月14-15日 名古屋(優秀発表賞受賞) (他24件)

〔図書〕(計1件)

井上圭一 「キサントロドプシン」、光と生命の事典、日本光生物学協会・光と生命の事典編集委員会 編集、2016、pp 60-61

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称：プロトンポンプおよびその利用

発明者：神取 秀樹、井上 圭一

権利者：鵜飼 裕之

種類：特許

番号：2016-173556

出願年月日：2016年9月6日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ach.nitech.ac.jp/~physchem/kandori/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上圭一 (Inoue Keiichi)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90467001

(2)研究協力者

神取 秀樹 (Kandori Hideki)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70202033

吉住 玲 (Yoshizumi Rei)

野村 祐梨香 (Nomura Yurika)