

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02856

研究課題名（和文）極限環境下に生きる光合成微生物の生存戦略の解明 その分光学と構造生物学的研究

研究課題名（英文）Unraveling survival strategies of photosynthetic bacteria in extreme environments: structural and spectroscopic studies

研究代表者

大友 征宇（Otomo, Seiu）

茨城大学・基礎自然科学野・教授

研究者番号：10213612

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまで確立した好熱性光合成細菌由来の光捕集反応中心超分子複合体（LH1-RC）の分光学と構造学的研究を発展させ、様々な極限環境下に生息する光合成微生物が太陽の光エネルギーを巧みに利用する生存戦略の一端、とりわけ光合成膜と光捕集複合体の多彩な分光学的挙動とそれを司る構造基盤を原子レベルで解明し、構造と機能の相関関係をより広い範囲で議論できる基礎を築いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光合成細菌から単離された光合成色素タンパク質は通常その菌体の生息環境に最も見合った安定な構造を取り、最適化された分光学的特徴を示すことから、本研究から得られた知見は様々な極限環境下に生きる光生物の光合成初期過程における励起エネルギーの伝達機構、反応中心における光誘起電荷分離機構の解明に役立つだけでなく、将来の工学的応用を見据えた人工光合成における高効率のアンテナと光電変換素子の構築に対しても根拠となる設計指針を与えるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have expanded on the previously established spectroscopic and structural studies of the light-harvesting-reaction center supramolecular complex (LH1-RC) derived from thermophilic photosynthetic bacteria, and elucidated at the atomic level aspects of the survival strategy by which photosynthetic microorganisms thriving in various extreme environments skillfully utilize solar light energy, in particular the diverse spectroscopic behaviors of the photosynthetic membranes and the light-harvesting complexes as well as the structural basis that regulates them, laying the foundation for a broader understanding of the correlation between structure and function.

研究分野：生物物理化学

キーワード：光合成 光捕集 エネルギー移動 光電変換

1. 研究開始当初の背景

今から約 30 億年前に誕生したと考えられる光合成微生物が、地球環境の変化に応じて太陽エネルギーを利用する多種多様な光化学系とその周辺の生合成系を進化させてきた。光合成初期過程における最も重要な機能である光電変換を司る反応中心 (reaction center, RC) のスペシャルペア (クロロフィルの二量体) について見ると、光合成細菌と現代植物の光合成系では同じ色素配置と分光学的特徴が見られることから、最もコアな部分の構造は環境の変化にほとんど影響されずに高度に保存され、光合成誕生後の比較的早い段階でほぼ完結されたと考えることができる。

一方、反応中心を取り囲む光捕集系 (アンテナ) に目を向けると、進化と共にクロロフィル色素の配置が光合成細菌の完全対称性から、植物型 (光化学系 I) の部分対称性、そして植物型 (光化学系 II) のより低い対称性へと移り変わっていることがわかる。さらに、対称性の高い光合成細菌の光捕集複合体 (light-harvesting complex, LH1) においても多彩な分光学的挙動を示すことが知られている。例として LH1 の近赤外吸収極大 (Q_y 遷移) は菌種によって約 150 nm にわたって変化する。興味深いことに、こうした特異な吸収挙動を示す LH1 は通常の生育条件 (常温、中性 pH) から離れた極限環境下 (好熱、好冷、好塩、好アルカリなど) に生きる光合成細菌から単離されたものが多く、LH1 の吸収極大は植物型光捕集複合体のもの (~700 nm) よりはるかに長波長側に現れる。水の吸収ピークは 970-980 nm にあることから、LH1 はこの領域をうまく避けるように両側ぎりぎりのところまで吸収極大を配置していることがわかる。

これらの研究の中で、幾つかの疑問が生じる。例えば、(i) なぜ極限条件下で生息する光合成細菌の光捕集複合体が特異な吸収挙動を示すものは多いか？(ii) 同じ色素 BChl *a* をもつ LH1 でも吸収ピークに約 100 nm の差をもたらす構造的要因は何なのか？(iii) 有機溶媒中で BChl *b* は BChl *a* より 20 nm 程度レッドシフトしているのに対して LH1 中では約 150 nm も長波長側にシフトするのはなぜか？(iv) 極端に長波長の吸収ピーク (より低いエネルギー準位) をもつ LH1 とそのエネルギー伝達先の反応中心にあるスペシャルペア (LH1 より高いエネルギー準位) とのエネルギーギャップ (登り坂エネルギー移動の幅) はどこまで許されるか？などが挙げられる。これらの謎を解く手がかりとして、当研究室で培養している様々な生育条件の光合成微生物を研究材料として用いることにした。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問いに対してこれまで本研究者らが明らかにしてきた好熱性光合成細菌由来の光捕集反応中心複合体 LH1-RC の詳細な分光学的・構造学的情報を手がかりに、極限環境下に生息する光合成微生物が太陽の光エネルギーを巧みに利用する生存戦略の一端、とりわけ光合成膜と光捕集複合体の多彩な分光学的挙動とそれを司る構造基盤を原子レベルで解明することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の基礎となるのが、好熱性光合成細菌 *Tch. tepidum* 由来の光捕集反応中心複合体 LH1-RC である。LH1 は 2 種類のポリペプチド α と β が組みとなり、これに色素 BChl *a* が 2 分子結合したものが単位 (サブユニット) を構成し、この単位が 16 個で反応中心の周りをほぼ円形に取り囲んでいる。16 個の Ca^{2+} は LH1 α と β 鎖のリング間に均等に分布し、隣り合う $\alpha\beta$ サブユニットの間に入っている。 Ca^{2+} の結合部位は α と β 鎖の C 末端領域にあり、両ポリペプチドのアミノ酸によって Ca^{2+} が配位され、6 配位の八面体構造をとっている。 $\alpha\beta$ サブユニット同士が Ca^{2+} との結合によって結ばれたネットワークを形成し、LH1 全体の構造安定化 (熱安定性) に寄与している。一方、 Ca^{2+} 結合部位が色素 BChl *a* の近傍に位置していることから、色素との相互作用の結果 LH1 の Q_y 遷移が通常のものより約 40 nm 長波長側に現れることをもたらしたと考えられる。これらの成果を踏まえて、本研究では以下の実施計画を進めてきた。

(1) 低温電顕による構造解析：結晶構造解析と同時に、最近発展の著しい Cryo-EM による単粒子解析も行う。まずは負染色による複合体粒子の純度と均一性を確認する。

(2) 共鳴ラマン・赤外分光、超高速分子分光測定、2D 電子吸収分光による各種分光学的測定を行う。

(3) 各種微量熱量測定 (示差走査熱量計 DSC や等温滴定熱量計 ITC) と分光学的手法 (円偏光二色性 CD や共鳴ラマンなど) を用いてその熱耐性機構を分子レベルで明らかにする。

4. 研究成果

(1) 異常な吸収挙動を示す LH1-RC の構造解析とその原因解明

ドイツ北部バルトルム島沿岸から採取された紅色硫黄細菌 *Thiorhodovibrio strain 970* の LH1-RC 複合体は通常のものより LH1 の近赤外の吸収極大が約 80 nm 長波長側 (960 nm) に現れる。これはバクテリアクロロフィル *a* をもつ既知の光合成生物の中で最長の吸収極大を示す。これまでの研究でその原因は Ca^{2+} によるものであることが明らかになった。高純度に精製された LH1-RC を用いて負染色による粒子の均一度を確認した後、低温電子顕微鏡を用いた単粒子解析を行い、高分解能の立体構造を決定した。

前述の好熱性光合成細菌 *Tch. tepidum* 由来の光捕集複合体 LH1 と異なり、*Thiorhodovibrio strain 970* は 4 種類の LH1- α ポリペプチドと 2 種類の β をもっている (図 1)。すべての α と β 鎖に Ca^{2+} の結合部位が存在する。1 対の $\alpha\beta$ 鎖に色素 BChl *a* が 2 分子結合した単位が 16 個からなり、これらが反応中心の周りを円形に取り囲んでいる。16 個の Ca^{2+} は LH1 α と β 鎖のリング間に分布し、隣り合う $\alpha\beta$ サブユニットの間に入っている。 Ca^{2+} の結合部位は α と β 鎖の C 末端領域にあり、両ポリペプチドのアミノ酸によって Ca^{2+} が配位されている。 $\alpha\beta$ サブユニット同士が Ca^{2+} との結合によって結ばれた強固なネットワークを形成し、LH1 全体の構造安定化 (熱安定性) に寄与している。一方、 Ca^{2+} 結合部位が色素 BChl *a* の近傍に位置し、 α 鎖から 2 つのアミノ酸残基、 β 鎖から 1 つのアミノ酸残基が BChl *a* と水素結合を作っていることから色素との強い相互作用の結果 LH1 の Q_y 遷移が通常のものより約 80 nm 長波長側に現れることをもたらしたと考えられる。この成果は国際学術誌 (*Nature Communications* **11**, 4955; 2020) に掲載された。

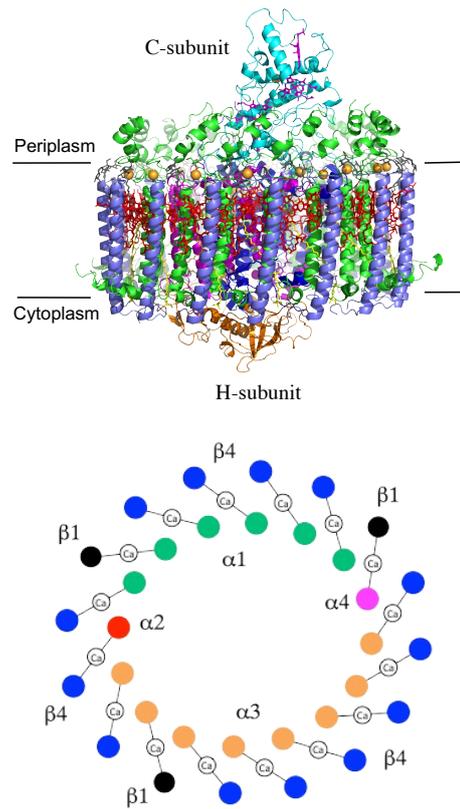


図 1 *Thiorhodovibrio strain 970* LH1-RC の構造 (上) と複数 $\alpha\beta$ 鎖の配置

(2) 紅色光合成細菌 *Rhodobacter sphaeroides* 由来の単量体 LH1-RC の構造解析

これまで最も良く研究され、光合成細菌のモデルとして用いられてきた *Rhodobacter sphaeroides* 由来の光捕集反応中心複合体 LH1-RC 単量体構造を決定した。同菌体のコア光捕集反応中心複合体は、他の種とは異なり、二量体形成 (同じ単量体ユニットが二つ集まった分子) もできることが知られており、そのカギとなる PufX の寄与メカニズムを明らかにするために様々な研究が行われてきた。しかし、複合体内のメカニズムについては未解明で、今回クライオ電子顕微鏡を用いてようやく明らかにすることができた (図 2)。

さらに、実際には確認されておらず、ゲノム情報上のみの仮想存在となっていた膜タンパク質が複合体に含まれていることを発見し、それを「protein-U」と命名した。研究により、protein-U が LH1-RC の二量体形成を安定化させるよう機能していることが示された。また、カロテノイドについても、可視化により新しい結合位置の存在を認め、新規様式で相互作用していることを明らかにした。

今回の詳細な三次元構造は、PufX とともに、protein-U がキノンの出入口を形成していることを示しており、新たなキノンの流入出経路のモデルと、高効率化の可能性を提示するものとなっている。この成果は国際学術誌 (*Nature Communications* **12**, 6300; 2021) に掲載された。

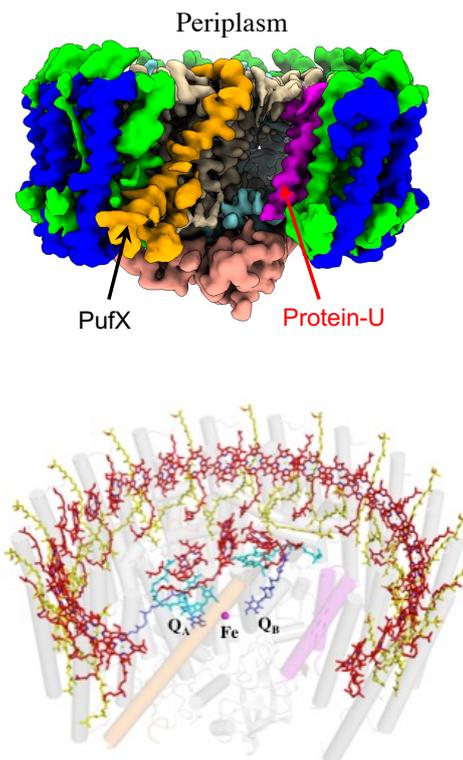


図 2 *Rhodobacter sphaeroides* monomeric LH1-RC の構造 (上) と色素配置 (下)。

(3) 好酸性光合成細菌 *Rhodospila globiformis* 由来の LH1-RC の構造解析

腐敗菌などが酸性溶液中で増殖できないように、他の光合成細菌も中性やアルカリ性溶液を好むが、*Rhodospila globiformis* は酸性環境下を好み、酸性下でも高い効率で光のエネルギー変換をコア光捕集反応中心複合体 LH1-RC で行えることが知られていた。酸性雨とみなされるような低い pH 環境下で、どうやって安定性や効率を高めているのかといったメカニズムについては未解明で、今回クライオ電子顕微鏡を用いてようやく明らかにすることができた (図 3)。

これまで立体構造が報告されている紅色細菌の LH1-RC では、膜貫通領域をもたないチトクローム(Cyt)サブユニットの代わりに PufX と呼ばれる膜タンパク質をもっているものばかりであった。ゲノム上の Cyt サブユニット遺伝子の位置が *pufX* 遺伝子で置き換わっていることが知られていたものの、双方がアミノ酸配列レベルでは進化的に離れていることもあり、その関連性を疑われつつも長年謎にまつまれている。

今回のコア光捕集複合体 LH1 は、Cyt サブユニットの末端に膜貫通部分が存在する初めての例となった。この膜貫通部分は、アミノ酸配列比較では PufX に近い関係性を示さないものの、複合体内部での立体配置関係としては良く似ており、特に細胞外側ループ部分の構造はほぼ重ね合わせることができた。これまで Cyt サブユニットと PufX の進化的関係を示す証拠は見つかなかったが、今回の結果は missing link としてこれまでの研究結果をうまく説明することができた。これらの成果は国際学術誌 (*Communications Biology* **5**, 1197; 2022) に掲載された。

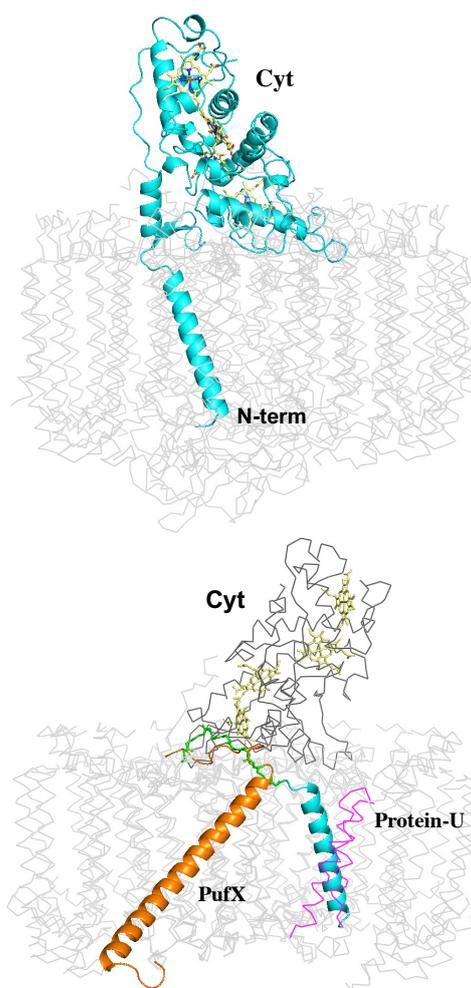


図 3 *Rhodospila globiformis* LH1-RC の構造 (上) と PufX を有する LH1-RC との比較

(4) 紅色光合成細菌 *Rhodobacter sphaeroides* 由来の二量体 LH1-RC の構造解析

コア光捕集反応中心複合体(LH1-RC)は、光合成細菌が光エネルギーを集め、電子変換し、伝達することを可能にしている膜タンパク質である。先に *Rhodobacter sphaeroides* 由来の光捕集反応中心複合体 LH1-RC 単量体構造の決定に続き、今回は同菌体由来の LH1-RC 二量体構造と、前回発見した高効率エネルギー変換を支える新奇の膜タンパク質 protein-U が存在しない欠損株の LH1-RC 単量体の立体構造を決定した。LH1-RC 二量体構造は、単純に単量体が 2 個結合した形状ではなく、非対称な形をとり、構成する 2 つの LH1-RC 単量体のキノンの出入口は互いに位置やサイズが異なり (図 4)、エネルギー変換の調節機能をもっている可能性が示唆された。また、protein-U は欠損株のタンパク質精製実験から二量体の安定化効果があることがわかっていたが、新たな欠損株の立体構造から単量体の安定化にも役立っていることがはっきりとなった。本研究により、protein-U が高効率な太陽光エネルギー変換を支えていることを二量体と単量体の両構造から確認できた。この成果は国際学術誌 (*Nature Communications* **13**, 1904; 2022) に掲載された。

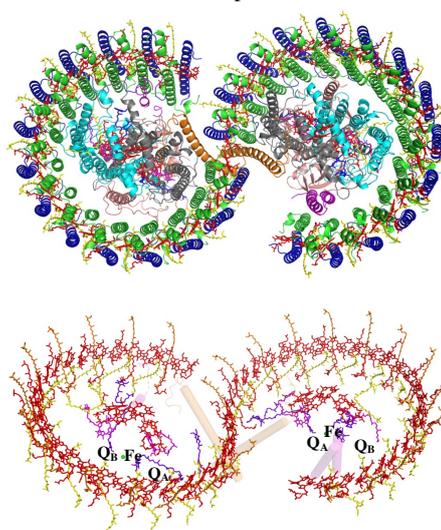


図 4 *Rhodobacter sphaeroides* dimeric LH1-RC の構造 (上) と色素配置 (下)。

(5) 好熱性硫黄光合成細菌 *Allochrochromatium tepidum* 由来の Ca 結合型 LH1-RC の構造解析

ニュージーランドの温泉に棲息する紅色硫黄細菌の一種 *Allochrochromatium tepidum* のコア光捕集反応中心複合体 LH1-RC の立体構造をクライオ電子顕微鏡により可視化することに成功した。これまで立体構造が報告されている Ca イオン結合型 LH1 は 16 個のサブユニットすべてに Ca イオンが結合しており、Ca イオンが結合しない LH1-RC との比較だけでは双方が進化的に離れていることもあり、選択的に Ca イオンを結合できる仕組みや特徴的なアミノ酸配列などは謎にまつまっていた。

今回の LH1 は複数のアイソフォームと呼ばれる異なる遺伝子由来のタンパク質を含んで形成する珍しい例である。そのため *Allochrochromatium tepidum* LH1 では Ca イオンの選択的な結合は計 6 箇所でのみ起こり、特定のアイソフォームにだけ存在するアミノ酸配列部分で起きていることが明らかになり (図 5)、これまでの研究結果をうまく説明することができた。このような複数のアイソフォームを含む LH1-RC の立体構造の決定は従来使用されていた X 線結晶構造解析では難しく、クライオ電子顕微鏡を用いる方法の威力を示す証拠となった。また、Ca イオンの結合が熱安定性へ貢献している仕組みも明らかになったので、バイオテクノロジー分野での応用時のヒントになることが期待される。この成果は国際学術誌 (*J. Biol. Chem.* **298**, 101967; 2022) に掲載された。

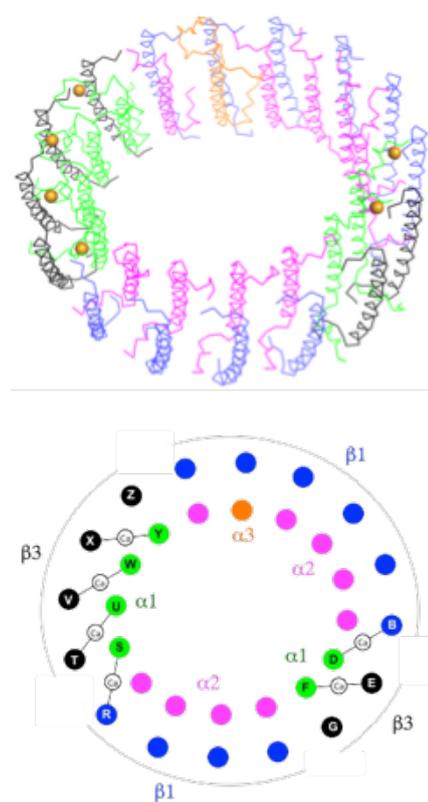


図 5 *Allochrochromatium tepidum* LH1 の構造 (上) とその模式図 (下)。

(6) 紅色光合成細菌 *Rhodobacter capsulatus* 由来の LH1-RC の構造解析

これまでモデル紅色光合成細菌の一つとして用いられてきた *Rhodobacter capsulatus* 由来の光捕集反応中心複合体 LH1-RC の構造を決定した。他の種とは異なり、LH1 サブユニット数が 10 個と最小構成数となっており (図 6)、理論的には 8 個のサブユニット数で光合成が可能であることを支持する結果となっている。さらに、前述の近縁種である *Rhodobacter sphaeroides* では同じ単量体が二つ集まった二量体も形成できることが知られているが、本種ではその集合時のカギとなる PufX の形が大きく異なるうえ、前に発見した二量体を安定化する Protein-U も存在しないことから、単量体として機能することが立体構造上からも明らかになった。そのため二量体を形成することはなく、本当の意味で極小サイズの光合成ユニットであることを明らかにした。今回得られた立体構造から、光捕集複合体の進化的な謎であった最小構成数での機能ユニットを示唆することが可能となり、理論上 LH1 サブユニット数が 8 個以上なら近赤外領域の吸収極大波長に大きな影響を及ぼさないことも一致し、これらの特徴をうまく進化的に取り入れて効率的に生き残れる戦略を取っていることがわかった。そのため本研究により、極小サイズの構成数でも高効率な太陽光エネルギー利用への貢献、環境保全への活用が期待される。この成果は国際学術誌 (*Nature Communications* **14**, 846; 2023) に掲載された。

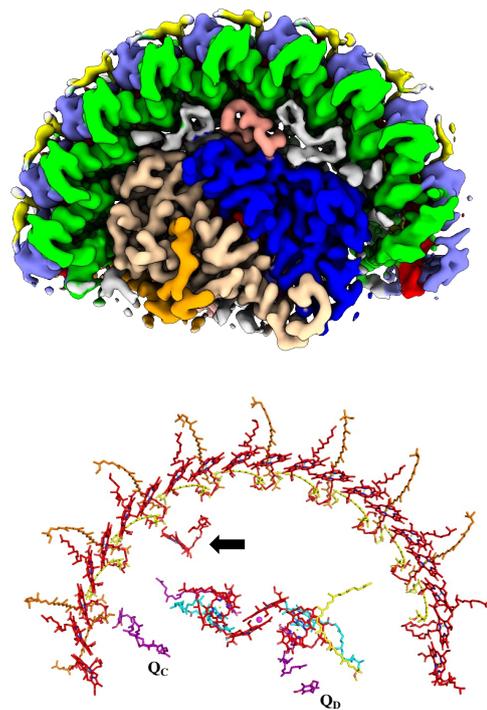


図 6 *Rhodobacter capsulatus* LH1-RC の構造 (上) と色素配置 (下)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Tani Kazutoshi, Kanno Ryo, Harada Ayaka, Kobayashi Yuki, Minamino Akane, Takenaka Shinji, Nakamura Natsuki, Ji Xuan-Cheng, Purba Endang R., Hall Malgorzata, Yu Long-Jiang, Madigan Michael T., Mizoguchi Akira, Iwasaki Kenji, Humbel Bruno M., Kimura Yukihiro, Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 7
2. 論文標題 High-resolution structure and biochemical properties of the LH1-RC photocomplex from the model purple sulfur bacterium, <i>Allochrochromatium vinosum</i>	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 176
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-024-05863-w	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 Sato I., Gotou K., Nagatsuma S., Nagashima K.V.P., Kobayashi M., Yu L.-J., Madigan M.T., Kimura Y., Wang-Otomo Z.-Y.	4. 巻 1864
2. 論文標題 Selective expression of light-harvesting complexes alters phospholipid composition in the intracytoplasmic membrane and core complex of purple phototrophic bacteria	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics	6. 最初と最後の頁 149001 ~ 149001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbabi.2023.149001	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 Madigan Michael T., Bender Kelly S., Sanguedolce Sophia A., Parenteau Mary N., Mayer Marisa H., Kimura Yukihiro, Wang-Otomo Zheng-Yu, Sattley W. Matthew	4. 巻 27
2. 論文標題 Genomic basis for the unique phenotype of the alkaliphilic purple nonsulfur bacterium <i>Rhodobaca bogoriensis</i>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Extremophiles	6. 最初と最後の頁 19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00792-023-01304-4	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 Qi Chen-Hui, Wang Guang-Lei, Wang Fang-Fang, Xin Yueyong, Zou Mei-Juan, Madigan Michael T., Wang-Otomo Zheng-Yu, Ma Fei, Yu Long-Jiang	4. 巻 299
2. 論文標題 New insights on the photocomplex of <i>Roseiflexus castenholzii</i> revealed from comparisons of native and carotenoid-depleted complexes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry	6. 最初と最後の頁 105057 ~ 105057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbc.2023.105057	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 Tani Kazutoshi, Kanno Ryo, Ji Xuan-Cheng, Satoh Itsusei, Kobayashi Yuki, Hall Malgorzata, Yu Long-Jiang, Kimura Yukihiro, Mizoguchi Akira, Humbel Bruno M., Madigan Michael T., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 14
2. 論文標題 Rhodobacter capsulatus forms a compact crescent-shaped LH1-RC photocomplex	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36460-w	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 Kimura Yukihiro, Tani Kazutoshi, Madigan Michael T., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 127
2. 論文標題 Advances in the Spectroscopic and Structural Characterization of Core Light-Harvesting Complexes from Purple Phototrophic Bacteria	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 6~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.2c06638	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 Morimoto Masayuki, Hirao Haruna, Kondo Masaharu, Dewa Takehisa, Kimura Yukihiro, Wang-Otomo Zheng-Yu, Asakawa Hitoshi, Saga Yoshitaka	4. 巻 157
2. 論文標題 Atomic force microscopic analysis of the light-harvesting complex 2 from purple photosynthetic bacterium Thermochromatium tepidum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Photosynthesis Research	6. 最初と最後の頁 13~20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11120-023-01010-4	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 Tani Kazutoshi, Kanno Ryo, Kurosawa Keigo, Takaichi Shinichi, Nagashima Kenji V. P., Hall Malgorzata, Yu Long-Jiang, Kimura Yukihiro, Madigan Michael T., Mizoguchi Akira, Humbel Bruno M., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 5
2. 論文標題 An LH1-RC photocomplex from an extremophilic phototroph provides insight into origins of two photosynthesis proteins	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 1197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-022-04174-2	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 Asaka Ryo, Ohshima Kazuki, Kawasaki Shinji, Maoka Takashi, Tode Chisato, Wang-Otomo Zheng-Yu, Takaichi Shinichi	4. 巻 85
2. 論文標題 Major Carotenoids of <i>Meiothermus ruber</i> Are Deinoxanthin Glucoside Esters, Not Meiothermoxanthin Glucoside Esters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Natural Products	6. 最初と最後の頁 2266 ~ 2273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jnatprod.2c00271	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 Tani Kazutoshi, Kanno Ryo, Kikuchi Riku, Kawamura Saki, Nagashima Kenji V. P., Hall Malgorzata, Takahashi Ai, Yu Long-Jiang, Kimura Yukihiro, Madigan Michael T., Mizoguchi Akira, Humbel Bruno M., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 13
2. 論文標題 Asymmetric structure of the native <i>Rhodobacter sphaeroides</i> dimeric LH1-RC complex	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-022-29453-8	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 Zhang Yan, Qi Chen-Hui, Yamano Nami, Wang Peng, Yu Long-Jiang, Wang-Otomo Zheng-Yu, Zhang Jian-Ping	4. 巻 13
2. 論文標題 Carotenoid Single-Molecular Singlet Fission and the Photoprotection of a Bacteriochlorophyll b-Type Core Light-Harvesting Antenna	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 3534 ~ 3541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.2c00519	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 Tani Kazutoshi, Kobayashi Kazumi, Hosogi Naoki, Ji Xuan-Cheng, Nagashima Sakiko, Nagashima Kenji V.P., Izumida Airi, Inoue Kazuhito, Tsukatani Yusuke, Kanno Ryo, Hall Malgorzata, Yu Long-Jiang, Ishikawa Isamu, Okura Yoshihiro, Madigan Michael T., Mizoguchi Akira, Humbel Bruno M., Kimura Yukihiro, Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 298
2. 論文標題 A Ca-binding motif underlies the unusual properties of certain photosynthetic bacterial core light-harvesting complexes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Biological Chemistry	6. 最初と最後の頁 101967 ~ 101967
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbc.2022.101967	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 Kimura, Y., Nakata, K., Nojima, S., Takenaka, S., Madigan, M. T. & Wang-Otomo, Z.-Y.	4. 巻 10
2. 論文標題 Salt- and pH-dependent thermal stability of photocomplexes from extremophilic bacteriochlorophyll b-containing Halorhodospira species.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microorganisms	6. 最初と最後の頁 959
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 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 Kimura Yukihiro, Imanishi Michie, Li Yong, Yura Yuki, Ohno Takashi, Saga Yoshitaka, Madigan Michael T., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 156
2. 論文標題 Identification of metal-sensitive structural changes in the Ca-binding photocomplex from Thermochromatium tepidum by isotope-edited vibrational spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 105101 ~ 105101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0075600	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 Madigan Michael T., Absher Jill N., Mayers Joseph E., Asao Marie, Jung Deborah O., Bender Kelly S., Kempher Megan L., Hayward Mackenzie K., Sanguedolce Sophia A., Brown Abigail C., Takaichi Shinichi, Kurokawa Ken, Toyoda Atsushi, Mori Hiroshi, Tsukatani Yusuke, Wang-Otomo Zheng-Yu, Ward David M., Sattley W. Matthew	4. 巻 204
2. 論文標題 Allochromatium tepidum, sp. nov., a hot spring species of purple sulfur bacteria	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Archives of Microbiology	6. 最初と最後の頁 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00203-021-02715-7	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 Tani Kazutoshi, Kanno Ryo, Makino Yuki, Hall Malgorzata, Takenouchi Mizuki, Imanishi Michie, Yu Long-Jiang, Overmann Jorg, Madigan Michael T., Kimura Yukihiro, Mizoguchi Akira, Humbel Bruno M., Wang-Otomo Zheng-Yu	4. 巻 11
2. 論文標題 Cryo-EM structure of a Ca ²⁺ -bound photosynthetic LH1-RC complex containing multiple polypeptides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-18748-3	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 Seto Ryuta, Takaichi Shinichi, Kurihara Toshiyuki, Kishi Rikako, Honda Mai, Takenaka Shinji, Tsukatani Yusuke, Madigan Michael T., Wang-Otomo Zheng-Yu, Kimura Yukihiro	4. 巻 59
2. 論文標題 Lycopene-Family Carotenoids Confer Thermostability on Photocomplexes from a New Thermophilic Purple Bacterium	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochemistry	6. 最初と最後の頁 2351 ~ 2358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.biochem.0c00192	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 Kangur Liina, Ratsep Margus, Timpmann K, Wang-Otomo Zheng-Yu, Freiberg Arvi	4. 巻 1861
2. 論文標題 The two light-harvesting membrane chromoproteins of Thermochromatium tepidum expose distinct robustness against temperature and pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics	6. 最初と最後の頁 148205 ~ 148205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbabi.2020.148205	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 Takaichi Shinichi, Okoshi Akira, Otomo Seiu, Misumi Masahiro, Sonoike Kintake, Harada Jiro	4. 巻 144
2. 論文標題 Direct injection of pigment-protein complexes and membrane fragments suspended in water from phototrophs to C18 HPLC	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Photosynthesis Research	6. 最初と最後の頁 101 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11120-020-00735-w	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2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大友征宇
2. 発表標題 昨年発表した「紅色細菌の昇温培養に対するカロテノイド生合成系の調節」のその後
3. 学会等名 光合成セミナー2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大友征宇
2. 発表標題 極限環境下に生息する紅色細菌の光捕集複合体の多様性
3. 学会等名 第5回光合成細菌ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 浅井智広、井上和仁、大友征宇、嶋田敬三、高市真一、塚谷祐介、永島賢治、原田二郎、平石明	4. 発行年 2020年
2. 出版社 裳華房	5. 総ページ数 320
3. 書名 光合成細菌	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------