

深海の光タンパク質は圧力にどう耐えるのか？ 静水圧分光により細菌のロドプシンの高圧適応メカニズムを解明

ポイント

- ① 深海に生息する微生物の光応答性タンパク質が、高圧環境でどのように機能を保つのかは未解明だった。
- ② 深海性の細菌由来のロドプシン（※1）PoXeR が、圧力によって三量体構造の形成を促進し、高圧下で構造を安定化することを発見した。
- ③ 高圧環境における微生物の適応メカニズムの一端が明らかとなり、高圧下でも機能する光応答性材料の開発が期待される。

概要

深海のような高圧環境に生息する微生物は、通常的环境とは大きく異なる圧力条件のもとで、タンパク質の構造や機能を維持しながら生命活動を行っています。従来は、光エネルギーを利用してイオン輸送などの役割を担う微生物ロドプシンが、高圧環境下でどのように構造を保ち、機能を発揮しているのかが十分に分かっておらず、極限環境におけるタンパク質の適応機構の解明が望まれていました。

今回、九州大学先端物質化学研究所の濱地智之助教、福原学教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科・先端生命科学専攻の井上圭一教授、永田崇助教、加藤善隆特任助教、呂子琨大学院生、萬年健太郎大学院生（当時）らの研究グループは、深海性の細菌由来のロドプシン PoXeR に着目し、高圧下における分光特性評価を行いました。その結果、PoXeR が圧力によって三量体構造の形成を促進し、分子集合状態を変化させることで、高圧下でも構造を安定化するという新たな仕組みを解明しました。

本研究グループは、深海性の細菌由来の PoXeR と、常圧環境に生息する微生物由来の *Gloeobacter rhodopsin* (GR) を比較し、静水圧（※2）下での吸収、蛍光、円二色性などの分光測定を行いました。その結果、GR は加圧によって不可逆的な構造変化を示し、除圧後も元の状態に戻らない一方、PoXeR は加圧後も構造を可逆的に維持することが明らかになりました。さらに、円二色性スペクトル（※3）の解析により、PoXeR では圧力によって三量体成分が増加し、この会合状態の変化が高圧下でタンパク質が構造を維持し、イオン輸送機能を保つ安定性に寄与していることを見いだしました。

今回の発見は、深海生物が高圧環境に適応するための分子レベルの仕組みを明らかにするものです。また、過酷環境・極限環境でも安定に働く光応答性タンパク質材料や、ロドプシンを利用したオプトジェネティクス（光遺伝学）分子ツールの開発に役立つことが期待されます。

本研究成果は英国科学雑誌「*Scientific Reports*」に2026年7月8日（水）（現地時間）に掲載されました。



深海性の細菌由来ロドプシンの高圧による会合

研究者からひとこと：

今回、深海性の細菌由来のロドプシンが高圧下でどのような挙動を示しているのか？という極めて単純な科学的好奇心で研究をスタートさせました。実際、静水圧スペクトル測定によって、三量体成分が増加し、この会合状態の変化が高圧下での安定性に寄与していることを世界で初めて明らかにしました。この結果は、これまで謎の大きかった深海生物の進化と深化解明のヒントになり得るでしょう。（福原学）

【研究の背景と経緯】

光を利用して生命機能を発現するタンパク質の一つに、微生物ロドプシンがあります。微生物ロドプシンは、細菌、古細菌、真核微生物などに広く存在する膜タンパク質で、内部にレチナールと呼ばれる発色団をもっています（図 1）。光を吸収すると、レチナールが構造変化を起こし、それに伴ってタンパク質全体の構造が連続的に変化します。この過程により、プロトンやイオンの輸送、光情報の伝達など、多様な機能が光エネルギーを使って実現されます。

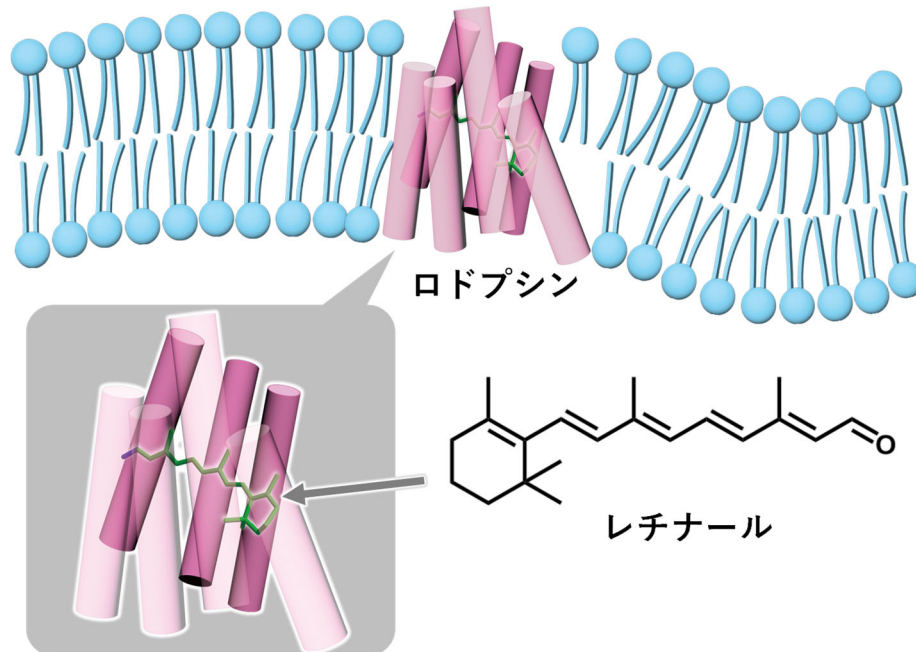


図 1 膜タンパク質のロドプシンとレチナール発色団の模式図。

微生物ロドプシンは、膜タンパク質の構造と機能の関係を調べるための重要なモデルであるだけでなく、神経細胞などを光で制御するオプトジェネティクスの分子ツールとしても利用されています。そのため、ロドプシンの構造安定性や機能を支配する分子要因を理解することは、基礎生物物理学だけでなく、バイオエンジニアリングにおいても重要です。

これまで、温度や pH などの外部環境が微生物ロドプシンの光反応サイクルや機能状態に与える影響が調べられてきました。しかし、その多くは常圧または比較的穏やかな環境に由来するロドプシンを対象としたものであり、深海のような高圧環境に適応したロドプシンが、どのような分子機構で構造と機能を維持しているのかは十分に解明されていませんでした。

そこで本研究では、深海微生物 *Parvularcula oceani* に由来する内向きプロトンポンプ型ロドプシン PoXeR に着目しました。PoXeR の高圧応答を、常圧環境に生息するシアノバクテリア由来の *Gloeobacter rhodopsin* (GR) と比較することで、深海由来ロドプシンに特有の圧力適応機構を明らかにすることを目指しました。

【研究の内容と成果】

本研究では、PoXeR および GR を緩衝液中に分散させ、0.1 MPa から 120 MPa までの静水圧下で紫外可視吸収スペクトルを測定しました。GR では加圧に伴い、吸収スペクトルの形状が大きく変化し、除圧後も元のスペクトルに戻りませんでした（図 2a）。さらに、測定後には試料中に白色沈殿が観察され、GR が圧力によって不可逆的に変性したことが示されました（図 2b）。

一方、PoXeR では加圧によるスペクトル変化は見られたものの、除圧後には元のスペクトルとほぼ重なる形に回復しました（図 2c）。また、試料は測定後も透明な紫色を保っており、GR で見られたような沈殿や明確な変性は確認されませんでした（図 2d）。この結果は、PoXeR が GR に比べて高い圧力耐性をもつことを示しています。

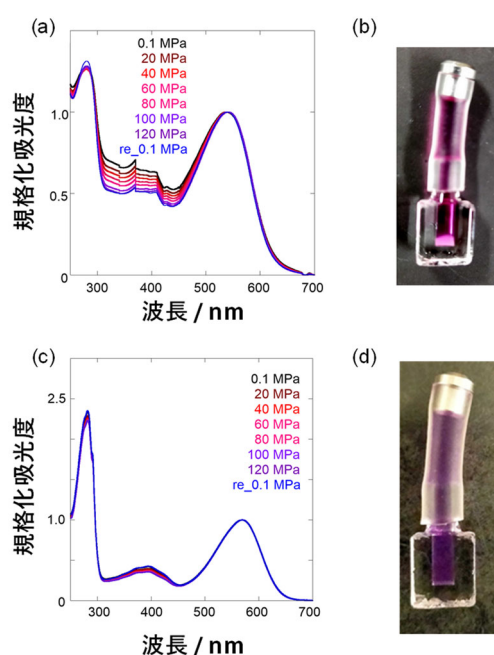


図 2 高圧下における GR と PoXeR の吸収スペクトル変化。(a, c) GR および PoXeR の加圧下での吸収スペクトル、(b, d) 除圧後の試料写真。

さらに本研究では、高圧 CD 分光により PoXeR の集合状態の変化を調べました。PoXeR は常圧で負の CD カップレットを示しました（図 3a）。このような CD 信号は、隣接するレチナール発色団どうしの相互作用に由来し、PoXeR が三量体構造を形成していることを示します。加圧すると、CD カップレットの強度が増大し、三量体成分が増加することが分かりました（図 3b）。

以上の結果から、PoXeR は高圧下で構造を保つだけでなく、三量体化を促進し、集合構造を利用して分子構造の安定性を高めていると考えられます。微生物ロドプシンでは、三量体形成が構造安定性やプロトンポンプ効率に関与することが知られており、本研究で観測された PoXeR の圧力による三量体化は、高圧環境で機能を維持するための合理的な適応戦略であると考えられます。

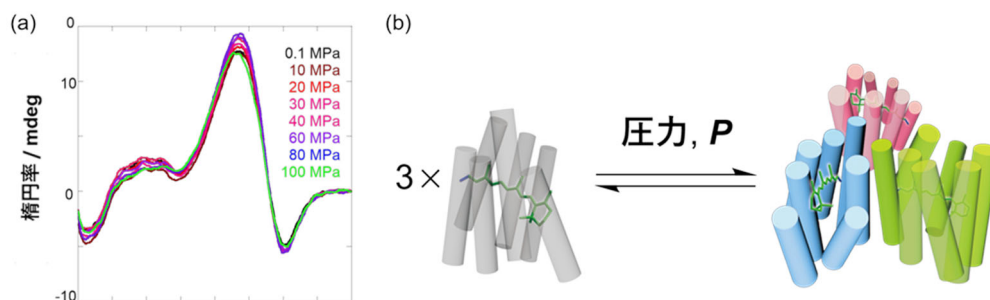


図 3 (a) 高圧下における PoXeR の CD スペクトル変化。(b) 圧力による PoXeR の三量体形成。

【今後の展開】

今後は、PoXeR の三量体化が実際のプロトンポンプ活性や光反応サイクルにどのように影響するのかを、時間分解分光や構造解析と組み合わせて明らかにすることが期待されます。また、圧力によって安定性が向上する分子設計原理を応用することで、過酷環境・極限環境でも機能する光応答性タンパク質材料の開発につながる可能性があります。

【用語解説】

(※1) 微生物ロドプシン

細菌や古細菌などの微生物がもつ光応答性の膜タンパク質です。光を吸収すると内部のレチナール分子が構造変化し、プロトンやイオンの輸送、光情報の伝達などの機能を発揮します。

(※2) 静水圧

液体中で分子に全方向から均一に加わる圧力のことです。分子全体を等しく圧縮できるため、分子構造や光応答性の変化を調べる手段として用いられます。

(※3) 円二色性スペクトル

右回りと左回りの円偏光の吸収の違いを測定し、分子やタンパク質の立体構造に関する情報を得る分光法です。特に、発色団どうしが近接して相互作用すると特徴的な信号が現れるため、分子やタンパク質の会合状態を調べることもできます。

【謝辞】

本研究は日本学術振興会（JSPS）科研費（JP23H04020, JP24K01536, JP24K21791, JP23K21092, JP23K18090, JP23H04404, JP24H02268, JP24K23073, JP23H04863, JP25K09698）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST 研究費（JPMJCR22N2）、文部科学省・学際領域展開ハブ形成プログラム・マルチスケール量子-古典インターフェース研究コンソーシアム（CURE）研究費（JPMXP1323015482）、公益財団法人三菱財団の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Scientific Reports

タイトル：Hydrostatic pressure spectroscopy reveals the adaptation of microbial rhodopsins to high-pressure environment

著者名：Tomoyuki Hamachi, Iori Okamura, Lyu Zikun, Kentaro Mannen, Yoshitaka Kato, Takashi Nagata, Keiichi Inoue and Gaku Fukuhara

DOI：10.1038/s41598-026-61129-x

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 先導物質化学研究所 教授 福原学（フクハラガク）

TEL：092-802-2517

Mail：gaku@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

東京大学 大学院新領域創成科学研究科先端生命科学専攻 教授／物性研究所 特任教授 井上圭一（イノウエケイイチ）

TEL：04-7136-3230

Mail：kinoue@edu.k.u-tokyo.ac.jp／inoue@issp.u-tokyo.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL：092-802-2130 FAX：092-802-2139

Mail：koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

 **VISION 2030**
総合知で社会変革を牽引する大学へ