



配信先：大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

2025 年 9 月 5 日

大阪公立大学

サンゴがもつ光受容タンパク質の シンプルな光感度システムを発見

<ポイント>

- ◇造礁サンゴの光受容タンパク質であるオプシンは、既知の動物オプシンとは異なる仕組みをもち、正に帯電したシッフ塩基^{※1}が塩化物イオンによって安定化することを発見。
- ◇塩化物イオンによる安定化は安定性が弱いため、pH 環境に応じて可視光または紫外線に対する感度が可逆的に変化する。
- ◇造礁サンゴに共生する褐虫藻による光合成の影響で細胞内外がアルカリ性になるため、オプシンの可視光感度が低下し、相対的に UV 感度が上昇する可能性を示唆。

<概要>

動物の網膜に存在する光受容タンパク質のオプシンは、ビタミン A 由来のレチナールをシッフ塩基として結合し、その部位を正に帯電することで可視光を感知する色素として働きます。この色素は不安定な状態のため、負に帯電したアミノ酸残基が対イオンとして働き、安定化させることは過去の研究から分かっています。

大阪公立大学大学院理学研究科の酒井 祐輔博士研究員（研究当時）、寺北 明久教授、小柳 光正教授、スイス PSI Center for Life Sciences の Xavier Deupi 博士らの共同研究グループは、造礁サンゴのオプシンは既知の動物オプシンとは異なる仕組みをもち、シッフ塩基が塩化物イオンによって安定した状態になることを発見しました。塩化物イオンによる安定化は安定性が弱いため、可視光または UV に対する感度が pH 環境に応じて可逆的に変化するという特性を示しました。また、共生する褐虫藻の光合成により細胞内外がアルカリ性になるため、オプシンの可視光感度が低下し、相対的に UV 感度が上昇する可能性が示唆されました。

本研究成果は、2025 年 9 月 1 日に国際学術誌「eLife」にオンライン掲載されました。



造礁サンゴ

美しいサンゴ礁を形成することで有名なサンゴがもつオプシンの特性は非常にユニークなものでした。オプシンの多様性 (=可能性) を広げる研究になったことを非常にうれしく思います。サンゴのオプシンやそれを通して明らかになるサンゴの光生理・生態の世界にはまだまだ可能性が広がっているはずです。



酒井 祐輔博士研究員

<研究の背景>

光を感じるタンパク質のオプシンは、ビタミン A に似た小さな分子のレチナールと結びつくことで光を感知します。この結びつきはシッフ塩基という特別な形で行われ、オプシンは光を感じる色素として働きます。通常、レチナールがシッフ塩基で結びつくとき UV には強く反応しますが、人間の目が見ることのできる可視光にはほとんど反応しません。

これまでの研究によって、オプシンが可視光に敏感に反応するためには、シッフ塩基に水素イオン（プロトン）が加わる必要があることが分かっています。この水素イオンが結びつくことをプロトン化と呼び、プロトン化されたシッフ塩基が安定するためには、周りに対イオンと呼ばれる、反対の電荷（負電荷）をもつアミノ酸が必要だということも知ら

れています。過去の研究では、対イオンとして機能するアミノ酸がタンパク質中の異なる三つの場所のいずれかに存在していることが分かっており、これがオプシンの働きや進化に重要な役割や影響をもつと考えられています。

近年、これまで知られていたオプシンとは異なるタイプのオプシンが、サンゴやイソギンチャクなどの花虫綱（かちゅうこう）に属する動物から発見され、ASO-II^{*2} と呼ばれる新たなオプシングループに分類されました。ASO-II グループのオプシンは、これまで対イオンとして機能することが確認されていた 3 か所のアミノ酸の位置に、いずれも負電荷をもつアミノ酸残基が存在しないことが分かりました。

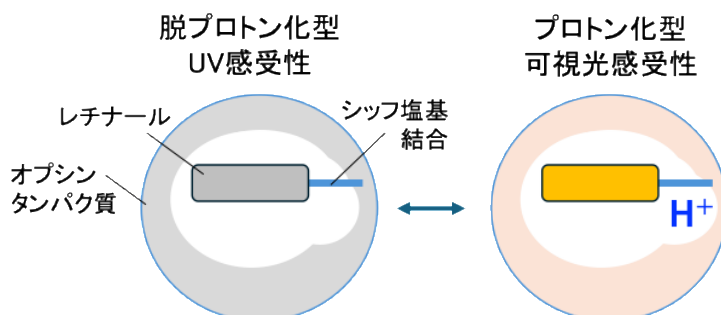


図1 シッフ塩基結合の状態と吸収特性

<研究の内容>

本研究グループは、サンゴ礁を造るサンゴの一種「ウスエダミドリイシ」に含まれる ASO-II グループのオプシンを使い、可視光を受け取るためにどのアミノ酸が対イオンの役割を果たすのかを詳しく調べました。アミノ酸を置き換える実験を行い、さらに、分子の構造や動きをシミュレーションできる QM/MM^{*3} という計算方法を使って解析しました。

その結果、これらのサンゴ由来の ASO-II グループのオプシンでは、対イオンとしてアミノ酸ではなく塩化物イオン（Cl⁻）が使われていることが分かりました。これは、オプシンにおいて無機イオンが対イオンとして働くことが確認された初の事例であり、オプシンの進化と多様化に関する理解に新たな視点をもたらす成果です。

さらに、塩化物イオンによるプロトン化シッフ塩基の安定化は、アミノ酸残基による場合と比べて弱いことも明らかになりました。このため、水素イオンの濃度（pH）の変化に応じて、オプシンが可視光に感受性をもつ状態（プロトン化型）と UV に感受性をもつ状態（脱プロトン化型）との間を可逆的に切り替える性質があることが分かりました。例えば、アミノ酸の対イオンをもつウシロドプシンの pKa^{*4} が 15~16 以上であるという報告がある一方

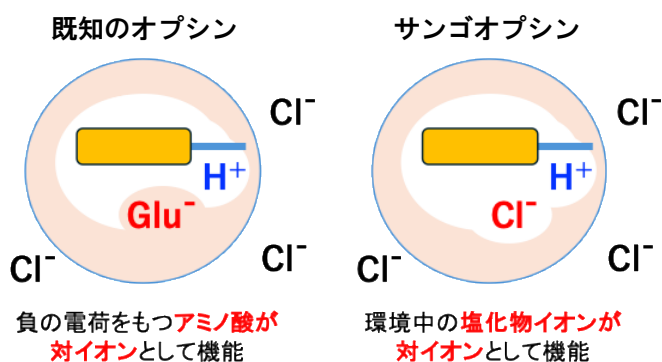


図2 既知のオプシンとサンゴオプシンの違い

で、サンゴオプシンのプロトン化シッフ塩基の pK_a は~9.0 です。

この pH 依存性は、実際のサンゴの生態においても重要な意味をもつ可能性があります。サンゴ礁を形成するサンゴは、細胞内に褐虫藻と呼ばれる藻類を共生させており、褐虫藻の光合成によって生じたグルコースなどを栄養源として利用しています。この光合成の過程で、サンゴの細胞内外の pH はアルカリ性に傾くことが多く、この pH 変動はこれらオプシンの機能に直接的な影響を与えると考えられます。pH が高くなるとシッフ塩基のプロトン化型の割合が低下することにより、オプシンの可視光への感受性が低下し、UV への感度は相対的に増加する可能性が示唆されました。

<期待される効果・今後の展開>

可視光または UV に対する感度の pH 依存的で可逆的な切り替えは、共生している褐虫藻の光合成の状態により、ホストであるサンゴの光の波長感受や感度が変化する可能性を示唆しています。pH の変動がオプシンの感受性に与える影響を理解することで、サンゴと褐虫藻の共生関係をより深く理解できるようになると期待できます。また、塩化物イオンを対イオンとするサンゴオプシンの一つの Antho2a は、光依存のおよび特異的にカルシウムイオンを増加させることも明らかにしており、pH により波長感受性が変化する光遺伝学^{*5} のツール創成にも寄与すると期待されます。

<資金情報>

本研究は文部科学省科学研究費補助金 23H02516、22H02663、20J01841、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (CREST) JPMJCR1753 の助成を受けて実施しました。

<用語解説>

- ※1 シッフ塩基：化学者ヒューゴ・シッフ (Hugo Schiff) が発見した化学結合の様式。アルデヒドやケトンとアミンが反応して生成する。オプシンにおいては、レチナールのアルデヒドとオプシンを構成するアミノ酸の一つであるリジンのアミンがシッフ塩基を形成し結合している。
- ※2 ASO-II: Anthozoan-specific opsin II の略。花虫綱の動物 (Anthozoan) に特異的 (Specific) にみつかるオプシン (Opsin) のグループの一つ。
- ※3 QM/MM: 量子力学 (QM) と分子力学 (MM) という二つの計算手法を組み合わせた方法。この手法を用いることで、分子の構造や動きについて詳細なシミュレーションすることが可能となる。具体的には、オプシン分子の構造モデルを基に、アミノ酸の解離状態に関する仮定を立て、吸収スペクトル特性を計算する。この計算結果として得られた吸収極大が実験で測定された吸収極大と一致することにより、アミノ酸の解離状態などを予測することができる。
- ※4 pK_a ：プロトン化と脱プロトン化が 1:1 の比率で成り立つときの pH の値。シッフ塩基がプロトンを受け取るとプロトン化状態となり、逆にプロトンを放出すると脱プロトン化状態となる。この二つの状態が半々になる pH 値が pK_a として定義される。
- ※5 光遺伝学：標的細胞に光感受性タンパク質を遺伝学的に導入・発現させ、その細胞を光により制御する技術。神経科学や細胞生物学の発展に大きく寄与している。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 eLife

【論文名】 Coral anthozoan-specific opsins employ a novel chloride counterion for spectral tuning

【著者】 Yusuke Sakai, Saumik Sen, Tomohiro Sugihara, Yukiya Kakeyama, Makoto Iwasaki, Gebhard F.X. Schertler, Xavier Deupi, Mitsumasa Koyanagi, Akihisa Terakita

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.7554/eLife.105451.3>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院理学研究科
教授 寺北 明久（てらきた あきひさ）

E-mail : terakita@omu.ac.jp

教授 小柳 光正（こやなぎ みつまさ）

E-mail : koyanagi@omu.ac.jp

TEL : 06-6605-3144

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課

担当：谷

TEL : 06-6967-1834

E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp