

本論文はすでに公開されています
本情報はすぐにご利用いただけます

ジンベエザメだけに起きた視覚の進化 ～深海生活への適応か？～

■ 概要

動物は、生息環境中の光を活用するしくみをもっています。なかでも、深海や地中など微弱な光環境で暮らす生物種は、その限られた光を活用する特別なしくみを備えています。最大の魚類であるジンベエザメは、海水面近くで摂餌をする一方で、光の届きにくい深海にも潜ることが知られています。

今回、情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所の工樂樹洋教授（理化学研究所 チームリーダー）、大阪公立大学の小柳光正教授が率いる研究チームは、ジンベエザメが光を活用するしくみの解明に挑みました。

本研究チームは、眼の網膜にある光受容タンパク質（オプシン⁽¹⁾）のうち、微弱光下での視覚をつかさどるロドプシンについて、DNA 情報と吸収する光の波長を測る分光測定を組み合わせることで、ジンベエザメと他のサメ類を比較しました（図1）。その結果、ジンベエザメのロドプシンは、従来の常識を覆すアミノ酸置換によって、深海の中で最も届きやすい青色の光を効率的に受け取ることができることを明らかにしました。また、ジンベエザメのロドプシンは熱に弱く、低温となる深海での機能に適していることもわかりました。

本結果から、ジンベエザメの視覚は、水温が低下した深海において、微弱な光を活用できるような進化を遂げたことが示唆されます。この進化の引き金になったアミノ酸置換部位はヒトの夜盲症⁽²⁾の原因となる置換部位でもあり、ジンベエザメの海水面付近から水深 2000 メートル付近の深海まで潜水するというその独特のライフスタイルの表れともいえるかもしれません。

さらに、本研究は、様々な生物のくらしをその生体を犠牲にすることなく解き明かすために、DNA の情報を活用したタンパク質の人工合成技術が有用であることも示しました。

本研究成果は、米国科学雑誌「Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)」に 2023 年 3 月 22 日午前 1 時（日本時間）に短報論文として掲載されました。



海洋博公園・沖縄美ら海水族館提供

■ 成果掲載誌

本研究成果は、国際科学雑誌「Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)」に 2023 年 3 月 22 日午前 1 時(日本時間)に掲載されました。

論文タイトル: Whale shark rhodopsin adapted to deep sea lifestyle by a substitution associated with human disease

(ヒトの疾患に関連したアミノ酸置換によって深海生活に適応したジンベエザメのロドプシン)

著者: Kazuaki Yamaguchi, Mitsumasa Koyanagi, Keiichi Sato, Akihisa Terakita, Shigehiro Kuraku

(山口和晃、小柳光正、佐藤圭一、寺北明久、工樂樹洋)

■ 研究の詳細

● 研究の背景

動物は、生息環境にある光を活用するしくみを種ごとに備えており、オプシンによって光を受容します。とくに多くの脊椎動物では、眼の網膜に届く光は、脊椎動物の祖先の時点で存在した5種類の視覚オプシンによって受容し、薄明視や昼間視・色覚などの視覚に活用されます。これまで、視覚オプシンの受け取る光の波長、すなわち色について、さまざまな脊椎動物で調べられてきましたが、サメ類のオプシンについての研究はあまり進んでいませんでした。以前の研究(「サメのゲノムを解読」https://www.riken.jp/press/2018/20181009_1/)で、すべてのサメ類は進化の過程で色覚をつかさどる視覚オプシン複数個をゲノムから失っていることが知られていました。また、視覚オプシンの中でも薄明視をつかさどるロドプシンについて、トラザメとジンベエザメでは、深海に届きやすい「青色の光」(図1)を効率的に受け取るような感度のチューニング(ブルーシフト⁽³⁾)が起きていました。両者のうち、トラザメのロドプシンのブルーシフトのしくみは従来の見解から説明できるものでしたが、ジンベエザメにおけるブルーシフトはそれとは異なるものであり、そのしくみは不明でした。サメ類のみならず魚類で最大のジンベエザメは、主に海の表層を遊泳しプランクトンなどを摂餌する一方で 2000メートル近くの深海に潜ることが知られていますが、その行動は未だに謎だらけです。本研究では、こういったジンベエザメの独特の生態を明らかにする一環としてジンベエザメの視覚に注目しました。

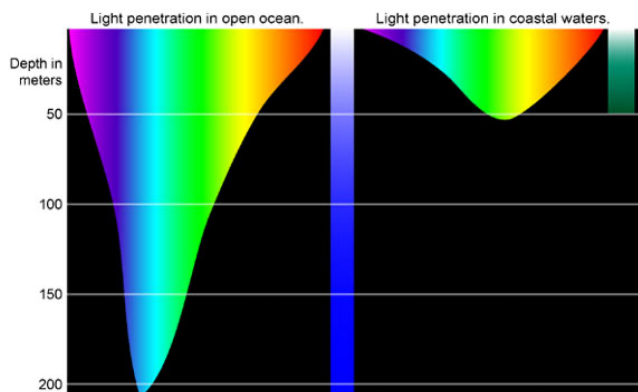


図1 さまざまな色の光が海水を透過する深さ：左は深海、右は沿岸域を示す。深海には青色の光のみが届く。

Source: NOAA

<https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04deepscope/background/deeplight/media/diagram3.html>

● 本研究の成果

ジンベエザメのロドプシンの性質とブルーシフトが起きるしくみを詳しく調べるにあたり、他の種との比較

が必要となります。ジンベエザメに最も近縁とされるトラフザメや、同じテンジクザメ目のなかまであるイヌザメについては、同チームの研究によりゲノム DNA の配列情報が得られていました。ゲノム情報から得られた3種のサメのロドプシンを合成し、その波長感受性(吸収スペクトル)を測定したところ、ジンベエザメのようなブルーシフトは近縁なサメ類には見られませんでした(図2)。

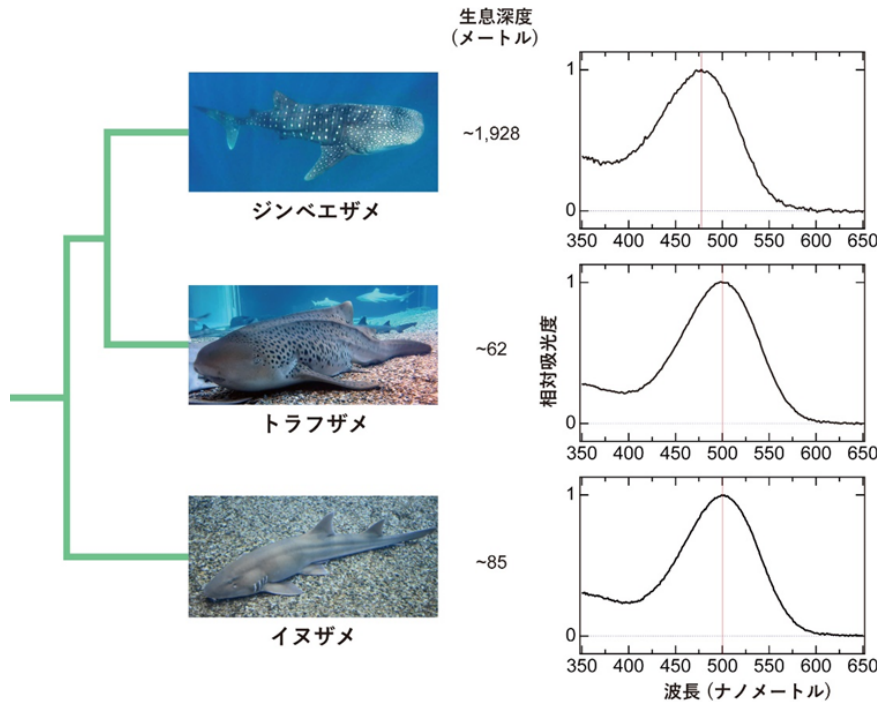


図2 ジンベエザメおよび近縁な他のサメ類のロドプシンの性質。左に3つの生物種の系統関係を、右に合成したロドプシンの吸収スペクトルを表示した。生息水深は文献に基づく。

そこで、これらの種間でロドプシンのアミノ酸配列を比較したところ、ブルーシフトを引き起こすことが知られている部位に違いは見つかりませんでした。ジンベエザメのみが保持しているアミノ酸として、94番目のアラニン(1文字表記でA)と178番目のフェニルアラニン(1文字表記でF)を見出しました(図3)。

	アミノ酸残基									
	83	94	122	124	132	178	208	261	292	299
ジンベエザメ	D	A	E	S	A	F	F	F	A	A
トラフザメ	D	T	E	S	A	Y	F	F	A	A
イヌザメ	D	T	E	S	A	Y	F	F	A	A
トラザメ	D	T	E	S	A	Y	F	F	S	S
クログチヤモリザメ	N	T	E	S	A	Y	F	F	S	A
ツマグロ	D	T	E	A	A	Y	F	F	A	S
<i>Leucoraja erinacea</i>	D	T	E	G	A	Y	F	F	A	A
<i>Amblyraja radiata</i>	D	T	E	S	A	Y	F	Y	A	A
ゾウギンザメ	D	T	E	G	A	Y	F	F	A	A
<i>Notothenia coriiceps</i>	D	A	E	G	A	Y	F	F	A	A

図3 ジンベエザメと他の生物種のロドプシンのアミノ酸配列の比較。

354 アミノ酸残基からなる配列のうち、他の生物種における研究で、ロドプシンのブルーシフトに影響を及ぼすとされているアミノ酸残基と今回注目したアミノ酸残基のみを表示。一番下の *Notothenia* 属の種は南極海に棲む硬骨魚。

DNA 合成技術を用いて、ジンベエザメのロドプシンをもとにこれらのアミノ酸を他生物種で見られるアミノ酸に人工的に置き換えた変異型ロドプシンを作製し、吸収スペクトルを測定したところ、ブルーシフトを示さず、トラフザメなど他の生物種と同様の吸収スペクトルとなりました。この結果は、ブルーシフトを起こした原因がこれらのアミノ酸への置換であること、とくに変化の幅の大きかった 94 番目のアラニンへの置換が原因であることを示しています。

興味深いことに、この 94 番目のアミノ酸の置換はヒトにおいて夜盲症の原因の一つとして知られています。夜盲症を引き起こすロドプシンに見られるアミノ酸置換(94 番目がイソロイシンに置換)は、ロドプシンの熱安定性を低下させることが知られています。そこで、研究チームは、ジンベエザメの野生型ロドプシンと、上記のように人工的にアミノ酸を他の生物種で見られるものに置き換えた変異体(ジンベエザメ二重変異体)およびヒトの夜盲症型に置き換えた変異体(ジンベエザメ夜盲症型変異体)、トラフザメの野生型ロドプシンそれぞれの熱安定性を比較しました。その結果、ヒトの夜盲症型ほどではないものの、ジンベエザメの野生型ロドプシンの熱安定性も低下していること、そして、ジンベエザメにおける 94 番目と 178 番目の 2 つのアミノ酸置換が安定性を低下させていることが示されました(図4)。

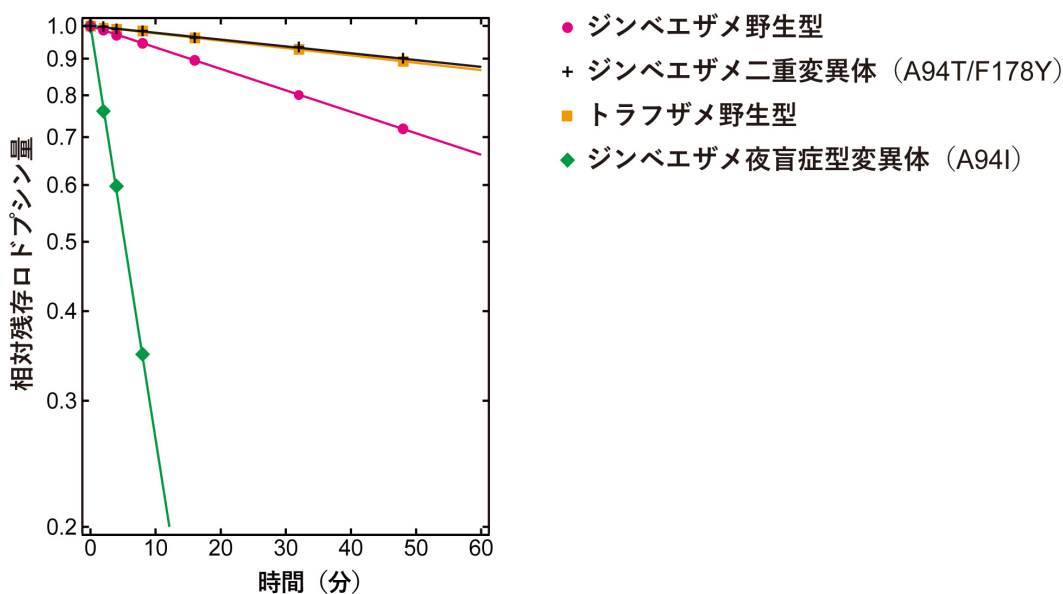


図4 ロドプシンの熱安定性の比較

縦軸は、37°C処理によって壊れずに残ったロドプシンの相対量を対数表示したもので、残量の減少が緩やかなものほど熱安定性が高い。「A94T」は 94 番目のアミノ酸 A (アラニン) を T (スレオニン) に人工的に置き換えたタンパク質を用いたことを表す。F: フェニルアラニン、Y: チロシン、I: イソロイシン。

通常、ロドプシンは高い熱安定性をもっており、これは暗い場所で感度良くものを見るために欠かせない性質です。したがって、熱安定性の低下は、ヒトの夜盲症に見られるように、本来、ロドプシンに起きては困る変化といえます。しかしながら、ジンベエザメが生息する水温が低い深海では、熱安定性が低いロドプシンでも問題なく機能できるのだと思われます。実際、ジンベエザメのように 94 番目がアラニンに置換されているロドプシンを軟骨魚類以外も含めて網羅的に探したところ、南極海に棲む一部の硬骨魚のみに見つかったことから、低温環境に生息する動物では熱安定性の低下をとまなうブルーシフトが許されている、あるいはなんらかの適応的な意義があることが推察されます。これらの結果から、ジンベエザメの視覚は、水温が低

下した深海において微弱な光を活用できるような独自の進化を遂げたことが示唆されます。また、本成果は、遺伝子に起きた同様の変化が、ある種では疾患、また別の種では環境適応につながるという、遺伝子と表現型とのかかわりに広がりを与える点でも興味深いものです。

● 今後の期待

ジンベエザメなどの大型生物の深海での暮らしを調べる手段は非常に限られています。本研究は、系統学的な知見に基づいた種間比較をよりどころに、眼の網膜などの採取のために生体を犠牲にすることなく、DNA情報や分子生物学的な手法を活用した実験室でのタンパク質の合成によって実現したものです。本研究のような、遺伝情報を利用した非侵襲・低侵襲的な研究アプローチにより、実験が困難な大型種や野生下での観察が困難な種など、これまで情報が限られていた生物種についても、暮らし方の謎を明らかにするための手がかりが得られると期待されます。

■ 用語解説

(1) オプシン

視覚に代表される動物の光受容における光受容タンパク質遺伝子およびそれがコードするタンパク質の総称。脊椎動物の視覚においては、桿体(かんたい)視細胞で機能する桿体オプシン(ロドプシン)と錐体(すいたい)視細胞で機能する錐体オプシンが、それぞれ薄明視および昼間視を支えている。多くの動物は、波長(色)感受性の異なる複数の錐体オプシンをもち、それらを用いて色の違いを見分けること(色覚)が可能となる。

(2)夜盲症

ロドプシンの突然変異など、網膜の桿体視細胞に異常があるため暗順応が障害され、暗いところや夜に見えにくくなるヒトの疾患。

(3)ブルーシフト

ロドプシンの波長感受性(吸収スペクトル)が、短波長側にシフトすること。一般的なロドプシンが緑色の光に最大感度をもつものに対して、短波長、すなわちより青色の光に最大感度がシフトすることからブルーシフトと呼ばれる。

■ 研究体制と支援

本研究は、情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 ゲノム・進化研究系 分子生命史研究室 教授(理化学研究所 生命機能科学研究センター 分子配列比較解析チーム チームリーダー) 工樂樹洋(くらくしげひろ)、大阪公立大学 大学院理学研究科 生物学専攻 分子生理学研究室教授 小柳 光正(こやなぎ みつまさ)、同教授 寺北 明久(てらきた あきひさ)、一般財団法人 沖縄美ら島財団 総合研究センター 上席研究員 佐藤圭一(さとう けいいち)の研究グループにより遂行されました。

本研究は、科研費補助金(18H02482, 21H00435)の支援を受けて行われました。