

軟体動物にみる視覚進化の平行ワールド

—脊椎動物と無脊椎動物とで運命を異にした光センサータンパク質—

概要

京都大学大学院理学研究科 山下高廣講師、同 酒井佳寿美研究員、同 池内大樹修士課程学生(研究当時)、同 藤敷千尋博士課程学生、同 今元泰准教授の研究グループは、軟体動物サメハダヒザラガイの光センサータンパク質がヒトの眼の光センサータンパク質と同じ特徴を持つことを明らかにし、ヒトとサメハダヒザラガイの光センサータンパク質が独立して同じように進化した「平行ワールド」である可能性を見出しました。

ヒトを含む脊椎動物の視覚に関わる光センサータンパク質ロドプシンは、脊椎動物の先祖が持っていたと思われる光センサータンパク質に比べて、光を受けた後のシグナル伝達の効率（シグナル増幅効率）が高く、この性質は脊椎動物のロドプシンが進化の過程で新たに特別なアミノ酸残基を獲得したことに由来すると考えられています。そして、この特別なアミノ酸残基を持つ光センサータンパク質は、脊椎動物以外に見つかっていませんでした。本研究では、軟体動物のサメハダヒザラガイの1種が持つ青色光感受性タンパク質が、この特別なアミノ酸残基を持つものの、脊椎動物のロドプシンほどシグナル増幅効率を高めていないことを見出しました。この結果は、サメハダヒザラガイと脊椎動物の光センサータンパク質は、収斂進化によって特別なアミノ酸残基を獲得したものの、サメハダヒザラガイとは異なり脊椎動物のみがさらに特殊な分子構造を獲得しシグナル増幅効率を高め、これが脊椎動物の持つ感度のよい視覚機能の獲得に貢献していると考えられました。

本成果は、2022年8月24日に、国際学術誌「Cellular and Molecular Life Sciences」にオンライン掲載されました。

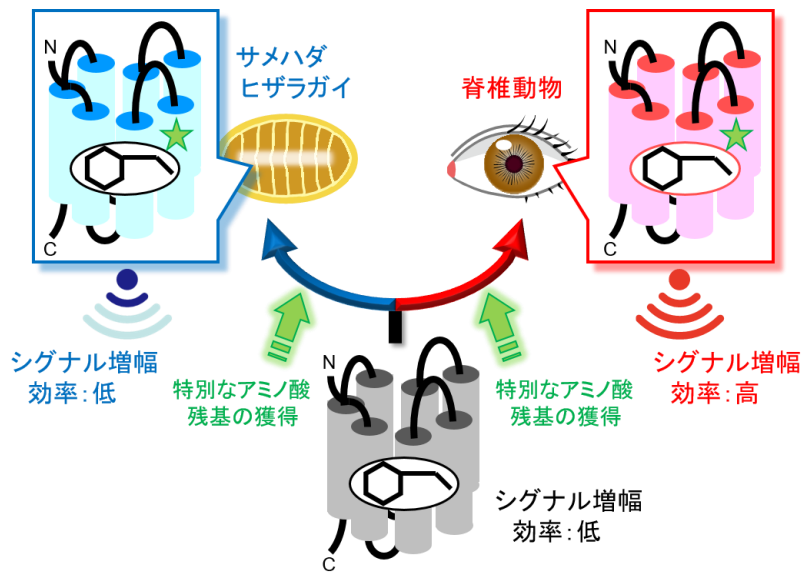


図 脊椎動物とサメハダヒザラガイの光センサータンパク質の「平行ワールド」的進化

脊椎動物の視覚を担うロドプシンのシグナル増幅効率の上昇をもたらした特別なアミノ酸残基（緑星）は、進化的に独立に軟体動物のサメハダヒザラガイの光センサータンパク質も獲得していた（緑星）。

1. 背景

動物にとって、眼から得られる視覚の情報は外界の変化をとらえる上で非常に重要です。そして、身の回りの動物を見ても、様々な形態の眼を持つものがあります。ヒトなど脊椎動物が持つカメラ眼とハエなど昆虫類が持つ複眼では、見た目が大きく異なっています。かつて、チャールズ・ダーウィンも眼の進化に大いに興味を持っていたことが、その著書『種の起源』の記述からも伺えます。そして最近では、眼の形態の違いだけでなく、眼の中で働くタンパク質に着目した研究も進んできました。

ヒトなど脊椎動物は高度に発達した眼を持ち、明るい場所でも暗い場所でも周りの環境を捉えることができます。この視覚機能を支えているのは、ロドプシンに代表される光センサータンパク質*¹であり、眼の網膜の光センサー細胞（視細胞）で働いています。この光センサータンパク質が光を受けるとタンパク質の構造が変化することで細胞の中にシグナルを伝え、視細胞の電気応答を引き起こします。そしてこの電気応答が最終的に脳へと伝達され、“見えた”と実感できます。

我々はこれまで、脊椎動物だけでなく無脊椎動物が持つ様々な光センサータンパク質の解析を行ってきました。そして、ヒトなど脊椎動物の眼が光への高い感受性を示すためにそこで働く光センサータンパク質がどのように進化してきたのか、を研究してきました。カンブリア爆発の時期に他の動物群と分岐した脊椎動物の祖先は、他の動物と同様に、明暗を感じる程度の光受容器官しか持っていなかったと考えられます。そのため、そこで機能する光センサータンパク質も現在の脊椎動物のロドプシンと比べて細胞内に伝えるシグナル増幅効率が悪いものであった、と推定できます。我々はこれまでの研究で、脊椎動物の祖先から進化する過程で、光センサータンパク質が新たに特別なアミノ酸残基を獲得することによってシグナル増幅効率を高めたことを発見していました。また、脊椎動物のロドプシン以外ではこの特別なアミノ酸残基を持つものは見つかっていませんでした。そのため、脊椎動物の光センサータンパク質におけるこのような分子レベルの変化*²が、視覚機能の劇的な進化に寄与していると考えられます。

2. 研究手法・成果

脊椎動物だけでなく無脊椎動物も特徴的な光センサー細胞を持つことが知られています。このような光センサー細胞は、光を感度よく受けるために、光センサータンパク質を含む細胞膜を幾重にも積み重ねた構造を持っています。そして、このような膜構造の由来によって光センサー細胞は古くから繊毛型と感桿型に大別されてきました。例えば、脊椎動物の眼の視細胞は繊毛型、節足動物の昆虫や軟体動物のイカ・タコの眼の視細胞は感桿型、にそれぞれ分類されます。また、無脊椎動物の中には、感桿型だけでなく繊毛型光センサー細胞を持つものも知られています。そこで今回、脊椎動物と無脊椎動物の繊毛型光センサー細胞で働く光センサータンパク質の比較を行うため、軟体動物のサメハダヒザラガイの1種 (*Leptochiton asellus*) が持つ繊毛型細胞で働く光センサータンパク質 xenopsin*³ に着目しました。この xenopsin は軟体動物などいくつかの無脊椎動物が持つものの、その分子的性質などはほとんどわかっていませんでした。本研究で解析を行ったところ、サメハダヒザラガイの xenopsin は青色光を受容する光センサータンパク質であることがわかりました。さらに、脊椎動物のロドプシンと同じ特別なアミノ酸残基を持つこともわかりました。このサメハダヒザラガイの xenopsin は、脊椎動物のロドプシンとは進化的に独立して特別なアミノ酸残基を獲得したことが確認された初めての例になります。しかし、この xenopsin は特別なアミノ酸残基を獲得したものの、脊椎動物のロドプシンのようにシグナル増幅効率を高めることはできていませんでした (図1)。この結果は、脊椎動物のロドプシンが、シグナル増幅効率を高めて視覚機能に貢献するためには、特別なアミノ酸残基の獲得に加えてさらに特殊な分子構造の獲得が必要であったことを示しています。

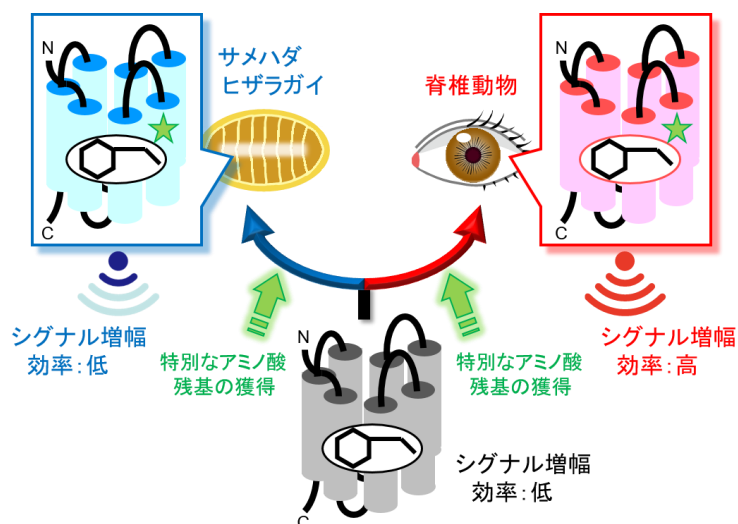


図1 脊椎動物とサメハダヒザラガイの光センサータンパク質の収斂進化

脊椎動物の視覚を担う光センサータンパク質のシグナル増幅効率の上昇をもたらした特別なアミノ酸残基（緑星）は、進化的に独立にサメハダヒザラガイの光センサータンパク質も獲得していた（緑星）。サメハダヒザラガイの光センサータンパク質はそこで進化がストップしたものの、脊椎動物の光センサータンパク質はさらに特殊な分子構造を獲得し、シグナル増幅効率の上昇につなげた。

3. 波及効果、今後の予定

我々は以前から、ヒトの視覚を担うロドプシンと同じような進化を遂げた「パラレルワールド」を持つ動物がどこかにいるのではないかと、思い探索をしてきました。そして今回、軟体動物の1種が持つ光センサータンパク質に行き当たりました。サメハダヒザラガイの xenopsin は、ヒトのロドプシンと同じく特別なアミノ酸残基を獲得することに成功したもののそこで進化がストップし、さらに分子レベルの変化を遂げたヒトのロドプシンと運命を異にしたように思われます。動物の光センサータンパク質の解析を進めると、自然が創ったユニークな性質を持つものに予想外に出くわすことがしばしばあります。そのような解析がヒトの視覚システムの成り立ちを理解することに役立つのでは、と期待します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業（CREST）「光の特性を活用した生命機能の時空間制御技術の開発と応用」（JPMJCR1753）、公益財団法人武田科学振興財団、京都大学教育研究振興財団の支援を受けて行われました。

<用語解説>

*1ロドプシンに代表される光センサータンパク質：脊椎動物の視細胞で機能するロドプシンなどの光センサータンパク質は、光を受容するために補因子としてレチナール（ビタミンA誘導体）を持ちます。このような光センサータンパク質は光を受けるとタンパク質の構造が変化し、細胞の中にシグナルを伝えます。このシグナルを伝える効率（シグナル増幅効率）が高いと、わずかな光を受けただけで細胞の中に多くのシグナルを伝えることができるため、光感度が高くなります。

*2光センサータンパク質の分子レベルの変化：我々は以前、脊椎動物にもっとも近縁な無脊椎動物であるホヤの光センサータンパク質を解析しました。その結果から、脊椎動物のロドプシンは、特別なアミノ酸残基を獲得することによってシグナル増幅効率を高めたと考えています。詳細は以下の URL のプレスリリースをご覧ください。 <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2017-05-29>

*3xenopsin：いくつかの無脊椎動物において、繊毛型の光センサー細胞で働くことがわかっている光センサー

タンパク質です。しかし、これまでその分子的な性質はほとんど分かっていませんでした。本研究の解析で、いくつかの xenopsin は青色光感受性のタンパク質であることが分かりました。

<研究者のコメント>

脊椎動物とは5億年以上前に系統的に分かれた軟体動物の中に、ヒトの光センサータンパク質と同じような進化を遂げようとしていたものがあったことはとても驚きでした。脊椎動物の祖先とサメハダヒザラガイの祖先が、どのような生息環境で光センサータンパク質を「パラレルワールド」的に変化させたのか、タイムトラベルで知ることができればいいですね。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Convergent evolutionary counterion displacement of bilaterian opsins in ciliary cells

(左右相称動物の繊毛型細胞で働く光センサータンパク質における収斂的な対イオン変位)

著者：Kazumi Sakai, Hiroki Ikeuchi, Chihiro Fujiyabu, Yasushi Imamoto, Takahiro Yamashita

掲載誌：Cellular and Molecular Life Sciences DOI：10.1007/s00018-022-04525-6.