

家の守り神『ヤモリ』が夜でも色を見分けられるのはなぜ？

—ヤモリが持つ特殊な色覚能力の分子メカニズムを説明—

概要

京都大学大学院理学研究科 山下高廣講師、岡山大学学術研究院医歯薬学域 小島慧一助教、京都大学大学院理学研究科 七田芳則名誉教授（現・立命館大学総合科学技術研究機構 客員教授）らの研究グループは、夜行性のヤモリが暗がりで見分けられる特殊な能力を持つメカニズムを明らかにしました。

ヒトは、明るい所で色を見分けられる（三色型色覚）ものの、暗がりでは見分けられません。これはヒトが、明るい所で働く光センサータンパク質（錐体視物質）を3種類持つものの、暗がりでは働く光センサータンパク質（ロドプシン）を1種類しかもたないためです。この暗がりでは色が識別できないことは多くの脊椎動物に共通しています。しかし、ヤモリは多くの種が夜行性で、暗がりでは色を識別していると考えられています。ただ、ヤモリはロドプシンをもたないため、本来明るい所で働く3種類の錐体視物質を暗がりでも利用する必要があります。そこで本研究チームは、夜行性ヤモリの錐体視物質の性質を調べました。その結果、錐体視物質の性質が数個のアミノ酸の置換によって「暗がりでの視覚」に適した形に変化していました。つまり、ヤモリは光センサータンパク質の性質を独自に変えることで、「暗がりでは色を識別できる能力」を獲得したと言えます。私たちの身近に棲むヤモリは、多くの脊椎動物が持たない特殊な色覚能力を駆使することで闇夜に潜む害虫を正確に認識し捕食していると考えられます。

本成果は、2021年10月1日（現地時間）に米国の国際学術誌「Science Advances」にオンライン掲載されます。

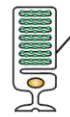
1. 背景

動物は、眼に入る視覚情報をもとにエサや外敵の存在といった周囲の状況を把握し、自分たちの活動に役立っています。ヒトを含む多くの脊椎動物は、モノを見る際に、色を見分けられます。この色識別のためには、動物は眼の中に複数種類の光受容細胞^{*1}を持ち、それぞれが異なる波長の光に応答する必要があります。

多くの脊椎動物(例:ヒト)



1種類の桿体



ロドプシン

暗がりでの
視覚に適応

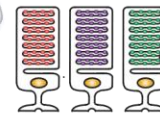


暗がりでは色を識別できない

夜行性ヤモリ



3種類の桿体



錐体視物質

暗がりでの
視覚に適応



暗がりでも色を識別できる

す。ヒトは、明るい所で働く光受容細胞（錐体）を3種類持ち、赤・緑・青色の光をそれぞれよく吸収する光センサータンパク質*2（錐体視物質）がその中で働いています。一方、暗がりでも働く光受容細胞（桿体）を1種類しかもち、その中では錐体視物質とは少し性質の違う光センサータンパク質（ロドプシン）が働きます。そのため、ヒトは明るい所では色を識別できる（赤・緑・青の三色型色覚）ものの、暗がりでは色を識別できません。このような「複数の錐体と1つの桿体」という光受容細胞のレパートリーは多くの脊椎動物で共通しており、明るい所でのみ色を識別できるという能力につながります（図1）。

日本の民家にも生息するヤモリは、暗がりでも生活し、民家内外の害虫を捕食することから“家の守り神”と言われ昔から親しまれてきました。このような夜行性ヤモリは他の多くの脊椎動物とは異なり、光受容細胞のレパートリーを変化させていることが古くから知られています。具体的には、夜行性ヤモリの眼には、錐体はなく暗がりでも働く桿体のみが3種類存在します。そして、ヤモリは進化の過程でロドプシンを失っているため、その桿体の中では赤・緑・紫色の光をよく吸収する錐体視物質が働きます（図1）。つまり夜行性ヤモリは、これら3種類の桿体を使って暗がりでも色識別をしていると考えられてきました。しかし、これまでの分子レベルの研究から、錐体視物質は明るい所で働くように、ロドプシンは暗い所で働くように、それぞれの性質が異なることが分かっていました。そのため、夜行性ヤモリが本来「明るい所での視覚」のための錐体視物質を桿体で働かせ「暗がりでの視覚」に利用するためには、錐体視物質の性質を変化させる必要があります。

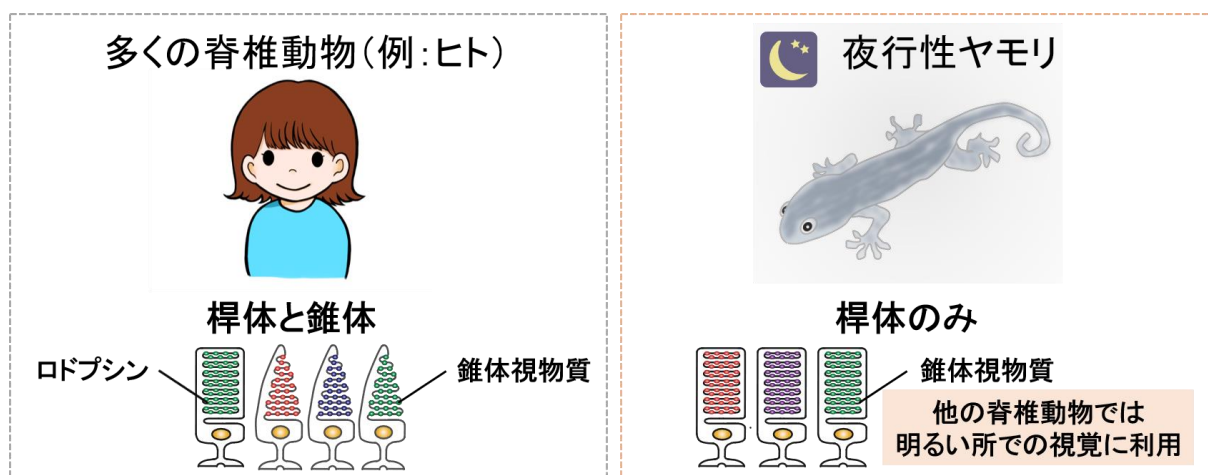


図1：脊椎動物の光受容細胞と光受容タンパク質 ヒトを始めとした多くの脊椎動物の眼には、1種類の桿体と複数種類の錐体が存在し、その中にはそれぞれロドプシンと錐体視物質が含まれています。夜行性ヤモリの眼には、桿体のみが3種類存在し、その中には錐体視物質が含まれています。

2. 研究手法・成果

私たちは今回、独自に開発した実験手法を用いることで、夜行性ヤモリの桿体で働く錐体視物質の性質を調べました。その際に着目したのが、「光がある時に反応する」性質ではなく、「光がない時に誤って反応してしまう」性質です。光センサータンパク質は、「光がある時に反応する」ことが重要ですが、まれに「光がない時に誤って反応してしまう」ことがあります。このような光が来ていない時に起こる誤った反応（ノイズ）^{*3}は、わずかな光を感度よく認識する「暗がりでの視覚」の妨げとなります。そのため、ロドプシンはこのノイズ反応を極めて低く抑えることで「暗がりでの視覚」を実現していることが知られていました。一方で、明るい所でモノを見る際には、強い光が眼の中に入るため光への感度を下げることがあります。そのため、錐体視物質は高いノイズ反応を示し「明るい所での視覚」に一役買っていることも知られていました。今回の研究から、夜行性ヤモリの桿体で働く錐体視物質は、数個のアミノ酸の置換によってロドプシンと同様にノイズ反応を低く抑えていて、「暗がりでの視覚」に適した性質を持つことが分かりました（図2）。つまり、夜行性ヤモリは、本来は「明るい所での視覚」を担っていた光センサータンパク質の性質を「暗がりでの視覚」に適応させたと言えます。その結果として、夜行性ヤモリは暗がりでも働く3種類の桿体を活用し、「暗がりでの色覚」という特殊な視覚機能を獲得したと考えられました（図3）。私たちの身近に棲むヤモリは、多くの脊椎動物が持たない特殊な色覚能力を駆使することで、闇夜に潜む害虫を正確に認識し、捕食していると考えられます。

日本に生息するヤモリは一般的に夜行性ですが、マダガスカルを始めとした熱帯地方には昼行性のヤモリが生息しており、「ヒルヤモリ」と呼ばれているものもいます。これらの種は夜行性のものから独自に進化してきたと考えられています。昼行性ヤモリの眼は錐体のみを3種類持ち、その中では赤・緑・紫色の光をよく吸収する錐体視物質が働きます（図3）。昼行性ヤモリは、これら3種類の錐体を使って明るい所で色識別をしていると考えられてきました。このような昼行性ヤモリの錐体視物質の性質も調べたところ、高いノイズ反応を示し、「明るい所での視覚」に適した性質を持つことが分かりました（図3）。つまり、昼行性ヤモリは夜行性ヤモリからの進化の過程で、光センサータンパク質の性質を「明るい所での視覚」に再び適応させたと言えます。その結果として、昼行性ヤモリは明るい所で働く3種類の錐体を活用し、「明るい所での色覚」を再び獲得したと考えられました（図3）。このように、ヤモリは生活リズムにあわせて色覚能力を独自に変化させ、活動時間帯にカラーで周囲の状況を認識し、自身の生活に役立てていると言えます。

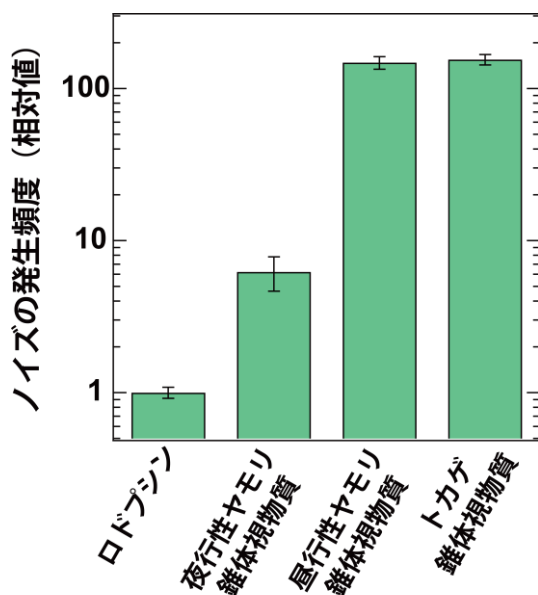


図2：ヤモリ錐体視物質のノイズの発生頻度

昼行性トカゲの錐体で働く錐体視物質に比べて夜行性ヤモリの桿体で働く錐体視物質のノイズ発生頻度は、ロドプシンと同様に低い値を示します。反対に、昼行性ヤモリの錐体で働く錐体視物質のノイズ発生頻度は、トカゲの錐体視物質と同様に高い値を示します。

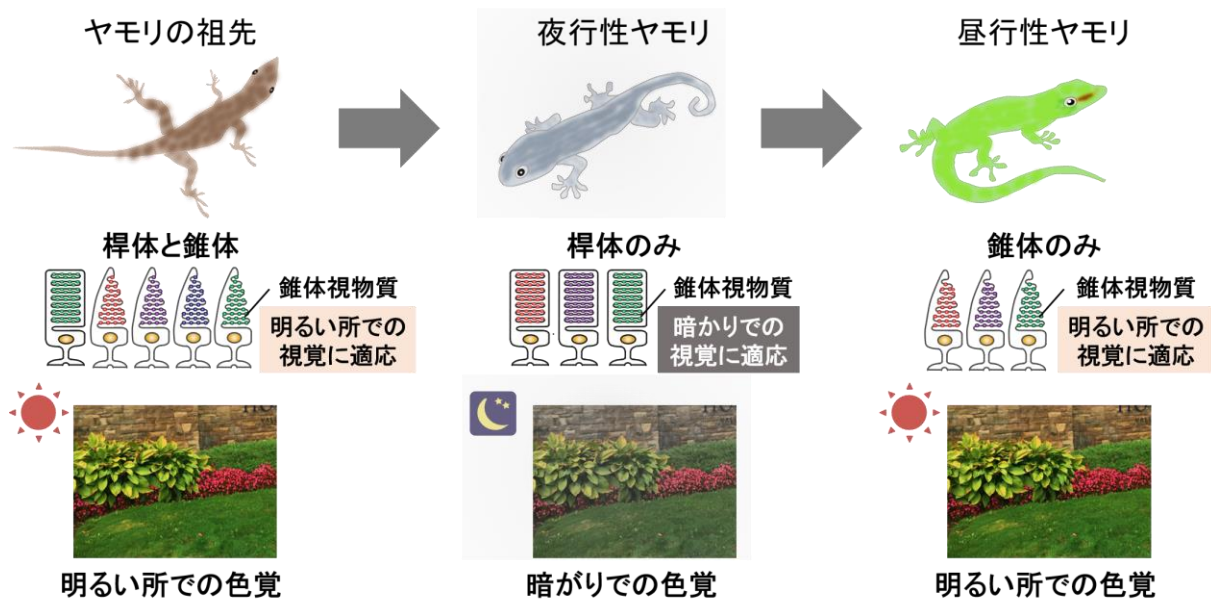


図3：ヤモリが生活リズムにあわせて視覚機能を適応させたメカニズムの概略図 夜行性ヤモリの錐体視物質は、ノイズを低く抑えることで「暗がりでの視覚」に適した性質を獲得しています。この特別な錐体視物質を含む3種類の桿体を用いて、夜行性ヤモリは暗がりでの色識別をしていると考えられます。また、昼行性ヤモリの錐体視物質はノイズが高く、「明るい所での視覚」に一役買っています。この錐体視物質を含む3種類の錐体を用いて、昼行性ヤモリは明るい所で色識別をしていると考えられます。

3. 波及効果、今後の予定

今回の研究から、ヤモリはその進化の過程で生活リズムを変化させる際に、眼の光受容細胞の形態を変えるだけでなく、そこで働く光センサータンパク質の性質も変えることで、視覚機能を独自に適応させていることが分かりました。自然界にはヤモリの他にも、生活パターンや生息する光環境（光のほとんど届かない深海や土壌中など）にあわせて光受容細胞の形態やレポーターを変化させている動物が存在します。これらの動物が持つ光センサータンパク質の性質を明らかにすることで、動物はどれほど巧みに生息環境へ適応しているのか、分子レベルでの理解が進むと期待できます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 基盤研究（A）、基盤研究（C）、挑戦的研究、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」、公益財団法人武田科学振興財団ライフサイエンス研究奨励、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光受容細胞：脊椎動物の眼の網膜に存在し視覚を担う光受容細胞（視細胞とも呼ばれる）として、形態の異なる桿体と錐体が存在する。桿体は暗がりでの視覚を、錐体は明るい所での視覚を担う。

*²光センサータンパク質：動物の視覚機能を担う光センサータンパク質は視物質と呼ばれ、脊椎動物では通常、桿体に存在する桿体視物質（ロドプシン）と錐体に存在する錐体視物質に分けられる。視物質はタンパク質内部にビタミンAの誘導体であるレチナールを結合しており、光を受容することで反応（活性化）し視細胞の応答

を引き起こす。

*³誤ったシグナル(ノイズ)：通常、視物質は光に反応し、視細胞の応答を引き起こす。しかし、光が来ていない時に視物質が誤って熱的に反応してもそれに由来する視細胞の応答は、光依存的な視細胞の応答と区別できないため偽シグナルとなり、視覚機能における感度の低下につながる。暗がりでの視覚では光への高い感度を必要とするため、光が来ていない時の誤った反応(ノイズ)の発生頻度を低く抑えることは重要になる。一方で、明るい所での視覚では光への感度を下げる必要があるため、光が来ていない時の誤った反応(ノイズ)の発生頻度を高めることが重要だと考えられている。

<研究者のコメント>

いくつかの動物は、特殊な視覚機能を独自に手に入れていることが知られています。本研究は、私たち研究グループが独自に開発した実験手法を駆使することで、90年以上前からナゾであったヤモリが持つ特殊な視覚機能の成り立ちを分子レベルから明らかにすることができました。正に温故知新です。動物たちが、自分たちの生存戦略のために、ヒトが持たないユニークな能力を精巧に築き上げていることに深い感銘を受けました。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Evolutionary adaptation of visual pigments in geckos for their photic environment

(ヤモリは生活する光環境にあわせて光センサータンパク質を進化的に適応させた)

著者：Keiichi Kojima, Yuki Matsutani, Masataka Yanagawa, Yasushi Imamoto, Yumiko Yamano, Akimori Wada, Yoshinori Shichida, Takahiro Yamashita

掲載誌：Science Advances DOI：10.1126/sciadv.abj1316