

はじめに

生物の器官の一つである「眼」は、カンブリア紀の生物大爆発から現在に至るまでの生態系において、非常に重要な役割を果たしてきた。

現在の自然界は、多様性に富む生物で溢れており、中でも色や形は実に多岐に亘るが、そのような多様性を生じさせるきっかけは、今から 5 億 4200 万年前のカンブリア爆発にまで遡る。アンドリュー・パーカーの「光スイッチ説」である。

光スイッチ説とは、外部形態の多様化を促したのは眼の誕生である、とした説で、つまり、眼を持ち視覚情報で獲物を捕える捕食者が現れた事により、被食者も必然的に眼を発達させ頑丈な外骨格を纏うようになり、その連鎖が爆発的な進化となって現れたという考え方だ。例えば、カンブリア爆発以前のエディアカラ動物群とカンブリア初期のチェンジャン動物群を比較してみると、前者は眼を持たず硬い外骨格も持たないが、後者は眼を持ち硬い外骨格や俊敏に運動するための付属肢なども見られる。

節足動物は最古の化石が 5 億 3000 万年前カンブリア紀からも見つかっており、硬い殻を眼のレンズとして利用しているために、視覚器官の一部が化石として保存される事がある。

節足動物の化石の眼の研究を研究する事は、化石生物の生態を復元するだけでなく、地質学的タイムスケールで生物進化や生物多様性を考える上でも重要となると言える。

そこで、節足動物を用いた 3 つ研究を紹介し、さらに「Optical Palaeontology (光学的古生物学)」の可能性について言及する。

研究紹介

「顕生代を通じてのオストラコーダの眼の進化と生息場の開拓史」

オストラコーダ (介形虫) はノープリウス眼と呼ばれる眼を持つ微小な甲殻類である (図 1)。眼のレンズに入射した光は屈折し、凹面鏡で反射して「感桿」と呼ばれるレセプター (光受容体) に吸収される仕組みになっている。

この研究ではノープリウス眼を持つ介形虫の集光能力の強さと光環境との関係、そしてその進化について考察した。

まず、ノープリウス眼を模して、外面が海水で、内面が細胞と接した石灰質の厚いレンズの後方に凹面鏡を置いた

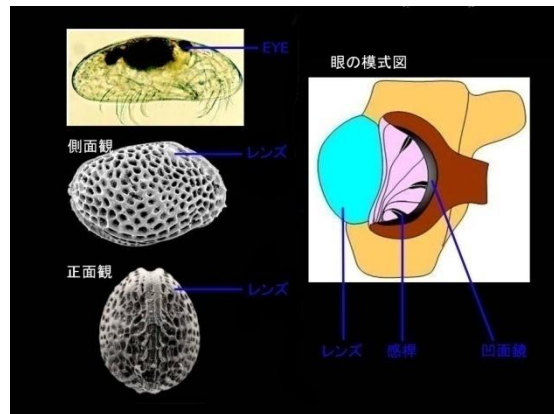


図 1. オストラコーダの眼の仕組み

光学系を考えた (図 2)。そして、レンズの外側から n 本の光線を通した時にレセプターの内部を通過する光線の線分の長さを合計した値、集光能力 G を評価した。

その際、レンズの外面および内面の相対的な曲率 (それぞれ $R1$ および $R2$)、レンズの相対的な厚さ ($E1$)、レンズと凹面鏡との相対的な距離 ($E2$) という 4 つのパラメータを変化させ、どれが集光能力 (G) に大きく寄与しているか調べた。

その結果、レンズの厚さと外側曲率の 2 要素が集光能力に大きく関与する事が分かった。

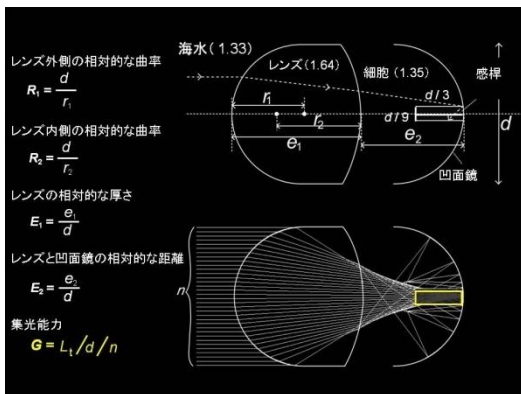


図 2. ノープリウス眼を模した光学系

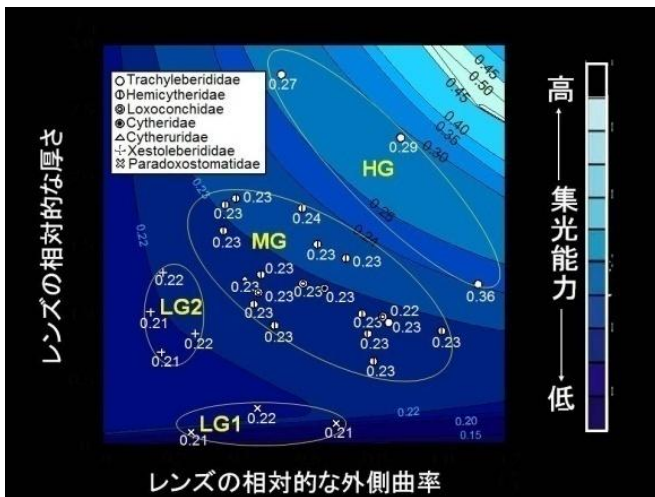


図3. レンズの相対的な厚さを縦軸に、外側曲率を横軸に作成した理論形態空間。色が薄いほど集光能力が高い。プロットされた点の横に書かれているのは集光能力値G。

その結果から、集光能力によって以下の4つのグループに分類された。

1. レンズの相対的な厚さ (E1) が小さく集光能力の低いLG1
2. レンズの相対的な外側曲率 (R1) が小さく集光能力の低いLG2
3. 集光能力が中位でさまざまな分類群からなるMG
4. 集光能力の高いHG

それぞれのグループに属する介形虫で、ハロゲンランプを使用した眼の感度を調べる実験を施したところ、HGグループが最も感度がよく、ついでMG、LGの順番になり、集光能力値に基づく順番と一致する。よって、集光能力が介形虫の眼の感度を評価するのに適当であることが示唆された (図4)。

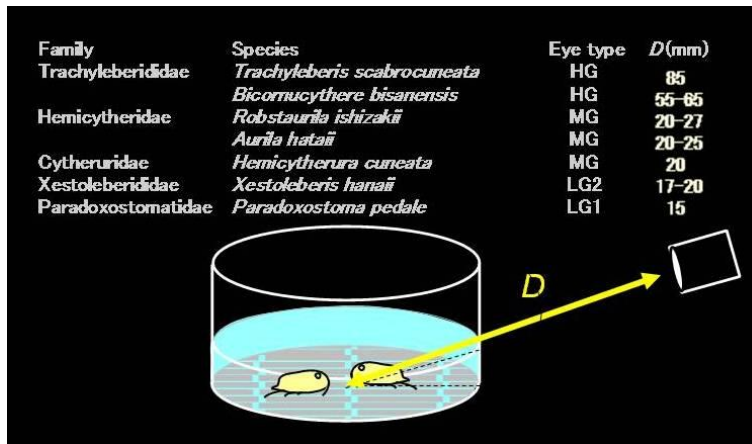


図4. ハロゲンランプを用いた感度実験。

ろ紙を敷き、人工海水で満たしたシャーレに介形虫を入れ、薄暗い光環境下でハロゲンランプの光源を少しずつ近づけていく。そして、介形虫が光から逃げ始めたときの光源と介形虫との距離Dを計測した。

ここから、集光能力の強さと光環境との関係、進化についての考察に入る。

まずは光環境との関係について調べるため、微小生息地の全放射照度を横軸に、先ほどの集光能力値を縦軸にとった図を作成した。すると、HGグループは他のグループよりもより低い放射照度環境に、LGグループは、高い放射照度環境に、MGグループは幾分広い範囲の放射照度環境に生息していることが分かった。

次に、分子系統樹上にグループの形質状態を示した。それによると、レンズを持たない分類群からまずMGグループが現れ、その後、MGグループの中から他のグループが派生し

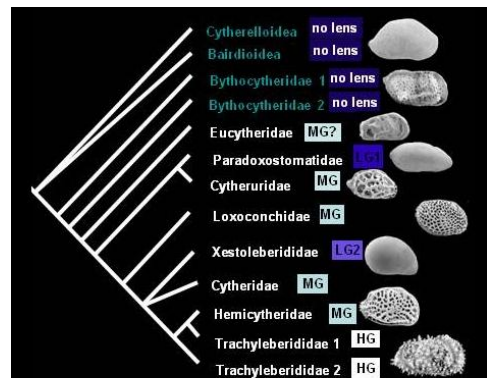


図5. オストラコーダの系統図 (Yamaguchi 2003)

ている。各グループの産出レンジを見てみると、古生代にレンズを持つ介形虫は見られず、三疊紀のはじめに MG グループが一斉に出現する。さらにジュラ紀後期には HG グループが水深の深い環境に、LG グループが白亜紀の潮干帯に出現した (図5)。

以上より、介形虫のノープリウス眼の集光能力はレンズの外側曲率と厚さによって左右される事、中位の集光能力の眼を持つグループから様々な集光能力の眼を持つグループが派生した事が分かった。

形態空間解析は、眼の形態や機能の進化を議論するのに有効なツールであることが結論付けられた。

「沖縄県久米島に分布する上部中新統一鮮新統島尻層群の古環境解析」

沖縄県久米島に分布する島尻層群の化石介形虫群集によって当時の環境を推定した。

沖縄本島から西へ約 100km の久米島北東部、島尻層群に属する真謝層と阿嘉層において S1 から S21 までのサンプルを採取した (図6)。

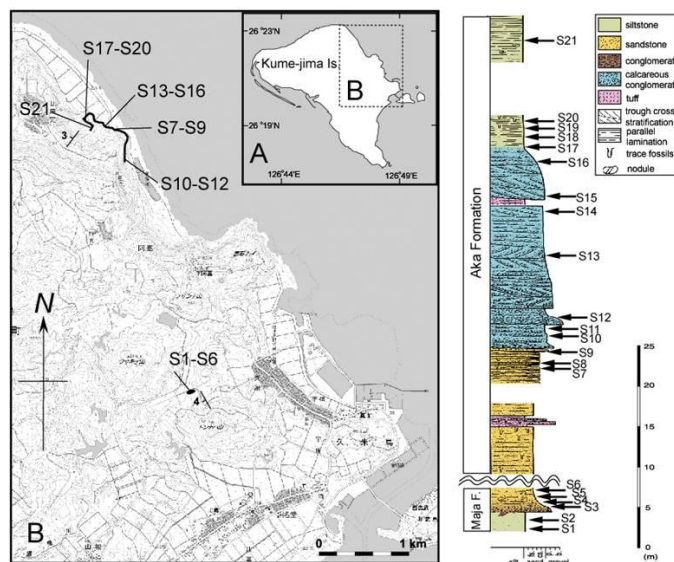


図6. (左) 沖縄県久米島。地図で示したのが調査地域、地図Aの口内を拡大した地図をBに示す。(右) 調査地域の柱状図。

そしてそれぞれの群集を現生の群集と化石群集を比較して環境を推定する「現生アナログ法」で解析した。

その結果、堆積当時の環境は水深が 10-16m, 最大底水温 19-28°C, 最高底水温 6-15°C, つまり現在の本州とほぼ同じ気候が推定された。

この事から現在の久米島よりも堆積当時の方が寒かった事が分かる。また、大陸河口付近で見られるような大型の斜交層理が見られる事などから沖縄トラフの深化は、後期鮮新世以前には起きていなかった事が分かった。

「5000 万年前のコハク中に閉じ込められたハエの眼」

琥珀中には時に節足動物の化石が取り込まれている事があり、中には生息当時の形態をよく保存しているものもある。ところが、琥珀中の節足動物について多くの記載研究があるが、そのなかの化石を琥珀から掘り出し、昆虫化石の表面の形態を観察した例は少ない。

そこで非常によく保存された化石が含まれる、バルト海沿岸のヤンターニ露天掘り鉱山から産出した「バルト琥珀」中の昆虫を針とデザインナイフを用いて琥珀中のアシナガバエを掘り出し、眼の構造を観察した。

観察したアシナガバエの複眼化石は、微細な構造までしっかりと保存されている事が観察出来た (図7)。

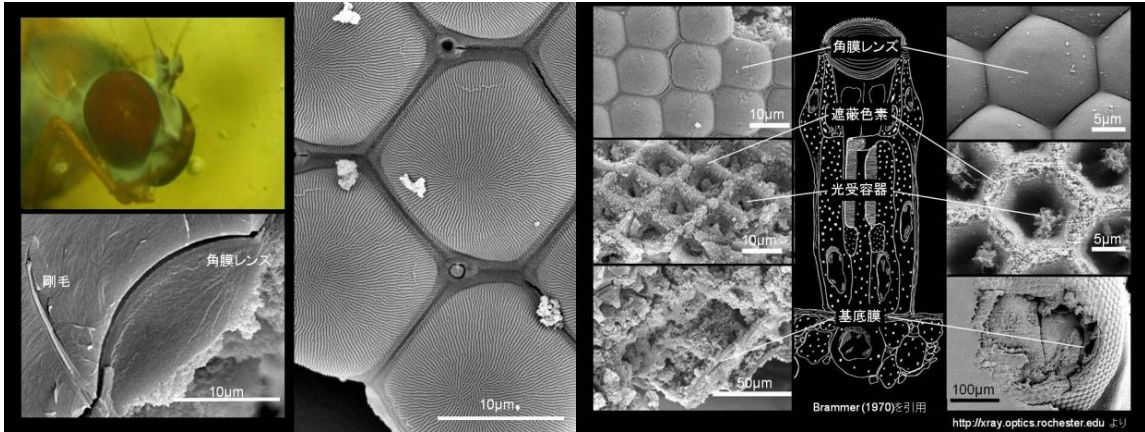


図7. (左) 琥珀中のアシナガバエ複眼化石の顕微鏡写真。
(右) 観察出来た眼の構造の微細組織。左が化石、右は比較用の現生標本。

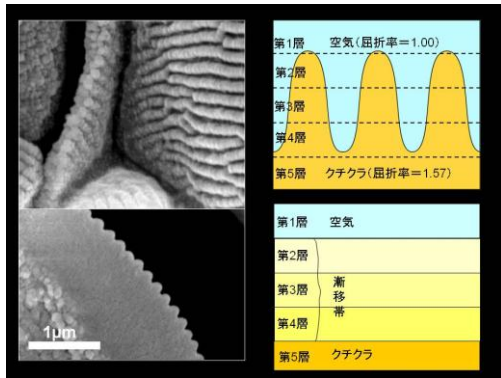


図8. 単眼表面の構造。

そして、その溝のパターンは4種類あるが(図9)、このパターン形成には微絨毛突起の形成を活性化する組織が相互に関連している事が大きく関わっていると考えられる。

パターン形成の仕組みを知るため、ヤング(1984)のセルオートマトンモデルを元にシミュレーションを行った。これは、単眼表面をグリッドで区切られた平面として模式化し、そのセルごとに、微絨毛突起形成の活性・不活性を決定する事で表わされる。セル内にランダムにうたれた点を持つ値が正ならば活性、負ならば不活性として表現するもので、その正負はランダムに選択された活性化セルからの距離と、活性化効果 W1、阻害効果 W2 によって決定する。この時、その効果の及ぶ範囲は任意に決定出来る半径 C 内と外では異なる(図10)。

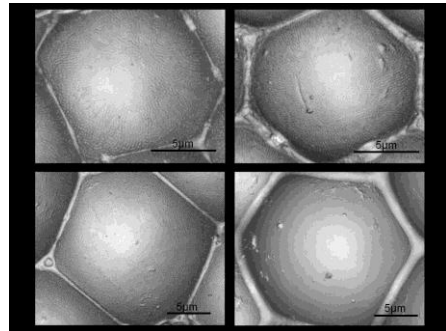


図9. 単眼表面の溝のパターン

上記のようなシミュレーションからアシナガバエ単眼表面の溝構造を作り出す事に成功した。つまり、この溝形成には微絨毛突起の形成を促す細胞が相互に関連し、創り上げている可能性が示唆される。

以上のような研究から、ニューラル連立像眼は少なくとも5000万年前には存在していた事、複眼表面の溝構造は系統的制約とは無関係に形成される吸光構造であるという事がわかった。

その単眼表面を観察してみると、周期的に複雑な溝が放射状に刻まれているのが観察できる。この溝を形成しているのはクチクラの微柔毛突起で、断面図を見てみると、空気層からクチクラ層への変化が連続的になる漸移帯が確認できる(図8)。系統図で見ると、この溝を発達させる種はハエ・アブの仲間ではほぼすべての分類群で確認できる。したがって、この構造は系統発生とは無関係に派生していると考えられる。

この漸移帯の有無でクチクラ層への光の到達度を比べてみると、漸移帯を持つ方が反射率が低い、つまり光吸収率が高くなる事が分かった。

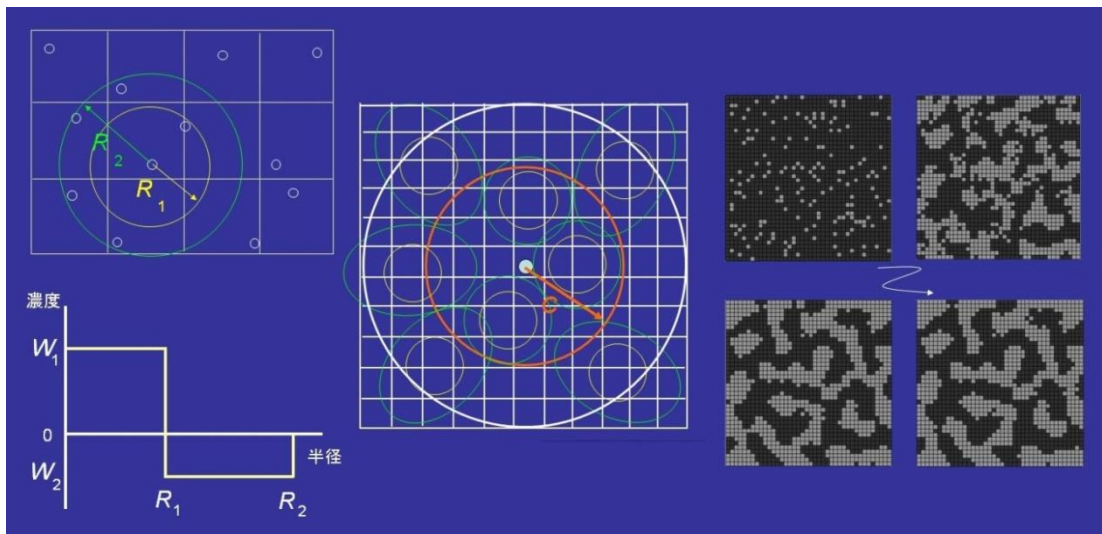


図 10. パターン形成のシミュレーション.

セル1つに対してランダムな位置に一点を打ち、微絨毛突起をつくる活性化セルをランダムに選択する (左上). 活性化セルの中心から半径 R_1 までを正の値, R_1 から R_2 の範囲は負の値をとるとして状態を変える (左下). 周辺の活性化セルに活性化効果 W_1 をかけたものと阻害セルに阻害効果 W_2 をかけたものの合計が正ならば, セルは, 活性化セルとなるが, その値が0ならば現状が維持され, 負なら阻害セルとなる. 個々のセルについて同様な計算を繰り返し, パターンが変化しなくなるまで計算を続ける.

この時, 個眼の中心から半径 C 内にあるセルについては阻害化の及ぶ範囲を円形に. 外にあるものについては楕円にする (中央).

繰り返す事によって, 一つの一つの模様収束していく (右).

さいごに

地層中から掘り起こした化石生物の光学器官の進化過程を, 化石だけでなく形態空間解析や光学的方法を用いて研究する事で, 生物がどのような機能の光学器官を備えていたのかを知り, 「Optical Palaeontology (光学的古生物学)」という新たな分野の発展を期待できる.

例えば, 3 つ目に紹介した研究に登場した光吸収効率を上げるハエの単眼表面の構造はすでに模型が出来ており, 実験段階にある. この構造によって光吸収率を上げる事が出来ると証明できれば, レンズ産業を始めとする様々な工業製品に応用が可能となるだろう.

化石生物の光学器官を研究した結果, またはその過程で, 工業製品に応用できるような構造が発見される可能性は十分にある.

「Optical Palaeontology」のさらなる発展は古生物学分野にとどまらず, 生物学分野, 工学分野においても大きな成果を期待できる.