

総論：昆虫が見ている世界を想う



しもだ まさみ
霜田 政美

（東京大学大学院農学生命科学研究科 生産・環境生物学専攻）

Profile: 1991年筑波大学大学院農学研究科博士課程1年次中退。同年農林水産省農業研究センター研究員。'98年米田ロックフェラー大学客員研究員。2001年（独）農業生物資源研究所主任研究員。'12年期研究ユニット長。'16年（国）農業・食品産業技術総合研究機構昆虫相互作用ユニット長。'21年より現職。専門分野は応用昆虫学・動物生理学。

General remarks: The World Insects See
Masami Shimoda
Department of Agricultural and Environmental Biology, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Key words

【複眼】、【視覚】、【色覚】、【光応答反応】、【光防除】

はじめに

トンボが不規則に飛翔している虫を捉えたり、その風が吹く中でハチがホバリング（静止飛行）しながら小さな花の蜜を吸ったり、セミが細い木の枝にビタリと着地したりと、昆虫はかなり高度なことをいとも簡単にやってのけてしまう。これは昆虫の視覚と情報処理、行動制御がいかに高度に洗練されたシステムであるのかを表している。生物が自然の中で生きていくためには周囲の環境を正確に認知する必要があり、昆虫は嗅覚、味覚、視覚などの鋭敏な感覚器官を発達させた。嗅覚や味覚が多数の化学受容体（匂いや味などの物質を捉えるセンサータンパク質）を使って物質を見分けるのとは対照的に、視覚はわずかな数の光受容体（光子を捉えるセンサータンパク質、視物質）を使って光の色や強さを見分けることができる。昆虫の複眼は、個眼と呼ばれる単位の集合体であり、それら個眼からの情報を電気的な信号に

変えて視葉～脳の神経細胞（ニューロン）で情報処理することで外界を認知している¹⁾。得られた視覚情報を瞬時に処理して、複雑な軌跡で飛翔するなど、さまざまな反応を示す。昆虫はごく小さく、脳もごく小さいのに、感覚器官と神経回路を最大限に進化させてそれを可能にしているのだから、実に驚くべき生き物である。

昆虫の視覚

読者の皆様は、昆虫の視覚にはどんな特徴や長所があると思いますか？今回の各論で詳しく説明されている部分もあるが、ここで人間の視覚と比較しながら考えてみたい。

（1）解像度

テレビ画面は画素数で表されるが、人間の目には桿体細胞（明暗に敏感な細胞）が約1億個以上、さらに色を見るのに役立つ錐体細胞が約1千万個あり、精細なハイビジョン画面も細部まで見ることができる。一方で昆虫の複眼はせいぜい数百から数万の個眼で構成されており、個眼1つを1つの点として数えるなら数万画素の粗い（レンズのピント調節もできないので、まるでピンボケしたような）解像度しかもっていない。

（2）色覚

昆虫の多くは波長350nm付近にピークをもつ紫外光と波長550nm付近にピークをもつ緑色光の感受性が高いことが知られている（複眼分光感度、図1）^{1,2)}。人間は波長400nmより短い紫外線が見えないが、昆虫は紫外線に反応する視物質をもっており、紫外線を色として認識できる。

（3）視野

複眼は個眼が球面状に配置されており、視野が前後左右と非常に広い。人間のように頭を動かさなくても周囲を一度に見ることができる。

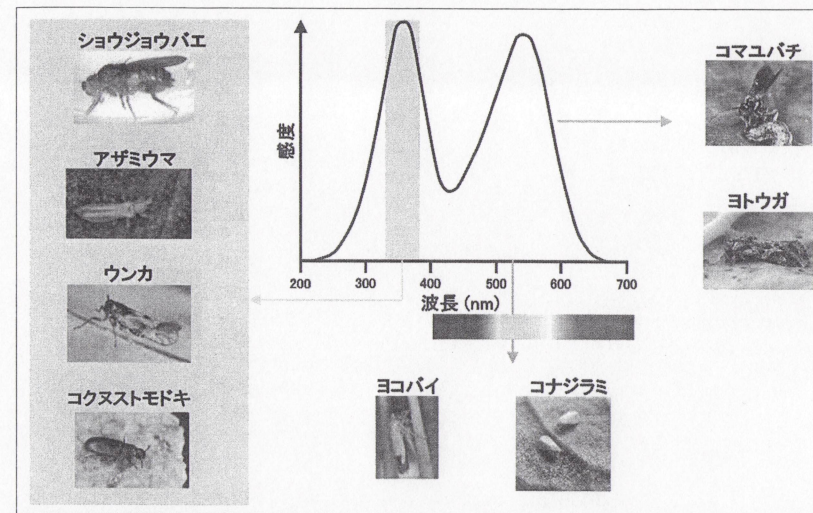


図1 複眼分光感度と最大誘引波長
中央の曲線は昆虫に典型的な二峰性の複眼分光感度を示した。波長350nmと波長550nm付近に感度ピークがある。多くの昆虫は、それぞれの感度ピーク付近の光に強く誘引される。文献²⁾を加筆改変。

（4）偏光視

光には振動方向が存在し、その偏りによって“偏光”が生じる。人間は偏光フィルターを使わないと識別できないが、昆虫の中には偏光を識別できる複眼を備えたものがある。各論「ハリガネムシ類に感染したカマキリはなぜ水に飛び込むのか？—偏光仮説の検証」で紹介したように水面の光反射による偏光を認識したり、同種の交尾相手を探す手がかりとして利用する。

（5）動体視

人間が認識できる光の点滅は1秒間に30回（30ヘルツ）程度が限界だが、ハエは100ヘルツ以上の高速点滅を識別できることがわかっている。この能力はトンボが虫を捉えたり、セミが枝に着地したりという物体の動きを捉える動体視力につながっていると考えられる。

以上、人間の視覚と比べて、昆虫の視覚は解像度では劣るものの、代わりに幾つもの長所を得ていることがわかる。昆虫が見ている世界は空間的にも時間的にも私たち人間とはだいぶかけ離れていることは想像に難くない。

視覚を介した反応

視覚で外界を認識した昆虫はさまざまな反応（行動）を示す。光や色に対する反応として私たちが一番身近に感じるのは“走光性”であろう（図2-A）。これは昆虫が光に誘引される性質のことで、夜間、街灯などの強い光に本能的に飛び込んでいく。強く誘引される波長は、その虫にとって明るく見える波長（分光感度のピーク付近）であることが多い³⁾。逆に明るく光を避けようとする忌避は、負の走光性ともよばれる（図2-B）。こ

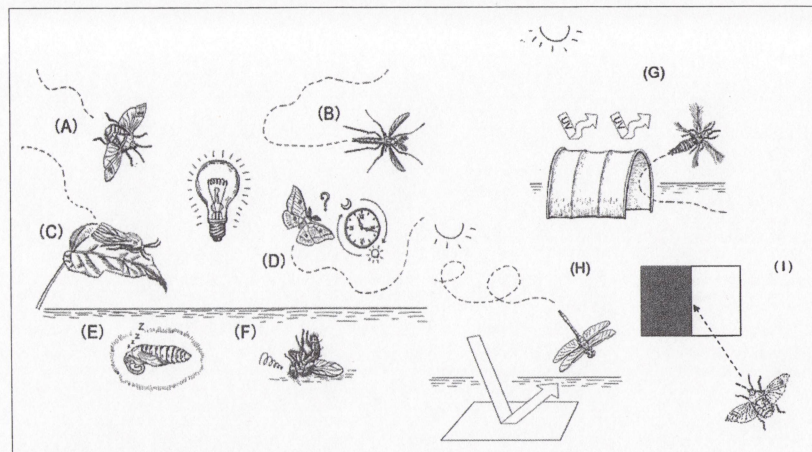


図2 光に対する昆虫の応答反応
(A) 誘引 (正の走光性); (B) 忌避 (負の走光性); (C) 明順応; (D) 体内時計 (概日リズム); (E) 光周性; (F) 致死;
(G) 視覚遮断 (カモフラージュ); (H) 背光反応; (I) エッジ反応。文献³⁾を加筆改変。

れまでに走光性以外の光応答反応も多数知られている³⁴⁾。ヤガなどの夜行性昆虫は、夜間、複眼が暗闇に順応して光に敏感な状態（暗順応）にある。この状態の複眼に強い光を照射すると、視細胞内の色素顆粒が移動して昼間の複眼の状態（明順応）になる。そうすると、その昆虫は飛翔や産卵などの活動を停止して一切の動きを止めてしまう（図2-C）。また、昆虫によって活動時刻は、昼行性・夜行性・薄明薄暮性などに分類されるが、飛翔、求愛、摂食など個々の行動は活動時刻が種によって異なる。昆虫にも人間同様に脳に体内時計が存在し、昼と夜の明暗サイクルに順応して生理状態や行動時刻が決められる（図2-D）。夜間に光を照射すると昆虫の体内時計はリセットされ、時刻（時計の針）が前進したり後退したりして活動時刻が攪乱される。また、昆虫は日長（1日の昼の時間）を測って季節を感じ取っており、1日20～30分の日長の違いも見分けることができる（光周

性、図2-E）。秋に日が徐々に短くなると休眠状態に入り、代謝を抑制して成長や活動を停止するだけでなく、体の耐寒性を高めて越冬する。

紫外線などの短波長の光は、タンパク質を変性したりDNAを損傷して突然変異を誘発するなど、昆虫の発育を阻害する作用がある（図2-F）。傷害性の高い紫外線であるが、多くの昆虫は紫外線を色として認識し、生活の中で利用している。モンシロチョウでは羽の紫外線反射の違いが性別の認識に重要であることが知られており、ミツバチなどの訪花昆虫では花の外縁部から花芯への紫外線反射率の違い（模様）がネクターガイドとして働くことが知られている。昆虫の可視光域が紫外線～緑であることから、この波長成分を変化させると物体の形状や色の判別を妨げる効果がある。例えば、近紫外線カットフィルムで覆った場所は昆虫には内部が暗く見えてその場所に入り込まなくなったり、植物の葉の色が認識できずカモフラージュされる（図2-G）。

昼行性であるトンボやアブラムシなどは、飛翔する際に空の明るさ（太陽光や大気の大気散乱光）を単眼で受容して水平姿勢を保つ。地面に光反射シートを敷いたり、LEDなどで下方から強い光を照射すると、これらの昆虫は正常な飛翔ができなくなる（背光反応、図2-H）。また、昆虫の走光性では、光源によって形成されるコントラストの重要性も指摘されている。LEDを使って面光源を提示する実験から、多くの昆虫が明るい面と暗い面の境界（エッジ）付近に向かって飛翔する行動が観察され、明暗の境界面に生じるコントラストを認識した応答反応であると考えられている（図2-I）。

ちょっと裏話

本稿では、昆虫の視覚と反応行動について解説した。私はこの10年余り、縁があって昆虫の視覚と応用技術の研究プロジェクトに携わる機会をいただいた。その中で観察や実験を重ねていく中で、まさか！？と言う現象の発見を目の当たりにしてきた。例えば各論「赤色光に対するミナミキイロアザミウマの反応と害虫防除」で紹介する赤色光の忌避効果は、発表当初、「そもそも昆虫が見えない赤色光を照射しても何も起こらないはずだ、実験の誤りではないか？」という意見が多かったと記憶している。つまり、「今までの知識（常識）で考えればあなたの研究は間違っています」ということである。赤色光の効果は、その後、数年かけて実験の再現性が確認され、生理学的な説明もなされるに至り³⁾、現象の正しさが証明された。同様のことは、青色光による殺虫作用⁴⁾、捕食性昆虫に特有の紫色光の誘引作用⁵⁾などでも発生し、発表当初は現象そのものが否定/疑われた。各論「昆虫の色覚」の蛭川謙太郎博士が学生時代に見つけたアゲハチョウ交尾器にある光受容系“お尻の眼”も常識に囚われない意外性のある発見であった⁶⁾。最近、「チ。地球の運動について」という漫画が流行ったが、天文学における天動説

の否定（コペルニクス）、生物学における自然発生説の否定（パスツール）や遺伝の法則（メンデル）など、これら的大発見は発表当初に全く注目されなかったり、否定されたものである。やや大袈裟かもしれないが、それまでの通説を否定したり、新しい現象を発見したりするのは昆虫学も同じであり、プロ/アマチュアを問わず、研究の醍醐味であろう。

おわりに

「光に操られる昆虫」というタイトルどおり、昆虫の光に対する行動は本能的であり、まさに光によって操られているが如く、明瞭な反応を示す。昆虫が外界を見て行動に至るまでのプロセスは、複眼による光受容（視覚）から始まり、複雑な神経回路を経て出力（行動）に至る。これはあらかじめプログラムされた行動であり、読者の皆様には各論それぞれのトピックスを読んでいただく中で、それらの行動がどう制御されているのか、なぜそういった行動が進化したのかなど、想像を膨らませつつ楽しんでいただければ、執筆者一同、この上ない幸せである。

文献

- 1) 寺北明久・蛭川謙太郎 2009. 見える光、見えない光：動物と光のかかわり。共立出版。
- 2) 徳嶋賀彰・上原拓也・山口照美ら 2016. 昆虫の光受容に基づく波長選好性のモデル化。JATAFF ジャーナル 4:11-15.
- 3) Shimoda, M., Honda, K. 2013. Insect reactions to light and its applications to pest management. Appl. Entomol. Zool. 48: 413-421.
- 4) 霜田政美 2018. 光防除技術開発の最近の進展。植物防疫 72:149-154.
- 5) Wakakuwa, M., Stewart, F., Matsumoto, Y. et al. 2014. Physiological basis of phototaxis to near-infrared light in *Nephotettix cincticeps*. J. Comp. Physiol. A 200: 527-536.
- 6) Hori, M., Shibuya, K., Sato, M. et al. 2014. Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. Sci. Rep. 4: 7383.
- 7) Ogino, T., Uehara, T., Muraji, M. et al. 2016. Violet LED light enhances the recruitment of a thrip predator in open fields. Sci. Rep. 6: 32302.
- 8) Arikawa, K., Eguchi, E., Yoshida, A. et al. 1980. Multiple extraocular photoreceptive areas on genitalia of butterfly *Papilio xuthus*. Nature 288: 700-702.