

昆虫の光に対する反応と害虫防除への利用

独立行政法人 農業生物資源研究所 **しも だ まさ み**
昆虫科学研究領域 昆虫相互作用研究ユニット

はじめに

施設園芸や露地栽培の光環境を人工的に操作して、害虫の進入・増殖を抑える防除法、すなわち「光防除」の研究開発が進んでいる。「光防除」は、総合的病害管理 (IPM) の中の物理的防除技術の一つであり、農薬の使用量を減らし、環境負荷を抑えた防除体系を確立するために貢献すると考えられる。「光防除」においては、一般の化学合成殺虫剤のように害虫をその場で殺すことを目的とする場合は少なく、他の防除手段と組合せて、被害が大きくなるように害虫の発生密度を下げるとともに殺虫剤抵抗性の発達を抑制するという性質が強い。本稿では、はじめに光防除の根本原理である「昆虫の光応答反応」について解説し、後半では実用化されている光防除技術と研究開発の現状について具体例をあげて紹介する。

I 昆虫の光受容と波長感受性

昆虫の光受容部位は、複眼と単眼のほか、脳による直接受容が知られている。視覚器官としては、ヒトの目に相当する複眼が重要な役割を担っており、色覚や物体の視認など光環境情報入力を中心である。複眼は、数百～数千個の六角形の個眼が整然と並んだ集合体である (図-1)。球面状に発達した複眼は、物体の形状や動きを認識し、頭を動かさずに一度に広い視野が得られる利点がある (LAND and NILSSON, 2002)。多くの昆虫は、受容する波長帯の異なる3種類の視細胞 (光受容細胞) をもち、それぞれ紫外線、青、緑に最大感度をもつ (図-2A, ミツバチの例)。それぞれの個眼は、数個の視細胞で構成されていて、広範囲にわたって色を見分けるための役割を担う。人間と昆虫の波長感受性には大きな違いがある。ヒトの可視光線はおおよそ 380 ~ 800 nm の範囲であるが、昆虫はおおよそ 250 ~ 650 nm の範囲であり、ヒトには見えない紫外線 (250 ~ 380 nm, 近紫外線と呼ばれる領域) を昆虫は感知している (蟻川ら, 2014)。昆虫のしている世界を説明するために、しばしば紫外線

透過フィルターを使って撮影した花の白黒写真を示すことがあるが、虫は周囲の世界を白黒で見ているわけではなく、実際には紫外線領域も「色」として識別していると考えられる。これまで昆虫の色覚の研究に、色彩板や光学フィルター等が使用されていたが、発光ダイオード (LED) の性能が向上し、より狭く多様な波長帯 (ピーク波長 ± 20 nm 程度) の光を使った研究が可能になった (図-2B)。現在、LED が出せる波長域は紫外線～赤外線まで広がり、発光強度も向上していることから、昆虫の視覚の研究には有効な手段になっている。

II 光防除の原理：昆虫の光応答反応

夏の夜、ヤガ類などが街灯の光に群がる光景を目にするが、このように光に集まる性質を走光性と呼ぶ。「光防除」では、走光性などの「光に対する応答反応」を利用して、昆虫の行動や成長を制御する。これまでの研究から、昆虫の示す様々な光応答反応が報告されている (図-3) (SHIMODA and HONDA, 2013)。以下に昆虫の光応答反応を分類して解説する。

1) 誘引：光源に近づいていく性質で「正の走光性」ともいわれる (図-3 (A))。昆虫種によって、好む光の波長や強度が異なる。利用技術としては、ライトトラップなどの捕獲装置である。

2) 忌避：光源から遠ざかったり、明るい光を避ける性質で「負の走光性」とも呼ばれる (図-3 (B))。例えば、ゴキブリは明るい場所に置くと物陰 (暗い場所) に隠れる行動をとる。忌避も昆虫種によって効果的な波長や強度が異なると考えられる。害虫が嫌いな光を照射することで、栽培施設内への侵入阻止が期待できる。

3) 明順応：夜行性の蛾類は、夜間、暗闇に順応 (暗順応) しており、複眼に光を当てると猫の目のように光が反射して見える。暗順応している複眼に光を照射すると、数分間のうちに昼間の眼の状態に変化する。これを明順応と呼ぶ。明・暗順応は視細胞内の色素顆粒の移動により起こる現象で、光照射により明順応の状態になった個体は飛翔や産卵等の行動を停止する (図-3 (C))。

4) 日周リズム：脳・中枢神経系にある生物時計 (概日時計) は、昼と夜の明暗サイクルに順応して働いており、それによって昆虫の生理状態や行動の時刻が決定さ

Insect Reactions to Light and its Applications to Pest Control.
By Masami SHIMODA

(キーワード：光応答, 光防除, 物理的防除, 走光性, 行動制御)

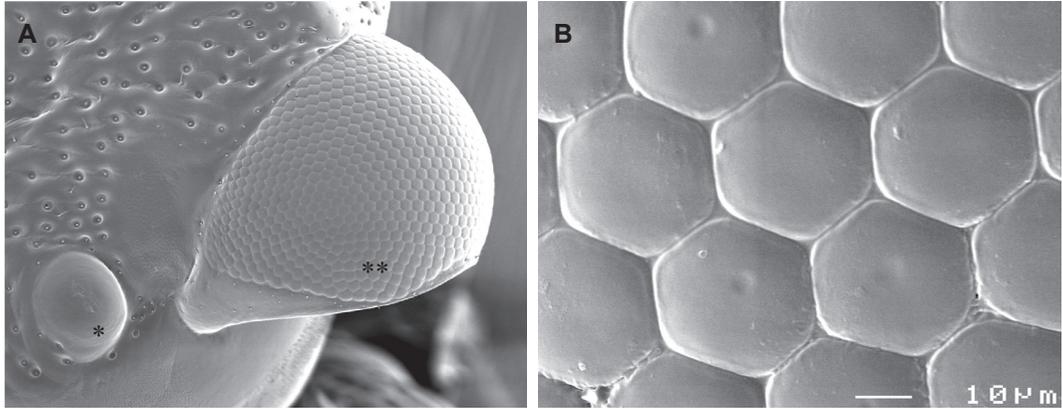


図-1 チャバネアオカメムシ (*Plantia stali*) の複眼の表面構造
 A 個眼が球形に並んで広い視野角を確保している.
 B 個眼の表面は正六角形で密に並んでいる.
 *単眼, **複眼.

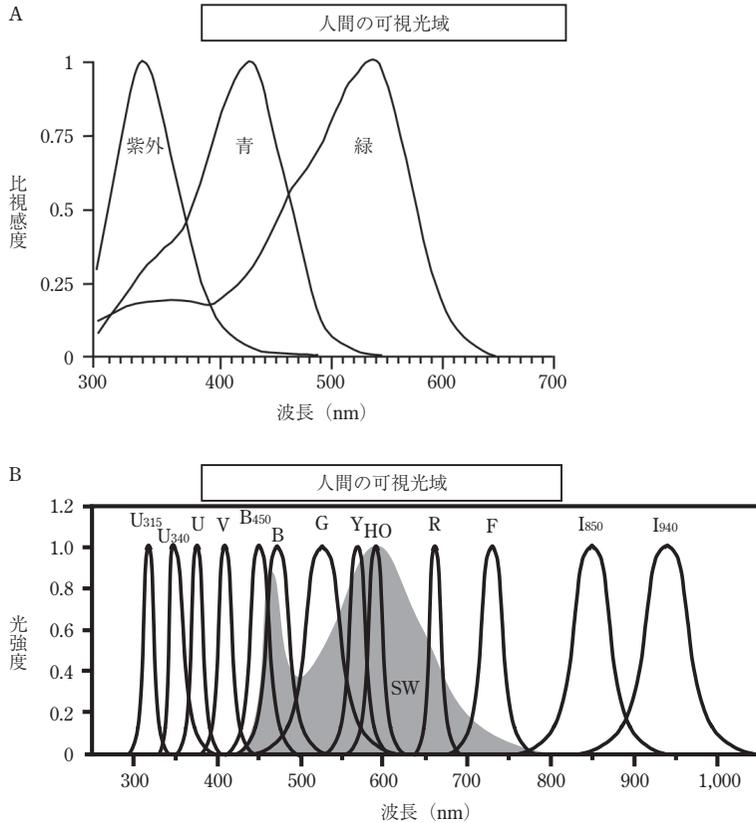


図-2 ミツバチ (*Apis mellifera*) 視細胞の分光感度と LED 発光特性
 A 3種類の視細胞の分光感度, Pertsch et al. (1992) を改変 (各視細胞の最大値を 1 とした).
 B 研究用に開発された LED の発光特性; CCS 社平板型 LED (LDF26 × 26) の実測値 (各 LED のピーク値を 1.0 とした. グレー域は白色 LED (SW) の発光特性).

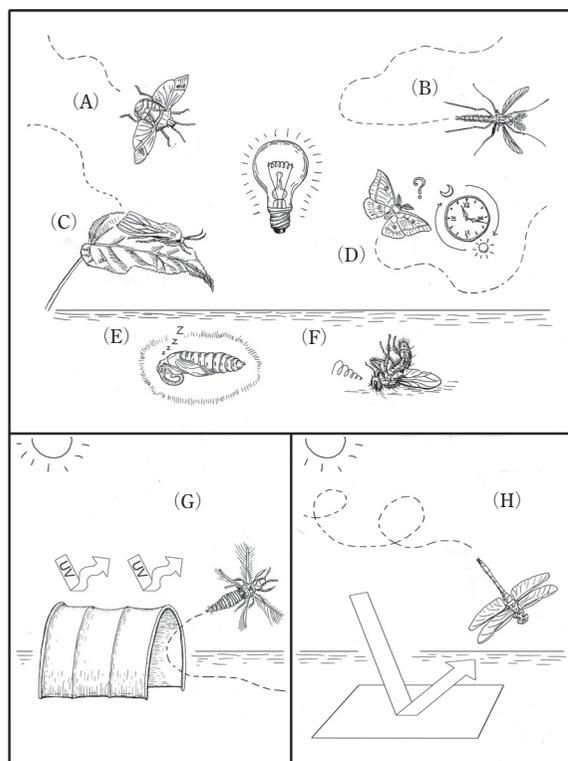


図-3 光に対する昆虫の応答反応

(A) 誘引；(B) 忌避；(C) 明順応；(D) 日周リズム；(E) 光周性；(F) 傷害；(G) 視覚遮断；(H) 光背反応，SHIMODA and HONDA (2013) より転載。ただし，光応答反応のメカニズムは完全には解明されておらず，将来，その概念が変わる可能性もある。

れている。夜間に光照射すると概日時計がリセットされ，概日時計は前進，または後退する（図-3 (D)）。これを位相シフトと呼ぶが，その結果，飛翔や求愛等の活動のタイミングが乱される。

5) 光周性：昆虫の季節性は日長や温度に依存するかたちで制御されている（図-3 (E)）。例えば，秋に長日から短日に移行すると，越冬するための準備として休眠が誘導される。夜間の光照射を数日間連続して行くと，休眠誘導が妨げられて越冬できない。

6) 傷害：近紫外線は強い細胞傷害作用を持つことが知られており，タンパク質を変性させるだけでなく，二本鎖DNAを損傷させて突然変異を誘発する。昆虫種によっては，光による細胞傷害を受けやすく，その影響が毒性として現れる（図-3 (F)）。光照射によって正常な発育が阻害されたり，脱皮できずに死に至る。

7) 視覚遮断：昆虫の可視光成分を減少させると，物体の形状や色彩が正しく識別できない状態になると考え

られる。例えば，近紫外線カットフィルムで栽培施設を覆うと，施設内の作物がカムフラージュされて見えにくくなり，結果として，害虫の侵入が妨げられる（図-3 (G)）。

8) 光背反応：トンボなどは，飛翔する際に空からの光（太陽の直接光と大気の散乱光）を背中に受けて，体の上下の姿勢を保つと考えられている。高い光反射率をもつシートを地面に敷くこと（マルチング）で，下方から光が照射され，正常な姿勢での飛翔が妨げられる（図-3 (H)）。

以上述べたように，昆虫の光応答反応は多岐に渡っている。これらの反応は，光の波長や強度だけでなく，様々な波長の組合せ（混色），光の照射方向，背景の明るさや色のコントラスト等の影響を大きく受ける。さらに，光の受け手である昆虫種に備わった習性や昆虫の生理状態（日齢，餓餓・満腹，生物時計による日周リズム）も重要な要因である。昆虫の活動リズムは，昼行性・夜行性・薄明薄暮性に大別されるが，脱皮，飛翔，求愛，摂食等の活動時刻は昆虫種によって実に様々である。

したがって，効果的な光防除を行うためには，電球やLED等の光源や反射板等，どのような材料や形状，装置を用いるかを検討するだけでなく，対象となる害虫の発育や行動についてその特性を解明し，ライトトラップなどの防除装置の設置場所，光源の照射時刻などについても十分に検討する必要がある。

III 光防除の実用技術

昆虫の光応答反応を利用した防除技術について，代表的なものを整理した（図-4）。(A)「誘引」の適用例には，ブラックライトを用いた電撃殺虫器がある。ブラックライトは，多くの害虫に誘引効果を示す近紫外線を含み，農業害虫だけでなく，食品製造業や飲食店において衛生害虫の駆除にも使われている。LED光源を用いた研究によって様々な昆虫種の誘引波長が明らかにされた。広食性で水稻ならびに野菜類を加害するミナミアオカメムシ，イネウイルスを媒介するトビイロウンカ，アルボウイルスを媒介して畜産業に大きな被害をもたらしているヌカカ類，穀類や茶葉等の貯蔵乾燥食品を加害するタバコシバンムシはすべて近紫外線（365～385 nm付近）に強く誘引される（遠藤ら，2014；松本ら，2014；梁瀬ら，2014）。キノコ栽培施設での被害が問題になっているキノコバエ類も同様に紫外線（365 nm）を照射した水盤トラップに誘殺される（園田ら，2014）。一方，チャヤカンキツ類の重要害虫であるチャノキイロアザミウマは紫外線（360 nm）よりも緑（520 nm）の誘引性が

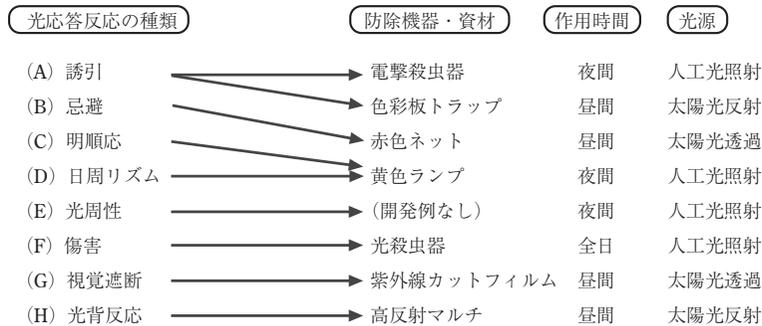


図-4 光応答反応を利用した防除技術の適用例

代表的な防除技術について、その防除原理との相関関係を示した。作用時間は、防除効果を発揮する時間帯を示し、光源はその種類によって分類した。ただし、赤色ネットは行動学的メカニズムが確定されていない面がある。

高い(貴志ら, 2014)。また、昼行性害虫の場合には、夜間の光照射よりも、活動する昼間に色彩板トラップを使った駆除が有効である。色彩板は、電気ではなく太陽光の反射を利用する方法で、害虫種に合わせて様々な反射特性の材料が開発されている。メロンやピーマン等の果菜類の重要害虫であるミナミキイロアザミウマは、青色粘着板(柴尾・田中, 2014)やコバルトグリーン(分光反射率のピーク波長 503 nm)の色彩板に最も強く誘引される(芳賀ら, 2014)。

(B)「忌避」については、行動学的な作用原理がよくわかっていない。単一波長による解析が十分ではなく、誘引波長との混色で忌避効果が確認されている。例えば、世界的に感染拡大しているカンキツグリーニング病を媒介するミカンキジラミは、青色よりも黄色粘着トラップに捕獲される個体が多かった(上地ら, 2014)。これは 450 nm 前後の青色波長が含まれると誘引が抑制されると考えられる。また、多くの昆虫では波長 600 ~ 700 nm の光に対する感受性が低いため、これまで全く見過ごされていたが、ツマグロヨコバイは赤色(650 ~ 750 nm)感受性を持つことが確かめられた(WAKAKUWA et al, 2014)。野菜の生産現場では赤色ネットにアザミウマ類に対する防除効果のあることが経験的に知られている。露地の葉ネギ栽培において、赤色ネット被覆によってネギアザミウマの寄生率が減少し、その防除効果が確認された(上山ら, 2013)。しかしながらそのメカニズムはまだ不明である。

(C)「明順応」の適用例としては、ナシやモモ等果実の吸汁性ヤガ類で黄色蛍光灯が実用化されたのを契機に、現在では夜行性蛾類の光防除が広く普及している(八瀬, 2004)。花き栽培では、ヤガの幼虫が葉や蕾を食害して被害が広がるが、黄色蛍光灯は成虫の飛来と産卵

行動を抑制し、バラ栽培におけるハスモンヨトウやカーネーション栽培におけるオオタバコガなどの防除に効果を発揮している。また、レタスなどの野菜の露地栽培では、より広い面積を少ない光源でカバーする必要があることから、光の到達距離の長い高圧ナトリウムランプが普及している。最近では、よりエネルギー効率が高く、波長特性に優れた光源として高輝度 LED が注目されている。

(D)「日周リズム」は、特定の時間帯の行動が抑制されるという点で、明順応と似た現象に見えるが、明順応では短時間(数分~30分程度)の光照射で「即効的に」すべての活動が抑制されるのに対し、日周リズムでは、例えば夕方方の光照射でヤガの求愛時刻が夜半にずれ込むなど、「遅効的に」交尾活動がかく乱される、という違いがある。概日時計のリセットには青色光が効果的であり、現在、チャの重要害虫であるチャノコカクモンハマキの日周リズムをかく乱し、交尾抑制するための照明装置の開発が進められている(佐藤ら, 未発表)。

(E)「光周性」は、昆虫の成長過程における日長反応で、光照射によって卵巣などの生殖器官の発達や休眠誘導を阻害する。しかし、効果を得るためには、数日~数週間の連続した光照射が必要で、非常に「遅効的」な作用ともいえる。光周性を阻害する反応を利用した実用技術はまだ開発例がない。

(F)「傷害」を引き起こす光波長としては、近紫外線が強い細胞傷害作用をもつことが知られているが、最近の研究から、一部の昆虫種は光感受性が高く、近紫外線以外の光でも発育や脱皮が阻害される現象が見いだされた(堀ら, 未発表)。このことは、近紫外線よりもエネルギー値の低い長波長側の光を使って、発育抑制や殺虫ができる可能性を示すもので、現在、光照射装置の開発

が進められている。

(G)「視覚遮断」の適用例としては、近紫外線除去フィルムがある。近紫外線除去フィルムはビニールハウスの被覆材料で、一般的なビニールハウス用フィルムと異なり、380 nm以下の近紫外線を透過しない。オンシツコナジラミを用いた詳細な解析から、近紫外線の視覚遮断による防除原理が明らかにされた(太田・武田, 2014)。近紫外線除去フィルムを被覆したビニールハウスでは、一般的なビニールハウスと比較して、ハウス内部での害虫の移動分散速度には違いがないが、野外からハウス内への侵入が抑制され、逆に内部から野外への移動が促進されることが判明した。近紫外線除去フィルムはヤガなどの夜行性の害虫には効果が期待できないが、昼行性の害虫には非常に有効な防除資材である。また、白色炭酸カルシウム剤をカンキツ類の葉に散布して植物体の色を隠す方法も、害虫の色覚をかく乱させる効果によるもので視覚遮断の一手段と考えられる(金子, 2012)。

(H)「光背反応」の適用例としては、高い光反射率のマルチシートがある。キュウリやダイコンの有翅アブラムシの飛来防止策として銀白色ポリフィルムが導入されたのを皮切りに、トマトなど他の野菜のアザミウマ類やコナジラミ類の防除にも用途が拡大した。その後、より高い光反射率を持ち、蒸気透過性、耐久性等を向上させた高機能なポリエチレン不織布などが開発され、用途に合わせた多数のマルチ製品が市販されている(長塚, 2000)。光反射シートによる行動攪乱は、微小害虫の栽培施設内への侵入抑制だけでなく、密度抑制効果もあることが確認されている。

おわりに

本稿では、光防除の根本原理である「昆虫の光応答反応」を分類し、その実用技術について解説した。今回、

紹介できなかったが、色覚や光強度だけでなく、偏光などの視覚属性も昆虫の行動に影響を及ぼすことが知られている(弘中・針山, 2014)。昆虫の光応答反応は、同一波長でも昆虫種によって全く異なる反応性が見いだされており、光防除法は害虫種ごとに検討する必要がある。また、未だに行動学的メカニズムがはっきりしないものの、赤色光に対する忌避反応は、今後アザミウマなど微小害虫の防除技術として応用が期待される。

以上、昆虫の光応答反応は、他の防除手段とともに様々な利用形態が考えられ(JOHANSEN et al, 2011; SHIMODA and HONDA, 2013)、その研究により減農薬・低環境負荷の病害虫防除体系を確立するための“新たな技術シーズ”を提供できるものと考えている。

謝辞 本稿は、農研機構 中央農業総合研究センター病害虫研究領域長の本多健一郎氏のご指導とご支援の賜であり、ここに心から感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 蟻川謙太郎ら(2014): 応動昆 58: 5 ~ 11.
- 2) 遠藤信幸ら(2014): 同上 58: 23 ~ 28.
- 3) 芳賀 一ら(2014): 同上 58: 17 ~ 22.
- 4) 弘中満太郎・針山孝彦(2014): 同上 58: 93 ~ 109.
- 5) JOHANSEN, N. S. et al. (2011): Ann. Appl. Biol. 159: 1 ~ 27.
- 6) 金子修治(2012): 植物防疫 66: 45 ~ 49.
- 7) 貴志 学ら(2014): 応動昆 58: 13 ~ 16.
- 8) LAND, M. F. and D.-E. Nilsson (2002): Animal Eyes. Oxford University Press, Oxford, 271 pp.
- 9) 松本由起子ら(2014): 応動昆 58: 111 ~ 118.
- 10) 長塚 久(2000): 植物防疫 54: 359 ~ 362.
- 11) 太田 泉・武田光能(2014): 応動昆 58 (印刷中).
- 12) PEITSCH, D. et al. (1992): J. Comp. Physiol. A 170: 23 ~ 40.
- 13) 柴尾 学・田中 寛(2014): 応動昆 58: 29 ~ 32.
- 14) SHIMODA, M. and K. HONDA (2013): Appl. Entomol. Zool. 48: 413 ~ 421.
- 15) 園田昌司ら(2014): 応動昆 58: 32 ~ 35.
- 16) 上地奈美ら(2014): 同上 58: 119 ~ 125.
- 17) 上山 博ら(2013): 関西病虫研報 55: 123 ~ 124.
- 18) WAKAKUWA, M. et al (2014): J. Comp. Physiol. A 200: 527 ~ 536.
- 19) 梁瀬 徹ら(2014): 応動昆 58: 127 ~ 132.
- 20) 八瀬順也(2004): 話題の新技術 黄色灯による農業害虫防除, 江村 薫・田澤信二(編), 農業電化協会, 東京, p. 33 ~ 45.