

# 青色光の殺虫効果による害虫防除

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	堀,雅敏
発行元	養賢堂
巻/号	94巻7号
掲載ページ	p. 607-616
発行年月	2019年7月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 青色光の殺虫効果による害虫防除

堀 雅敏\*

〔キーワード〕：青色光，殺虫，害虫防除，LED，照射

### はじめに

昆虫を含む多くの動物にとって光は、種々の生理や行動を制御する情報・刺激としての役割を担っている。ほとんどの人が、夜、街灯の周りに多数の虫が群がっている様子を見たことがあると思う。これは昆虫が光源に対して近づいていく行動で、正の走光性によるものである。逆に、負の走光性の場合、光源から遠ざかる行動を示す。正の走光性の場合には誘引効果、負の走光性の場合には忌避効果となる。走光性の他にも、休眠や変態、繁殖などに関わる様々な生理状態の変化も通常、光によって制御されている。このように、光は昆虫に対して様々な作用を持つことから、害虫防除にも昔からよく利用されてきた。特に、誘引効果は最も広く、また、最も古くから利用されてきた光の昆虫に対する作用である。農業現場だけでなく、飲食店や食品工場、公共施設など様々な場面で、害虫捕獲用のトラップの誘引源として利用されている。農業害虫の防除では、夜行性蛾類の行動抑制にも光は利用されている。夜行性昆虫は暗所では複眼がこれに順応し（暗順応）、活動が活発になる。逆に明所では複眼が明順応し、活動が抑制される。したがって、夜間、照明を点けることにより、夜行性蛾類の複眼を明順応させ、飛翔や交尾、産卵などを抑制することで、成虫による果実の吸汁加害や繁殖を抑えることができる。これは、黄色灯の夜間点灯によるヤガ類の吸汁・繁殖行動抑制技術として利用されている。

環境への配慮や食の安心・安全に対するニーズの高まりから、殺虫剤使用量の低減につながる害虫防除技術の開発・普及が求められている。物理的防除はノンケミカルな害虫防除であるため、農業低減のための技術として期待されているが、中でも光による防除は先に述べたように、昔から利用されて実際の防除で効果を発揮してきたことから、また、比較的労力もかからないことから、さらなる利用の拡大

が期待されている。近年では、発光ダイオード（LED）の目覚ましい発展と普及により、様々な分野で LED 光源を用いた光利用に関する研究・開発が行われているが、害虫防除においても光による防除の光源として LED を利用する動きが進んでいる。LED を利用すれば、光の波長や強度を比較的簡単に制御できるので、昆虫に対する光の作用の詳細な解析も従来に比べて容易にできるようになってきた。そのため、最近では、波長ごとに昆虫に与える影響が詳細に明らかにされるとともに、これまで知られていなかった昆虫に対する新たな光の作用も見出されている。

青色光（波長：400～500 nm）の殺虫効果は筆者らの研究グループが新たに発見した昆虫に対する光の作用で、2013 年に「害虫の防除方法及び防除装置」として特許出願し（2017 年に登録：特許第 6118239 号）、2014 年に論文発表している（Hori ら 2014）。光の生物に対する傷害作用としては、短波長の紫外線である UVC（100～280 nm）や UVB（280～315 nm）が強い毒性をもつことがよく知られている。DNA の最大吸収波長は 260～265 nm であるため、UVC や UVB は DNA に吸収されやすく（Beggs 2002）、DNA を直接傷つけるため、強い毒性を発揮する（Pfeifer 1997）。UVC の殺虫効果は比較的古くから知られており、中島・吉田（1971）はカイコに対して、Wharton（1971）はゴキブリに対して、Beard（1972）はハエやカメムシ、シロアリに対して、殺虫効果を報告している。また、UVB 照射はハダニを対象とした殺ダニを目的に、実証試験や一部導入が行われている（田中ら 2017）。一方、UVB よりも波長の長い光である UVA（315～400 nm）や可視光（400～780 nm）は DNA に吸収されないため、DNA に直接的な傷害を与えることはない。このため、生物に対する毒性は UVC や UVB に比べるとはるかに低い。UVA に関しては、オオタバコガの成虫に照射すると、酸化ストレスが増加し（Meng ら 2009）、成虫寿命がわずかに短くなる（Zhang ら 2011）ことが報告されていたが、強い

\*東北大学大学院農学研究科（Masatoshi Hori）

殺虫効果を示す報告はこれまでになかった。光の生体に対する毒性は、波長が短いほど大きいことが知られている。したがって、筆者らが青色光の殺虫効果を発見するまで、UVA よりもさらに波長が長い可視光に、昆虫を含む複雑な動物に対する致死効果があるとはまったく考えられてこなかった。本稿では、青色光の殺虫効果と防除への利用に関して解説する。

なお、この研究の一部は、農林水産省委託プロジェクト「生物の光応答メカニズムの解明と高度利用技術の開発 (INSECT-3108)」, 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代農林水産業創造技術」における「持続可能な農業生産のための新たな総合的植物保護技術の開発」(管理法人: 農研機構生物系特定産業技術研究支援センター), JSPS 科研費 2566026, 同 17K19254, 同 18H03946 により実施した。

### 1. 青色光の殺虫効果

青色光の殺虫効果は、アシグロハモグリバエの羽化リズムを調査する中で、偶然、その可能性が見出された。その後、キイロショウジョウバエ (以下、ショウジョウバエ) を用いた実験により、殺虫効果

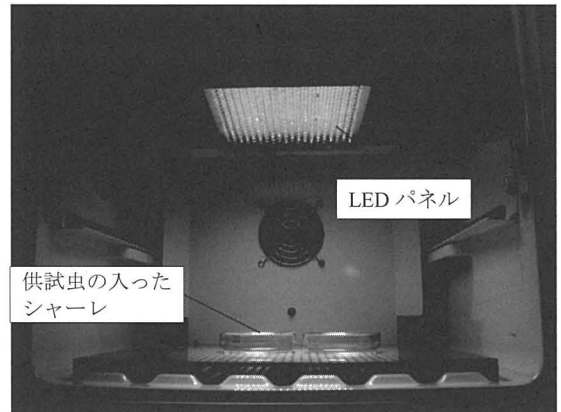


図1 LEDを用いた青色光の昆虫への照射実験の様子

の詳細が明らかになってきた (Hori ら 2014)。ショウジョウバエの蛹に 375~735 nm の異なる波長の LED 光を、蛹期間中、照射し続けたところ (図 1), 470 nm, 次いで 435 nm の青色光に強い殺虫効果が認められた (図 2 (A))。照射した光の強さは、直射日光に含まれる青色光の 12%程度であったが、470 nm 光の照射では 95%の蛹が死亡した。興味深いことに、435 nm と 470 nm の間の波長である 450 nm の青色光は、殺虫効果が両波長に比べて顕著に

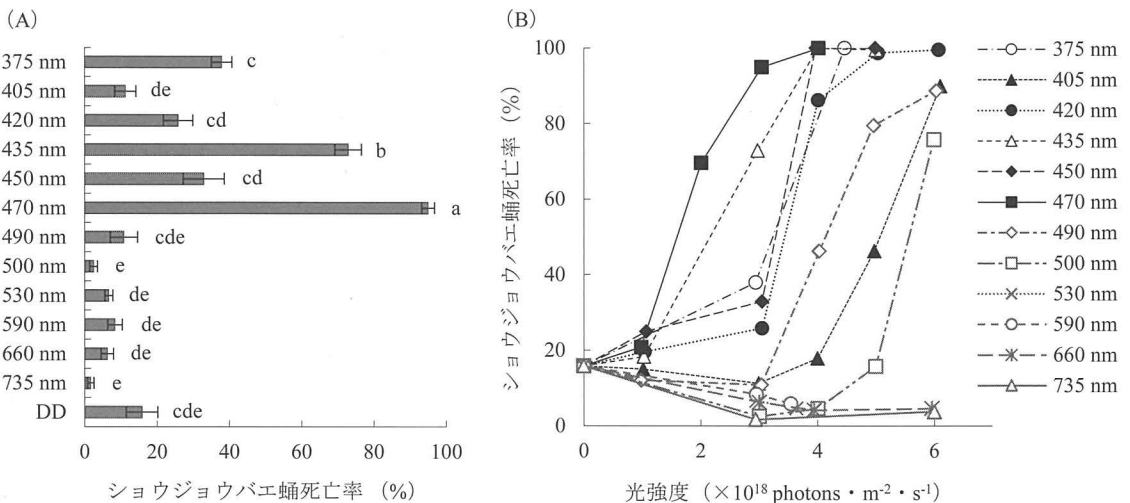


図2 ショウジョウバエの蛹に対する各種波長光の殺虫効果 (Hori ら (2014) を加工)

光強度の単位「 $\text{photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 」は1秒間に  $1 \text{ m}^2$  当たり照射される光子数を示す。直射日光中の青色光強度は約  $25 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (仙台で9月下旬の午前11:30の快晴時に、LEDの光強度と同じ測定器で400~500 nmの光強度を測定)。 (A) 光強度  $3 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  で照射したときの殺虫効果の波長間比較。数値は平均値±標準誤差。DDは全暗区を示す。蛹化後24時間以内の蛹に蛹期間中、各波長のLED光を連続照射し、羽化せず死亡した個体の割合を調査。同一英小文字を付した死亡率間には有意差なし ( $P > 0.05$ , Steel-Dwass test, 30頭×8反復)。 (B) 各波長における光強度と殺虫効果の関係。

劣っており、青色波長域のわずか 100 nm の中に効果の高い二峰性のピーク波長が見られた。また、UVA である 375 nm の殺虫効果も 435 nm と 470 nm に比べて明らかに低く、光の殺虫効果は必ずしも波長が短いほど高いのではないことが明らかになった。375~500 nm の UVA および青色光では、光強度の上昇にともない殺虫効果も上昇した (図 2 (B))。蛹に対して最も高い殺虫効果を示した 470 nm 光は、卵や幼虫にも殺虫効果を示し、また、成虫に照射した場合は、寿命が短くなることがわかった。このことから、青色光はすべての発育ステージのショウジョウバエに効果があることが示された。さらに、ショウジョウバエだけでなく、同じハエ目のチカイエカの蛹や卵でも青色光の殺虫効果は確認され (図 3)、青色光はショウジョウバエ以外の昆虫にも殺虫効果を示すことが明らかになった。しかし、効果的な波長は兩種で異なり、チカイエカの蛹では 420 nm 近辺の波長が最も高い効果を示すことがわかった (図 3 (A))。また、有効光強度も兩種で大きく異なることもわかった。チカイエカの蛹では、最も効果の高い 420 nm の青色光を、直射日光に含まれる青色光の 40% 程度の光強度で照射しても、致死率は約 60% に止まり、直射日光の 12% 程度の青色光でほぼ全ての蛹が致死したショウジョウバエと比較すると、有効光強度は顕著に高かった。また、420 nm 光はチカイエカの卵に対しても殺虫効果を示した

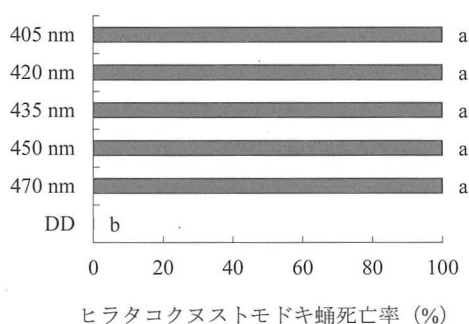


図 4 ヒラタコクスストモドキの蛹に対する各種青色波長光の殺虫効果 (Hori ら (2014) を加工) 光強度  $2 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$  で蛹に照射したときの殺虫効果の波長間比較. 数値は平均値  $\pm$  標準誤差. DD は全暗区を示す. 蛹化後 24 時間以内の蛹に蛹期間中、各波長の LED 光を連続照射し、羽化せずに死亡した個体の割合を調査. 同一英小文字を付した死亡率間には有意差なし ( $P > 0.05$ , Steel-Dwass test, 10 頭  $\times$  10 反復).

が、光を照射した卵の約 65% からは幼虫が孵化した (図 3 (B)). しかし、孵化幼虫を全暗条件下で 72 時間飼育したところ、約 90% の個体が死亡した。すなわち、卵期間中に青色光照射により受けた傷害が孵化後に持ち越されて、致死したと考えられる。さらに、青色光の殺虫効果はハエ目昆虫だけでなく、コウチュウ目のヒラタコクスストモドキの蛹でも確認された (図 4)。ヒラタコクスストモドキの蛹に対する有効光強度は、ショウジョウバエと比べても

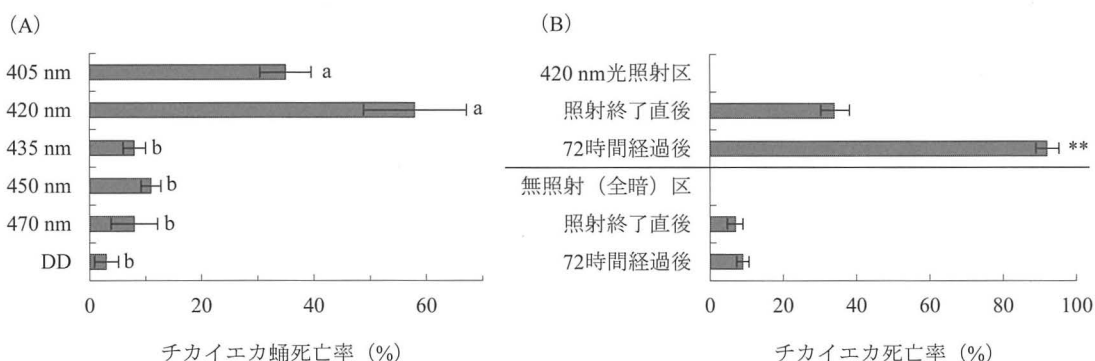


図 3 チカイエカに対する青色光の殺虫効果 (Hori ら (2014) を加工)

(A) 光強度  $10 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$  で蛹に照射したときの殺虫効果の波長間比較. 数値は平均値  $\pm$  標準誤差. DD は全暗区を示す. 蛹化後 1 時間以内の蛹に蛹期間中、各波長の LED 光を連続照射し、羽化せずに死亡した個体の割合を調査. 同一英小文字を付した死亡率間には有意差なし ( $P > 0.05$ , Steel-Dwass test, 10 頭  $\times$  10 反復).

(B) 420 nm 光を光強度  $10 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m $^{-2}$   $\cdot$  s $^{-1}$  で卵に照射したときの殺虫効果. 数値は平均値  $\pm$  標準誤差. 産下後 1 時間以内の卵に 420 nm 光を 48 時間連続照射し、孵化せずに死亡した卵の割合を調査 (照射終了直後死亡率). 照射終了後 72 時間暗条件下に置き、孵化幼虫の死亡率を調査 (72 時間経過後死亡率). \*\*:  $P < 0.01$  で照射直後と 72 時間経過後死亡率との間に有意差あり (Wilcoxon signed-rank test, 30 卵  $\times$  10 反復).

かなり低く、直射日光の8%程度の光強度の照射でも、全ての青色光波長で100%の致死率が得られた。以上のことから、効果的な波長や有効な光強度は昆虫種により異なるものの、青色光は幅広い分類群の昆虫に殺虫効果を示すことが明らかになった。

上述したように、殺虫に効果的な青色光の波長や有効な光強度は昆虫種によって異なるが、これらは同じ昆虫種でも、発育ステージによって変化することも明らかになっている。ショウジョウバエの蛹では、435 nm と 470 nm に効果の高い二峰性のピークがみられると述べたが、卵や幼虫では効果の高いピーク波長はみられず、成虫は蛹と同じく、470 nm 付近に効果の高いピーク波長が存在する (Shibuya ら 2018) (図 5)。イチゴハムシでも卵と蛹で効果的な波長が異なることが明らかになっており、卵に対

しては 435 nm 付近の青色光の効果が高いが、蛹に対しては 435 nm 付近の青色光は、逆に、前後の波長に比べて明らかに効果が劣ることがわかっている (Hori and Suzuki 2017) (図 6)。

青色光の殺虫効果はこれまでに、4 目 10 種の昆虫で明らかになっている (堀 2018a) (図 7)。種や発育ステージにより、効果的な波長や有効光強度の違いはあるが、これまでに調査した種に関しては、完全、不完全変態の変態様式にかかわらず、いずれも、卵～成虫の少なくとも1つ以上の発育ステージで殺虫効果が確認されている。また、殺虫効果は屋内害虫だけでなく、野外に生息する害虫でも認められている。このことから、青色光は広く様々な昆虫種に対して殺虫効果があると推測される。殺虫効果が確認されている害虫種の中で、高い青色光耐性を示し

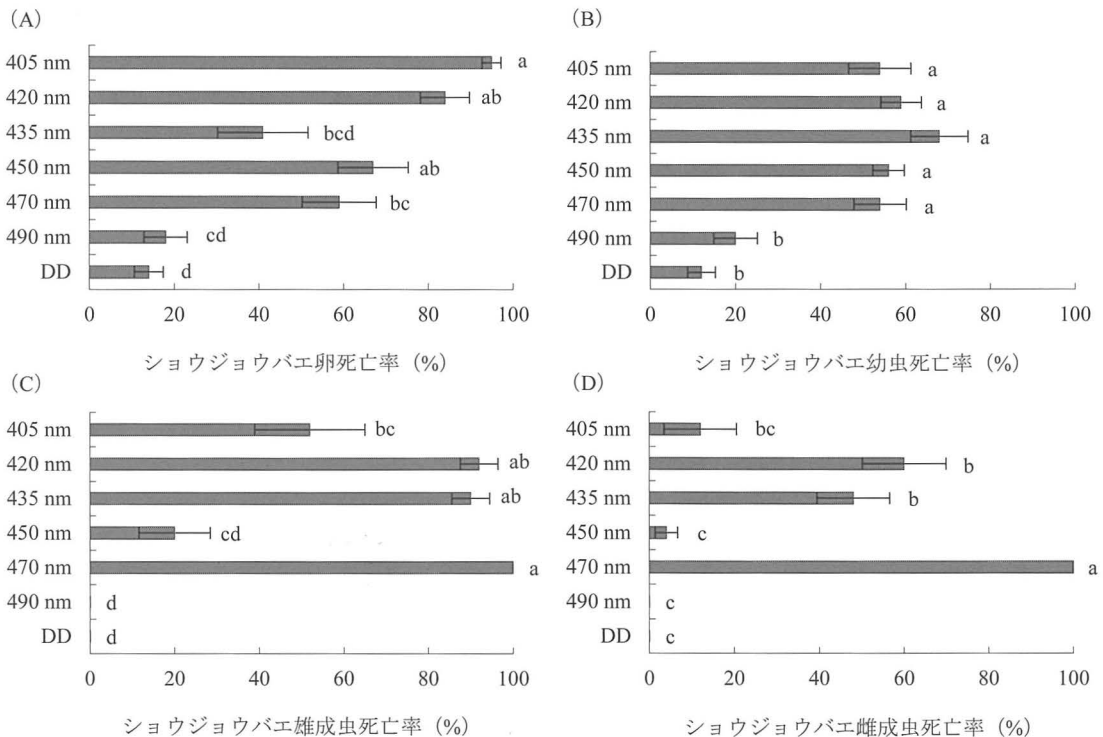


図 5 ショウジョウバエの発育にともなう青色光の殺虫効果の変化 (Shibuya ら (2018) を加工) いずれのグラフも数値は平均値±標準誤差。DDは全暗区を示す。同一英小文字を付した死亡率間には有意差なし ( $P > 0.05$ , Steel-Dwass test, 10 頭 (成虫は雌雄各 5 頭)  $\times 10$  反復)。

(A) 光強度  $4 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m<sup>2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup> で卵に照射したときの殺虫効果の波長間比較。産下後 6 時間以内の卵に 48 時間、各波長の LED 光を連続照射し、孵化せずに死亡した個体の割合を調査。(B) 光強度  $5 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m<sup>2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup> で幼虫に照射したときの殺虫効果の波長間比較。徘徊後 24 時間以内の終齢幼虫に 24 時間、各波長の LED 光を連続照射し、その後、羽化せずに死亡した個体の割合を調査。(C), (D) 光強度  $10 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m<sup>2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup> で成虫に照射したときの殺虫効果の波長間比較。羽化後 12 時間以内の成虫に各波長の LED 光を連続照射し、照射 3 日後に死亡した個体の割合を調査。(C) 雄成虫。(D) 雌成虫。

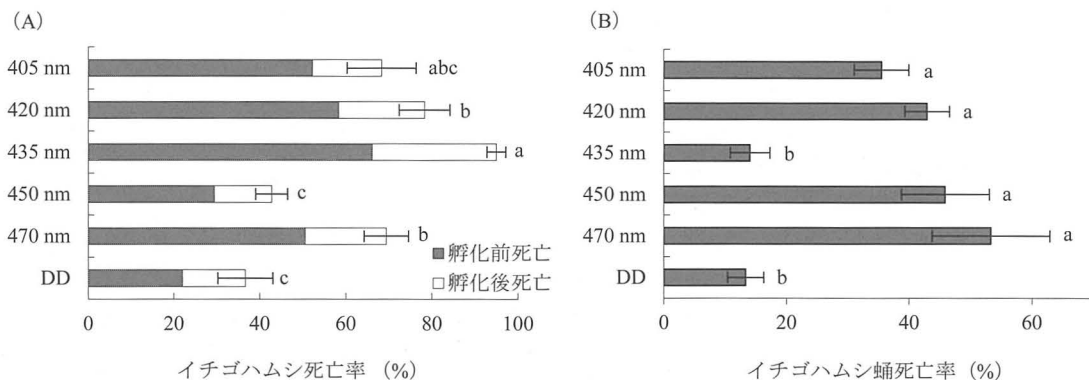


図6 イチゴハムシに対する各種青色波長光の殺虫効果 (Hori and Suzuki (2017) を加工)  
 $15 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m<sup>2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup>の光強度での照射による殺虫効果の波長間比較. いずれのグラフも数値は平均値±標準誤差. DDは全暗区を示す. 同一英小文字を付した死亡率間には有意差なし (P > 0.05, Steel-Dwass test).  
 (A) 卵に照射したときの殺虫効果. 産下後24時間以内の卵に卵期間中連続照射し, 孵化せずに死亡した個体の割合を調査 (孵化前死亡率). さらに, 照射卵から孵化した幼虫は全暗条件下で飼育し, 羽化前に死亡した個体の割合を調査 (孵化後死亡率). 20卵×9反復. (B) 蛹に対する殺虫効果. 前蛹に蛹期間中連続照射し, 羽化せずに死亡した個体の割合を調査. 15頭×9反復.

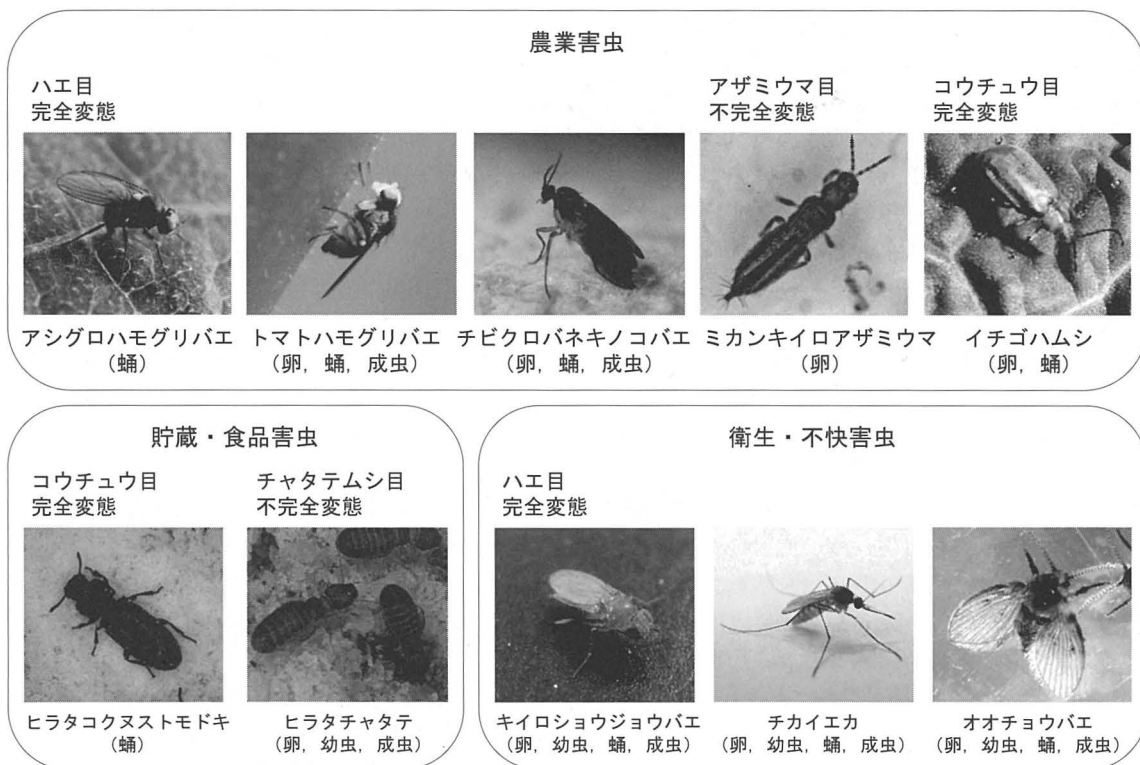


図7 殺虫効果がこれまでに確認されている害虫種 (堀 (2018a) を加工)  
 ( ) 内は効果が確認されている発育ステージ.

た種は2種のハモグリバエとイチゴハムシ、ミカンキイロアザミウマであるが、いずれも、野外に生息している害虫である。一方、ショウジョウバエ、オオショウバエ、ヒラタコクヌストモドキ、ヒラタチャタテは比較的低強度の青色光でも殺虫できる。ショウジョウバエは、成虫は野外でも活動するが、卵や幼虫は餌の中の日の当たらない所に生息している。オオショウバエは幼虫がスカムやヘドロを好むため、卵～蛹はこれらの発生した排水管や下水設備内などに生息している。ヒラタコクヌストモドキは穀粉類を餌とし、幼虫と蛹はその中に潜った状態で生息している。ヒラタチャタテは通常、屋内でカビや動植物標本、貯蔵食品などを餌として生活している。すなわち、比較的低強度の青色光で殺虫できた種はいずれも、太陽光に暴露される危険性がほとんどない種である。したがって、青色光に対する昆虫の耐性の程度は、昆虫種の分類群とはあまり関係がなく、生息場所における太陽光暴露のリスクの大きさと密接に関係していると考えられる。また、これまでに最も高い青色光耐性を示したイチゴハムシでも、直射日光に含まれる青色光の60%程度の光強度の青色光を卵期間中に照射し続けられれば、ほとんどの個体は羽化前に死亡する (Hori and Suzuki 2017)。すなわち、多くの昆虫は、直射日光を浴び続けられれば、成虫になる前に死亡してしまうと考えられる。しかし、実際には多くの昆虫が野外で活動している。ではなぜ、昼間、太陽光のある野外で活動している昆虫は死なないのかという疑問が生じるが、筆者はこれらの昆虫種でも致死するほどの青色光を実際には浴びていないためと考えている。野外に生息している昆虫でも、通常、卵は日陰や葉裏、土中などに産み付けられるため、直射日光が当たることはほとんどない。蛹化場所も日陰となる場所が通常選択されるので、蛹も直射日光にはほとんど当たらない。移動可能な成虫や幼虫は、物陰に隠れることで直射日光を避けることができる。また、1日の中で、直射日光が当たる危険性のある時間は限られており、例えば、日本における日照時間の平均は5時間程度であり、日長が長い季節の一日中晴れた日でも14時間程度である。したがって、野外活動性の昆虫であっても、一日の中で直射日光に曝される時間は比較的短いと考えられる。青色光が殺虫効果を発揮するためには、有効光強度以上の光が、あ

る一定時間以上連続的に、虫体に当たっている必要がある。すなわち、自然界ではこのような状況に置かれることがないため、多くの昆虫は野外で生活していても問題が起きないものと考えられる。

## 2. 青色光の殺虫メカニズム

青色光の殺虫メカニズムについては、現在、解明を進めているところである。UVCやUVAはDNAに吸収されてDNAに直接的な損傷を与えるが、UVAや可視光はDNAに吸収されないため、直接的にDNAに損傷を与えることはないと言われる。したがって、青色光の昆虫に対する毒性は、UVCやUVBとは異なるメカニズムによって引き起こされていると考えられる。一般的に光の毒性は波長が短いほど高いとされているが、殺虫効果の大きさは必ずしも波長が短いほど大きいわけではない。すなわち、光のエネルギーの高さと殺虫効果の大きさは必ずしも一致せず、昆虫種により効果的な波長が異なっている。このことから、昆虫体内にある種特異的な物質を通して殺虫効果が発揮されると推測している。また、哺乳類の網膜細胞では、青色光の照射により、細胞が傷害を受けることが明らかになっており (Rózanowska and Sarna 2005)、その傷害には活性酸素が関与していることが示唆されている (Kuseら 2014)。昆虫でもこれと同様に、活性酸素を介して殺虫効果が生じているのかもしれない。すなわち、昆虫体内にある種特異的な光感受性物質や発色団などが体表や蛹殻、卵殻を透過した光のうち、特定の波長域の光を特に強く吸収することで励起され、活性酸素を生じ、それによりDNA・細胞が傷害を受け、組織の損傷、さらには個体の致死につながるものと推測している (図8)。実際、青色光をショウジョウバエの蛹に照射して、活性酸素の一種である過酸化水素の発生量を比較したところ、照射によりその発生量は増加し、さらに、殺虫効果の高い波長と過酸化水素発生量の多い波長との間には類似性があることが明らかになった (Shibuyaら 2018) (図9)。また、予備試験の段階ではあるが、青色光をショウジョウバエの胚由来の培養細胞に照射すると、細胞の増殖が抑えられ、細胞死が起きることが確認されている。これらのことから、筆者らが推測している殺虫メカニズムは大きくは間違っていないのではないかと考えている。

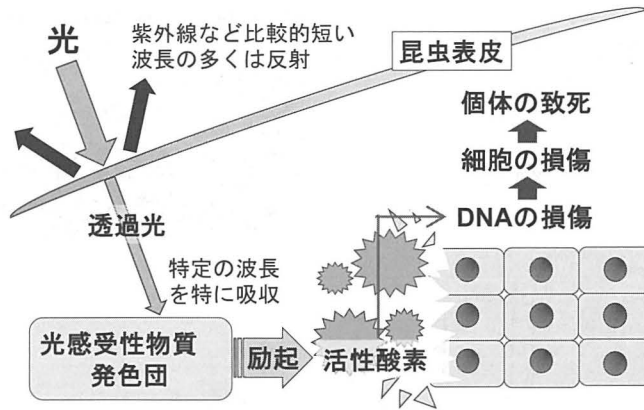


図8 推測される青色光の殺虫メカニズム

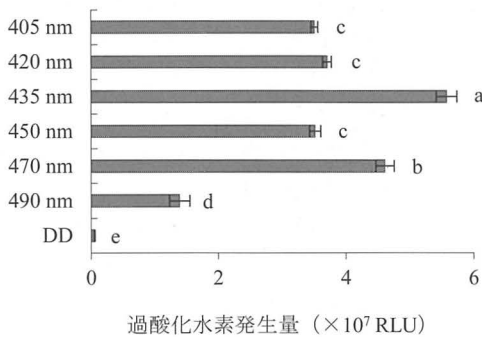


図9 青色光を照射されたショウジョウバエの蛹における過酸化水素発生量の波長間比較 (Shibuyaら (2018) を加工)

ホモジナイズしたショウジョウバエの蛹に  $10 \times 10^{18}$  photons  $\cdot$  m<sup>-2</sup>  $\cdot$  s<sup>-1</sup> の光強度で各波長の青色光を24時間照射し、発生した過酸化水素量をルシフェリンによる発光量に変換して測定。いずれのグラフも数値は平均値±標準誤差。横軸の単位のRLUは発光量を示す。DDは全暗区を示す。同一英小文字を付した発生量間には有意差なし ( $P > 0.05$ , Tukey's test)。1頭/反復×30反復。

また、筆者らは、青色光照射が昆虫に与える影響として、直接的な殺虫効果の他に、免疫抑制効果があることを明らかにしている (Tariqら 2017)。ミカンコミバエを用いた実験では、1日当たり7時間、低強度の青色光を7日間継続して幼虫に照射したところ、幼虫のクチクラのメラニン含量が低下することが明らかになった。また、幼虫期に青色光を照射されたミバエの成虫はメラニン合成に関与するフェノール酸化酵素の活性が低下し、異物挿入に対するカプセル化も抑制された。すなわち、幼虫が青色光に曝露されることでメラニン合成などの免疫

関連因子が阻害されて、免疫抑制が起き、その抑制効果が成虫にまで持ち越されることを示している。実際、幼虫期に青色光を曝露された成虫は、病原糸状菌の *Beauveria bassiana* に対する耐性が低下することも確認されている。Debeckerら (2015) の報告によると、イトトンボを用いた実験では、紫外線を幼虫に照射すると免疫抑制は起きるが、フェノール酸化酵素の活性は向上し、メラニン合成も増加することが認められている。したがって、紫外線照射も青色光照射も免疫抑制は生じさせるが、その作用は両者で異なっていると考えられる (Tariqら 2017)。

### 3. 青色光殺虫装置の開発と実用化について

青色光は様々な害虫に殺虫効果があると考えられることから、農業、食品産業、貯水・水処理、衛生、畜産業、流通・輸送など、多岐にわたる利用分野が想定される (図10)。光源としては、特定波長の光を照射しやすく、省エネ・長寿命であることを考慮すると、LEDが最も使いやすいと考える。防除対象害虫に対して効果的な波長の青色光を、害虫発生箇所あるいは発生しやすい箇所に照射するだけなので、照射装置を設置さえしてしまえば、処理は簡単で労力があまりかからない。光を照射するだけのノンケミカルでクリーンな防除法であるため、安全上の問題などにより殺虫剤処理が困難な場所での防除にも利用できるという大きなメリットがある。例えば、食品を扱う施設では、殺虫剤が付着する危険性があるため、害虫防除に殺虫剤を使用できない場合が多い。このように、これまで有効な害虫防除手段がなかった場面でも、青色光を導入するこ





図10 青色光殺虫の想定される利用分野(堀(2018a)より転載)

とで、防除が可能になるかもしれない。

青色光の殺虫効果は昆虫種だけでなく、発育ステージによっても効果的波長や有効光強度が異なるため、防除に利用する際は、対象害虫のどの発育ステージの虫を殺虫のターゲットとするかあらかじめ検討しておくことが必要である。その際にはまず、光を照射しやすい発育ステージを考えなければならない。例えば、青色光耐性が最も低い発育ステージが蛹であったとしても、土中で蛹化する場合や蛹が厚い繭に覆われているような場合は、蛹をターゲットとするのは難しい。すなわち、殺虫に用いる光源波長は、実用的に照射が可能な発育ステージで効果を発揮できる波長でなければならない。

さらに、利用する光源波長を選択する際には効果の高さだけでなく、製造コストも考慮する必要がある。例えば、LED素子の価格は波長の流通量で大きく異なる。また、同じ電力量でも波長によって放射強度が異なるため、発光効率の低いLED波長の場合は、有効光強度を確保するのにより多くの素子が必要となる。したがって、殺虫効果が最も高い波長でなくても、実用的に殺虫効果を発揮できる波長であれば、低コストでの製造が可能な波長を選択する

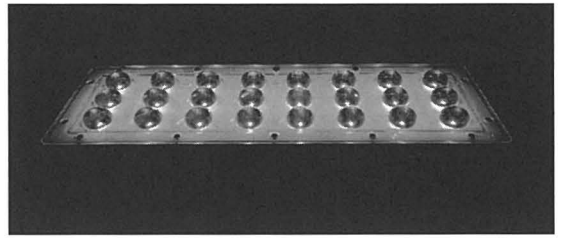


図11 青色光殺虫装置の商品化第一号となったブルーケア470(堀(2018b)より転載)

ほうが良い場合もある。すなわち、製造コストと殺虫効果の両方を考慮して波長を選択し、照射装置を設計・開発するのが良いと考える。

上記のような考えのもと、アース環境サービス株式会社と共同で、LED光源を用いた青色光殺虫装置を開発し、2018年5月にブルーケア470という商品名で、食品・医薬品などの製造現場における害虫駆除用として商品化された(堀2018b)(図11)。食品・医薬品などの製造現場は、先に述べたように殺虫剤を処理できない場所が多い。したがって、清掃による害虫の発生源の除去が現在の主な害虫対策となっているが、労力などの問題から清掃による除去を徹底するのは難しい場合が多く、害虫が発生して問題となることは少なくない。そのような背景から、発生源を除去でき、さらには発生源ができるのを未然に防ぐことができるノンケミカルな殺虫技術の開発・導入が昔から強く望まれてきた。食品害虫は通常、製造機械などの内部や配電盤・分電盤の中、施設・設備の隙間空間などにある食品残渣や有機残渣を餌として繁殖する。そのため、害虫の発生源は人の目の届きにくいところに行きやすい。このような発生源の行きやすい空間に青色光光源を設置して、空間内を青色光で照射すれば、害虫の繁殖が抑えられるので、発生源ができるのを防ぐことができる。また、これらの場所は比較的狭い閉鎖空間のため、青色光の照射強度が一定強度以上になるように装置を設計・設置するのが容易であり、害虫に有効光強度以上の青色光を照射しやすい。先にも述べたように、青色光はヒトの目の網膜に傷害を与えるため、光源を直接見ないようにする必要があるが、上述のような害虫の発生源の行きやすい閉鎖空間であれば、人の目にも触れにくく、安全に使

用できる。以上のような理由から、実用化が比較的容易であると考えられた食品・医薬品製造現場向けに青色光殺虫装置を開発し、商品化に至った。

ブルーケア 470 の現在の適用害虫の範囲は、食品製造現場で問題となるチャタテムシ、ショウジョウバエ、チョウバエなどである。装置を開発する際は、これらの害虫種において殺虫対象とする発育ステージを考慮し、光源を選択している。例えば、チョウバエ（オオチョウバエ）は発育にともなって効果的の波長が大きく変化するので、ターゲットとする発育ステージを決めて、光源波長を選択する必要があった。殺虫試験により、蛹と成虫の青色光耐性は比較的高いことが示されていたため、両ステージにおいては有効光強度での照射は困難と考えられた。一方、卵の耐性は比較的低いことが示されていたので、殺虫対象としては卵が適していると考えられた。したがって、本種殺虫用の光源波長としては卵に対して効果の高いいくつかの波長を候補として選択した。ショウジョウバエも発育にともなって効果的な波長が異なっていたが、蛹と成虫には 470 nm 近辺の波長が最も効果が高く、幼虫は 470 nm より短い波長の青色光であればほぼ同程度の効果を示し、卵は波長が短くなるほど効果が高くなる傾向があった（Shibuya ら 2018）。また、青色光耐性は蛹が最も低く、次いで、卵、幼虫の順であった。したがって、光源には蛹に最も効果的な 470 nm 近辺の波長が候補として適していると考えられた。チャタテムシ（ヒラタチャタテ）に対しては、波長が短くなるほど効果が高くなる傾向がみられたが、いずれの発育ステージでも青色光耐性は低く、470 nm 以下の波長であれば比較的低強度でも高い殺虫効果が得られることが明らかになった。以上のことを考慮し、上記 3 種のいずれの害虫に対しても高い殺虫効果があり、かつ、流通量が多く、低コストでの製造が可能な 470 nm を光源として用いることとなった。1 辺が約 50 cm までの空間であれば、この装置を用いることにより、これら 3 種の害虫の有効光強度以上の青色光を照射できることが確認でき、実証試験でも実用的な防除効果が確認された。まだ、製造現場への導入が始まったばかりの段階であるが、今後、この装置が多くの製造現場に普及すれば、実用上の様々なノウハウが蓄積されていくと考える。ノウハウが蓄積されれば、さらに効果的な装置への

改良や、より低コストで効率的な利用技術の確立につながっていくことが期待できる。また、これらの製造現場において、青色光殺虫による防除の成果が蓄積されれば、その他の分野への利用に広がっていくと考える。

#### 4. 青色光殺虫技術の農業での利用について

青色光照射の農業害虫に対する殺虫効果は、ハモグリバエ、クロバネキノコバエ、ハムシ、アザミウマで確認されている。現在は、最適波長と有効光強度をすでに明らかにしているトマトハモグリバエで照射装置の試作品を作成し、ポット試験によりこの試作装置の有効性を評価しているところであるが、農業での利用においては、対象害虫に対する有効性の他に解決しなければならないいくつかの課題がある。例えば、青色光照射が対象作物に与える影響も調査しなければならない。この際、青色領域の波長光が作物に与える傷害や生理に及ぼす影響だけでなく、夜間の光照射が与える生理障害の有無も調べる必要がある。これらの影響は、強光を好む植物と弱光を好む植物でも大きく異なると考えられ、同じ波長や光強度でも植物種によって影響そのものの有無だけでなく、その良し悪しも大きく異なるものと考えられる。そのため、実用化においては、対象作物それぞれに対する青色光照射の影響について、収量や見た目の品質はもちろんのこと、味や香りなども含めて、詳細に調査する必要がある。また、害虫は植物の葉裏などの陰に潜んでいることが多いので、有効光強度以上の青色光が害虫に確実に当たるようにするため、光源の設置位置や角度を工夫したり、反射資材を併用したりするといった工夫が必要であろう。青色光が殺虫効果を発揮するためには、有効光強度以上の青色光が虫体に当たらなければならない。したがって、防除対象面積が広くなれば、青色光光源の放射面積も広くする必要がある。そのため、露地栽培での利用の場合は多くの光源が必要となり、コスト的に実用化は難しいと考えられ、農業においては、施設での利用が現実的であると考える。また、光源の設置や光の制御の容易さおよび必要となる光源の数を考えると、育苗施設での利用が最も実用化しやすいかもしれない。すなわち、育苗施設で青色光照射により害虫フリーの苗を生産し、育苗施設から本圃への害虫の持ち込みを防ぐと

いう利用の仕方も考えられる。

また、農業で青色光殺虫を利用する場合、青色光の照射強度を低く抑えられれば、植物への影響も少なくできると考えられる。先に述べたように、青色光は低強度での照射でも昆虫に対して免疫抑制効果をもつことが示唆されている。したがって、青色光照射と昆虫病原微生物を併用することにより、低強度の青色光でも十分な殺虫効果を得ることができると考えられる。これについては、今後さらに検討していく必要があるが、もしこの相乗効果が様々な農業害虫で認められれば、青色光殺虫の農業への利用はさらに広がるものと考えられる。

### おわりに

青色光に殺虫効果があることを最初に発見してから、約10年が経とうとしている。この間に、様々な基礎的な知見が得られ、食品・医薬品などの製造現場向けの防除装置の商品化・導入も始まったところである。殺虫メカニズムについては、活性酸素の発生やそれによる細胞傷害など少しずつ明らかになり始めてはいるが、未だ、完全には解明されていない。例えば、殺虫に効果的な青色光の波長は昆虫種や発育ステージにより異なっているが、その原因も明らかになっていない。現在、その原因解明を含め、青色光の殺虫メカニズムの詳細な解明に取り組んでいるところである。今のところ、青色光の殺虫効果を防除に利用する際は、対象害虫種ごとに効果的な波長や光強度を調べる必要がある。しかし、メカニズムが解明されれば、例えば、虫体の青色光受容部の吸収スペクトルを解析することで、これらを簡単に調べることができるようになるかもしれない。また、青色光による殺虫技術が今後普及してくると、抵抗性個体の出現などの問題が生じる可能性もある。これらの問題が万が一発生した場合の対応のためにも、殺虫メカニズムの解明は喫緊の課題といえる。

今のところ、青色光殺虫が実用化されているのは食品・医薬品などの製造現場だけであるが、農業においても実用化を見据えた研究を現在行っており、現場への導入に早期につなげていきたいと考えている。この日本初の新規の殺虫技術が、今後、様々な分野での害虫防除の世界的なスタンダードの一つになればと考えている。

### 引用文献

- Beggs, C. B., 2002: A quantitative method for evaluating the photoreactivation of ultraviolet damaged microorganisms. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2002(6): pp.431-437.
- Beard, R. L., 1972: Lethal action of UV irradiation on insects. *Journal of Economic Entomology*, 65(3): pp.650-654.
- Debecker, S., R. Sommaruga, T. Maes and R. Stoks, 2015: Larval UV exposure impairs adult immune function through a trade-off with larval investment in cuticular melanin. *Functional Ecology*, 29(10): pp.1292-1299.
- 堀 雅敏, 2018a: 青色光照射による殺虫技術の開発. *植物防疫*, 72 (3) : pp.98-102.
- 堀 雅敏, 2018b: 青色光の殺虫効果と防除への応用. *日本農薬学会誌*, 43 (2) : pp.109-116.
- Hori, M., K. Shibuya, M. Sato, and Y. Saito, 2014: Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. *Scientific Reports*, 4: 7383.
- Hori, M. and A. Suzuki, 2017: Lethal effect of blue light on strawberry leaf beetle, *Galerucella grisea* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Scientific Reports*, 7: 2694.
- Kuse, Y., K. Ogawa, K. Tsuruma, M. Shimazawa and H. Hara, 2014: Damage of photoreceptor-derived cells in culture induced by light emitting diode-derived blue light. *Scientific Reports*, 4: 5223.
- Meng, J. Y., C. Y. Zhang, F. Zhu, X. P. Wang and C. L. Lei, 2009: Ultraviolet light-induced oxidative stress: Effect on antioxidant response of *Helicoverpa armigera* adults. *Journal of Insect Physiology*, 55(6): pp.588-592.
- 中島 誠・吉田治男, 1971: カイコの紫外線感受性に関する研究 とくに令を周期とした致死率の変動. *日本応用動物昆虫学会誌*, 15 (1) : pp.17-22.
- Pfeifer, G. P., 1997: Formation and processing of UV photoproducts: Effects of DNA sequence and chromatin environment. *Photochemistry and Photobiology*, 65(2): pp.270-283.
- Rózanowska, M. and T. Sarna, 2005: Light-induced damage to the retina: role of rhodopsin chromophore revisited. *Photochemistry and Photobiology*, 81(6): pp.1305-1330.
- Shibuya, K., S. Onodera and M. Hori, 2018: Toxic wavelength of blue light changes as insects grow. *PLOS ONE*, 13(6): e0199266
- 田中雅也・八瀬順也・神頭武嗣・刑部正博, 2017: UVBランプと光反射シートによるハダニ物理的防除 (UV法) について—施設イチゴにおける防除事例を中心に—. *植物防疫*, 71 (4) : pp.229-234.
- Tariq, K., M. Noor, M. Hori, A. Ali, A. Hussain, W. Peng, C.-J. Chang and H. Zhang, 2017: Blue light-induced immunosuppression in *Bactrocera dorsalis* adults, as a carryover effect of larval exposure. *Bulletin of Entomological Research*, 107(6): pp.734-741.
- Wharton, D. R. A., 1971: Ultraviolet repellent and lethal action on the American cockroach. *Journal of Economic Entomology*, 64(1): pp.252-255.
- Zhang, C. Y., J. Y. Meng, X. P. Wang, F. Zhu and C. L. Lei, 2011: Effects of UV-A exposures on longevity and reproduction in *Helicoverpa armigera*, and on the development of its F1 generation. *Insect Science*, 18(6): pp.698-702.