

青色光に見いだされた殺虫効果 —新たな害虫防除技術の可能性—

東北大学大学院農学研究科 ^{ほり}堀 ^{まさ}雅 ^{とし}敏

はじめに

害虫防除の現状としては、農薬を用いた化学的防除が主となっているが、環境への負荷の軽減やより高い安全性が求められる中、農薬への依存を低減させるための技術開発が求められている。物理的防除を採り入れることも、農薬低減のための重要な手段の一つである。物理的防除の中で光を利用した害虫防除は昔から広く行われており、予察灯による害虫の発生状況の把握のほか、黄色灯による夜行性蛾類の活動抑制、反射マルチ・シートによる害虫の忌避等、実用化されているものも多い。光の利用は、発光ダイオード (LED) の開発とその目覚ましい発展・普及により、近年、様々な産業分野で進み、農林水産業においても LED を中心とした光の利用技術の研究・開発が、現在、活発に行われている。

昆虫に対する光の作用に関しては昔から多くの研究があり、上述のように実用化されている技術も多いが、そのほぼすべてが行動制御に関するものである。光そのものの殺虫効果に関する研究例は、紫外線を除き、これまでにない。光の動物に対する殺傷作用は、紫外線の中でも波長の短い UVC (100 ~ 280 nm の波長の光) や UVB (280 ~ 315 nm) ではよく知られている。これらの紫外線は DNA に直接的な損傷を与えることで強い毒性を発揮する (PFEIFER, 1997)。一方、これらより波長が長い紫外線である UVA (315 ~ 400 nm) や可視光 (400 ~ 780 nm) は DNA に直接的な傷害を与えることはなく、UVC や UVB に比べると毒性は極めて低いと考えられている。光は波長が短いほど生物に対する毒性が高いことがよく知られていることから (CLARK, 1922)、可視光が昆虫を含む比較的複雑な動物に直接的な致死効果を示すとはこれまでに全く考えられてこなかった。

しかし、安全性が高いといわれていた可視光でも、短波長可視光といわれる比較的波長の短い、紫~青色の光 (以下、青色光: 400 ~ 500 nm) は、ヒトの網膜に傷害を与えることがわかってきた (KUSE et al., 2014)。可視光の動物に対する毒性に関しては未解明なことが多く、可視光の新たな利用技術を開発するうえで、また、可視

光の安全性を評価するうえで、それらを明らかにしていくことは極めて重要である。本稿では、筆者らが新たに発見した青色光の殺虫効果について、これまでに得られた知見 (Hori et al., 2014) を紹介するとともに、この知見に基づくクリーンで安全性の高い新たな害虫防除技術開発の可能性について述べる。

I 青色光のショウジョウバエに対する殺虫効果

1 蛹に対する殺虫効果

キイロショウジョウバエ (以下、ショウジョウバエ) はライフサイクルが短く、飼育も容易なため、代表的なモデル動物として、生物学の様々な研究で用いられている。そこで筆者らも、ショウジョウバエを用いて、可視光による蛹に対する致死効果を調査した。蛹化後 24 時間以内のショウジョウバエを 25°C の恒温条件で 7 日間連続的に、様々な波長の LED 光源下に置き、羽化せずに死亡した蛹の割合を調べることにより、殺虫効果を波長間で比較した。蛹に照射する光の強さは $3.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ とした (測定器の受光角は全角で約 22°)。筆者のいる大学構内 (仙台) において、5 ~ 7 月の 14:00 ころに、晴天時の直射日光の青色光の総量 (400 ~ 500 nm) を調査したところ、 $7.5 \sim 9.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。したがって、蛹に照射した LED 光の強さは直射日光の青色光総量の 1/3 程度であった。各波長の殺虫効果を調査した結果、440 nm と 467 nm が特に高い効果を示し、死亡率はそれぞれ 73% と 95% に達した (図-1)。UVA である 378 nm での死亡率は約 40% で、前記 2 波長と比べると、その殺虫効果は明らかに劣っていた。さらに興味深いことに、456 nm は 440 nm と 467 nm の間の波長であるにもかかわらず、その殺虫効果はこれら 2 波長に比べて明らかに低く、死亡率は約 30% に止まった。また、紫外線に最も近い可視光であった 404 nm での死亡率は、光を照射しない全暗下の蛹と同程度であった。

次に、それぞれの波長について光強度と殺虫効果の関係を調査したところ、378 ~ 508 nm では、光強度が高くなると殺虫効果も高くなることが明らかになった (図-2)。467 nm では、 $2.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度でも死亡率は約 70% を示し、 $4.0 \times 10^{18} \text{ pho}$

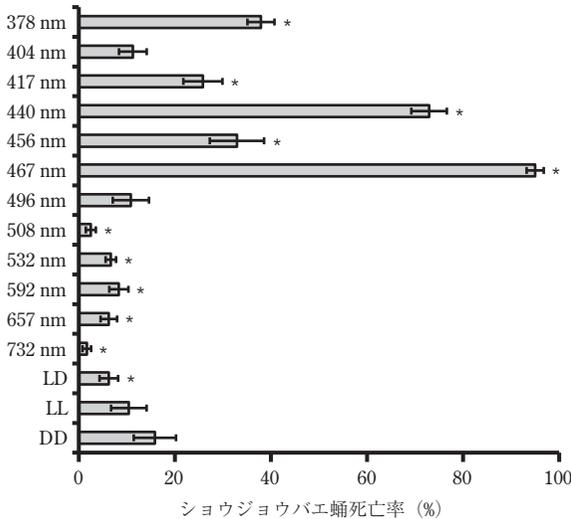


図-1 ショウジョウバエ蛹に対する各種波長光照射の殺虫効果

- 注1) 蛹化後24時間以内のショウジョウバエを25℃恒温条件下で7日間連続的に様々な波長のLED光源下に置き、羽化せずに死亡した蛹の割合を調査。
- 注2) LD:16時間明期・8時間暗期; LL:全明; DD:全暗 (LDおよびLLにおける明期の照明には白色冷陰極蛍光灯を使用)。
- 注3) *: $P < 0.05$ で DD との間に有意差あり (一般化線形モデルによる解析) (30蛹×8反復)。
- 注4) 死亡率は平均値±標準誤差。
- 注5) 光強度: $3.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$\text{tons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では 100% の死亡率を示した。これに対して、404 nm では、 $5.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度でも死亡率は 50% 未満であった。

以上の結果から、青色光には殺虫効果があること、光の殺虫効果は必ずしも波長が短いほど強いというわけではないこと、特異的な波長が強い殺虫効果をもつことが明らかになった。

2 卵、幼虫、成虫に対する殺虫効果

ショウジョウバエのような完全変態昆虫では卵、幼虫、蛹、成虫の間で、形態だけでなく、生理的にも大きな変化が生じる。したがって、青色光による致死効果も変態を境に大きく変わる可能性がある。そこで、蛹で最も高い効果を示した 467 nm 光を用いて、ショウジョウバエの卵、幼虫、成虫に対する青色光の殺虫効果を調査した。

産下後 6 時間以内の卵に 25℃ 恒温条件下で 2 日間連続的に、青色光を様々な強度で照射したところ、 $4.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では約 60% が、 $5.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では 80% 以上の個体がふ化せ

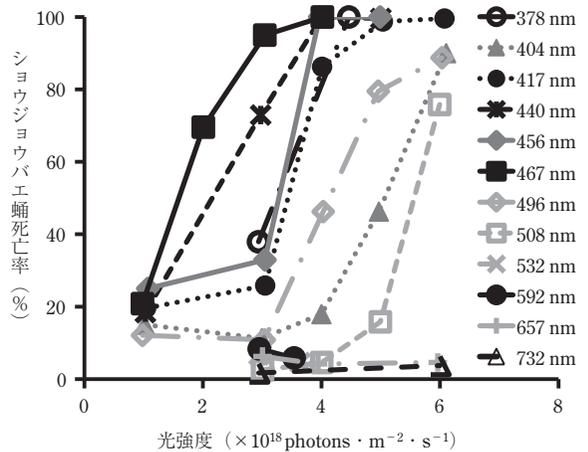


図-2 各種波長光の光強度とショウジョウバエ蛹に対する殺虫効果との関係

注1) 死亡率は平均値 (30 蛹 × 8 反復)。

ずに死亡した (図-3)。 $10.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度では、100% の個体が死亡した。

次に蛹化のために餌から出てきた終齢幼虫を回収し、青色光を様々な光強度で 24 時間照射した後、16L:8D の明暗周期にした恒温室内に置いた (明期の照明は白色蛍光灯)。その後、羽化せずに死亡した個体の割合を調べるとともに、死亡時の成虫ステージを調査した。その結果、 $5.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で照射すると約 60% の個体が、 $7.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ で照射すると 90% 以上の個体が羽化せずに死亡した (図-4)。また、光強度が高いほど成虫ステージの早い段階で死亡する個体が増え、 $7.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では、蛹まで至らずに前蛹または幼虫で死亡したものが死亡個体の約半数を、 $10.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ では蛹になる前に死亡した個体が 90% を超えた。

成虫でも、青色光を照射し続けると、寿命が短くなることが明らかになった。通常、ショウジョウバエの成虫は 60 日程度生きるが、 $5.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の強度で青色光を連続照射すると、寿命が 5 日程度にまで短くなることがわかった (図-5)。 $1.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ という弱い強度でも、寿命は約 20 日と、通常の 1/3 程度になることが明らかになった。生存雌 1 頭当たりの産卵数も大きく減少し、無照射の雌では最も多い日の産卵数が約 45 個であったのに対して、 $1.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ での照射でも、最大産卵数は約 20 個にまで減少した。

以上のことから、青色光は蛹だけでなく様々な成虫段階のショウジョウバエに殺虫効果を示すことが明らかに

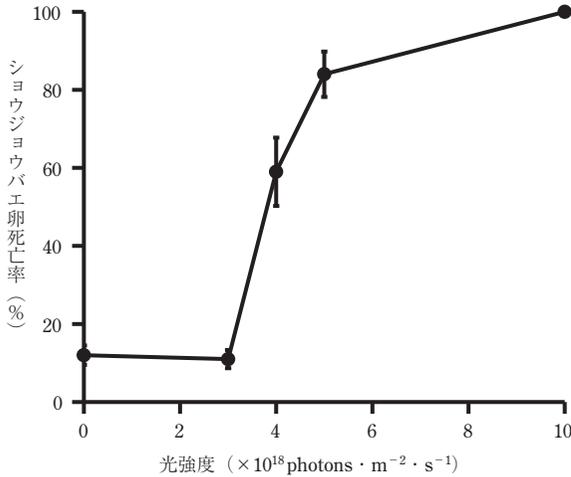


図-3 ショウジョウバエ卵に対する 467 nm 青色光照射の殺虫効果

- 注1) 産下後6時間以内の卵に25℃恒温条件で2日間連続的に青色光を様々な強度で照射し、ふ化せずに死亡した卵の割合を調査。
 注2) 死亡率は平均値±標準誤差(10卵×10反復)。
 注3) 光強度の0は全暗。

なった。

II 青色光のチカイエカに対する殺虫効果

1 蛹に対する殺虫効果

青色光の殺虫効果がショウジョウバエに特有なものであるか否かを明らかにするため、同じハエ目ではあるがハエ亜目ではなくカ亜目に属するチカイエカを用いて、青色光の殺虫効果を調査した。チカイエカは都市型害虫で、しばしば大量発生して問題となる。蛹化後1時間以内のチカイエカに25℃恒温条件で5日間連続的に、様々な波長のLED光を照射し、羽化せずに死亡した個体の割合を波長間で比較した。その結果、青色光はチカイエカに対しても殺虫効果をもつことが明らかになった(図-6)。しかし、興味深いことに、殺虫効果の高い波長はショウジョウバエとは大きく異なっていた。すなわち、ショウジョウバエで高い効果を示した440 nmや467 nmはチカイエカに対しては効果が低く、逆にショウジョウバエではそれら2波長よりも効果が明らかに劣っていた417 nmが高い効果を示した。また、ショウジョウバエでは青色光域に効果の高い2山型のピーク波長が見られたが、チカイエカではピーク波長は1山型であった。また、417 nmは光強度を上げることで殺虫効果が高くなったが(図-7)、チカイエカの蛹で100%の致死率を得るには $15.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の光強度を必要

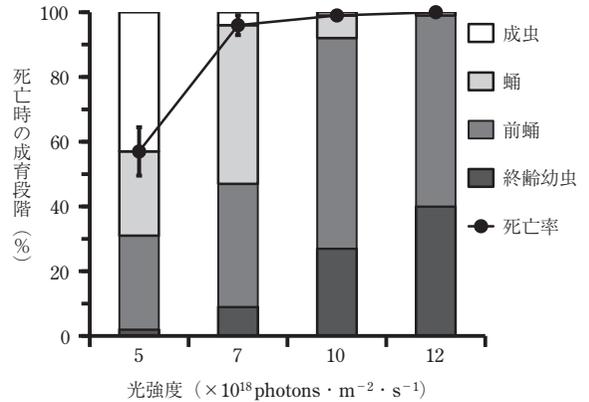


図-4 ショウジョウバエ幼虫に対する 467 nm 青色光照射の殺虫効果

- 注1) 終齢幼虫に25℃恒温条件で24時間連続的に青色光を様々な強度で照射し、羽化せずに死亡した個体の割合と死亡時の成育ステージを調査。
 注2) 死亡率は平均値±標準誤差(10幼虫×10反復)。

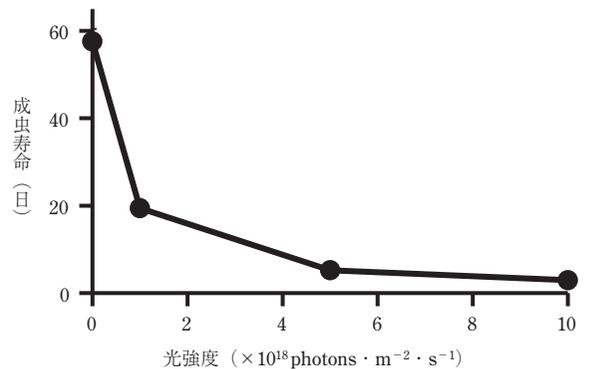


図-5 ショウジョウバエ成虫に対する 467 nm 青色光照射の殺虫効果

- 注1) 羽化後12時間以内の成虫に25℃恒温条件で連続的に青色光を様々な強度で照射し、生存日数を調査。
 注2) 寿命は平均値±標準誤差(雌雄1対×10反復)。
 注3) 光強度の0は全暗。

とした。これは、467 nm 光がショウジョウバエに十分な致死効果を示した強度の5倍に相当する。すなわち、青色光の殺虫効果はショウジョウバエに特有のものではないが、青色光への耐性は種により大きく異なることが明らかになった。

2 卵に対する殺虫効果

チカイエカの卵に対する青色光の殺虫効果を調べるため、蛹で最も高い効果を示した417 nm光を卵に照射し、その後の死亡率を調査した。産下後1時間以内の卵に青

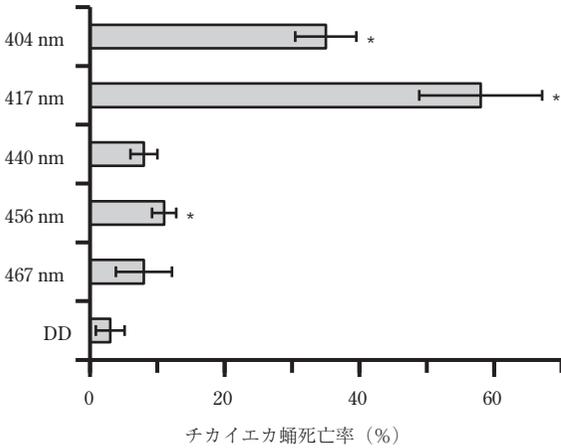


図-6 チカイエカ蛹に対する青色光照射の殺虫効果
 注1) 蛹化後1時間以内のチカイエカに25℃恒温条件で5日間連続的に様々な波長のLED光を照射し、羽化せずに死亡した蛹の割合を調査。
 注2) DD: 全暗。
 注3) *: $P < 0.05$ で DD との間に有意差あり (一般化線形モデルを用いて解析) (10 蛹 × 10 反復)。
 注4) 死亡率は平均値 ± 標準誤差。
 注5) 光強度: $10.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

色光を48時間照射し、ふ化せずに死亡した個体の割合を調べた。調査後、さらに72時間全暗下に置いた後、ふ化後の死亡率を調べた。その結果、青色光照射直後の死亡率は30%程度とあまり高くなかったが、その後72時間以内にほとんどのふ化幼虫が死亡した(図-8)。このことから、チカイエカは卵期に青色光照射により傷害を受けると、ふ化しても成育できずに死亡することが明らかになった。また、このときの417 nm 光の照射強度は $10.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であったことから、卵期での照射のほうが蛹期での照射よりも、低い照射強度で高い殺虫効果が得られることがわかった。

III ヒラタコクスストモドキに対する殺虫効果

青色光の殺虫効果がショウジョウバエだけでなくチカイエカにもあることがわかったが、これら2種は亜目が異なるものの、目レベルでは同じハエ目に属している。そこで、ハエ目以外の昆虫にも効果を発揮するのか明らかにするために、コウチュウ目のヒラタコクスストモドキの蛹を用いて、青色光の照射殺虫効果を調査した。ヒラタコクスストモドキは世界的な重要貯穀害虫である。蛹化後24時間以内の蛹に、25℃恒温条件で、404, 417, 456, 467, 532 nm のいずれかの波長光を、 $2.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の強度で14日間連続的に照射し、羽化せずに死亡した個体の割合を調べた。その結果、532

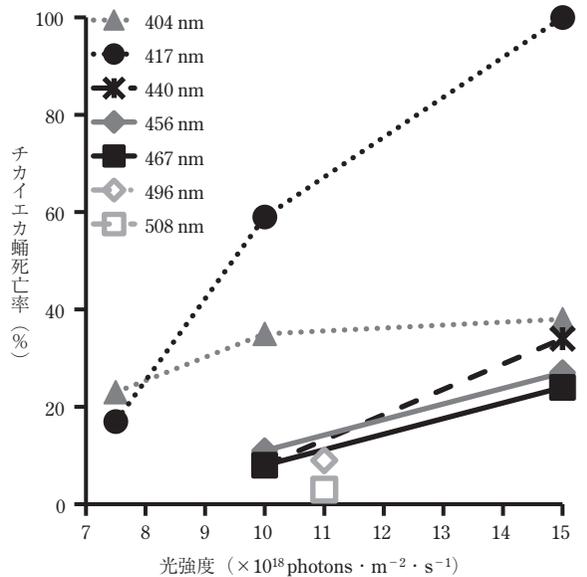


図-7 各種波長光の光強度とチカイエカ蛹に対する殺虫効果との関係
 注1) 死亡率は平均値 (10 蛹 × 10 反復)。

nm の緑色 LED 光を照射した蛹と 16L:8D の明暗周期 (明期の照明は白色冷陰極蛍光灯) に置いた蛹の死亡率がそれぞれ3%と0%であったのに対して、404~467 nm の青色光を照射した蛹の死亡率はいずれも100%となった。このことから、青色光はハエ目だけでなくコウチュウ目にも殺虫効果を発揮することが明らかとなり、様々な分類群の昆虫種に効果がある可能性が示された。また、ヒラタコクスストモドキは蛹の期間が約2週間と前2種に比べて長い (ショウジョウバエとチカイエカの蛹期間はそれぞれ約4日と2日)、青色光の照射期間が長かったことも要因として考えられるが、 $2.0 \times 10^{18} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (直射日光の青色光総量の1/5~1/4程度) という弱い強度で、100%の致死率を得ることができた。ヒラタコクスストモドキは青色光に対する耐性が非常に弱いといえる。

IV 考えられる青色光の殺虫メカニズム

青色光が昆虫に対して致死効果をもつことは明らかになったが、その殺虫メカニズムはまだ不明である。筆者らは殺虫メカニズム解明のヒントとして、有効波長の種特異性に注目している。当初、筆者らは蛹殻や表皮の透過スペクトルがこの種特異性に起因していると考えたが、ショウジョウバエ蛹の困蛹殻の透過スペクトルを測定したところ、有効波長と透過スペクトルの間に関係性は見られなかった。したがって現時点では、殺虫効果の

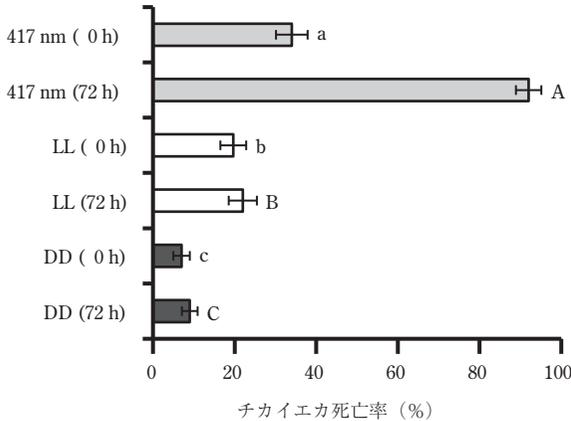


図-8 チカイエカ卵に対する 417 nm 青色光照射の殺虫効果

注1) 産下後1時間以内の卵に25℃恒温条件下で48時間連続的に青色光を照射し、ふ化せずに死亡した卵の割合および照射終了72時間後の死亡率を調査。

注2) LL: 全明; DD: 全暗 (LDおよびLLにおける明期の照明には白色冷陰極蛍光灯を使用)。

注3) 0h: 照射(48時間)終了直後; 72h: 照射終了後全暗下で72時間経過後。

注4) DDとLLおよびDDと417nm照射区の間には $P < 0.01$ で有意差あり。また、417nm照射区のみ照射直後と72時間経過後の間に $P < 0.01$ で有意差あり(一般化線形モデルによる解析)(30卵×10反復)。

注5) 同じ経過時間の処理区間で、異なる英文字を付している死亡率間には $P < 0.05$ で有意差あり(Steel-Dwass test)。

注6) 死亡率は平均値±標準誤差。

注7) 光強度: 10.0×10^{18} photons \cdot m $^{-2}$ \cdot s $^{-1}$ 。

波長特異性は、蛹殻や表皮を透過した後の体内部の吸収スペクトルに関係していると推測している。

DNAの光の吸収スペクトルは260~265nmで最大となり、それより長くなると吸収量は急激に減ることから(BEGGS, 2002)、UVAや可視光はDNAに直接的な傷害を与えないとされている。しかし、UVAでは活性酸素を発生させることで、脂質やタンパク質、DNAに間接的に傷害を与えることが報告されている(McMILLAN et al., 2008)。青色光もUVAと同じく活性酸素を介して細胞や組織に傷害を与えることが知られ、例えば、ヒトの眼の網膜も青色光の照射で発生した活性酸素により傷害を受けることが明らかになっている(KUSE et al., 2014)。青色光の殺虫効果も活性酸素を介している可能性は高い。すなわち、昆虫の体の内部組織にある種特異的な発色団や光感受性物質がある特定の波長の青色光を吸収することで活性酸素が生じ、それにより細胞や組織が損傷を受け、致死するのかもしれない。ショウジョウ

バエの蛹では440nmや467nm付近に、チカイエカの蛹では417nm付近に吸収極大をもつ発色団や光感受性物質を虫体組織にもっていると考えれば、これらの波長が種特異的に高い殺虫効果を発揮したことにも説明がつくかもしれない。

V 新たな害虫防除技術としての可能性

本研究から、青色光は様々な昆虫種に対して殺虫効果を発揮する可能性が高いと考えられた。したがって、この殺虫効果は農業分野だけでなく、畜産分野、食品産業分野、衛生分野など様々な分野で利用可能な技術になるかもしれない。しかし、実用化には解決しなければならない多くの課題がある。青色光の殺虫効果は、実際に有効な量の光が虫体に当たっていなければ発揮されない。光を避けて隠れるような場所がある場合は、ただ照射するだけでは効果を発揮させることは難しい。農業害虫防除においては、葉裏などに隠れた虫にどのように光を当てるか工夫が必要であろう。また、青色光は強すぎると植物にも大きなダメージを与えてしまう。したがって、対象植物と対象害虫の光耐性の関係をよく考慮し、照射方法を考える必要もある。また、有効な光強度や波長は昆虫の種により異なる。そのため、対象害虫それぞれにおいて有効な光強度や波長を明らかにしていく必要もある。複数種の害虫を防除対象とする場合は、青色域に複数のピーク波長を含む光やブロードなスペクトルをもつ光を利用する必要もあるだろう。筆者らの試験では、殺虫に必要な強度の青色光を含んでいれば、その他の波長の光を含んでも殺虫効果に変化がないことが示されている。したがって、植物の育成上、夜の照射が難しい場合は、昼のみの照射で効果を発揮できるような光強度、照射方法の検討も必要となるであろう。このように解決しなければならない課題は山積しているが、実用化できれば、クリーンで安全性が高いこれまでにない害虫防除技術になることが期待できることから、まずは主要害虫に対する青色光の殺虫効果を明らかにするなど基礎的な知見を早急に積み上げる必要がある。

おわりに

青色光の殺虫効果を発見したとき、筆者らも非常に驚いた。なぜなら、太陽光にも青色光は含まれているからである。しかも、ショウジョウバエやヒラタコクヌストモドキに十分な殺虫効果を示す青色光の強度は、直射日光に含まれる青色成分の総量よりもかなり小さい。では、なぜ彼らは太陽光では死なないのであろうか? 実は、直射日光に含まれる量の青色成分を含む光を当て

ば彼らは十分に死ぬということが、筆者らの研究で確かめられている（未発表データ）。したがって、彼らは生きていの中で、直射日光に曝されていることはほとんどないと考えられる。ショウジョウバエの場合は、蛹になる直前までは餌の中に潜っていることが多く、蛹化時も直射日光が当たる場所は避けている。成虫は移動性が高いので、直射日光に曝され続けられないよう日陰に隠ればよい。ヒラタコクヌストモドキは、通常、穀粉の中に生息しているので、太陽光に曝される機会はほとんどない。さらに、太陽光が当たる屋外でも、直射日光が当たっている時間は1日の中で限られている。したがって、これらの昆虫が直射日光を浴びている時間は極めて短いか、ほとんどないと思われる。また、昆虫種によって青

色光に対する耐性に大きな違いが見られたが、これはその種が太陽光に曝されるリスクの大きさとも関係していると考えられる。今後、生息環境と光耐性との関係も明らかにしていく必要がある。青色光殺虫の発見を実用技術に活かすため、現在、基礎的知見の積み上げとともに、メカニズムの解明、実用化のための研究を進めている。

引用文献

- 1) BEGGS, C. B. (2002): Photochem. Photobiol. Sci. 2002: 431 ~ 437.
- 2) CLARK, J. H. (1922): Physiol. Rev. 2: 277 ~ 309.
- 3) HORI, M. et al. (2014): Sci. Rep. 4: 7383.
- 4) KUSE, Y. et al. (2014): ibid. 4: 5223.
- 5) McMILLAN, T. J. et al. (2008): J. Pharm. Pharmacol. 60: 969 ~ 976.
- 6) PFEIFER, G. P. (1997): Photochem. Photobiol. 65: 270 ~ 283.

農林水産省プレスリリース (27.5.16 ~ 6.15)

農林水産省プレスリリースから、病害虫関連の情報を紹介します。

<http://www.maff.go.jp/j/press/syouan> の後にそれぞれ該当のアドレスを追加してご覧下さい。

- ◆ 「平成 27 年度 病害虫発生予報第 2 号」の発表について (5/19) [/syokubo/150519.html](http://www.maff.go.jp/j/press/syokubo/150519.html)
- ◆ 韓国における火傷病の発生に伴う宿主植物の輸入停止措置 (6/1) [/keneki/150601.html](http://www.maff.go.jp/j/press/keneki/150601.html)