

[昆虫のコミュニケーションと害虫被害の抑制]

光と色による害虫被害抑制

大木 碩仁¹⁾・荻野 拓海²⁾*・徳丸 晋虫³⁾・霜田 政美¹⁾

¹⁾ 東京大学農学生命科学研究科・²⁾ 農研機構 生物機能利用研究部門・

³⁾ 京都府農林水産技術センター

光と色による害虫被害抑制

大木 碩仁¹⁾・荻野 拓海²⁾*・徳丸 晋虫³⁾・霜田 政美¹⁾

¹⁾ 東京大学農学生命科学研究科・²⁾ 農研機構 生物機能利用研究部門・

³⁾ 京都府農林水産技術センター

昆虫の光や色に対する応答反応には、虫が夜の街灯に集まる「走光性」がよく知られているが、このほかにも昆虫はさまざまな光応答反応を示すことが知られている。これらの生理的メカニズムはすべて解明されているわけではなく、害虫防除技術として実用化途上のものもある。そこで本稿では、昆虫の光波長（色相）に対する応答反応に焦点をあてて基礎から応用への解説を試みた。昆虫種によって最も強く誘引される光波長（色相）は異なっており、天敵の波長選好性を利用して害虫を防除する技術、逆に赤色を避ける性質を利用した防虫ネットの開発について紹介する。

(キーワード：昆虫，視覚，光応答，光防除，天敵，赤色系防虫ネット，発光ダイオード)

1. はじめに

昆虫は食草である緑の葉に降り立ったり、交尾相手を見つけたりと、生活の中でさまざまな視覚による認識を行っており、昆虫にとって視覚は生存やコミュニケーションの手段として極めて重要なものである (Shimoda and Honda, 2013)。これらの現象(光や色に対する応答反応)を害虫防除に利用しようという試みは以前から行われてきたが、それらの生理的メカニズムはすべて解明されたわけではなく、十分に活用されているとは言い難い。この十年ほどで発光ダイオードの製造技術が進歩し、波長や強度、照射範囲などの光環境の操作が容易になってきたことで、昆虫の光応答特性に関する知見が蓄積された。本稿ではアザミウマ類でわかってきた

波長選好性の種特異性とその生理的意義について説明し、昆虫の光波長（色相）に対する応答反応を使った技術開発を2つ紹介し、光と色による害虫防除について理解を深めていただきたいと考えている。

2. 微小害虫の波長選好性

1) 研究の背景

昆虫が特定の波長（色）に誘引される現象は波長選好性とよばれる。昆虫の波長選好性は、紫外や青、緑の波長に偏っており、複眼分光感度と相関があることが知られている。例えば、イネの害虫トビイロウンカやミナミアオカメムシは365~385nmの紫外波長を選好し (松本ら, 2014; 遠藤ら, 2014)、トマトの害虫オンシツコナジラミは550nmの緑波長を強く選好する (Stukenberg and Poehling, 2019)。いずれの

Hiroto OHKI, Takumi OGINO, Susumu TOKUMARU and Masami SHIMODA : Insect pest control by light and color

*現在, アリスタライフサイエンス株式会社

昆虫種も、複眼分光感度が高い波長を嗜好しており、昆虫にとって明るく見える波長に集まる性質であると考えられてきた。

2) アザミウマ類の波長選好性

広範囲の野菜や花きを加害するアザミウマ類は、薬剤抵抗性が高度に発達し殺虫剤だけの防除が難しくなっている。そこでアザミウマ類の防除対策では、波長選好性を利用したカラー粘着トラップを他の防除資材と併用することで殺虫剤の使用を抑える試みがなされている。アザミウマ類は、青色や黄色に誘引され (Muvea *et al.*, 2014; Prema *et al.*, 2018) 農業現場に導入されている。しかし、カラー粘着トラップは反射波長域が幅広く、塗料の種類や設置場所などによって期待した防除効果が得られない場合もある。より誘引効果の高い防除資材を設計するためには、誘引に寄与する波長を明らかにすることが重要である。

単一波長を照射できる LED を用いて波長選好性を調べたところ、ミカンキイロアザミウマとヒラズハナアザミウマは紫外 (365nm) に最も強く誘引された (図 1)。一方、ミナミキイ

ロアザミウマとネギアザミウマは緑波長 (525nm) に最も強く誘引された。これら 4 種の複眼分光感度は、紫外と緑波長に極大をもつ二峰性の作用スペクトルを示すにもかかわらず、波長選好性の波形は種によって大きく異なっていた (Ohki *et al.*, unpublished data)。すなわち、アザミウマ類の波長選好性は複眼分光感度だけでは説明できず、より高次の神経回路を介した情報処理を受けていることが示唆される。

3) 波長選好性の適応的意義

アザミウマ類の波長選好性が多様化した要因について、分子系統解析や食性などの生態観察から考察を試みた。ミトコンドリア DNA の塩基配列から、*Frankliniella* 属のミカンキイロアザミウマとヒラズハナアザミウマ、*Thrips* 属のミナミキイロアザミウマとネギアザミウマのそれぞれが近縁関係にあり (図 2)、波長選好性もまた、*Frankliniella* 属の短波長選好性と *Thrips* 属の長波長選好性に区別された。すなわち、波長選好性は近縁関係に相関した傾向を示し、種分化に伴って変化する遺伝形質であると

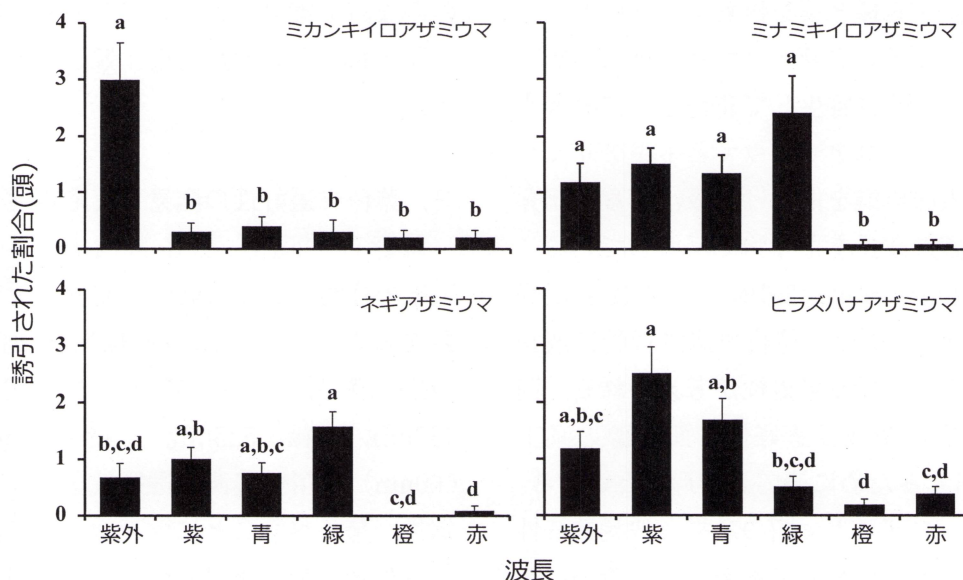


図 1 アザミウマ類の波長選好性

各 LED に誘引されたアザミウマ類の頭数 (紫外; 波長365nm, 紫; 405nm, 青; 450nm, 緑; 525nm, 橙; 590nm, 赤; 660nm)

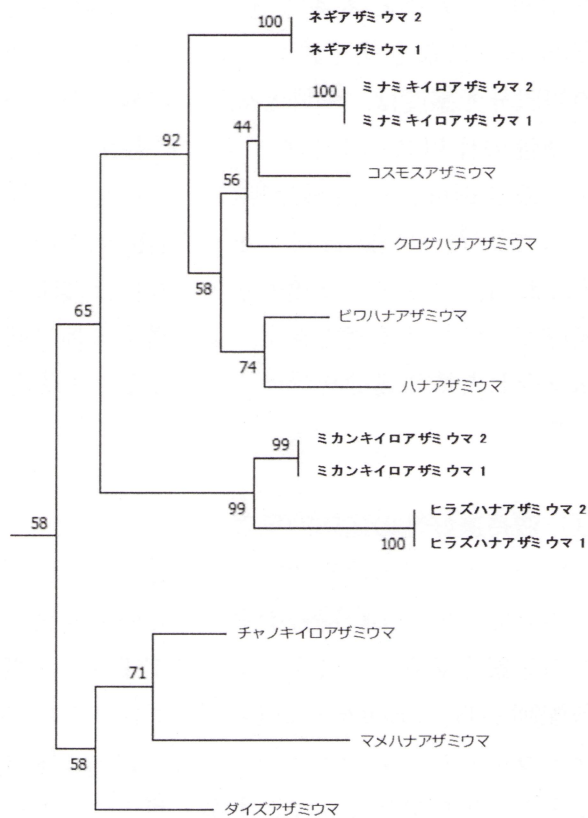


図2 アザミウマ類の分子系統樹

ミトコンドリア COI 領域のアミノ酸配列データを用いて近隣結合法により作成
各分岐の信頼性を500回反復のブートストラップ値で併記

考えられる。また、アザミウマ類の食性は、主に花粉を摂食する種と葉を摂食する種に大別される。ミカンキイロアザミウマとヒラズハナアザミウマは、花蕾に寄生して花粉を主に摂食するが、ミナミキイロアザミウマとネギアザミウマは、葉の表層組織を傷つけて吸汁する。花卉の多くは、紫外波長をより強く反射していることから (Schulte *et al.*, 2019), 短波長を選好する *Frankliniella* 属は、訪花や採餌行動に波長選好性を利用している可能性が考えられる。同様に *Thrips* 属の緑波長選好性も餌資源の葉上に定位、採餌するために適応した形質といえる。したがって、アザミウマ類の多様な波長選好性は、種分化に伴う食性と栄養要求性の違いに起因して獲得された形質であると推察される。

4) まとめと今後の課題

アザミウマ類のカラー粘着トラップでは、波長選好性の多様性を十分に考慮して策を講じる必要がある。農作物上の優占種に有効な特定色の粘着トラップを選定し、物理的、生物的防除などを交えた防除が望ましい。ミカンキイロアザミウマやヒラズハナアザミウマには波長365nmを反射する白色トラップに光反射シートの併用が考えられる。また、ミナミキイロアザミウマやネギアザミウマには波長525nmを反射する緑色トラップと近紫外線除去フィルムの併用によって侵入抑制を含む高い防除効果が得られる可能性がある。

3. 紫色光による天敵誘引法

1) 研究の背景

現在、害虫を捕食する天敵を用いた生物的防除法に期待が集まっている。ナミヒメハナカメムシは国内に広く分布するため、露地や施設栽培で利用できる土着天敵である (永井, 1991; 大野ら, 1995)。また、タバコカスミカメはトマト黄化葉巻病を伝搬するタバココナジラミの捕食者であり、主に施設栽培での利用が進んでいる (土田ら, 2017)。しかし、光照射は天敵のみならず害虫も誘引してしまうため、生物的防除と組み合わせた利用は難しいと考えられてきた。

2) 紫色光選好性の発見と反応特性

荻野ら (2015) と Uehara *et al.* (2019) は、天敵の作物に対する誘引・定着を促す技術を開発するために、昆虫の可視光域を含む6色のLED (紫外; 波長365nm, 紫; 405nm, 青; 450nm, 緑; 525nm, 橙; 590nm, 赤; 660nm) を用いて波長選好性を調査した。その結果、驚くべきことに両天敵ともに波長405nmの紫色光に強く誘引されることが判明した。アザミウマをはじめとしてほとんどの昆虫は紫外光や緑色光に波長選好性を示すことが報告され

ている。このことから、紫色光を用いれば天敵を選択的に誘引できるのではないかと考えた。

次に Ogino *et al.* (2019) は、光による害虫の誤誘引を減らすためにナミヒメハナカメムシの活動リズムを調査した。その結果、ナミヒメハナカメムシは、日出から活動量を徐々に増していき、日没から2時間後まで活動することが判明した。タバコカスミカメにおいては、日没前後に活動することが報告されている (Nakano, unpublished data)。一方で、アザミウマやコナジラミは、日出から正午の間が最も活発で、日没後の活動量は低いことが報告されている (Taravati *et al.*, 2014 ; Liang *et al.*, 2010)。このことから、日没前後の時間帯に紫色光を点灯することで、天敵誘引の選択性を高められると考えた。

3) 紫色光選好性の実用化

野外の栽培環境でナミヒメハナカメムシの誘引試験を行った。天敵温存植物を周囲に植えたナス露地圃場を準備し、波長405nmのLEDを照射する区画(点灯区)としない区画(非点灯区)を設け、ナスの葉に発生したヒメハナカメムシとアザミウマの生息密度を比較した。その結果、点灯区ではヒメハナカメムシ密度は対象区の2.9倍にまで上昇し、アザミウマ密度は60%以下に減少した (Ogino *et al.*, 2016)。同時に

ヒメハナカメムシ幼虫が2.6倍に増加し、作物上で産卵、増殖することが判明した。天敵の増加と害虫の減少は1カ月以上にわたって持続し、ヒメハナカメムシの約6割からアザミウマDNAが検出され、誘引された天敵が作物上の害虫を捕食し、密度抑制に働いていたことが証明された (図3)。

つぎにトマト栽培施設においてタバコカスミカメの誘引試験を行った。奥行き10mのビニールハウスの入口に温存植物を定植し、波長405nmのロープ状LEDを奥から点灯してタバコカスミカメの移動拡散を調査した。その結果、点灯区のトマト上には3.6倍のタバコカスミカメが確認された。非点灯区では温存植物付近にしかタバコカスミカメが観察されなかったのに対し、点灯区では温存植物から最も離れたトマトまで移動していた。これらの誘引試験から、波長選好性と点灯時間の2点に工夫を施すことで、光による天敵の選択的な誘引が可能であることが証明された。

紫色光を使った天敵誘引技術には幾つかの特徴がある。1つは「即効性」である。いずれの誘引試験でも作物上への天敵の移動は点灯からすぐに確認され、ナス圃場では点灯3日目にアザミウマの密度が8割減少した。2つ目は、「拡散効果」である。トマト施設では、天敵が光の照射範囲内にある全株に行き渡った。このこと

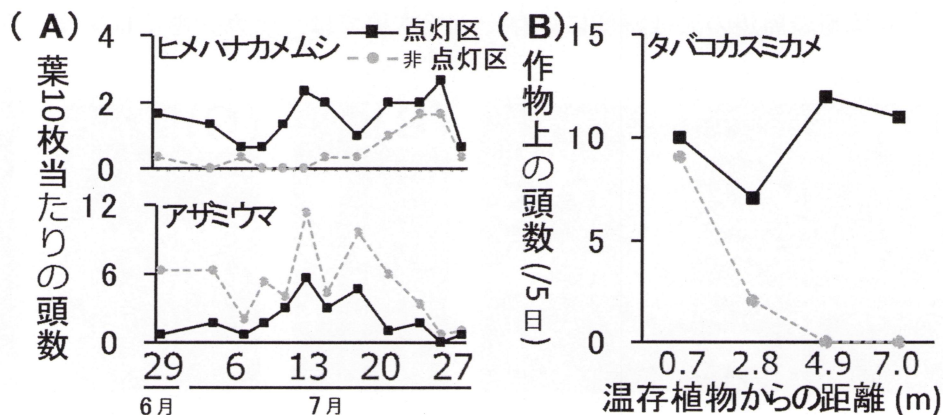


図3 誘引試験での各天敵および害虫の密度変化

(A) 露地におけるヒメハナカメムシの誘引試験 (B) 施設におけるタバコカスミカメの誘引試験

から紫色光には、天敵を広範囲の作物上に分散させる効果があることが分かる。3つ目は「持続性」である。ヒメハナカメムシの捕食量は5齢幼虫が最も多く (Nagai and Yano, 2000), タバコカスミカメも5齢幼虫の捕食量が最も多い (Gavkare *et al.*, 2016)。これまでの誘引試験から、紫色光には両種の成虫の産卵と幼虫の密度増加を促す効果が認められた。幼虫は翅を持たず移動能力が低いため、作物上で長い期間にわたって害虫の密度抑制が期待できる。

4) まとめと今後の課題

予想外の発見に端を発した紫色光による天敵誘引であるが、さまざまな捕食寄生性昆虫に適用できる可能性が期待できる。天敵を選択的かつ素早く作物上に誘引し、害虫被害を長期間にわたって抑制できる。現在、本技術は企業3社にて商品開発され市販されている。シグレイ製品は、ソーラー発電により電源を必要とせず、暗くなると自動点灯する。ネイブル製品は、AC電源を用いて軽量かつコンパクトに高い光量を照射する。開発中のアグリセクト製品は、充放電回路を備えたポータブル型である。いずれも設置が容易で維持費のかからない防除資材である (図4)。

最後に本技術の利用にあたって留意点がある。それは天敵温存植物の定植と点灯開始の時期である。本技術は天敵を誘引し害虫を防除するため、防除効果は圃場周辺の天敵密度に依存

する。そのため、あらかじめマリーゴールドやソバといった温存植物を圃場内に定植し天敵密度を高める必要がある。また、害虫発生初期に防除するために、紫色光を害虫が確認される前から点灯しておく必要がある。以上の留意点を踏まえて本技術を使用することで、生物的防除の効果をより向上させることができる。

4. 赤色系防虫ネットによる微小害虫防除

1) 研究の背景

近年、トマト、ネギ、トウガラシなどの野菜栽培では、アザミウマ類、コナジラミ類などの微小害虫が多く発生し、生産物の品質低下などの被害が生じている。また、アザミウマ類やコナジラミ類の中には、病原性ウイルスを媒介する種も存在する。さらに、これらの微小害虫には、殺虫剤感受性を低下させた個体群が国内外で報告 (Nauen *et al.*, 2002; 武田, 2014; 徳丸, 2022) され、殺虫剤のみに頼った防除には限界が生じている (徳丸・林田, 2010; 徳丸・上山, 2016)。このため、殺虫剤に頼らない防除技術の開発が望まれている。殺虫剤に頼らない物理的防除法の一つとして、赤色系防虫ネットの利用が広がりつつあり、本誌においてもすでにネギアザミウマに対する防除効果について紹介した (徳丸・上山, 2016)。しかし、赤色系防虫ネットに対するネギアザミウマ以外の各種微小害虫の行動反応特性については不明であった。そこで本稿では、ミカンキイロアザミウマ、ヒラズ

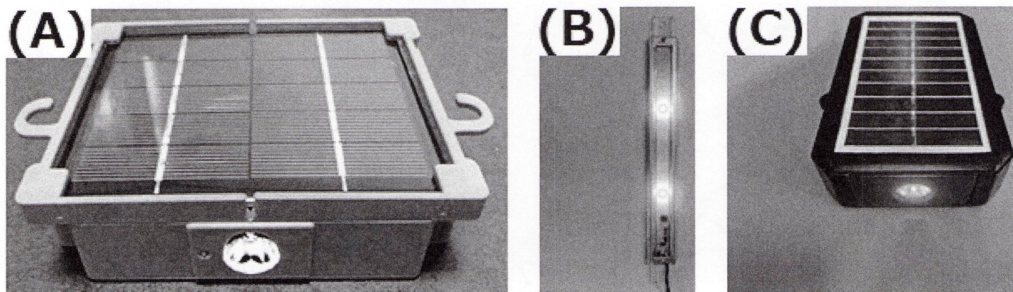


図4 各メーカーの天敵誘引光源

(A) 天敵誘引定着用ソーラーパネル型紫LED [(株)シグレイ] (B) BIアトラクター [(株)ネイブル] (C) 現在開発中のLED光源 [(株)アグリセクト]

ハナアザミウマおよびタバココナジラミの赤色系防虫ネットに対する行動反応特性とハウストマトにおける赤色系防虫ネットの各種微小害虫に対する防除効果について報告する。

2) 赤色系防虫ネットに対する微小害虫の行動反応特性

ミカンキイロアザミウマ, ヒラズハナアザミウマおよびタバココナジラミに対して0.8mm目合いの赤白 (縦をポリエチレン製赤糸, 横をポリエチレン製白糸で平織り), 赤黒 (赤白ネットの白を黒に改良), 赤赤 (赤白ネットの白を赤に改良), 黒白 (縦糸を黒, 横糸を白に改良), 黒黒 (縦横共に黒に改良), 白 (縦および横糸を白で平織り) の防虫ネットを用いて, 成虫の侵入抑制効果を調べた。その結果, ミカンキイロアザミウマでは, 赤黒および黒白ネットが白ネットに比べてネット内への侵入を約3分の1に抑えた。ヒラズハナアザミウマでは, 赤白ネットが白ネットに比べてネット内への侵入が約3分の1に低下した。タバココナジラミでは, 赤黒ネットが白ネットに比べてネット内への侵入を約5分の1に抑えた (図5)。

3) ハウストマトにおけるコナジラミおよびアザミウマの防除効果

2016年5~8月まで京都府農林水産技術センター農林センター内のビニルハウス4棟でトマトを栽培して試験を行った。試験区はハウス1棟 (面積68.4㎡:7.2m×9.5m) を1区とし, ハウスサイドおよび開口部に0.8mm目合の各種防虫ネット (赤白, 赤赤, 赤黒および白) を展張した。調査は約1週間間隔で行い, 各試験区任意の20株の上位, 中位および下位におけるアザミウマ類およびコナジラミ類の成幼虫を種別に数えた。その結果, アザミウマ類 (ミカンキイロアザミウマおよびヒラズハナアザミウマがほぼ1対1で発生) の発生は, 赤黒ネット区および白ネット区で5月下旬から始まり, その後,

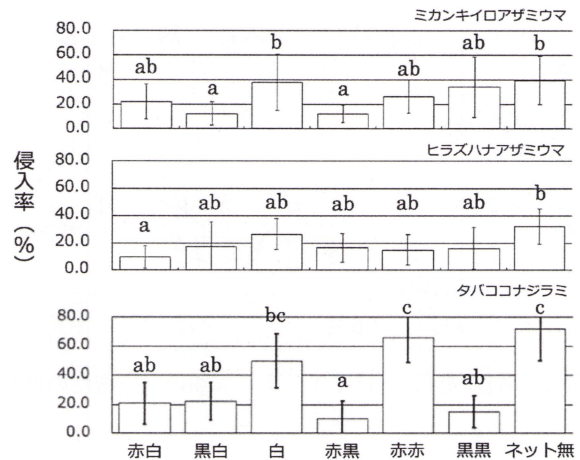


図5 各種防虫ネットにおける各微小害虫の侵入率

白ネット区では増減を繰り返し, 8月上旬に最も高い発生密度 (133匹/60葉) になった。8月中旬における赤白および赤赤ネット区での発生密度は, とともに白ネット区の約3分の1に抑えられた (図6)。また, コナジラミ類 (オンシツコナジラミのみ発生) の発生は, 白ネット区で6月中旬から始まり, 赤赤および白ネット区では増加傾向に推移した。一方, 赤白および赤黒ネット区における発生密度は0~7匹/60葉の値で推移し, 8月中旬における赤白および赤黒ネット区での発生密度はともに白ネット区の10分の1以下に抑えられた (図7)。

4) まとめと今後の課題

ミカンキイロアザミウマは赤黒および黒白, ヒラズハナアザミウマは赤白, タバココナジラミは赤黒の防虫ネットで高い侵入抑制効果が確認された。また, トマトハウスにおいて防虫ネットをハウスサイドおよび開口部に展張して防除効果について調べた結果, アザミウマ類に対しては赤白および赤赤ネット, コナジラミ類に対しては赤黒ネット区で高い防除効果が確認された。また, 防除効果の高い糸の組み合わせは害虫種により異なることが明らかになった。

今回紹介した赤赤および赤黒ネットは, 2018年1月から販売が開始されており (赤黒ネット

参考文献

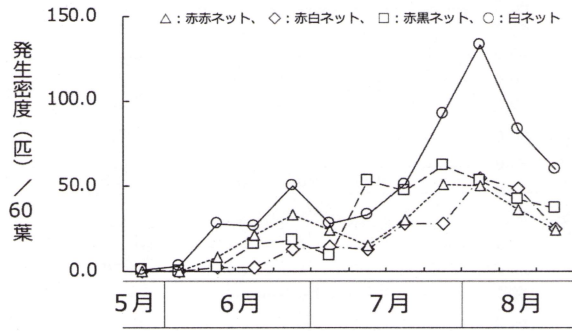


図6 各試験区におけるアザミウマ類の発生密度の推移

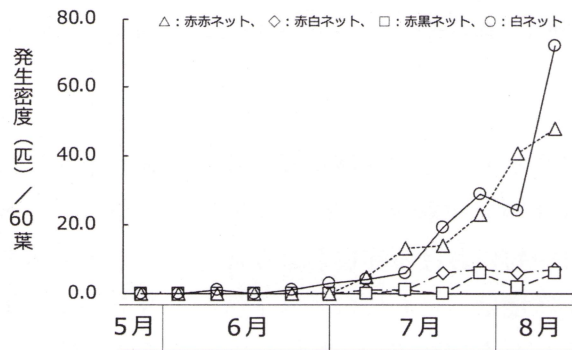


図7 各試験区におけるコナジラミ類の発生密度の推移

は受注販売),すでにトマトなどの施設野菜を中心に普及が進んでいる。また,本技術は農林水産省の「みどりの食料システム戦略技術」技術カタログにも掲載されている。さらに,筆者らは赤色系防虫ネットのチャのチャノキイロアザミウマ(徳丸,2020)ならびにニンジンのネギアザミウマおよびクロゲハナアザミウマ(片山ら,未発表)に対する防除効果も確認しており,今後は他の品目においても利用が期待される。海外では,モモを赤色ネット下で栽培することにより一果実重が増加すると報告されている(Shahak *et al.*, 2004)。赤色系防虫ネットの作物への影響については不明な点が多く,今後,各作物別に調べる必要がある。

謝辞

本研究の一部は,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」(管理法人:農研機構生研支援センター)により実施した。

遠藤信幸ら(2014)日本応用動物昆虫学会誌, 58(1): 23-38.

Gavkare, O. and Sharma, P. L. (2016) Journal of Agricultural and Urban Entomology, 32: 50-58.

Liang, X. H. *et al.* (2010) Insect Science, 17: 535-541.

松本由記子ら(2014)日本応用動物昆虫学会誌, 58(2): 111-118.

Muvea, A. M. *et al.* (2014) International journal of tropical insect science, 34(3): 197-206.

永井一哉(1991)日本応用動物昆虫学会誌, 35: 283-289.

Nagai, K. and Yano, E. (2000) Applied Entomology and Zoology, 35: 565-574.

Nauen, R. *et al.* (2002) Pest Manag. Sci., 58: 868-875.

荻野拓海ら(2015)日本応用動物昆虫学会誌, 59: 10-13.

Ogino, T. *et al.* (2016) Scientific reports, 6: 32302.

大野和朗ら(1995)福岡県農業総合試験場研究報告, 14: 104-109.

Prema, M. S. *et al.* (2018) Journal of Entomology and Zoology Studies, 625-740.

Schulte, A.J. *et al.* (2019) Beilstein Journal of Nanotechnology, 10, 459-466.

Shahak *et al.* (2004) Acta Hort. 636: 609-616.

Shimoda and Honda (2013) Applied Entomology and Zoology, 48: 413-421.

Stukenberg, N. and Poehling, H. M. (2019) Annals of Applied Biology, 175(2): 146-163.

武田光能(2014)植物防疫, 68: 248-254.

Taravati, S. *et al.* (2014) Florida Entomologist, 97: 1842-1844.

徳丸 晋・林田吉王(2010)応動昆, 54: 13-21.

徳丸 晋・上山 博(2016)JATAFFジャーナル, 4(7): 31-34.

徳丸晋虫(2020)関西病虫研報, 62: 1-4.

徳丸晋虫(2022)応動昆, 66: 45-52.

土田祐大ら(2017)日本応用動物昆虫学会誌, 61: 135-137.

Uehara, T. *et al.* (2019) BioControl, 64: 139-147.

1) 〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
 2) 〒305-8634 茨城県つくば市大わし1-2
 3) 〒619-0244 京都府相楽郡精華町北稲八間大路74