

論考●特集●里山

里山の天敵を使った害虫管理

高林純示 (京都大学生態学研究センター教授)

Junji TAKABAYASHI



1956年、兵庫県生まれ。1986年、京都大学大学院農学研究科博士課程修了。1987年、京都大学助手(農学部附属農薬研究施設)、1995年、京都大学助教授(農学研究科)などを経て、2001年、京都大学教授(生態学研究センター)、現在に至る。2000年、日本応用動物昆虫学会学会賞受賞。主な著書に『虫と草木のネットワーク』、共著に『共進化の謎に迫る——化学の目で見える生態系』『寄生バチをめぐる「三角関係」』など。

高齢化、兼業化等によって労働力が減少すれば、そのような取り組みが思うように進まないこともある。一方、里山の農生態系において特徴的なのは、豊かな自然を背景に多種多様な害虫が圃場^{ほじょう}で発生するという点と、それらの天敵も涵養されているという点である。そこでこのような特徴を生かして、里山に土着する天敵を利用し、人にも環境にも優しく里山に適し省力化した害虫管理の可能性を、産官学(京都大学、農研機構、曾田香料、四国総研)で検討してきた。本稿ではその取り組みを紹介したい。

美山という里山

われわれは、里山で土着天敵を利用するケーススタディーを京都府南丹市美山町で行った。日本の原風景のような美山町は、豊かな自然に囲まれた総農家戸数約800戸の里山である(図1)。少量多品目生産が主であり、また京都の伝統野菜の1つであるミズナのハウス生産が盛んである。そこではさまざまな害虫が発生するが、減農薬、無農薬栽培に取り組んでおり、美山認証という制度を定めている。現在の美山町のホームページを見ると次のようにある。

美山農産物認証制度は、農産物の販売拡大、ひいては農家の所得向上につなげることを目的として、平成16年4月に制定され、野菜に関して認証を行っています。栽培基準は、金ランクと銀ランクの2区分となっています。認証実績をみると、約7割が金ランク、約3割が銀ランクで栽培されています。高齢

者や女性を中心とした認証農家によって栽培された認証野菜は、美山町内の各地区の農産物直売所で販売されている他、学校給食に供給されています。また、第3セクターの美山ふるさと(株)を主に経由して町外に出荷されており、消費者宅配産直や、定期的な野菜市、飲食店、自然食品店等で販売しています¹⁾。

金ランクとは、化学肥料及び農薬を不使用か、有機JAS認定資材のみに使用を限定、銀ランクは、化学肥料、農薬(普通物に限定)を必要最小限に厳しく限定とあり、なかなか厳しい条件で、現在金ランクが約7割というのはすごい。われわれが研究を実施していた時期は認証制度が発足したばかりのころであった。

里山環境では多様な害虫が発生すると述べたが、コナガ(図2)もそのひとつである。この害虫は当時、美



図2 コナガとその幼虫(提供:安部順一郎)

はじめに

日本の農地の約4割は里山にあるそうだ。里山農業の多くは少量多品目の生産だが、減農薬・無農薬農業に積極的に取り組んでいる。しかし



図1 美山町の風景写真(提供:安部順一朗)

山町の雨よけハウス（以下ハウス）でのミズナの生産で最も問題となっていた。近畿中国四国農業研究センターの安部順一朗博士、長坂幸吉博士（長坂さんは現在中央農業総合研究センター）らが、コナガが発生したミズナ生産ハウスを調査したところ、ハウス内のコナガ数の増加の後を追うように、コナガ幼虫の天敵コナガサムライコマユバチ（以下コマユバチと略、図3）もハウス内で観察されるようになった。コマユバチ



図3 1ミリ目合いのメッシュの上を歩行するコナガサムライコマユバチ(本文ではコマユバチと略)(提供:小原祥嗣)

は、アブラナ科植物がコナガの被害を受けたときに特別に生産する揮発性物質に誘引されることが明らかになっている（後述）。里山環境でひっそりと土着しているコマユバチが、コナガが食害したミズナの匂いに誘引されてハウスに侵入した可能性が高い。われわれは、土着のこのコマユバチを有効利用してコナガを防除しようと考えた。

ミズナの経済的許容水準とコマユバチの必要誘引数を探る

現在ペコIPMパイロット社というベンチャー企業を営んでいる浦野知博士（当時九州沖縄農業研究センター研究員）は、美山町のミズナ農家に泊まり込んで、ハウス内での手作業のミズナ収穫を手伝いながら、どの程度のコナガ被害があれば何らかの対策をとるのか（要防除水準：Control Threshold；CT）について聞き取りを行った。美山認証発足当時、平成16年ごろの話である。その

結果、おおむね以下のようなことがわかった。聞き取り農家では、（1）葉あたり5個以上のコナガ等の幼虫の食い跡があれば、その葉を取り除く。（2）そのような葉が株あたり2割以上あれば株は出荷しない。（3）そのような株が畝あたり2割以上ならば農薬等の対策をとる。（4）また20株のうちコナガ幼虫が1匹以上いたら農薬等の対策をとるというものだ。（4）から株あたり0.05匹のコナガの要防除水準と言える。成虫に関しては、左記の安部さんらの情報では、ハウスあたりコナガのメス成虫を1匹でも見つけたら、何らかの対策が必要とされるということであった。美山町のミズナ生産における要防除水準はかなり厳しいようだ。美山町のハウスの標準サイズでは、1棟あたり播種期のそろったミズナが9,000株栽培されている。株あたり0.05匹がリミットだとすると、ハウス内のコナガ幼虫を常時450匹以下に維持しているかぎり、コナガを防除す

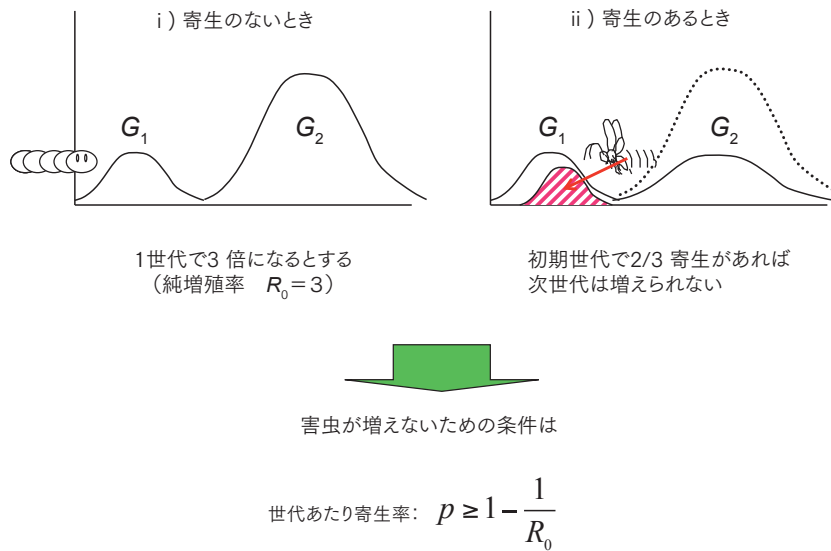


図4 寄生バチの寄生によって害虫が増えないための必要寄生率の考え方

る必要がないということになる。では、コマユバチによってこの条件をクリアするにはどうしたらよいのだろう。

浦野さんは、簡単な数式で必要寄生数をもとめる考え方を考案した²⁾。それは1から害虫の増殖率の逆数を引いた値が必要寄生数という数理モデルである(図4)。たとえば、害虫が3倍に増えるなら、1から3分の1を引いた3分の2が必要寄生数となる。なぜなら、残った3分の1が次世代で3倍になっても、最初と同じ1であり、世代間で個体数の増加はない。言われてみれば簡単でただちに納得なのだが、自分で思いつくかと言われれば、まず無理だろう。この考え方でハウス内の450匹の幼虫の次世代もやはり450匹であり続けるには、コナガの増殖率を7倍と見積もると、1世代あたり387匹がコマユバチに寄生されなければならないことになる。はたして可能なのか？

コマユバチの能力と分布

可能かどうかを知るためには、コマユバチがどのくらい優秀な天敵なのかを確認しなければならない。この研究は、中央農業研究センターの下田武志博士と光永貴之博士が実施

した。繰り返し実験が要求される大変な検証だったが、結論としては餌(糖)がある条件では、この寄生バチの日当たり寄生可能なコナガ数はおおむね24匹、餌なしではおおむね10匹とわかった³⁾。387匹に寄生するコマユバチ数は、餌(糖質)がハウス内であればコナガ1世代あたりのべ16匹でよいことになる。実際にはハチは寿命が2週間程度である。そこで誘引されたハチが、低く見積もって3日間働くとしたときの必要定着ハチ数は、5.4匹。1日当たり1.8匹誘引しておけば、美山町のCTをクリアで

きる。小スケールの試験用ハウス内にコナガを0.05匹/株の密度で接種し、コマユバチを上記の条件を満たす数で最初に1回だけ放飼すると、温室内のコナガ個体群はCT以下に長期間制御された(安部ら,2007)⁴⁾。うまくいきそうだ。

1日あたり約2匹を誘引するとして、では美山町にこの優秀な寄生バチが広く分布しているのかを確認しなければならない。そのために、コナガを接種したコマツナ株を入れた大型のプランターを作り、それを1ミリ目合いのメッシュで包んだモニターを美山町の各地に設置した。図3からわかるように、コマユバチはこの目合いを楽に通過できるが、接種したコナガは通過できない。ハチはプランター内の食害コナガ株のかおりに誘引されメッシュを通過して寄生に至る(後述)。うまくできている。ただ、コナガは逃げ出さないといっても、コナガがついた植物を農家圃場に置くというのは、置く側にも置かれる側にも心理的抵抗があった。この調査は安部さんと長坂さんが行ったが、農家との信頼関係がなせる業であろう。調査の結果、コマユバチは広く美山町に分布していることが分かった(図5)。美山町には、豊かな奥山環境(芦生原生林)



コナガコマユバチは美山町で最も多く見られるコナガの捕食寄生者であり、美山町に広く分布している

図5 コナガサムライコマユバチの美山町における分布

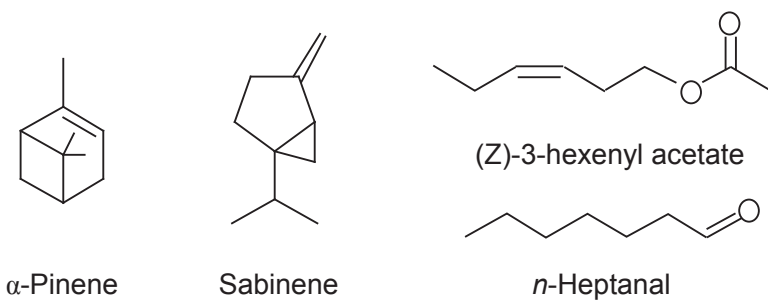


図6 コナガ食害キャベツから放出されるコナガサムライコマユバチ(本文ではコマユバチと略)誘引成分4成分が混合されて初めて誘引性を示す

を背景にアブラナ科の雑草(イヌガラシ等)、害虫であるコナガ、そしてその天敵であるコマユバチが涵養されていたのだ。

コナガ食害株が放出するコマユバチ誘引物質を決める

1983年ごろより、害虫の食害を受けた植物は、その特異的な捕食性天敵を呼び寄せるかおりを放出し始める、という現象が明らかになってきた。「ボディーガードを雇う植物」の発見である。現在では、50種以上の植物と70種以上の植食性昆虫の組み合わせで植物がボディーガードを呼ぶという現象が報告されている。

アブラナ科植物-コナガ幼虫-コマユバチ三者系でも同様に被害株が出すかおりにコマユバチは誘引された⁵⁾。そのなかでもキャベツ株やミズナ株がコナガに食害された場合、コマユバチをよく誘引した。食害株の化学分析と誘引性の検定を重ねた末、コナガ食害キャベツ株から健全キャベツ株よりも多く放出される4つの成分の混合物((Z)-3-hexenyl acetate, myrcene, sabinene, n-heptanal)に対してコマユバチが誘引されることを京都大学白眉センター(現在、龍谷大学農学部講師)塩尻かおり博士、農業環境技術研究所の釘宮聡一博士(両名とも当時生態学研究センター研究員)、生態学研究センターの小澤理香博士らが解明した(図6)⁵⁾。興味深いことに、各成分単独では誘引されず、4成分を混合して初めてコマユバチは誘引される。

野外で誘引の確認

コマユバチが優秀であることはわかった。コナガの発生のいかにかわからず、餌のある環境では毎日2匹ほど誘引しパトロールしてもらえばよいことも予測できた(コナガがいなければコマユバチには無駄足になってしまい申し訳ないが、そこは目をつぶる)。誘引成分も候補が出た。しかし、まだ農家圃場で試す前に確認することがあった。4成分の誘引性は、30センチ四方の小さな空間で確かめたに過ぎない。変動する野外環境下で長距離から誘引できるのだろうか。本研究とは別のテーマで共同研究している山口大学の植物生理学者の松井健二教授が面白いことを言った。

「体長2ミリのコマユバチが50メートル先の寄主を見つけるための移動は、比率的には身長165センチのマラソン選手が42.195キロ走るとほぼ同じですよ」

なるほど。そう言われてみると寄生蜂がいかに困難なことをしているのかがわかる。われわれは美山町でハウスの四方にひっそりと生息しているコマユバチを毎日少数ずつ誘引しなければならない。はたして可能なのか。さまざまな空間スケールで調べたが、決定打は名城大学の上船雅義博士(当時生態学研究センター研究員)、前出の釘宮さんらが生態学研究センターの実験圃場で行った結果で、4成分のブレンドが50-70メー

トル離れたところのコマユバチを誘引することを示した⁶⁾。次に、共同研究者である曾田香料の佐野孝太博士らによって剤型も検討された。最初はトイレの芳香剤型であったが、最終的には天敵誘引成分をマットに含浸させフィルムに封入する剤型を開発した。これにより天敵誘引剤の扱いや設置が簡単になり、また長期間徐放性が維持できた。

ダモクレスの剣

「餌(糖質)のある環境では毎日2匹ほど誘引しパトロールしてもらえばよい」と先に述べたが、美山町のみならずこのミズナ里山ハウスでも、その内部で雑草の花が咲いているということはまずない。コマユバチの餌はハウス内には何もないのだ。豊かな自然に囲まれている美山町では、花はむしろハウス外にある。せっかく誘引したコマユバチが空腹になり、餌を求めてハウス外に出てしまつては元も子もない。ではどうするか。ハチミツを入れたボトルをハウスに設置すればよいということになった。前出の下田さん、光永さんらが中心となって給餌のための黄色ボトルの設置方法と形状をデザインし、その給餌効率を確認した⁷⁾。ボトルを黄色にするのは、空腹のコマユバチを呼び寄せる効果があるためである⁸⁾。これは共同研究者である四国総研の研究員(当時)小原祥嗣博士の大学院時代の偶然の発見(コナガ幼虫に寄生する別種の寄生蜂が黄色に誘引される)からヒントを得た。ただこの給餌ボトルは、侵入したコナガのメス成虫によっても利用されることが容易に予想され、その場合はコナガのメス成虫の産卵数を増やす。いわば両刃の剣である。コマユバチをハウス内に留め、多くのコナガ幼虫に寄生するコナガ抑制効果が勝って防除に成功するか、コナガのメス成虫の産卵数の増加が勝つてコナガの発生の手助けになるか、

これについては慎重に検討を重ねたが、最終的にはやってみなければわからない。実証試験では、ハウスに誘引剤とハチミツ給餌ボトルを同時設置したが、その期間中はこのボトルはいわばダモクレスの剣（心配な状況を作り出すもの）であった。

いざ実証

複数年で実証試験を行ったが、本稿執筆時点では成果論文作成中でもあるので、2006年度にうまくいったときの結果の概略を紹介する（2006年度生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業研究成果集より）。

基本的な考え方としては、

- 1) コナガのハウスへの侵入は、4月頃から10月末までいつでも起こりうる。侵入は偶然と考える。
- 2) そこで4月からコナガ発生期間中継続して、誘引剤とハチミツ入りボトルを一定数ハウス内に設置する。
- 3) それによって、コナガの発生のいかにかわらずハウス内にコマユバチを低密度で呼び寄せ、パトロールさせる。
- 4) これで、偶然侵入したコナガのメス成虫が産卵したとしても、そこから孵化したコナガ幼虫の食害レベルが低いときに、前もって呼んでおいたコマユバチが先手をとって寄生し、コナガ発生をCTレベル以下に保つことができる（はずである）。

さて、調査であるが、これは安部さんと上船さんが中心となって行った。複数の農家の協力を得て、22ハウスで調査することができた。11ハウスで誘引剤とハチミツ入りボトルを設置し、11ハウスはなにも設置せず、あとは各農家の栽培管理に任せた。コナガ幼虫の密度が0.05匹/株であるかどうかを2週間毎に22ハウスで調査するのは労力的に無理がある。そこで、ハウス内に黄色の小さな粘着板（15cm×30cm）を作業の邪魔にならないように1つだけ設置させてもらい、そこに捕獲されたコナ

ガ成虫数で評価した。ヒヤヒヤしながら待つこと6カ月、結果を見るとコナガ成虫捕獲数は全期間を通した平均値で見ると、無設置（対照区）ハウスに比べて誘引剤、ハチミツ入りボトル設置ハウスで約3分の1に減少した。マイルドな効果ではあるが防除効果を確認できた。調査日毎の発生率でも、常に設置ハウスが非設置ハウスの発生率を上回ったので、期間を通してコマユバチはハウスに（少数）誘引されたと考えてよい。

この2006年の結果から言えることの1つは、誘引剤とハチミツ入りボトルのハウス内設置によるコナガ防除技術は、効果がマイルドであり、それだけで独立して使用して効果がある技術ではないということだ。もしさらに強力な誘引剤成分を開発できたとして、それによって里山周辺環境に生息するコマユバチ個体群（供給源）から多くのコマユバチをハウスに集中させれば防除効果はさらに上がるかもしれないが、今度は里山の供給源となる個体群が枯渇するかもしれない。われわれはこの技術を、里山がコナガの天敵コマユバチを涵養しているという生態学の用語で言うところの「生態系サービス」（自然がわれわれに与えてくれる有形無形の恩恵）をすこしだけ余分にいただくという技術であると位置づけたい。他のさまざまな技術（物理的防除技術、微生物農薬、フェロモン剤等）と組み合わせることによって、環境に優しい総合防除技術へと展開できるものと考えている。ただ残念なことに現在の法律では、この天敵誘引剤も農薬の一種とされる。したがって農薬登録が必要になるが、それに関してはハードルが高くこれからの段階である。

謝辞

本研究は生研センター生物系産業創出のための異分野融合研究支援事業の支援を得て行ったものである。

引用文献

- 1) 美山町のホームページ
<http://www.miyama-nakagurashi.jp/ninsyouyasai/ninsyou.html>
- 2) Urano S, Uefune M, Abe J and Takabayashi J (2011) Analytical model to predict the number of parasitoids that should be released to control diamondback moth larvae in greenhouses. *J Plant Inter* 6: 151-154
- 3) Mitsunaga T, Shimoda T, Yano E (2004) Influence of food supply on longevity and parasitization ability of a larval endoparasitoid, *Cotesia plutellae* (Hymenoptera: Braconidae). *Appl Entomol Zool* 39: 691-697
- 4) 安部順一郎、浦野知、長坂幸吉、高林純示 (2007) 「ハウス栽培のコマツナを低密度で加害するコナガに対するコナガサムライコマユバチの必要放飼率」『近畿中国四国農業研究センター研究報告』6: 125-132
- 5) Shiojiri K, Ozawa R, Kugimiya S, Uefune M, van Wijk M, Sabelis M W, Takabayashi J (2010) Herbivore-specific, density-dependent induction of plant volatiles: Honest or “Cry Wolf” Signals? *PLoS One* e12161
- 6) Uefune M, Kugimiya S, Sano K and Takabayashi J (2012) Herbivore-induced plant volatiles enhance the ability of parasitic wasps to find hosts on a plant. *J Appl Entomol* 136: 133-138
- 7) Shimoda T, Mitsunaga T, Uefune M, Abe J, Kugimiya S, Nagasaka K, Sano K, Urano S, Suzuki Y, Yano, E and Takabayashi J (2014) A food-supply device for maintaining *Cotesia vestalis*, a larval parasitoid of the diamondback moth *Plutella xylostella*, in greenhouses. *BioControl* 59:681-688
- 8) Uefune M, Kugimiya S, Ozawa R and Takabayashi J (2013) Parasitic wasp females are attracted to blends of host-induced plant volatiles: do qualitative and quantitative differences in the blend matter? *F1000Research* 2:57 (doi: 10.3410/f1000research.2-57v1)