天敵利用を基幹としたIPMを農業経営に取り込む
―SDGs時代の実践的害虫管理―

柿元　一樹*

2020年11月26日，当会は一般財団法人農林水産奨励会との共催により，鹿児島県農業開発総合センター専門研究員の柿元一樹氏をお迎えして，第４回農業懇話会をオンライン方式で開催しました。以下は講演と質疑応答の内容です。

講　演

はじめに

柿元　一樹 氏

私は鹿児島県庁に入って23年で，行政，研究，普及機関での仕事に勤めてきました。研究機関での仕事が最も長いのですが，この間，これからお話するIPMに何らかの形で携われたことは幸運であったと思っています。私はこの過程で，しっかりとした根拠・データに基づくことは当然としても，常に現場の方々と対話しながら技術確立を図ることを信念にしてきました。例えば，われわれが提案する技術も生産者が実施できる場合と難しい場合があるので，生の意見も取り入れながら試行錯誤して技術を作り上げてきました。

最近よく耳にするSDGs（国連の「持続可能な開発のための国際目標」）という言葉は，持続可能な社会の実現のために求められる国際的な目標ですが，農業分野として取り組む肝になるのがIPMだと思います。本日は，ここ10年ほど私が取り組んできた仕事を中心に紹介します。

前半部分で天敵についての基礎的な話をした上で，まず天敵（われわれ人間にとっては益虫です）がどういうものかを説明し，野菜の施設栽培と露地栽培における具体的な事例を紹介します。ポイントとなるのは，①天敵により利用する餌が違うことと，②そうした特性が異なる天敵をうまく組み合わせ，③さらに天敵がうまく働ける住処を人為的に作っていくことです。

IPMとは

IPMの日本語訳は「総合的病害虫・雑草管理」です。そのイメージを**図１**に示しましたが，産地に対しては階層的に提案しています。基盤となるのは栽培作業を通じた耕種的防除で，農薬もうまく取り入れながら（化学合成農薬も完全に否定するものではありません），必要に応じて物理的な防除手段（防虫ネット，光や水を利用した防除）も取り入れていく病害虫・雑草防除法です。

FAO（国連食糧農業機関）が定義している

＊かきもと　かずき　鹿児島県農業開発総合センター専門研究員　博士（農学）。2021年より株式会社 Field Styled Lab.　代表取締役

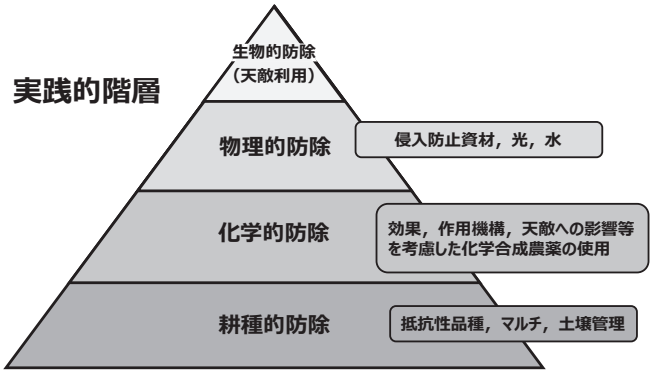

図１　IPM（総合的病害虫・雑草管理）における各種防除法の実践的階層と個別防除技術

IPMの考え方では，こうした諸技術を矛盾なく取り入れることがポイントです。つまり農業経営という経済活動において，こうした防除手段をいかに合理的に取り入れていくかが大事です。そして，さらに圃場に劇的変化をもたらすのが天敵を使った生物的防除だと考えています。

天敵利用のための基礎情報

天敵について

皆さんご存じの代表的な天敵であるナナホシテントウや肉食のカメムシは，捕食性天敵です（**写真1A，1B，口絵参照**）。一方，アブラムシの寄生バチ（**同1C，口絵参照**）は，メスが一瞬でアブラムシに卵を産み付けて，アブラムシの体内で孵化（ふか）したハチの幼虫はアブラムシの体内組織を食べて育ちます。寄生性天敵です。害虫であるアブラムシは，通常，葉の裏などで**写真２左**のように群れをなしていますが，寄生を受けたアブラムシはハチの蛹と化してしまい（**同右**），全く姿が変わってしまいます。

天敵利用生物的防除の基本的活用方法

天敵を害虫防除に使う方法は，基本的に二つの入り口があります。一つは露地栽培作物の場合です。そこには自然の中に天敵の役割を果たす生物がいるので，地域にもともと住んでいる土着天敵を生かす方法が一般的です。一方，施設栽培の場合には，自然の天敵がハウスに入ってくるのは難しいので，市販の天敵（生物農薬）を生産者が購入して自ら放す（放飼）行為が主体となります。

天敵を放すという作業自体は通常の化学農薬の散布作業とは違い，防護服も不要なので，作業性に優れるのが大きな魅力です。一方，露地栽培で小さい天敵が働くシーンを確認するのは難しいものです。しかし，いろんな農薬を使ってもダニの被害を抑えることができなかった茶畑で，思い切って農薬の散布を控えてみたところ，全く被害が見られなかったこ

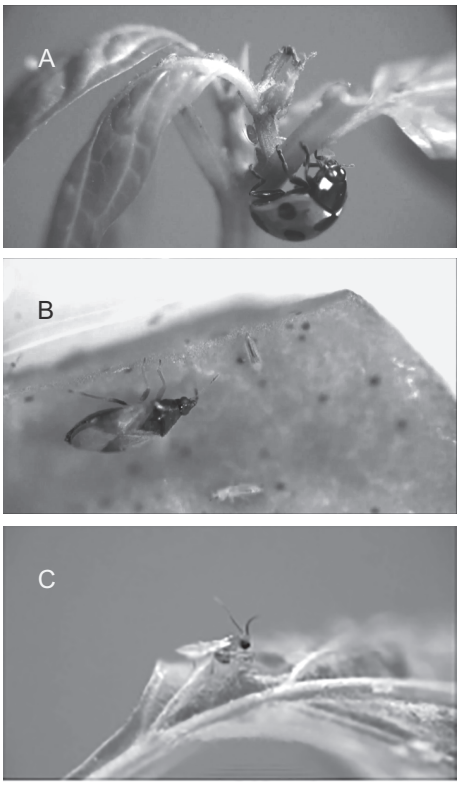

写真１　代表的な天敵

［上：ナナホシテントウ，中：害虫を捕食しようとする肉食性カメムシ，下：アブラムシに産卵直前の寄生蜂（ギフアブラバチ）］

写真２　葉の裏で群れを成すアブラムシ(左)と、寄生蜂に産卵され、寄生蜂の蛹塊となったアブラムシ(右)

写真３　ダニの被害（手前）を受けて変色したチャ

とがあります。その圃場を調査してみると，農薬散布を控えたエリアではダニを食べる捕食性のダニ（天敵）が働いていたという事例があります。

写真３の手前部分が変色しているのはチャに付くダニの被害です。しかし，1.5haのこの圃場の半分から向こう側で農薬散布を控えてみたら被害がほとんど無かったのです。

天敵利用防除の技術開発と普及

天敵利用の研究には非常に長い歴史があるのですが，ここ十数年でその成果が急速に普及してきました。この背景を考えると，まず施設栽培ではいろいろな餌を利用できる食性の広い天敵の製品化が図られました。これは基礎研究によって，どういった天敵がいて，どういった餌を食べ，どういった生活をしているのかといった情報が蓄積されたためです。さらに，これらの製品化には民間企業の努力が大きかったと考えます。

なお市販化されているそれぞれの天敵の標準使用量はほぼ定まっています。例えばスワルスキーカブリダニですと10ａ当たり５万頭が標準で，値段にして大体３万円強，捕食性のカメムシなら10ａ当たり500～1,000匹が一般的になっています。

また天敵の市販化に併せて，天敵への影響が小さい選択性の高い殺虫剤の開発も大きかったと考えています。例えばアブラムシとその捕食性天敵であるテントウムシの組み合わせの場合，古い時代に多く見られた殺虫効果の広い殺虫剤は，アブラムシにもテントウムシにも影響を与えてしまいます。ところが，近年では，アブラムシに効果があるがテントウムシには影響が小さいという特性の選択性のある殺虫剤が登場しました。

この選択性の高い農薬の使用というのは，IPM導入の最初のステップとして非常に重要です。例えば**写真４**は鹿児島県指宿市のJA販売店の例ですが，生産者農家が迷わず選択性の高い農薬を購入できる工夫がなされています。

写真４　生産者農家が迷わずIPM用に選択性の高い農薬を購入できる販売店の陳列
（鹿児島県指宿市のJA）

図２は，オクラで天敵に影響が大きい剤と小さい殺虫剤をそれぞれ散布した結果です。**図2A**は天敵まで殺してしまう影響の強い剤を散布した場合で，実線が害虫，破線が天敵の密度の変遷を示しています。アブラ

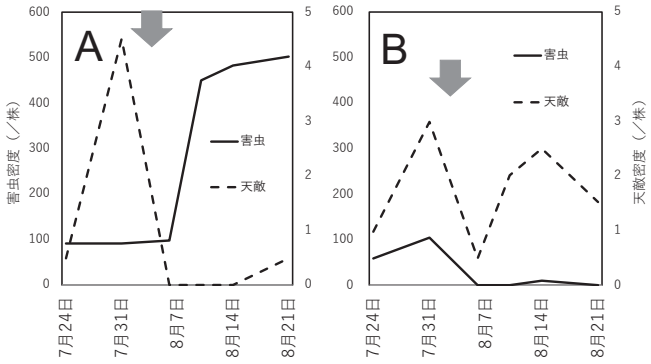

図２　露地オクラ栽培における（A）慣行農薬（天敵にも影響）と（B）天敵に優しい農薬による防除効果と天敵への影響

（矢印は農薬散布時期）

ムシは少し残った状態ですが，天敵はほぼ排除されています。一方，**図2B** は選択性が高い殺虫剤を散布した場合で，アブラムシは減り，天敵はそれなりに保全されているので，その後持続的にアブラムシの個体数が抑制されています。

また水を使った選択的な防除効果の例もあります。当時カイガラムシはチャの大害虫で，従来の防除法では一時的には抑えられても，同時に天敵も排除されるので，カイガラムシだけが生き残り，結果的に毎年同じ防除作業を繰り返さないといけませんでした。しかし水を散布すると，水でカイガラムシはそれなりに死亡しますが，カイガラムシの世代

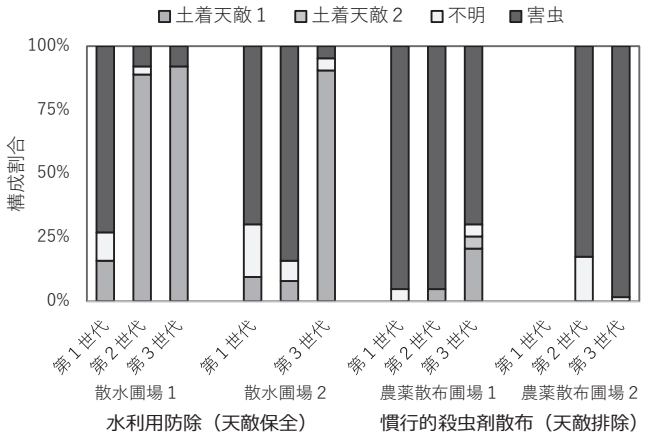

図３　散水によるチャの害虫カイガラムシ防除で土着天敵の構成割合が徐々に高まる

が経過するにつれて天敵の寄生割合が高くなっていきます（**図３**）。すなわち，水という直接の効果と天敵の保全効果の二つが働いて，当時大害虫だったカイガラムシも今はむしろマイナー害虫に転じています。

生態的根拠に基づいた技術の組み立て

いろいろな天敵がいて，それぞれの種によって食べる餌の種類や範囲が違います。そしてそれぞれの天敵によって好適な温度や攻撃能力も違います。一つの種で全ての害虫を抑えられる万能な天敵は存在しません。例えばアブラムシにはアブラムシなりの天敵，アザミウマやハダニにはそれぞれの天敵が存在します。アブラムシを取ってみても，テントウムシ以外に例えば捕食性のアブやハエ，寄生バチといった多様な天敵が存在します。

さらに，天敵の種によって餌の範囲が異なります。ハダニの例ですと，ハダニだけを捕食する「スペシャリスト」の天敵もいれば，餌としてハダニへの依存度が低く，ハダニ以外の微小な昆虫や花粉のような植物資源を利用する「ジェネラリスト」の天敵も存在します。このジェネラリストが今回のキーワードの一つにもなってきます。

こういった多様な天敵が自然界でどういう生活をしているかという例を示します。私が20年ほど前にクワ畑で調べたデータですが，**図4A** の実線がハダニ，破線が天敵です。ハダニが増えて，それに続いて天敵も増えるというパターンを繰り返します。そこで**図4B** で天敵の内訳を見ると，５種類の天敵がおり，白い棒がジェネラリストで他の色の棒がス

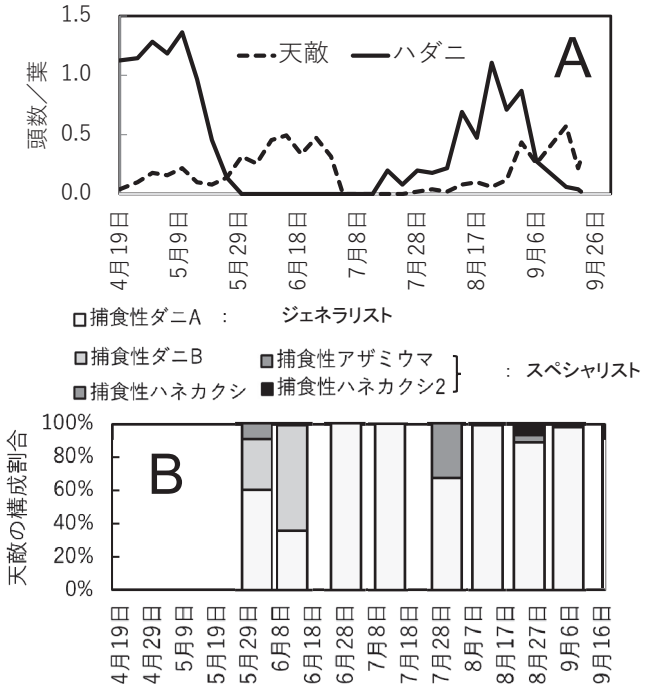

図４　クワ畑におけるハダニと天敵（ジェネラリスト、スペシャリスト）の消長（A）、およびその構成割合（B）の例

ペシャリストの天敵です。これを見ると，ハダニがいる時期はスペシャリストを含む多様な天敵が存在している一方，ハダニがいない時期に存在しているのは，さまざまな餌を利用できるジェネラリストの天敵です。こういう食性の違いがこの後で示す防除戦略における実例のポイントになります。

天敵の種類によっても攻撃する能力も異な

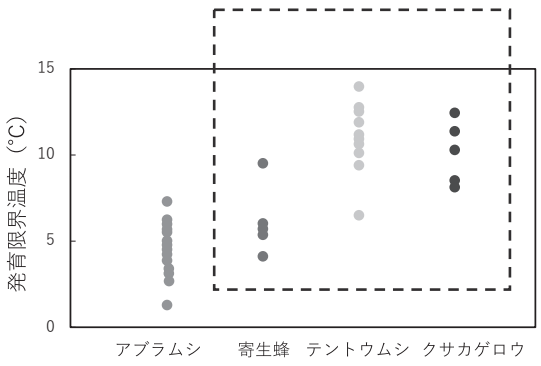

図５　害虫アブラムシとその天敵（点線内）の発育限界温度（発育零点）

［桐谷（2012）の図を改変］

ります。例えば，害虫のアザミウマに対する天敵の場合では，１日に数匹の害虫を食べる天敵もいれば，１日に50匹ほどの害虫を食べる天敵もいます。一方，害虫のハダニの場合では，同じ捕食性ダニでもジェネラリストの捕食性ダニに比べてスペシャリストの捕食性ダニの方が捕食能力（攻撃能力）は高いといった例もあります。

また天敵により好適な温度が違うケースもあります。例えば害虫のアブラムシとその天敵の例で，虫が発育を進めるために必要な最低の温度（発育限界温度）を比較してみると（**図５**），アブラムシは２～７℃の範囲ですが，特に捕食性の天敵では割と高いところにあり，総じて10℃が発育限界温度であり，寄生バチでは捕食性天敵よりも低い温度で活動ができています。こういった天敵の基礎的な情報が，後半で紹介する現場での実例のベースになります。

天敵を利用したIPMの体系

主役はジェネラリスト利用の体系に

自然界では，一般的に**図6A**に示したように，まず害虫の密度が変化し，その後少し遅れて天敵の密度が変化します。つまり天敵にとって害虫は餌なので，こういった経過をとります。ところが，農業上は害虫が増えてしまっては困るわけです。**図6B**のように常に天敵が優勢な状態が理想です。しかしそれをどう実現するかが問題でした。

つまり**図6B**の丸で囲った部分のように，害虫の出始めや害虫がいったん減ってしまって天敵にとっての餌の量が豊富でない条件，つまり害虫が少ない条件が農業上では求められます。しかしこれは生態系の理論で考えれ

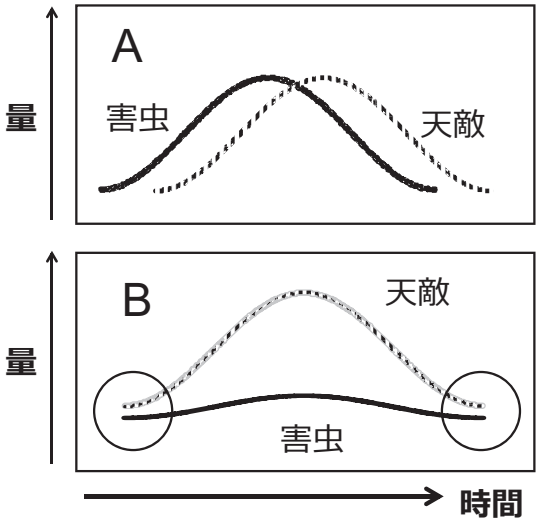

図6　害虫と天敵の発生量とその推移

［A：自然状態では消長にズレが生じる，B：農業上理想的な天敵の消長。害虫発生のごく初期（左の○）でも絶滅後（右の○）でも生存している。］

ば矛盾する条件になります。

餌のアブラムシが多いときにテントウムシを天敵として放して防除を図ろうとするケースをイメージし，**図7A** のようにアブラムシの出始めを見計らってテントウムシを放します。この時，餌のアブラムシが多過ぎるとテントウムシの捕食効果が追いつかずに，結果的にアブラムシが増えてしまって失敗します。このように餌の量が多過ぎると，なかなか防除としては効果が得られないケースもあります。逆に，天敵放飼時に餌である害虫の量が少な過ぎると，天敵にとっては餌不足になるので，作物そのものに定着すらできないといった課題があります。

このジレンマに対しては，1990年代から2000年代前半，さまざまな解決策が検討されてきました。それを解決したのがジェネラリスト天敵の登場です。例えば，施設栽培ではアブラムシからハダニまでいろいろな害虫が発生するのですが，天敵利用技術の積極的な開発が始まった1990年代前半は，それぞれの害虫に対するスペシャリストの天敵，すなわち害虫の数に依存しやすい天敵の利用がメーンで検討されました。ところが2009年ごろ，スワルスキーカブリダニやミヤコカブリダニといった，いろいろな餌を利用するジェネラリストの天敵が登場して，この状況が大幅に改善されました。

施設栽培での天敵利用

歴史を変えたスワルスキーカブリダニ

前述したジェネラリストの天敵の代表格が2009年に上市されたスワルスキーカブリダニです。例えばピーマンには，主にアザミウマ，コナジラミ，ホコリダニ，アブラムシ等の害虫が発生します。そのような場合には，従来最も被害が大きいアザミウマに対してはスペシャリストに近い天敵で防除を図り，それ以外の害虫に対してはその天敵に影響が小さい殺虫剤の散布で防除する方法が主体でした。しかし，当然こういう体系では，大幅な殺虫剤の削減にはなかなか至りません。

ところが突破口となったのがスワルスキーカブリダニです。この天敵が優れていたのは，アザミウマ，コナジラミ，ホコリダニの3種類の害虫に一定の効果があったことがまず挙げられます。中でも，2003年ぐらいから被害が問題

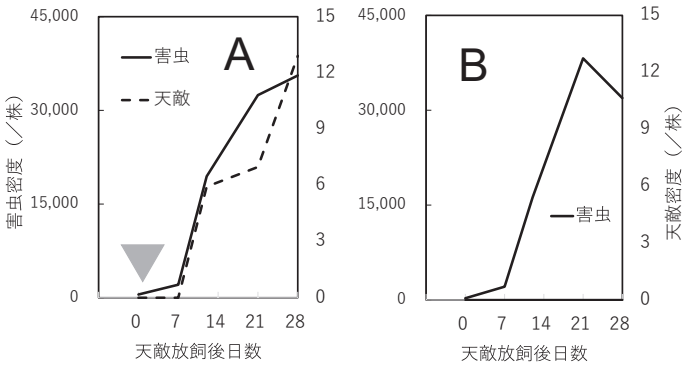

図7　施設栽培のピーマンで害虫のアブラムシに天敵のテントウムシ放飼のタイミングが遅れて防除効果が得られなかった例

［A：天敵を放飼（▼：放飼時期），B：天敵を放飼しなかった対照区］

になったタバココナジラミに対しては，この天敵を放飼するだけでその圃場のコナジラミを効果的に防除ができたことが最も高く評価された点でした。

さらにこの天敵が優れていたのは，先にジェネラリスト天敵が植物資源も利用するという話をしましたが，ピーマン等の花粉や蜜を与えただけでも本来の餌である害虫を与えた場合と同程度に生存可能で増殖もできる点です。

すなわち，ピーマンなら害虫発生の有無にかかわらず，花さえ咲いていれば，その段階でスワルスキーカブリダニを放飼することが可能です。このように，植物の資源を餌にできる天敵は生産者にとって非常に扱いやすいと言えます。

ただしスワルスキーカブリダニも万能ではなく，アザミウマにはやや効果が低い例もあります。**図８**はその例です。実線がアザミウマの消長を示していますが，スワルスキーカブリダニを放飼して約３カ月はある程度低いレベルに保たれています。この天敵を導入するだけで，従来のピーマン栽培に比べて殺虫剤の散布回数を半減させられるぐらいの効果があるのですが，栽培の後半になるとどうしてもアザミウマの増殖を抑えられないこともあり，この課題は懸案として残りました。

単一の天敵から複数の天敵へ

スワルスキーカブリダニ導入でも残された問題をどう解決するかが次のキーワードの，「害虫１種に対して複数の天敵を使う」という考え方になります。つまり，スワルスキーカブリダニと，それよりも捕食能力がさらに優れる捕食性のカメムシの２種類の天敵を組み合わせてアザミウマの防除を図るという手段です。

私はスワルスキーカブリダニが登場して２年ほどで現場を離れてしまったので，このデータや技術はその後に産地の皆さんと当時の普及指導員の方が熱心に頑張って完成された成果です。

図９の実線で示したアザミウマの消長を見ると，タバコカスミカメも天敵として併用した圃場では，栽培の後半までアザミウマがほぼ低く抑えられているのが分かります。この

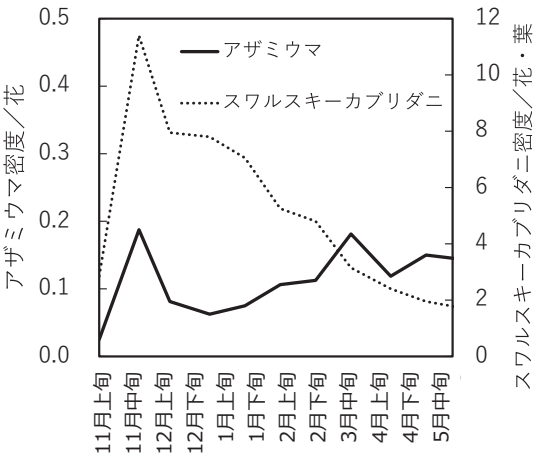

図８　施設栽培ピーマンにおける害虫アザミウマと天敵スワルスキーカブリダニの密度の推移

（鹿児島県志布志市12圃場の平均値）

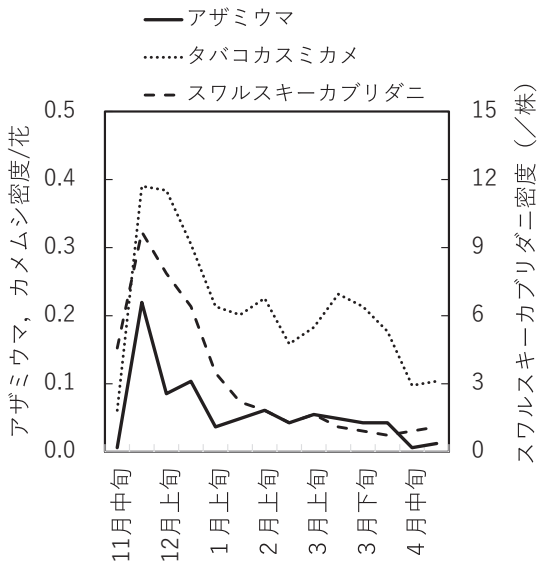

図９　施設栽培ピーマンで害虫アザミウマをタバコカスミカメとスワルスキーカブリダニの天敵併用で作期後半まで防除に成功した例

体系ならピーマン１作を通して天敵利用が完成されたと考えられます。言い換えれば，スワルスキーカブリダニというジェネラリスト天敵の予防効果と捕食量が多いカメムシの治療効果でアザミウマが防除されるに至ったとことになります。

天敵としての捕食性カメムシ

捕食性カメムシの一種であるタバコカスミカメは，最近注目されている天敵昆虫で，農研機構からもマニュアル等が出されています。この天敵も実はジェネラリストで，植物そのものも餌にして生活することができます。土着のものなので，例えば西日本ですとゴマやフウチョウソウといった植物があれば，こういった植物で捕獲することも可能です。従って，西日本では生産者自らが捕獲してこの天敵を圃場に導入するというやり方が一般的に可能と考えられます。

天敵の機能を強化する住処

捕食性カメムシの導入でピーマンではさらに殺虫剤の散布回数削減に至りましたが，最後に残った害虫がアブラムシです。ピーマンでは主に３種類のアブラムシが発生し，種によっては果実に被害を出すものもいます。アブラムシに対しても複数の天敵を使うのが必須で，ここからさらにもう一つのキーワードである「天敵の住処を作る」という手段が登場してきます。

それは圃場の周りに天敵が好む天敵の住処を作る植生管理という技術です。なぜピーマンのアブラムシの対策でわざわざ天敵の住処を作る必要があったのか。それはアブラムシの天敵，少なくとも市販されている天敵の中には，先ほどのスワルスキーカブリダニのように前座を任せられるような実用的なジェネラリストの天敵が今のところ存在していないことが挙げられます。

バンカー法の利用

そこで活用するのが「バンカー法」[注１）]と呼ばれる技術です。これも既に農研機構からマニュアルが出されています。具体的にはハウスの一画を使って天敵の増殖源を作ります。まずムギを育てて（**写真５，口絵参照**），ムギに寄生するアブラムシ（天敵の餌）を放し，その上に天敵を放して天敵の増殖源とします。こういった環境をつくり，施設内にあらかじめ天敵が待ち伏せしている状況ができ上がります。そうすると害虫のアブラムシが作物上に発生しても，増殖源で増えていた天敵が速やかにアブラムシを防除してくれるというイメージです。

しかし，そう簡単にはいきません。それは少しややこしい話ですが，害虫のアブラムシの天敵である寄生蜂のさらにその天敵（二次寄生蜂），つまり天敵の天敵が天敵の増殖を阻害するという課題です。

例えば**図10**の折線は施設栽培のピーマンで，害虫であるアブラムシに対して，その天敵である寄生蜂（一次寄生蜂）の個体数の推

写真５　天敵の増殖源として施設内に栽植された天敵の住処としてのムギ（円内）

注１）天敵の出し入れが行われる場所なので，「バンク＝銀行」に由来する用語（Bennison and Corless, 1993; 長坂ら，2010）

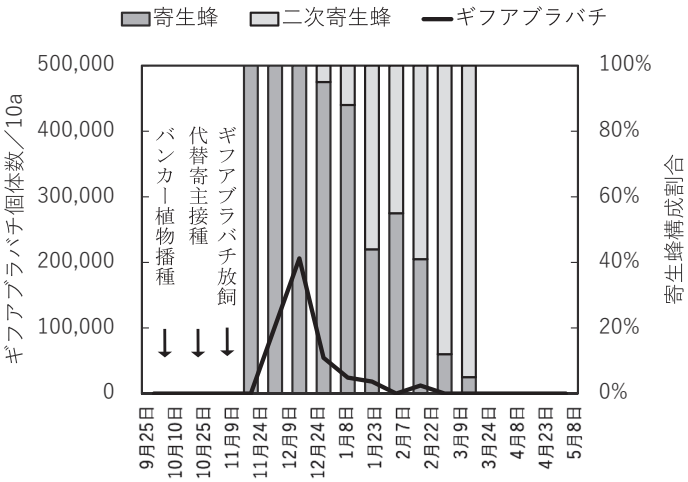

図10　施設栽培ピーマンで害虫アブラムシの天敵寄生蜂ギフアブラバチの増殖が二次寄生蜂により阻害された例

［2014-2015，鹿児島県志布志市。天敵寄生蜂はバンカー植物上の代替寄主（害虫でないアブラムシ）上で増殖。ギフアブラバチ推定個体数＝葉上の蛹数×葉数×ギフアブラバチの構成割合括弧］

移を示しています。そこで二次寄生蜂が発生してしまうと，せっかくバンカー植物上の代替寄主（害虫でないアブラムシ）で維持しておいた天敵はピーマン栽培の後半にはほぼ存在しなくなり，天敵としての効果は無効になります。つまり，ここでの二次寄生蜂はアブラムシの防除に何ら役立たないので，邪魔な存在にすぎません。

そこで登場するのが，アブラムシの寄生蜂とともに捕食性のヒメカメノコテントウというテントウムシも併用する技術です。前述したスワルスキーカブリダニと捕食性のカメムシを併用する目的とは違いますが，この場合でも複数の天敵を併用する技術が必須になってきます。

この「ハイブリッド・バンカー法」と呼ばれる技術を適用したピーマン栽培の例を**図11**に示しました。３圃場で検証した結果ですが，実線がテントウムシ，太実線が寄生蜂，破線が害虫であるアブラムシの密度です。このようにアブラムシは一時的に発生しても，その後速やかに抑制されています。この技術によりピーマン栽培におけるアブラムシ類を対象にした殺虫剤の散布は基本的に不要になるところまで到達しました。

ここまで来ると殺虫剤の散布効果は非常に目覚ましく，当初の回数に比べるとおおむね80～90％減，回数にして１作で２～３回の散布防除で済むというところまで到達しています。実際，このフル装備の技術で有機栽培に転換された方も数名いらっしゃいます。

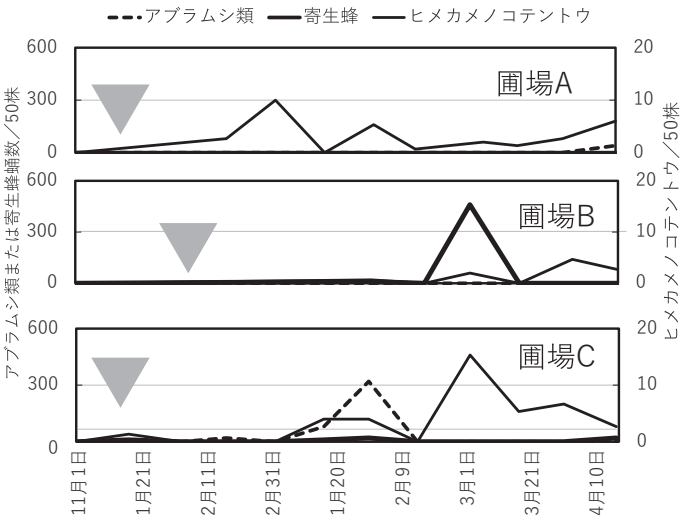

図11　施設栽培ピーマンにおける害虫アブラムシに対するハイブリッド・バンカー法の効果

（2016-2017，鹿児島県志布志市。▼：バンカー開始時期）

ピーマンでの天敵利用の経済評価

ここでは，天敵利用をフル装備した防除体系が果たして経営の中で採算に合うのかという点を評価してみます。

その試算の前に，天敵利用の一番のメリットである省力化を金額

表１　ピーマン施設栽培で天敵利用した場合の経済性評価＊

項目	慣行防除			天敵利用		
	単価（円）	数	小計（円）	単価（円）	数	小計（円）
殺虫剤	2000	20成分	40,000	2,000	３成分	6,000
殺菌剤	2000	20成分	40,000	2,000	６成分	12,000
散布労賃（A）	6000	20回	120,000	6,000	６回	36,000
小計			200,000			54,000
天敵購入費						
スワルスキーカブリダニ			0			35,000
アブラムシ用天敵			0			30,000
ハナカメムシ（B）			0			50,000
天敵利用にかかる労賃						8,000
小計			0			123,000
合計			200,000			127,000 ～ 177,000

＊実証圃場の散布実績の10ａ当たり平均値
　A：生産者聞き取り，B：タバコカスミカメで代用すれば０円

に換算してみました。まず，生産者が実際に10ａ当たりの１回の防除で自身の労賃をどう見積もっているかをアンケートした結果，夏野菜のオクラの生産者27名の回答ですと，さすがに真夏の猛暑での作業になるので，平均で約9,000円です。一方，ピーマンでは，40名の生産者の回答で，１回の散布を平均6,000円と見積もっています（ちょっと安いと思います）。

これらをベースに経済性の評価を試算しました（**表１**）。表の左側は化学農薬だけを使った慣行防除，右側が天敵を利用した場合です。従来法では殺虫剤と殺菌剤からなる化学農薬の費用が10ａ当たり８万円かかっていたのが，天敵を使うと化学農薬の費用が１万８千円に削減されます。しかし，新たに天敵費用11万５千円（土着天敵のタバコカスミカメが利用できる場合は６万５千円）が発生するので，防除資材全体の費用は従来法で８万円，天敵利用で約８万円～約13万円になり，従来法と比較して1.5倍となる場合もあります。

しかし大事なのは散布労賃で，化学農薬のみに頼る従来法では，ざっと12万円かかる経費が天敵利用の体系では大幅に削減され，これを合計すると化学農薬と同等以下の費用で防除が十分可能になります。従って，「天敵利用＝コスト高」というイメージは払拭（ふっしょく）される必要があります。

さらに忘れてならないのが，突発的な害虫が発生し，本来必要でなかった防除作業が発生した場合のロスです。先ほどのピーマン生産者40名に，「繁忙期に急に農薬散布が必要になった場合，それに伴う収穫のロスがありますか」と尋ねると，６割の方が「ある」と回答しました。これを実際に金額に換算すると（**図12**），殺虫剤の散布作業で失われる３時間で収穫できたはずのピーマンが時間当たり40kg，これにピーマンの平均単価を掛けると１回の防除で５万４千円分のピーマンが収穫できたはずです。しかし，急に発生した防除作業により収穫時間にロスが生じます。こう考えると，今後より一層効率的な農業生産が求められる時代において，天敵利用というのは不可欠なツールであると言えます。

天敵温存植物の活用

先にスワルスキーカブリダニにとって花粉が好適な餌になると説明しましたが，中にはうまくいかない品目も出てきます。現場からの課題

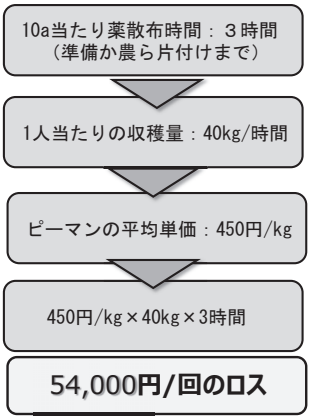

図12　ピーマンの施設栽培繁忙期の防除作業を省略できた場合に行うことのできた作業の経済性試算

解決の要請があったので，サヤインゲンの事例を精査してみました。すると，サヤインゲンの花粉はスワルスキーカブリダニに対して好適な餌ではないことが分かりました。種々の作物の花粉を与えてスワルスキーカブリダニの産卵数を比べてみると，サヤインゲンの花粉を与えたものはピーマンの花粉を与えた場合の３分の１程度の産卵数しか得られていませんでした。つまり，サヤインゲンの栽培ではスワルスキーカブリダニに対して何らかの別の餌を供給してやる必要があります。そこで登場するのが「天敵温存植物」です。

例えば，スイートアリッサムの花粉はスワルスキーカブリダニにとって好適な餌になります。こういった植物をわざわざインゲンの圃場に植えると，天敵の効果は大幅に改善されます。

図13は，サヤインゲン栽培施設内にスイートアリッサムを配置した場合としない場合における，天敵であるスワルスキーカブリダニの密度（A）と害虫であるアザミウマとコナジラミの密度の推移（B）です。実線が従来の方法で，破線がスイートアリッサムを加えた圃場です。これを見ると，従来法ではスワルスキーカブリダニの増殖が思うようにいかずに害虫が増加したケースでも，スイートアリッサムを施設内に配置するとスワルスキーカブリダニが倍以上に増え，なおかつ害虫も低く抑えられます。

例えばサヤインゲン栽培ですと，こういった天敵温存植物を10ａ当たり400株植えるだけで劇的な変化がもたらされます。この天敵温存植物の考え方は，露地野菜の事例にも大きくつながってきます。

露地栽培での天敵利用

土着天敵の誘引と作物への持続的供給

露地栽培の場合でも基本的には，先に**図６**で示したような害虫と天敵の関係になりますが，露地の場合は土着天敵を利用することになります。特別な操作をしなければ，**図6A**のようにどうしても害虫が先に発生し，少し遅れて天敵がやってくるので，防除効果が高まりません。理想的には**図6B**のように，害虫が増加しようとする時点で天敵が十分存在する状態です。

これをどうやって露地で実現するかということになります。露地栽培の場合は，先ほど紹介した「天敵温存植物」という天敵が好む植物を圃場の周りに植栽して，そこに天敵を誘引して作物に供給するという考え方になります。

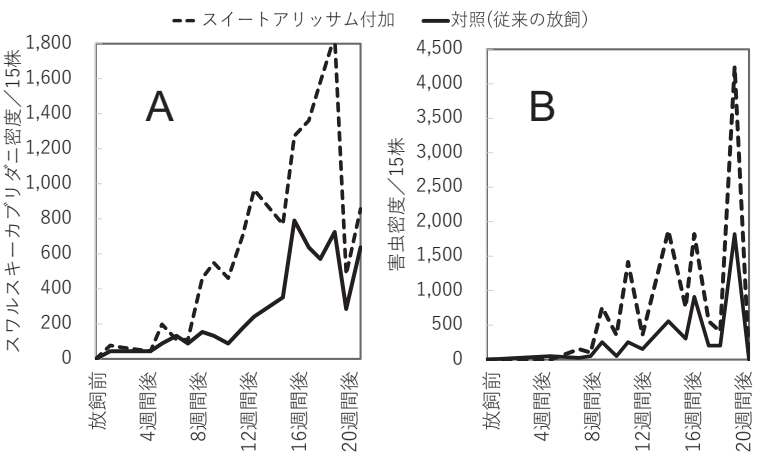

図13　施設栽培サヤインゲンの害虫（アザミウマ，コナジラミ）に天敵スワルスキーカブリダニを用いた場合における天敵温存植物スイートアリッサムの付加効果

（A：スワルスキーカブリダニ密度の推移，B：害虫密度の推移。2019-2020，鹿児島県垂水市各2反復×3圃場の平均）

オクラ栽培での天敵温存植物利用

天敵温存植物利用の代表例が夏野菜の代表格オクラです。その国内最大の産地である鹿児島指宿市での事

例を紹介します。指宿市におけるオクラ栽培の一番の害虫はアブラムシで，通常は１作期を通じて大体３～４回の殺虫剤散布が必要となります。それを改善するため，まずはソルガムを植栽してアブラムシに対する天敵の住処を設けます。それが具体的にどう機能しているかというと，まずソルガム上で繁殖するアブラムシは野菜には無害ですが，これを餌としてアブラムシの天敵が増えます。そして，ここで増えた天敵がオクラに供給されるという仕組みになります。

さらにここからは複数の植物を使う考え方が必要になります（施設栽培で紹介した「複数天敵の利用」と似ていますが）。**図14**はソルガムで増殖するアブラムシとそれを餌として増える天敵の数の推移を示しています。ここでは，餌になるアブラムシは増えるまでに時間を要することが課題になります。ソルガムの品種や植え付け時期を変えてもこの傾向は変わりません。すなわち，このオクラ栽培では，春の栽培前半で天敵を温存するソルガム以外の何らかの植物が必要になるということになります。そこで，この前半部分に役に立つもう１種類の天敵温存植物を導入するこ

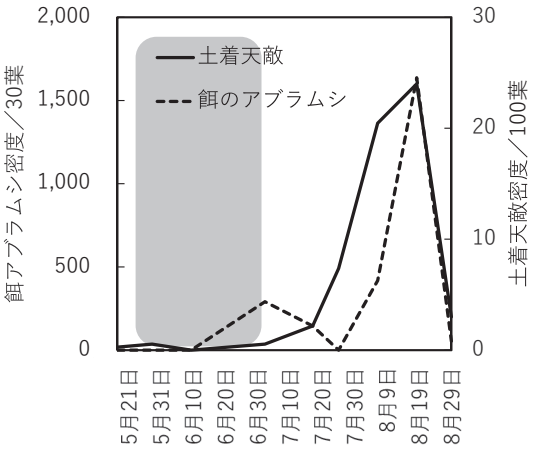

図14　露地のオクラ栽培において、天敵温存植物ソルガム上における餌のアブラムシと土着天敵密度の推移

（灰色の部分は土着天敵が機能していない時期を示す。）

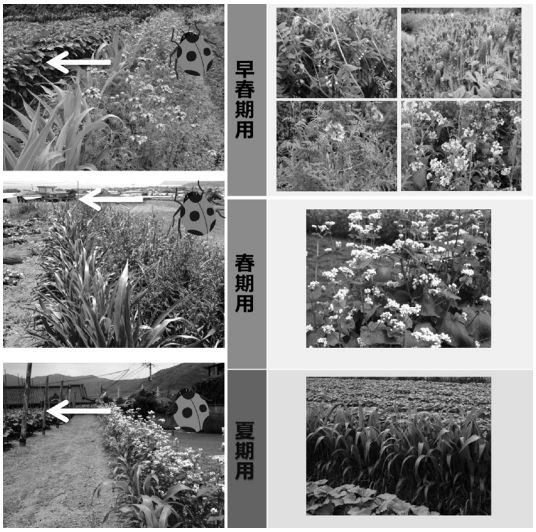

写真６　露地栽培オクラの栽培期間を通じて土着天敵を終始利用できるように配置された天敵温存植物利用の体系

（早春期用：右上より時計回りでクリムソンクローバー，シロガラシ，ハゼリソウ，ヘアリーベッチ。春季用：ソバ。夏期用：ソルガム。鹿児島県指宿市）

とにより，１作期を通じて土着天敵が機能する体系ができ上がります。

写真６は指宿市での現在の体系を示していますが，まずは夏場に機能するソルガムを基本として，もっと涼しい春に有効な，例えばソバ，さらに早春期にはヘアリーベッチ，クローバー，ハゼリソウ，シロガラシを組み合わせると，オクラの栽培期間を通じて土着天敵を終始利用することができます。

花を咲かせる植物は重要

最初に天敵の一般的な説明をした中で，天敵にも温度適応性に違いがあることを紹介しました。**図15**は，指宿市でのオクラ圃場におけるアブラムシの天敵類の時期別の種類構成を示したものです。これを見ると夏期にはオクラ上に多様な天敵がいますが，気温が低い春には天敵の種類構成はシンプルで，ヒラタアブという捕食性の天敵が優占しています。この天敵は幼虫がアブラムシを捕食してくれます。

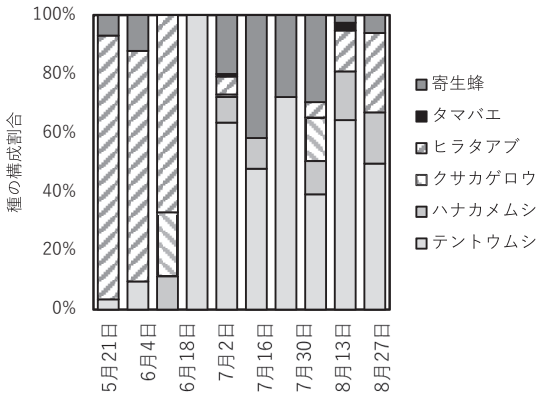

図15　露地栽培のオクラにおける害虫アブラムシに対する天敵類の時期別の種類構成

（鹿児島県指宿市６圃場の平均）

一方，その成虫は花の花粉や蜜を餌にするので，われわれにとって好都合です。ヘアリーベッチを例にすると，つまり圃場の周りに花粉や蜜を供給する植物を植えてやると，ヒラタアブの成虫はこれに誘引されます。結果的にはこういった植物を使っても，植物の葉や茎に餌となるアブラムシが発生したり，花に餌となるアザミウマが発生したりしますので，いろいろなアブラムシ以外の天敵ですとかアザミウマの天敵も同時に温存できることが分かったのですが，季節や天敵の基本的な生態を考慮して住処づくりに使う植物も選んでいく必要があるという例の一つになります。

ではオクラでの経済効果を試算してみます。先ほど農薬の散布労賃のアンケートの結果があったと思いますが，この結果でオクラの生産者の皆さんが回答していたのが10ａ当たり9,000円というラインでした。オクラで削減される殺虫剤の使用回数が６～７回程度なので，この時点で大体６万円前後の経費の労賃の削減，そしてそれに伴う殺虫剤の経費の削減によって概ね10ａ当たり約７万円の削減効果があったと推定されます。

天敵温存植物のおとり効果とその利用

オクラの例では天敵温存植物に天敵を寄せて，そこで増えた天敵を作物に供給する話でしたが，ここでは作物の周りに植物を植えて害虫の侵入をブロックするという考え方になります。

スナップエンドウ栽培での利用例

ここではスナップエンドウというエンドウマメの一種における天敵温存植物利用の例を示します。このスナップエンドウも鹿児島県指宿市が国内最大の産地ですが，そこで一番厄介な害虫がアザミウマです。エンドウマメの花が咲くと，アザミウマがそこに侵入して花の中に潜ってしまいます。潜った状態でさやとなる前段階の小さな組織に卵を産み付けるので，収穫時には卵の跡が傷になり，さやが肌荒れの症状になって著しく品質を低下させます。この害虫に対して見いだされた防除技術を以下に紹介します。

まず通常の栽培では，圃場に侵入してきたアザミウマが直接スナップエンドウへ飛び込んで寄生します。ここでは，まずその圃場の周りにソルガムを植えます。このソルガムは前述したオクラ栽培の場合とは違い，障壁としての役割を果たします。

写真７　スナップエンドウの周りにソルガム，その周りに天敵温存植物を植える２段構えのアザミウマの防除例

（天敵温存植物の左がホーリーバジル，右はソバ）

さらにそのソルガムの周りに天敵が好む天敵温存植物をおとりとして植えます(**写真７**，**口絵参照**)。そうすると，本来直接スナップエンドウに侵入するアザミウマは一旦その天敵温存植物でとどまり，そこで寄生します。ところが，そこには土着天敵があらかじめ温存されていますので，ここで天敵による抑制効果が働きます。さらにここを逃れようとするアザミウマは，先ほどのように直接圃場に侵入しようとしたアザミウマと同様に，ソルガムの障壁でブロックされるという２段構えの構造になります。

実際の栽培では，スナップエンドウの作付けが始まる１カ月ほど前，鹿児島ですと８月上旬という早い時期から周りで植生管理を施して準備していきます。このソルガムの外側に植わっているのが天敵温存植物のバジルの仲間とソバになります。これらの天敵温存植物の中で活躍するのがアザミウマの有力な天敵である捕食性のカメムシです。

わざわざスナップエンドウでこういう手段を取る必要があったのには，二つの理由が挙げられます。まずスナップエンドウでは，本種特有の表面のつるつるしたワックス構造が原因で，天敵が好まない植物であるということです。

次に前述したように，スナップエンドウに対するアザミウマ被害を抑えるには，成虫が侵入後にすぐになされる産卵行動を阻止する必要があります。すなわち，これまでの害虫と天敵のように，天敵を圃場で増やして徐々に害虫を抑えようという考え方は通用しません。アザミウマをスナップエンドウに飛来させないことがポイントになりますので，侵入阻止という手段が最も有効であるということになります。

スナップエンドウ栽培での経済評価

この防除法の具体的な効果を２カ年の結果のうち，2018年の結果を**図16**に示しました。従来の慣行防除法と「おとり+障壁効果」による植生管理を導入した圃場の成績です。折れ線は害虫アザミウマの密度で，面グラフは健全なさやと被害を受けたさやの構成割合です。結果は一目瞭然で，従来の防除に比べ，植生管理を行った圃場では，害虫密度は従来法に比較して80～90％も減少しています。

さらにこの効果を金額に換算すると（年当たり粗収益），従来の防除法の場合よりも約60％も増加しています。これは被害さやが大幅に軽減されたことによるものです。金額にすると10ａ当たり約27万円となるので，この効果が経済的にもいかに大きかったかが分かります。

天敵の住処の重要性

ここまで，露地におけるオクラとスナップエンドウ栽培を例に最新の天敵利用技術を紹介しました。どちらの作物でも天敵の住処を作ってあげるということでしたが，その中

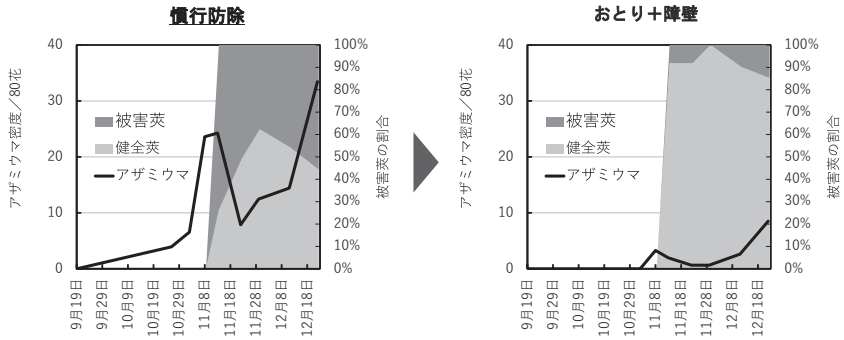

図16　露地栽培のスナップエンドウにおける害虫アザミウマに対する天敵温存植物（おとり）とソルガムによる障壁導入の効果

（鹿児島県指宿市2018年３圃場の平均）

身・目的は違っています。オクラ栽培の場合は天敵をオクラに誘引するための住処として。一方，スナップエンドウ栽培では，ソルガムによる害虫飛来の障壁の効果と組み合わせて天敵の住処を害虫のおとりとして機能させて防除を可能としています。このように天敵温存植物や障壁植物を上手に利用すれば，これからいろいろな露地作物での技術体系に貢献できると考えています。

生物特性を合理的に生かす病害虫管理

今回紹介した施設野菜のピーマンや露地野菜のオクラ，スナップエンドウは，どれも１圃場の規模が10～30ａ程度と，比較的小規模で高収益を得る作物でしたが，例えば「ハクサイ，キャベツや葉根菜類といった土地利用型野菜に応用できる技術はないのか」という疑問があると思います。

今後のキーワードは「輪作」や「間作」だと考えていまして，例えば鹿児島県のカボチャ栽培の事例では，収穫前に使う敷きわらを得るため，カボチャ作付け前にムギ類を全面栽培し，カボチャの作付け後は一部分のムギ類を残すやり方で栽培していきます。

これを病害虫管理の立場から見ますと，例えば作付け前のエンバクなら，それに緑肥の効果があるばかりでなく，土壌病害虫や雑草管理に対する効果，すき込んですぐの時点では天敵の避難場所，さらに時間が経過するとそこに発生する餌に起因する天敵の温存場所，そしてそれら以外にも防風効果，敷きわらあるいは雑草管理といった多目的なメリットがあります。すなわち，こういった「輪作」，「間作」という考え方を土地利用型のものにも応用できれば，もっと違った害虫管理の可能性も残されていると考えています。

現在，私は昨年日本に侵入した世界的大害虫のツマジロクサヨトウ[注２)]の防除対策プロジェクトにも参画していますが，ああいった害虫に関してもこういう植生管理の技術に何らかのヒントがあるのではないかと考えております。

SDGs の実現に向けて

ここで説明した天敵利用や IPM に取り組んだ生産者から必ず聞こえてくるのが「こういう取り組みをもっと消費者に知ってほしい」という声です。**写真８**はテントウムシを主体にした鹿児島県独自のキャラクターで，県が定めた IPM を実践した生産者にだけ使用許可を与えています。これらの生産者は，決してこうした取り組みで価格への反映を期待してはおらず，恐らく，ものづくりに懸ける生産者のプライドを消費者の方にもっと届けたいという思いではないかと思います。

言い換えれば，単にスーパーマーケットに並んでいる商品を買ってもらうだけではなく，作り手からすると農産物には商品が並ぶまでにさまざまな物語や背景があるということを消費者に理解してもらうことも重要だと思いますし，そういった取り組み自体も今後

写真８　鹿児島県が独自に定め，IPM を実践した生産者にだけ使用許可を与えるテントウムシのキャラクター

注２) トウモロコシ，サトウキビ，野菜類等，多数の作物に被害を与える害虫。わが国では，2019年に初確認され。西日本を中心に発生が確認されている。

の SDGs の実現に向けた重要な要素だと思います。

さいごに

今回，私が鹿児島の代表として機会を頂きましたが，ここで紹介したいろいろな成果は生産者をはじめいろいろな関係者の皆さんの協力なしでは成し得なかったものですので，この場を借りて改めて皆さんに御礼を申し上げたいと思います。

また，私よりも若い研究者，技術者の方が本日の講演を聞いていらっしゃれば，もっと自分の開発した技術の提案に責任を持ち，産地にどっぷり漬かり，生産者（開発した技術の実需者）と本気で向き合うような姿勢が大事だということを提言したいと思います。

質疑応答

農薬の種類と天敵への影響について

質問　農薬で広い範囲に効く殺虫範囲の広い農薬と選択性の農薬があり，害虫と天敵への影響は違う場合があるというお話でした。農薬の選択性については，例えば有機リン剤やネオニコチノイド系といった農薬の種類によって何か傾向がありますか，あるいは対象となる害虫や天敵にもいろいろ分類学的に異なるグループがあると思いますが，そういった違いで何か一定の傾向があるのでしょうか。あるいは，薬剤ごとに一つ一つやってみないと分からないものでしょうか。

柿元　農薬による天敵への影響は，ある程度農薬の化合物の種類によって影響が異なるような気がします。例えば有機リン剤や合成ピレスロイド剤のようなものは，概して天敵に強い影響を及ぼしていると思います。

従って，まずは個別の農薬というよりは農薬の系統によって天敵への影響はおおむね絞られてくると思います。

土着天敵の利用法について

質問　土着天敵のタバコカスミカメが非常に有効だとのお話でした。また，その虫はゴマやフウチョウソウで増殖が可能とか，西日本では自分で捕獲が可能ということでした。それらは一般の農家でも一度導入して，ある程度増殖すればそれを絶やさずに毎年有効に活用できるでしょうか。

柿元　タバコカスミカメはゴマやフウチョウソウさえあれば，ある程度毎年安定的に確保できる天敵だと理解していますし，現場の皆さんも実際にそのように継続して実践されていると思います。

ハイブリッド・バンカー法について

質問　ハイブリッド・バンカー法でヒメカメノコテントウをバンカーに導入するタイミングについてお伺いします。なぜその虫を天敵として選んだのか，その理由を教えてください。その場合アブラバチ（アブラムシ類の寄生蜂）への影響はありませんか。

柿元　個々の天敵を放飼する量や時期の話まで含めると煩雑になるので略しましたが，ヒメカメノコテントウをバンカー植物に入れるタイミングは，基本的にはバンカーでその天敵の餌になるアブラムシが増えていれば特にいつでも良いと思います。通常，大体バンカーを開始して１カ月から１カ月半程度が経過した頃だと思います。

次にこの天敵を選んだ理由は，まず施設栽培ですので，生産者が安定的に継続して入手できる資材であることが前提にあるので，市販されている天敵が対象になり，ヒメカメノコテントウあたりに必然的に絞られてきます。

またアブラバチへの影響はないとは言い切れないのですが，あったにしてもそれが防除効果全体に作用するような影響ではないと理解しています。

天敵の育種について

質問　例えばスワルスキーカブリダニなど，有効な天敵の品種改良は将来的にはいろいろな方策として考えるのでしょうけれど，例えばテントウムシでも「飛ばないナミテントウ」[注3)]の研究がされています。同じように有効な天敵については，例えば食生を広げて簡単に飼えるようにするとか，あるいは殺虫剤抵抗性を付けるといった天敵自体の品種改良のようなことは今後の方向としていかがでしょうか。

柿元　「飛ばないナミテントウ」などはその代表例かと思います。実は市販されている天敵もすでにそういった工夫がなされているものもあると理解しています。例えば，短い日長条件で休眠に入ってしまう天敵もいるのですが，休眠性を弱くするために選抜されてきた天敵資材もあると思います。そういった天敵の育種は重要な視点です。ただそれができるかどうかは，いろいろなケースによるので，やってみなければ分からないところも多々あろうかと思います。

天敵温存植物等のコストについて

質問　スワルスキーカブリダニの温存植物でスイートアリッサムがあると聞きました。10 a 当たり400株を植えるというと結構大変な気がします。ソバやヘアリーベッチ，ムギなどは単純に播種すればいいのでしょうが，花苗を植えるのは結構大変かなと思いますし，コストも少しかかると思います。何か対策はありますか。

柿元　ご指摘のとおり，直まきできる植物は簡単に播種できますが，苗を植える植物はその作業労力がネックになってきます。従って当該野菜の産地では，例えば花苗を生産する園芸農家と連携して，そういった植物を花苗の生産者が野菜生産者に販売する仕組みにも着手していただいています。その普及が進めば改善できるだろうと思っています。

おとり植物上で天敵の餌となる虫の種類

質問　おとり植物と障壁植物を組み合わせた取り組みでは，おとりになる天敵温存植物では，内側の作物を加害しない虫を付ける植物を選択する形でないといけないのか，もしくは中の作物を加害する虫が付くような植物であっても利用は可能なのか教えて下さい。

柿元　重要な視点だと思います。理想は対象の作物を加害しない虫が集まる天敵温存植物が理想ですが，これは不可能といってもいいぐらい難しいことです。

実際，私もスナップエンドウとソバの関係を研究する前には，スナップエンドウで問題になっている害虫はソバにも付くので，本来はスナップエンドウには寄生しないアザミウマが生育できる植物が天敵温存植物として理想だと思っていました。しかし，温存植物上にいる餌となる虫による本来の作物の加害に対する心配よりも，天敵の機能の方が勝っていたので，当初の不安を払拭してくれました。今のところ，そこは大きな問題ではないと思います。

なお，本日紹介したオクラのように，天敵温存植物だけを配置してその内側に障壁植物を配置しない場合は，なるべく本来の作物に対してリスクが小さい餌虫が繁殖できる物を選んできています。

天敵導入による生態系への影響

質問　施設で利用された天敵は利用後どのようになるのでしょうか。野菜の受粉用に放飼された外来種のマルハナバチが生態系の多様性に悪影響を及ぼすとされた事例もありま

注3）アブラムシを捕食する天敵だが，施設内に放飼しても，飛んで逃げてしまう問題があった。飛ぶ力の弱い個体を育種して天敵資材として実用化

す。

柿元　施設で用事が済んだ天敵は，その後，特別な処分は実施しません。そもそも施設で使う天敵等の生物農薬資材に関しては，そういう生態系のリスクはクリアした状態で登録・販売されているので，特別な処分は不要ですし，何らかの悪影響が生じるリスクは極めて小さいと理解しています。

質問　露地栽培の場合には，もともと土着天敵を利用するのでそれ自身は問題ないとは思いますが，わざわざバンカー植物を入れて天敵を増殖したりしているのをみて，本当に生態系に悪影響がないのか心配になります。

そもそも，対象になっている害虫やその天敵といったものを含めた個々の生態や生態系全体についての研究もある程度進んでいるのでしょうか。

柿元　露地で発生する主要な害虫やそこで機能する天敵に関する基礎的な研究というのは，突発的な害虫はさておき，基本的な実用上体系化を図るには問題ない程度の基礎的な知見は集積されていると思います。ただし分類がまだ整理されていない天敵もいます。そういった分類されていない天敵は生態研究にも支障があるので，それらについてはもっと基礎研究が必要です。

IPM における病害防除について

質問　IPM の中でも天敵を利用した害虫防除を中心にしたお話でしたが，野菜だと特に，べと病やうどんこ病や褐斑病のような病害に対する殺菌剤の散布の場面が多くありますが，それらに対する IPM の考え方の普及場面ではどのような工夫をされ，どのような薬剤の削減，あるいは労働費の削減の実証されているのか，あれば教えてください。

柿元　私も病害関連については直接タッチしてこなかったので，今回スライドには載せなかったのですが，今後，病害対策まで含めた IPM に進んでいくことは当然必要だと理解しています。

一つ例をお示しします。これは産地の創意工夫ででき上がった技術なのですが，代表的なのがうどんこ病に対する硫黄くん煙剤の利用です。ピーマンで一番問題になる病害がうどんこ病です。ピーマンにスワルスキーカブリダニを放す技術を導入したときでも，うどんこ病を対象に殺菌剤が多用されてしまうと，どうしても間接的にスワルスキーカブリダニも影響を受けてきました。ところが硫黄くん煙剤はわざわざ散布しなくても，くん煙器で硫黄をたく作業で施用できるので，それをうまく使うとうどんこ病が防除できます。うどんこ病が防除できると，殺菌剤の散布回数が大幅に軽減されるので，スワルスキーカブリダニへの影響も回避されます。

うどんこ病はある程度乾燥する条件下で発生し易いのですが，そのような乾燥条件下に施設を保った上で硫黄くん煙剤を入れ，うどんこ病さえ防除しておけば，それ以外の過湿条件で発生しやすい病害は耕種的に抑えられていきます。つまり良い連鎖が生じるということが産地で認められています。

私は今後，微生物殺菌剤といったものも，取り入れられるものはどんどん取り入れていくべきだと思いますし，そういう技術はもっと開発されてもいいのかなと思っています。

さらにスマート農業で施設の環境制御が進んでいけば，温湿度管理の側面からも病害対策の点ではプラスになると思いますので，スマート農業とのマッチングというのも不可欠だと思います。

IPM に対するスマート農業の貢献

質問　多様なスマート農業技術が最近登場してきています。潅水チューブや，露地栽培だとドローン利用の話が随分進んできていると思います。現在そういうところで IPM の

邪魔にならないスマート農業の取り組みをご存じでしたら，ご紹介いただきたいと思います。特に生育期の農薬の灌注処理の登録が進みつつありますが，こういった方法は普及しているのでしょうか。

柿元　今のところスマート農業で取り入れられている技術は少なくとも IPM にマイナスにはならないと思いますし，病害管理という点ではプラスに働くと思います。天敵利用についてもスマート農業の要素を取り入れる視点は必要だと思っていて，例えばドローンで天敵を散布するのはまだハードルが高いでしょうが，もっと天敵の放飼を省力化できるような装置やそういった研究は今後必要になると思います。

IPM と殺虫剤抵抗性管理の関係について

質問　アザミウマ，ハダニ，コナジラミなど，現場で殺虫剤抵抗性[注4)]が問題になりやすい害虫に対する天敵利用のことをお話になりました。また最後の方では，世界的にも重要な害虫であるツマジロクサヨトウの話題も出ました。この害虫に対する殺虫剤抵抗性を管理する上でも，農薬ばかりに頼るのではなく，IPM の発想で天敵を利用することも大切だと感じています

今回の話の中では IPM が殺虫剤抵抗性の管理にも貢献できるという側面からの話がなかったのですが，柿元さんのご意見をお聞かせ願いたいと思います。

柿元　天敵利用を主体とした IPM をすると，当然殺虫剤の散布回数が減ります。一方 IPM の考え方であっても，どうしても特効薬は使わざるを得ない場合が多々あります。しかし見方を変えてみると，IPM の導入により農薬散布回数が減るので，特効薬を温存できるというのは一つのメリットと思います。これは，殺虫剤抵抗性が生じないように管理することにもつながると理解しています。従って，IPM は間違いなく殺虫剤抵抗性管理に貢献できる技術だと認識しています。

国内で IPM が普及するための要因

質問　国内では IPM の普及はまだ部分的だと思いますが，現地でずっと活動されてきた中で IPM が普及しやすい条件や普及しにくい要因などをどのように考えていますか。

柿元　答えにくい難問ですが，私の率直な感想は現地指導に携わる地域の指導者の情熱だと思います。そういう人がいるかいないかで産地は大きく変わります。少なくとも私の経験ではそんな気がしています。そこで私の講演の最後のメッセージにも書きました。若い人に期待をしています。

注4) 同じ殺虫剤の多用で，そこにいる害虫にその殺虫剤が効きにくくなる現象