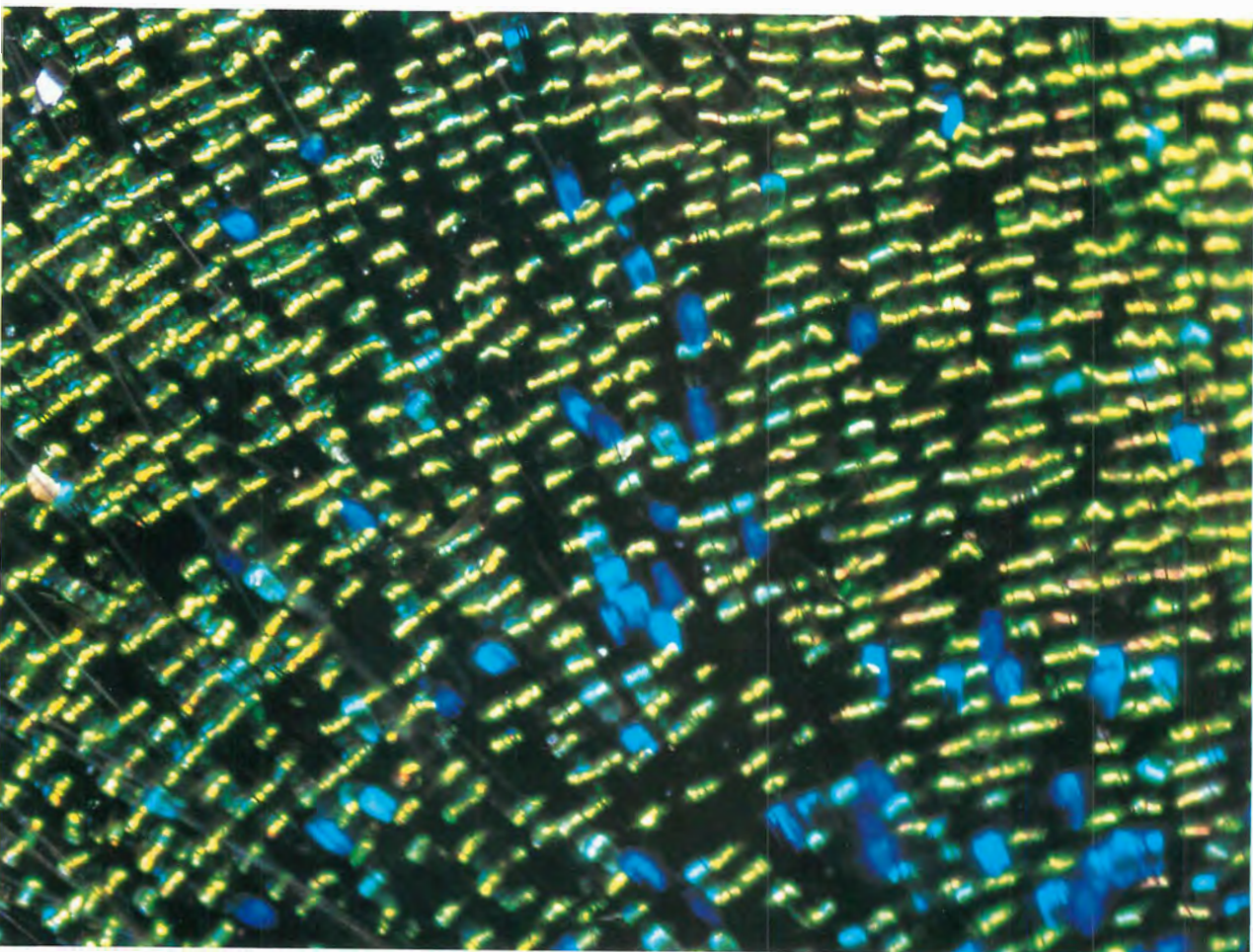


ISSN 0037-4091

植物防疫

特集号 昆虫産業



1995 **1 1** VOL 49

平成七年十月二十五日印刷
第四十九卷 第十一号

畑のチャンピオン、 ガゼットくん。

野菜・畑作害虫をノックアウト

特 長

- 抵抗性コナガ、キスジノミハムシ、ミナミキイロアザミウマなど難防除害虫に優れた効果を示します。
- かんしょやいちごのコガネムシ類(幼虫)、さとうきびのハリガネムシなど土壌害虫にすぐれた効果を示します。
- 優れた浸透移行性により、薬剤のかかりにくい部分でも十分な効果を示します。
- 優れた残効性により防除回数を減らすことが可能です。



ガゼット[®]粒剤

カルボスルファン…3.0%

®は米国FMC社の登録商標です。



日産化学



原体供給元

FMCコーポレーション

省力・経済防除。
 水稻初期害虫を
 同時にノックアウト。



ガゼット® 粒剤

カルボスルファン…3.0%

®は米国FMC社の登録商標です。



日産化学

FMC

原体供給元
 FMCコーポレーション

あなたの喜びが、私たちの喜びです。



研究開発のいちばんの大きなテーマは、あなたの満足です。

効果、品質、安全。すべての面において最良の製品であること。

私たちの企業のテーマはここにあります。

そしてそれをよりレベルの高い次元で実現するために、絶え間ない研究開発を続けています。

生産から販売さらには消費という、私たちのお届けする製品が関わるあらゆる場に

喜びをもたらすために、笑顔をもたらすために、私たちは努力を惜しみません。

私たちは日本サイアナミッドです。

日本サイアナミッド株式会社

東京本社 東京都港区六本木1-4-30 六本木25森ビル 〒106 TEL.03-3586-9712
 田原研究所 愛知県渥美郡田原町大字六連字神ヶ谷16-1 〒441-34 TEL.05312-7-1630
 掛川工場 静岡県掛川市細谷字山合635-15 〒436-01 TEL.0537-26-3721

フリーダイヤル

0120-22-3388

●ラベルをよく読んでください。●ラベルの記載以外には使用しないでください。●小児の手の届く所には置かないでください。

天敵微生物の改変と利用

飯塚敏彦氏原図（本文 20 ページ参照）



- ① マレーシアのカメロン ハイランドにおける一般農家で高地キャベツの栽培にBT剤が使用されている風景
② 使用されているBT剤（左より、FLORBAC（NOVO社）、DELFIN（SANDOZ社）、Zen Tari（ABOTT社）、Turex 50 wp（Ciba Geigi社））

信号物質の害虫制御への利用と産業的展望

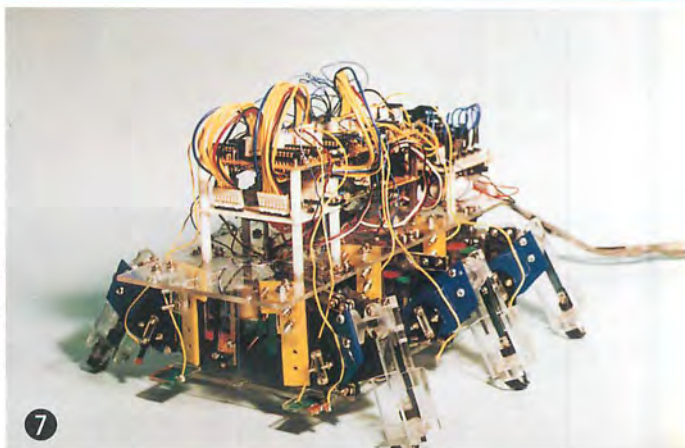
（本文 26 ページ参照）



- ③ 接触刺激性の合成フェロモンを塗布したゼラチンカプセルに反応しているキボシカミキリ雄成虫（深谷 緑氏原図）
④ ハスモンヨトウ 6 齢幼虫を倒して摂食虫のハリクチブトカメムシ（キシモフリクチブトカメムシ）5 齢幼虫（若村定男氏原図）
⑤ タイワンキドクガ雌成虫の尾毛に便乗しているドクガクロタマゴバチ（1 頭は尾毛上にいるが、やや後方の 2 頭は体を尾毛中に潜らせている）（新垣則雄氏原図）

昆虫の脳神経機能の工学的応用

（本文 30 ページ参照）



- ⑥ 昆虫の脳（カイコガ雄成虫の中脳の渡銀染色像）（神崎亮平氏原図）
⑦ 昆虫の歩行の神経システムを模倣して作製された6足歩行ロボット（東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻 三浦・下山研究室 提供）

新しい防除シーン を提案します。

フェロモン製剤は
新しい防除シーンを
提案します。

害虫の発生を予測する。
交信を攪乱して交尾を阻害する。
大量に誘引して防除する。

害虫の抵抗性を
発達させることがなく、
また殺虫剤の
散布回数を軽減する。

サンケイ化学のフェロモン製剤

【交信攪乱用製剤】

●コナガコン®(コナガ用)

●ヨトウコン®-S

(シロイチモジヨトウ用)

【大量誘殺用製剤】

●アリモドキコール®

(アリモドキゾウムシ用)

●オキメラノコール®

(オキナワカンシャクシコメツキ用)

【発生予測用製剤】

●コドリングコール®(コドリング用)

●SEルアー(ニカメイガ、コナガ、

シロイチモジヨトウ、カブラヤガ、

モモハモグリガ、キンモンホソガ、

チャノホソガ、シバツトガ、

スジキリヨトウ、ヒメコガネ、

アリモドキゾウムシ用)

※は登録商標



サンケイ化学株式会社

本社：〒890 鹿児島市唐湊4-17-6

東京本社：〒110 東京都台東区東上野6-1-7(MSKビル)

☎(0992)54-1161

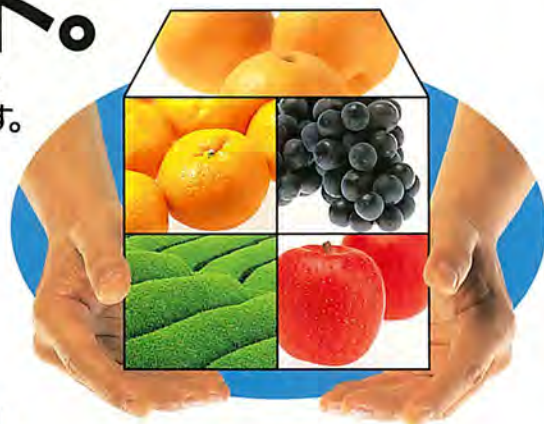
☎(03)3845-7951

タフな効きめで、 しっかりガード。

ぶどう、りんご、なしなどの病害に優れた
効果を示す、新しいタイプのEBI剤です。

●特長

1. 広範な病害の防除
2. 優れた持続力
3. 安定した効果
4. 低薬量・低濃度
5. 難防除病害にも有効



ツイン・アクションの園芸用殺菌剤



マネージ® 水和剤



北興化学工業株式会社 〒103 東京都中央区日本橋本石町4-4-20

®は北興化学工業の登録商標

植物防疫

Shokubutu bōeki
(Plant Protection)

第 49 卷 第 11 号
平成 7 年 11 月号

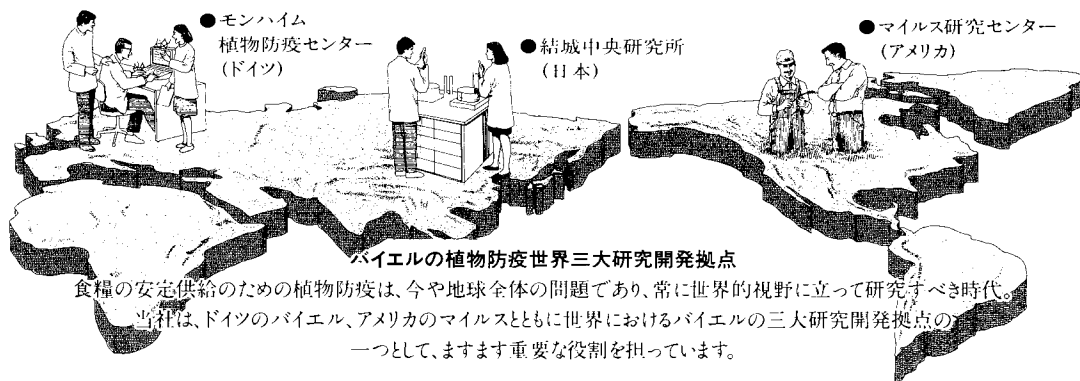
目 次

特集号：昆虫産業

注目される昆虫産業	梅谷 献二	1
昆虫の抗菌性タンパク質の生産と利用	名取 俊二	3
絹タンパク質の利用拡大	塚田 益裕	8
昆虫ホルモンの多目的利用	木内 信	11
産業としての天敵昆虫と花粉媒介昆虫の利用	池田二三高	16
天敵微生物の改変と利用	飯塚 敏彦	20
信号物質の害虫制御への利用と産業的展望	若村定男・新垣則雄	26
昆虫の脳神経機能の工学的応用	神崎 亮平	30
連載：諸外国の植物検疫制度（4）／オーストラリアの植物検疫制度	塚本和彦・笹井 司	35
（リレー随筆）産地の研究室から——地域ブランドを育てる／（2）飛騨紅かぶ	田中 一弘	41
新しく登録された農薬（7.9.1～9.30）		19
中央だより（病虫害発生予察ニュース）	43	人事消息 15
主な次号予告	25	出版部より 44

自然の恵みをより豊かにするために。

「確かさ」を追求…バイエルの農薬



新しい時代のニーズに合った 夢の新殺虫剤

アドマイヤー®

Bayer 

日本バイエルアグロケム株式会社
東京都港区高輪4-10-8 ☎108

美しい穂の仕上げをお手伝いします。

田植から収穫までにいろいろな病原菌が
イネの生育や米の品質に悪い影響を与えています。
ブラシン剤は、いもち病・ごま葉枯病をはじめ米の品質を低下させる
穂枯れ性病害に幅広く作用して美しい穂に仕上がります。



●いもち病・ごま葉枯病・変色米・紅変米に



●殺虫剤・殺菌剤の混合剤も取り揃えています。

いもち病菌

ごま葉枯病菌

すじ葉枯病菌

アルタナリア菌 (褐変穂起因菌)

カーブラリア菌 (変色米起因菌)

エピコッカム菌 (紅変米起因菌)

すみ黒穂病菌

●農薬は正しく使いましょう！

- 使用前にはラベルをよく読んで下さい。
- ラベルの記載以外には使用しないで下さい。
- 本剤は小児の手の届く所には置かないで下さい。



新発売

水稻の広域防除に空中散布専用剤

ブラシン[®]ザル

武田薬品工業株式会社 アグロ事業部 東京都中央区日本橋2丁目12番10号

注目される昆虫産業

社団法人農林水産技術情報協会技術参与 ^{うめ}梅 ^や谷 ^{けん}献 ^じ二

周知のように昆虫類は地上最大の動物群である。そして昆虫類は4億年を超える進化と適応の歴史の中で、生きるための様々な独自の機能を開発してきた。しかし、人類とのかかわりでは農業や衛生上の害を及ぼす存在として専ら排除の対象とされ、昆虫やその機能が産業的に利用されてきたものは、これまでミツバチやカイコなど数えるくらいしかない。

ところが、近年のバイオテクノロジーなど科学技術と機器の急速な進歩は、ようやく昆虫類の本能の領域に科学が介入することを可能にし、改めてその多彩な機能を科学的に解析・制御・再構築することによって産業的な利用開発が行われようとしている。

昆虫類の利用の場面は、ここにいくつかの例を示したように、大変多岐にわたる。そしてこうした技術開発は、将来的に農業をはじめ、生命科学・医学・工学などの広範な分野に対して、ほとんど無限の可能性を拓くことが期待され、昆虫こそ残された地上最大の未利用資源であるとの認識が世界的に高まってきた。

こうした背景を踏まえ、日本でも蚕糸・昆虫農業技術研究所の設立を契機に、関連研究が活発化しつつある。一方、農林水産省では産・学・官を包含した昆虫の産業的な利用開発についての組織的なプロジェクト研究を1992年に発足させ、“学・官”による基礎開発研究から、“産”による実用化への展開まで、一貫した研究体制を整備し、精力的に研究を推進している。

昆虫生体の利用

一口に「昆虫産業」といっても、その内容は多くの学問ジャンルを包含し、出口も農学の枠を大きく超えているが、農業面で最短距離の実用化が期待されているのが天敵昆虫や天敵微生物の利用である。この件については、すでに本誌においても再三にわたって解説されているが、産業利用という面に関しては日本ではまだこれからの問題である。欧米においては現在幾多の天敵販売企業が存在し、また、生物的防除を実施した場合に、国が補助金を支出している国も散見される。昨今こうした天敵を諸外国から購入して、国内で販売する動きがあるが、やはり、侵入害虫対策以外の場面では国産天敵の開

発利用をまず考えるべきであろう。またそのためには、有力な素材の探索、低コストの大量増殖法、保存・輸送法や品質管理法、作物生産現場での利用法と効果の科学的な評価法などの研究が必要で、わが国では特に施設栽培などにおける実用化が急がれるテーマである。

同様に、近年花粉媒介昆虫（ポリネーター）の減少が農業生産上の問題となっている。その需要は施設栽培を中心に急増し、汎用性のある素材の探索とその実用化技術の開発が急がれている。一方、家畜排出物による牧草の枯死や畜舎から発生するハエ類の公害も問題化している。食糞性昆虫や腐食性昆虫を利用して畜産排出物などの農業廃棄物を効率的に処理する技術開発と併せて、排出物で大量に増殖させた昆虫を家畜の濃厚飼料として還元するリサイクルについても研究が始まっている。

また、昆虫はさまざまな実験用の動物としても多用され、そのための新たな素材の探索と利用手法の開発も行われている。最近では蚕糸・昆虫農業技術研究所によって、新たな実験用昆虫としてのエビガラスズメの開発に成功している。

昆虫機能の利用

昆虫が生まれつき備えている多彩な生理・行動・形態的機能の利用は、世界的に注目されている。例えば昆虫の歩行や飛ぶ機能は、新しい小型ロボットやマイクロマシン開発のための絶好のモデルとして研究が進められている。また、昆虫の脳神経システムは脊椎動物よりもはるかに単純だが、記憶や学習能力など高度の機能を持つ。そしてそれは高等動物の脳機能を解明するモデルシステムとして注目され、近年、研究が急速に進展しつつある。さらに、昆虫は卓越した感覚受容能力を持ち、その機能はバイオセンサーや工学機器の制御システムへの利用から、将来は学際的な研究協力による知能ロボット開発へつながるものと期待されている。

また、昆虫細胞の人工培養による増殖技術が進展し、天敵微生物や有用物質を生産するためのバイオリアクターとしての利用研究が活発化している。昆虫の培養細胞は生産工程の自動化が可能となし、ほ乳類の培養細胞のような厳密な培養条件を必要としない等の利点を持ち、すでにこれによって天敵ウイルスの増殖や、ワクチン生産を目的としたデング熱等の病原ウイルスの増殖なども試

みられている。また、昆虫培養細胞は、後記の遺伝子組換えウイルスによる有用物質生産の系においても、こうした遺伝子産物への脂肪酸や糖鎖の付加、リン酸化、分泌アミノ酸配列の切断など、細胞内での異種有用タンパク質生産に不可欠で、大腸菌等の既存の培養細胞の欠点とされていた条件をカバーしている点から、その利用が注目を集めている。昆虫の細胞培地は高価な点が隘路になっているが、低コスト培地の開発と大量増殖システムの研究や、幅広い昆虫からの特異機能性細胞株や増殖効率の高い細胞株などの選抜法、形質転換細胞の作出などの研究が進展しつつあり、産業的利用も飛躍的に増大することが予想される。

昆虫産生物質の利用

昆虫は自己の生活を維持するために、実に多様な物質を自ら生産している。そしてこれらの物質の中には、利用価値の高いものが少なくない。特に、自個体の発育や変態等を司るホルモンや、生物間のコミュニケーションに用いる各種信号物質は、それを人為的に調節することによって様々な利用が考えられる。すでに、ホルモンを操作し、虫体を目的に合わせて大型または小型化させたり、ホルモンや性フェロモンで変態や配偶行動を制御して害虫防除のための素材として用いたりする多彩な利用開発研究が行われ、一部はすでに実用化されている。

昆虫は抗原抗体による免疫機構を持っていないので、生まれつきエイズに感染したような状態にある。しかし、それに代わる生体防御のしくみを発達させ、それが昆虫の生存を可能にしている。そのひとつに、体内に異物が侵入すると急速に生成される強力な抗菌物質があり、それが多くの細菌やカビに殺菌効果を示すことが明らかにされ、新たな医薬品の開発の可能性が開けようとしている。

また、カイコが桑の葉をやがて美しい絹糸に変える…こうした魔法のような物質変換機能も、昆虫の持つ顕著な特性のひとつである。例えばミツバチやカイガラシなど、ある種の昆虫が産生する蠟物質は石油ワックスでは得られない多くの優れた特性を持ち、電気機器の絶縁剤、情報記録剤、食品・医薬品のコーティング剤、マイクロカプセル添加剤、高機能プラスチックの離型剤等、多方面の近代的な用途開発が研究されている。さらには、古くから利用されてきた絹も、新たな特性が明らかにされるにつれて、利用面が急速に拡大されつつある。中でも絹タンパク質は、化粧品・機能性食品等への利用をはじめ、それを処理して得られる絹膜の酸素透過性と透明度は、人工皮膚などの医療用素材やコンタクト

レンズなどへの利用が期待されている。

昆虫関連微生物の利用

近年、昆虫に寄生、共生する微生物群の生存戦略が分子生物学的に解明されつつある。そうした研究を通して、昆虫の関連微生物は、抗生物質、抗ウイルス物質、免疫抑制物質などの新たな医療用の物質の探索源として有望視されている。また、一部の昆虫病原微生物は、生物農薬として利用が始められているが、汎用性、即効性の強化などを目的に、微生物が持つ殺虫性タンパク質の化学修飾や分子育種にまで研究が展開されている。例えば、昆虫寄生性のバキュロウイルスに、選択的な殺虫作用を持つサソリ毒素の遺伝子や昆虫ホルモンを不活化させる遺伝子を組み込むことに成功し、その農薬としての利用を飛躍的に広げつつある。

一方、バキュロウイルスは、有用物質を生産するための遺伝子導入ベクターの中でも利用性と物質合成能力に優れ、バイオテクノロジーの有力な素材として世界的に注目されている。現在すでに、このウイルスを用いた各種の有用タンパク質の製造が数多く特許公開されている。また、昆虫の生体や前記の昆虫培養細胞との組み合わせの系による、こうした有用物質生産のシステムを確立するためには、外来遺伝子の発現制御など解決を要する多くの課題が残されているが、昆虫産業の将来的可能性としては、この分野にもっとも大きな期待がかけられている。

将来展望

昆虫の産業的利用の研究は、多くの夢を乗せて「昆虫との平和共存」を合言葉に、いま具体的な行動に入ろうとしている。この“地球にやさしい”産業の日本における現在の市場規模は、養蚕と養蜂を中心に約2,600億円程度であるが、技術開発が順調に推進されれば、約40年後には昆虫やその関連微生物を利用した有用タンパク質や医薬品の生産、昆虫遺伝子を導入した耐虫性作物の普及、昆虫由来の知能ロボットの開発などによって、5兆円以上の市場が形成されると期待されている。

しかし、この夢を現実のものとするためには、産・学・官が一体となった地道な技術開発研究の努力が必要になってこそはじめて可能である。昆虫類が地上最大の未利用資源であることは疑う余地がない。ただ、これを生かすも殺すも人類側の対応いかんにかかっている。せっかく発芽したこの芽が大きく育ち、昆虫類が来るべき21世紀の科学技術の素材として中枢を担うようになることを大いに期待したい。

昆虫の抗菌性タンパク質の生産と利用

東京大学薬学部微生物薬品化学教室 名 取 俊 二

はじめに

昆虫は、その種の多さから見ても、個体数の多さから見ても、現在地球上で最も繁栄している生物の一つであることは、まぎれもない事実である。このように昆虫が繁栄しているのは、種を保存するための生殖能力と、個体を保護するための生体防御能力が他の生物に比べて優れているためだといわれている。しかしこれ以外にも、昆虫には人知では測れないような超能力があって、それが彼らの繁栄を支えているのではないかと感ずることがしばしばある。よく経験することであるが、夕方キャベツやブロッコリーなどの苗を移植し、翌朝畑に出てみると、その中の何本かが根元からものの見事に切り倒されて倒れていることがある。これはいわゆるネキリムシの仕業で、切り倒された苗の根元を掘ってみると、薄汚い黒褐色のハダカ虫が丸まっている。いつも不思議に思うのは、この虫が苗の在りかをどのようにして感知しそこへ到達するのかということである。犬も歩けば棒に当たるで、夜どおし畑の中を歩き回っていて、たまたまキャベツやブロッコリーの苗に行き当たるわけではあるまい。この虫には何かセンサーがあって、それがこのような美味しい苗の存在を感知し、遠方からその方向へ移動してくるのではないかと思うのだが、昆虫のこのような不思議な能力についてはどれだけ解析が進んでいるのだろうか。昆虫産業というのは、こういった昆虫の持つ超能力を、システムとして研究したり、あるいは昆虫から有用性の高い物質を取り出したりして、それらを基盤とした新しい産業を開拓するプロジェクト、と理解している。

私たちはもう 20 年近く、昆虫の生体防御機構について研究をつづけている。昆虫の生体防御機構として注目されるのは、まず第一に、抗菌性タンパク質やレクチンに代表される体液性の生体防御因子が形成する生体防御ネットワークが挙げられる。次いで、体液細胞が関与する生体防御システムがある。もう一つ注目してよいのが、昆虫の持つ組織再生能力である。私は薬学部に所属しているので、どうしても人間の疾病の治療や予防といった観点から昆虫の生体防御機構を論ずることになるが、『そ

れなら何故人間ではなくて昆虫なのか』という質問をもう何十回となく受けてきた。その際の私の回答は、『人間の病気の治療や予防を考えるときに、人間だけを見ていたのではどうしても分らない部分がある。比較生物学的な視点が是非とも必要である』というものであった。今年の初め、ドイツの免疫学者 Jan KLEIN が『免疫学におけるヒト中心的排他主義』という論文を発表した (KLEIN, 1995)。この論文の要旨をここで解説するつもりはないが、この論文の中に上の質問に対する模範回答が示されているように思える。

本稿では昆虫、特にセンチニクバエの抗菌性タンパク質について要約を記す。昆虫の抗菌性タンパク質に関する研究はヨーロッパで先鞭がつけられ、広く世界的に行われるようになった。昆虫は一般に、バクテリアの感染や体壁の傷害に応答して、強力な抗菌性タンパク質を体液中に作り出すことが知られている。センチニクバエの場合も、体壁に傷をつけた幼虫の体液からこのような誘導性の抗菌性タンパク質が精製され、その性質が明らかになっている (NATORI, 1994)。この種のタンパク質の特徴として、構造的によく似た抗菌スペクトルが少しずつ異なる複数のホモログが存在することが挙げられる。また、センチニクバエの場合、幼虫の体液の中に抗真菌活性を持った構成的なタンパク質が存在する。以下に、この種のタンパク質の主なものについて解説し、その遺伝子発現機構ならびにその医薬への応用について述べる。

I センチニクバエの主要な抗菌性タンパク質

1 グラム陰性菌に作用するタンパク質

現在までに、グラム陰性菌に致死的に作用するタンパク質が 4 種類ほど見いだされている。センチニクバエの学名が *Sarcophaga peregrina* であることから、このハエが作り出す毒性タンパク質という意味で、これらのタンパク質を総称してザルコトキシンと呼んだ。ザルコトキシンの中で最も抗菌活性が強いのがザルコトキシン I と呼ばれるアミノ酸 39 個からなるタンパク質である (OKADA and NATORI, 1983)。ザルコトキシン I には、IA から IE までの 5 種類のホモログが知られており、その構造を示したのが図-1 である。この図から明らかなように、これらのタンパク質はその一次構造はきわめてよく似ている。図-1 の一次構造をよく見ると、アミノ末端側

	1	5	10	15	20	25	30	35	40																												
ザルコトキシシン IA	G	W	L	K	K	I	E	R	V	G	Q	H	T	R	D	A	T	I	Q	L	G	I	A	Q	A	A	N	Y	A	A	T	A	R				
ザルコトキシシン IB	G	W	L	K	K	I	E	R	V	G	Q	H	T	R	D	A	T	I	Q	V	I	G	V	A	Q	A	A	N	Y	A	A	T	A	R			
ザルコトキシシン IC	G	W	L	R	K	I	E	R	V	G	Q	H	T	R	D	A	T	I	Q	V	L	G	I	A	Q	A	A	N	Y	A	A	T	A	R			
ザルコトキシシン ID	G	W	I	R	D	F	G	K	R	E	R	V	G	Q	H	T	R	D	A	T	I	Q	T	I	A	V	A	Q	A	A	N	Y	A	A	T	L	K
ザルコトキシシン IE	G	W	L	K	K	I	E	R	V	G	Q	H	T	R	D	A	T	I	Q	L	G	I	A	Q	A	A	N	Y	A	A	T	A	R				

図-1 ザルコトキシシンIの構造

ボックスで囲った部分は保存されている配列を示す。

の19残基は比較的親水性であるのに対して、カルボキシル末端側の20残基は疎水性であることがわかる。NMRの解析の結果、ザルコトキシシンIは二つの α -ヘリックスがちょうつがいにつながったような構造をしていることが示された。ザルコトキシシンIは分子全体としては両親媒性であり、膜と相互作用ができる構造をしている。遺伝子の解析から、これらのホモログはいずれも独立した遺伝子の産物であり、おのおのの遺伝子は比較的狭い領域にクラスターを形成して存在することが示された。以後、最も研究が進んでいるザルコトキシシンIAについて述べる。

ザルコトキシシンIAは種々のグラム陰性菌に対して、1~10 $\mu\text{g/ml}$ の濃度で致死的に作用する。またこのタンパク質は、胃がんや胃かいようを引き起こすのではないかと、今問題になっている病原菌、ヘリコバクターピロリ (*Helicobacter pylori*) に対しても有効である。このタンパク質の作用機構を検討した結果、ザルコトキシシンIAはグラム陰性菌の細胞膜に働き、膜の電気化学的なポテンシャルを消失させることが明らかになった。すなわち、大腸菌にザルコトキシシンIAを作用させると、ATPの含量が速やかに減少して、数分以内にほとんどゼロになる。このような菌では、プロリンのようなアミノ酸の能動輸送は全く観察されない。ATP合成もプロリンの輸送とともに膜の電気化学的なポテンシャルにより駆動される反応であることが知られている。ザルコトキシシンIAは両親媒性であるために容易に膜と相互作用を持ち、膜の電気化学的なポテンシャルを破壊するものと思われる。

基質レベルのリン酸化のみでATP合成を行っている大腸菌の変異株が知られているが、このような変異株ではザルコトキシシンIAが効きにくい。このことから、ザルコトキシシンIAにより菌が死に至る直接の原因は、膜機能の喪失によると考えられる。ザルコトキシシンIAはグラム陽性菌には効果がないが、これはバクテリアの表層構造の問題であろうと思われる。グラム陽性菌のペプチドグリカン層はグラム陰性菌のそれに比べるとはるか

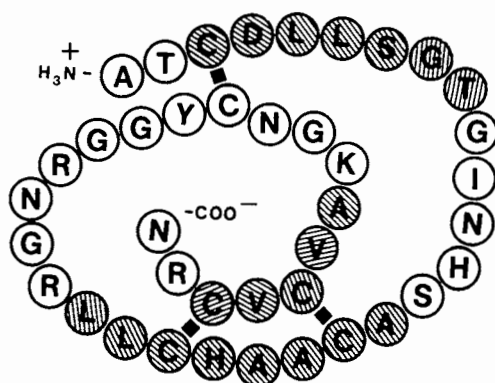


図-2 ザーペシンの構造 (アミノ酸の配列と結合)

に厚いため、ザルコトキシシンIAが細胞膜に容易に到達できないのかもしれない。

2 グラム陽性菌に作用するタンパク質

ザーペシンは主としてグラム陽性菌に対して抗菌性を示すタンパク質である (MATSUYAMA and NATORI, 1988)。ザーペシンには現在3種類のホモログが知られており、ザーペシン及びザーペシンCはアミノ酸40個よりなるが、ザーペシンBはアミノ酸34個よりなるタンパク質である。いずれも分子内に3対のジスルフィド結合が存在する。このうち、ザーペシンに関して研究がいちばん進んでいるので、以後このタンパク質について解説する。ザーペシンの構造を図-2に示した。ザーペシンの黄色ブドウ球菌と大腸菌に対する最小生育阻止濃度 (MIC) を比較すると、5 $\mu\text{g/ml}$ および 100 $\mu\text{g/ml}$ で20倍もの差がある。NMR解析の結果このタンパクはアミノ末端側から順に、ループ構造、 α -ヘリックス構造及び二つの β -シート構造を持っていることが判明した。ザーペシンの標的もバクテリアの膜で、膜構成リン脂質の一つカルジオリピンと強い親和性を持つことが示されている。おそらくザーペシンは、ザルコトキシシンIAと同様に膜機能に損傷を与えることにより、バクテリアを死に至らしめるものと思われる。その際にカルジオリピンの存在が重要であることは、大腸菌のカルジオリピン合成酵素を欠く変異株では、ザーペシンに対する感受性が低下しているという事実からも支持される。

3 真菌に作用するタンパク質

昆虫に感染する病原性微生物は細菌だけではない。ウイルス、真菌、原虫など様々な微生物が存在する。いまままで述べてきたタンパク質はすべて抗細菌性のタンパク質であるが、センチニクバエはいわゆるカビを殺す抗真菌性のタンパク質を産生していることが明らかになった (IJIIMA et al., 1988)。図-3は幼虫の体液中の抗真菌活性

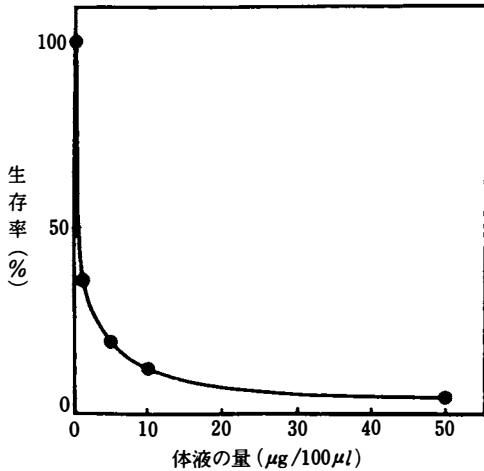


図-3 幼虫体液の抗真菌活性
一定数のカンジダアルビカンスに対して種々の濃度の幼虫体液を加えインキュベーション後、生菌数の変化を調べた。

を、カンジダアルビカンス (*Candida albicans*) を標的菌として調べたものである。加えた体液の量に依存して菌が死んでいくのがわかる。ここで注意すべきは、この体液は正常な幼虫から採取したもので、体表に傷害を受けた幼虫の体液ではない。したがって、この抗真菌活性は誘導性のものではなく、常に体液中に存在する活性ということになる。体液を 100°C で加熱しても抗真菌活性は失われなかった。そこで、体液を 100°C で加熱して大部分のタンパクを変成させて除去した上清から、抗真菌活性を持つタンパク質の精製を行った。精製したタンパク質の分子量は約 7,000 で、電気泳動的に単一であった。このタンパク質を AFP と命名した (antifungal protein の略)。

精製したタンパク質の部分アミノ酸配列を決定し、その配列をもとに AFP の cDNA を単離した。cDNA を解析した結果、AFP は 67 個のアミノ酸からできていた。そしてそのアミノ酸組成には偏りがあり、グリシンとヒスチジンが全体の 50% 以上を占めている。また分子内にいくつかの繰り返し配列が存在する。AFP の作用機構についてはほとんどわかっていないが、カンジダにこのタンパク質を作用させると、細胞内から物質の漏出が起きることがわかった。これは、AFP の標的が多くの抗細菌性タンパク質と同様に細胞の膜である可能性を示唆するが、AFP は大変溶解性の高いタンパク質で、分子内に疎水性のドメインは存在しない。

II 抗菌性タンパク質の遺伝子発現機構

以上述べてきた抗菌性タンパク質は AFP を除きすべて誘導性で、幼虫の体壁に傷をつけたときに、遺伝子レベルで活性化されることが分かっている。この遺伝子の活性化には、*Rel* ファミリーの転写因子が関与することが、明らかになった。*Rel* ファミリーの転写因子の代表的なものとして、ほ乳動物の NF- κ B がよく知られている。事実、これらの抗菌性タンパク質の遺伝子の 5' 上流には例外なく NF- κ B の結合配列が存在する (Kobayashi et al., 1993)。また、実際に *Rel* ファミリーの転写因子と考えられる、この配列に結合する分子量 59 kDa のタンパク質が精製されている。これらの遺伝子は、バクテリアやカビの細胞壁成分である LPS や、 β -1, 3-グルカンによって活性化され、転写が開始されることが示されている。しかし、これらの物質の刺激がどのような経路で遺伝子の活性化を引き起こすかという、いわゆるシグナル伝達の経路については、今後の研究に待たなければならない。

III 抗菌性タンパク質の活性中心の同定と医薬への応用

以上述べてきた昆虫の抗菌性タンパク質を、ヒトの感染症の治療あるいは予防のために使用しようとするとき、まず問題になるのがその抗原性である。ザルコトキシニン IA にしてもザーペシンにしても、アミノ酸残基数から見て当然ヒトの体内で抗体ができると思われる。そこで、この種の抗菌性タンパク質の抗菌活性部位の同定を試みた。もしアミノ酸数残基の活性中心が同定できれば、それは低分子のペプチドであるので、抗原性の心配はなくなることになる。ザーペシン B はザーペシンのホモログで、アミノ酸残基数はザーペシンより 6 残基少ない。ザーペシン B も構造的にはザーペシン同様、ループ構造、 α -ヘリックス構造及び二つの β -シート構造を持っているので、おのおのの構造に相当するペプチドを合成し、いずれかのペプチドに抗菌活性が認められるかどうかを調べた (Yamada and Natori, 1994)。その結果、7 番目のアルギニンから 17 番目のリジンまでのアミノ酸 11 残基よりなるペプチド (RSLCLLHCRLK) に、もとのザーペシン B とほぼ同程度の抗菌活性が認められた。この部分はザーペシン B の α -ヘリックス構造に相当し、このタンパク質の活性中心と考えられる。

このペプチドの性質を調べた結果、カルボキシル末端をアミド化すると抗菌活性が上昇すること、アミノ酸配列を変えることにより、より活性の強いペプチドを作出

表-1 様々な細菌に対する合成ペプチドの最性育阻止濃度 (MIC)

合成ペプチド	MIC ($\mu\text{g/ml}$)		
	黄色ブドウ球菌	大腸菌	薬剤耐性黄色ブドウ球菌
RLKLLLLRLK-NH ₂	1	20	30
RLKLLLLRLK-NH ₂	2	20	>35
RLKLLLRLK-NH ₂	2	30	>35
KLKLLLLKLK-NH ₂	2	20	30
RLRLLLLRLR-NH ₂	2	>35	>35
HLHLLLLHLH-NH ₂	>16	>35	>35
KKLLLLKK-NH ₂	>16	>35	>35
KLLLLLK-NH ₂	>16	25	>35
KLKLLLL-NH ₂	8	20	>35

することが可能であることなどが明らかになった。そこで、このペプチドを種々改変した結果、RLK または KLK というモチーフを両端に持ち中間に L が 5 個並ぶ構造のペプチドが黄色ブドウ球菌に対して強い抗菌活性を示し、大腸菌に対しても有効であることがわかった。この結果をまとめたものが表-1 である。

表から明らかなようにこれらのペプチドは、薬剤耐性黄色ブドウ球菌 (MRSA) に対してもある程度有効であった。また、両末端の塩基性モチーフは KLK または RLK という構造が重要で、HLH や KK あるいは K のみでは活性は著しく低下することがわかった。表の最下段にカルボキシル末端の KLK を除いたペプチドの活性を示してあるが、このようなペプチドにも有意な抗菌活性が認められた。したがって、カルボキシル末端側の KLK は、活性にそれほど重要な寄与はしていないように思われる。KLKLLLLKLK-NH₂ はアミノ酸が 2 種類で合成が容易であり活性が比較的に強いので、以後はこのペプチドを使って研究を進めた。このペプチド (KLK-NH₂ と略す) はリジンを多く含むために、トリプシンのようなプロテアーゼによって容易に分解されてしまうことが分かった。そこで、KLK-NH₂ のすべてのアミノ酸を D-アミノ酸で置き換えた D-エナンチオマーを合成した。KLK-NH₂ とその D-エナンチオマーのトリプシンに対する感受性を比較すると、KLK-NH₂ が完全に分解される条件下でも D-エナンチオマーは全く分解されなかった。

この二つのペプチドの MRSA に対する活性を見たのが図-4 である。KLK-NH₂ を 15 $\mu\text{g/ml}$ 添加すると、菌の成長は 12 時間目までは 80% 程度抑えられるが、その後菌は成長を開始し 24 時間目ではほぼ 100% まで回復する。一方、D-エナンチオマーを同量添加した場合には、24 時間培養しても菌の成長は認められなかった。この事

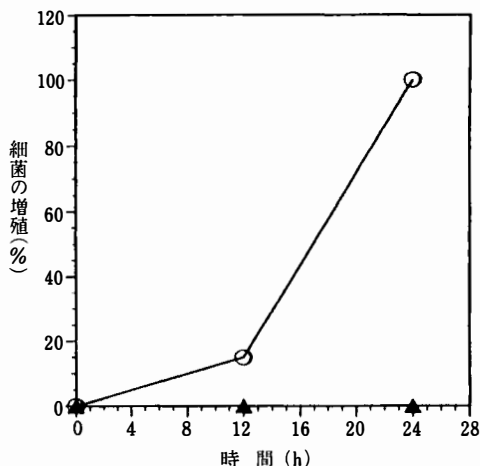


図-4 MRSA の成育に及ぼすペプチドの効果
15 $\mu\text{g/ml}$ のペプチドを添加した培地での MRSA の成育を調べた。

○: KLK-NH₂, ▲: D-エナンチオマー

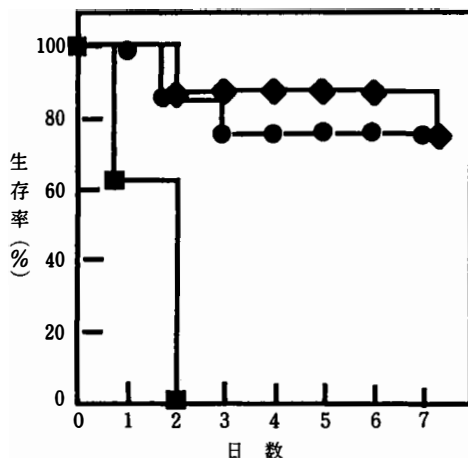


図-5 抗菌ペプチドによる MRSA 感染マウスの治療実験

MRSA を静脈内に接種し、15 分後に KLK-NH₂ またはその D-エナンチオマーを 100 μg 静注し経過を観察した。一群 8 匹のマウスを使用した。

■: 生理食塩水投与群, ◆: KLK-NH₂ 投与群,
●: D-エナンチオマー投与群

実は、MRSA が培地中に分泌するプロテアーゼによって KLK-NH₂ は 12 時間目までに完全に分解されてしまい、生き残っていた菌が増殖するのに対して、D-エナンチオマーはプロテアーゼによる分解を受けないために持続的に菌の増殖が抑えられるものと解釈される。したがって、抗菌性という点では D-エナンチオマーのほうが優れているといえる。

このペプチドの作用機構についてはまだ詳しく解析していない。しかし、大腸菌の膜のリン脂質組成を模して作製したリポソームにグルコースを封入し、このペプチドを添加すると、濃度依存的にグルコースの漏出が起きることから、膜作用性であることが推察された。そこで、羊の赤血球を使ってこのペプチドの溶血活性を調べたところ、二つのペプチドともに溶血活性は全く認められなかった。おそらく、これらのペプチドはバクテリアの膜に選択的に作用し、動物細胞に対する毒性は低いように思われる。

最後に、この二つのペプチドを使って MRSA 感染防御の実験を行った。マウスにあらかじめサイクロフォスファミドを投与し MRSA の感染を可能にしておいて、静脈内に MRSA を感染させた。15 分後にこれらのペプチドを一匹当たり 100 μg を 1 回静注した。その後、感染の経過を 7 日間観察した結果を図-5 に示した。図から明らかに、生理食塩水を投与した群は 2 日以内にすべてのマウスが感染症を起こして死んだが、ペプチド投与群では 70% 以上のマウスが生存していた。興味深いことにプロテアーゼ感受性の KLK-NH₂ の方がその D-エナンチオマーよりも成績が良かった。この結果には再現性があり、抗菌ペプチドの有用性が個体レベルの実験でも実証されたことになる。この結果がすぐヒトの感染症に適用されるものではないが、この種の抗菌ペプチドは将来の医薬のシーズとして有用であると思われる。

お わ り に

以上、本稿ではセンチニクバエの抗菌性タンパク質について解説したが、この昆虫の防御システム全般について次のようなことがいえる。まず第一に、一つの抗菌性タンパク質には複数のホモログが存在する。おそらく、個々のタンパク質はそれぞれ少しずつ異なる抗菌スペクトルを持っていて、全体として多様なバクテリアに対応できるようになっているのではないと思われる。

第二に、AFP 以外のすべてのタンパク質が誘導性であった。すなわち、この種のタンパク質は通常は存在せず、体表に傷ができたような緊急時に一過性に出現することになる。これを昆虫サイドから見ると、一過性にこの種のタンパク質を発現させ、必要がなくなると速やか

に消失させることで耐性菌の出現を防いでいる可能性が考えられる。

最後に、この種の抗菌性タンパク質は全体として大きなネットワークを形成している可能性がある。というのは、本稿ではふれなかったが、ザルコトキシシン IA には抗真菌活性は認められないが、このタンパク質を少量 AFP に加えると、AFP の抗真菌活性が著しく増強されることがわかっている。すなわち、AFP は常時体液中に存在してあるレベルの抗真菌活性を維持しているが、緊急時にザルコトキシシン IA が産生されると相乗的に AFP の抗真菌活性が高められることになる。これは昆虫の生体防御機構の優れた特質であり、昆虫が自己防御のために獲得した巧妙な戦略なのかもしれない。

このように見てくると、昆虫には体の中に薬を作り出す能力があるということになる。これらの抗菌性タンパク質は遺伝子レベルで活性化を受けることがわかってきたが、他の動物にこのような機構が備わっているかどうかは不明である。スウェーデンの微生物学者 Hans Boman はブタの小腸からザルコトキシシン IA と構造的によく似たタンパク質を取り出している。ブタにあるならヒトにあってもおかしくはない。もしヒトにも、昆虫と同じような生体防御機構があつて、なんらかの方法でそれを活性化することができれば、われわれは必要なときに強力な抗菌性タンパク質のネットワークを体の中に作り出すことができる。抗菌タンパク質の活性中心の同定も重要であるが、ヒトのこのような抗菌性タンパク質の遺伝子を探索し、その活性化を考えることも、これからの重要な課題のように思われる。

引 用 文 献

- 1) IJIMA, R. et al. (1993): J. Biol. Chem. 268: 12055~12061.
- 2) KLEIN, J. (1995): 科学, 65: 55~62.
- 3) KOBAYASHI, A. et al. (1993): Mol. Cell. Biol. 13: 4049~4056.
- 4) MATSUYAMA, K. and S. NATORI (1988): J. Biol. Chem. 263: 17112~17116.
- 5) NATORI, S. (1994): *in* Antimicrobial Peptides (Boman H. G. ed.) John Wiley & Sons, New York, pp. 123~134.
- 6) OKADA, M. and S. NATORI (1983): Biochem. J. 211: 727~734.

絹タンパク質の利用拡大

農林水産省蚕糸・昆虫農業技術研究所 塚 田 益 裕

はじめに

カイコが作る絹は、優雅な風合いと優れた感性に富み繊維素材の女王に例えられている。吸湿性と染色性等の実用性能が良好な絹は理想的な衣料素材である。絹衣料が皮膚障害軽減に有効であるとの最近の報告がある(清水ら, 1995)。伝統的なこうした衣料材料としての利用とは別に、バイオ素材を始め各種の産業材料として絹を利用しようとの研究が進展するようになった。

純粋なタンパク質がカイコを通じて簡単に、しかも年間を通して随時入手することのできることは絹タンパク質を調達する上での利点である。絹を溶かした水溶液の蒸発速度を制御すると溶液状、粉末状、あるいは膜状など形の異なる素材が調整できる。水に対する絹素材の溶解特性を穏やかな条件で調節できることは、他の生体高分子にはない絹だけの長所である。絹製の縫合糸が古くから用いられてきたことは、絹が人体に対して安全な生体素材であることを意味しており、今後の絹利用を考える上で示唆するところが多い。

ここでは、絹素材の調整法と非衣料分野における利用拡大の実例を紹介し、今後の展開方向を見定めることにしたい。

I 絹タンパク質素材の調製方法

絹タンパク質繊維を塩化カルシウムや臭化リチウム等の濃厚な水溶液に溶かし純水で透析すると、利用価値の高い再生絹タンパク質水溶液が得られる。成熟したカイコ体内にある絹糸腺の内容物の分散水溶液も有効に利用できる。成熟したカイコを解剖して体内の様子を見たものが図-1である。蚕の体内には20 cm以上に及ぶ絹タンパク質の貯蔵器官の絹糸腺がある。絹フィブロインは後部絹糸腺で生合成されて順次前方へと移行し、中部、前部絹糸腺を経て吐糸口から繭糸へと変身する。再生絹フィブロイン溶液あるいは絹糸腺内容物を分散した水溶液をポリエチレン膜の上に薄く広げて試料水溶液を蒸発させると透明な絹膜ができる。絹膜は水溶性性であるが、メタノール水溶液で軽く処理するだけで水不溶性に変化してしまう。絹タンパク質はなんと不思議な特性

の変化を示すものである。

II 絹の利用拡大の実例

蚕糸・昆虫農業技術研究所では、絹タンパク質の構造と物性に関する基礎的な情報や絹の新しい利用技術を開発するために必要な知識を蓄積している。

1 細胞付着・増殖膜

有益な浮遊細胞を経済的に低コストで、しかも効率的に培養する技術を開発することは、免疫工学あるいは細胞工学といった関連分野においてはきわめて重要である。家蚕絹フィブロイン表面の化学構造と生体細胞の相互作用との相関を解明する研究が進んでいる。マウス由来の繊維芽細胞L929を用い、試料膜の表面上に10%の子ウシ血清を含んだ細胞浮遊液(約10万/ml)を加え、所定時間培養してフィブロイン膜上での細胞の付着・増殖の実験を試みた(MINOURA et al., 1995)。細胞付着率は、培養17時間後の値で、また細胞増殖率は50時間後の値で評価することにした。絹フィブロインは、従来、細胞の付着性が良好なコラーゲンに匹敵する優れた細胞付着・増殖能力を持っている。絹表面は生体細胞の足場

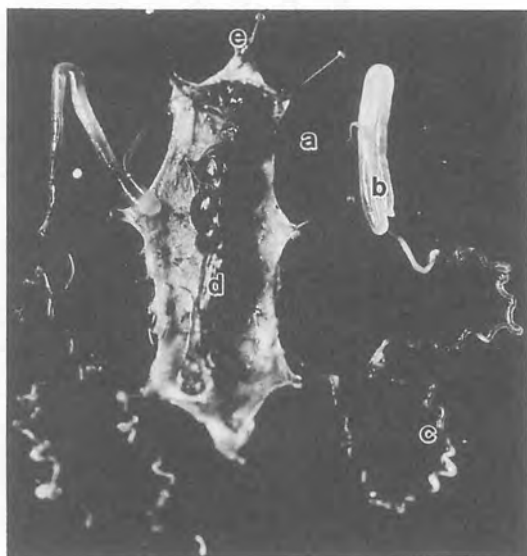


図-1 カイコ体内の解剖図

a: 前部絹糸腺, b: 中部絹糸腺 (絹が多量に蓄積されている), c: 後部絹糸腺 (フィブロインが生合成される部位), d: 中腸 (消化器官), e: 吐糸口

Exploitation of various kinds of silk protein-based materials. By Masuhiro TSUKADA

となり細胞の増殖を促進する材料となっているのであろう。また、家蚕の絹とは化学組成を異にする野蚕絹フィブリン表面で生体細胞の付着増殖性が良好なのは、野蚕の絹フィブリン遺伝子の cDNA の塩基配列に細胞接着活性ペプチド Arg-Gly-Asp (RGD) の配列を持つ部位が存在するためであろう。一方、家蚕絹フィブリン表面で細胞付着増殖性が良いのは、C 末端の塩基性領域によるものと考えられる。

2 絹フィブリンへの化学修飾加工

絹フィブリンに含まれるアルギニン(Arg)残基は正の電荷を持つ面白いアミノ酸である。含量がわずか 0.4 mol% と微量であるにもかかわらず生体細胞の付着に深く関連している。Arg 残基の側鎖部分への化学修飾加工が検討されている (Gotoh et al., 1992)。絹フィブリン水溶液にホウ酸ナトリウムと 1,2-シクロヘキサジオン (CHD) を加え 37°C で反応させると絹の Arg 側鎖を CHD で修飾できる。修飾 Arg は、アミノ酸分析において、未反応 Arg と異なる位置に溶出するため、両者の溶出位置の比較により修飾率の評価が可能となる。反応 3 時間で絹フィブリンの Arg は完全に修飾されることが確かめられた。CHD 修飾絹フィブリンは、特徴ある生化学特性を示すことから、バイオ材料として付加価値の高い利用が可能となろう。

3 病原虫の貼付材と同定用貼付材

カイコを飼育する養蚕に重大な被害を及ぼす微粒子病原虫 (微孢子虫) 胞子の抗体をスチレンのラテックス粒子に結合させ、これと微粒子病原虫胞子との凝集反応の有無をみることによって微粒子病原虫が簡易に同定できる。蚕糸・昆虫農業技術研究所では、微生物や微粒子病原を顕微鏡で観察する際の貼付剤として利用できることを見だし、これを上述のラテックス法に応用することにより供試原虫の識別・同定を容易にした。

4 物質透過性絹フィブリン膜

バイオ素材は生体内という特殊な環境で用いられる。直接・間接的に生体に接触するので、人体に対する生体適合性、細胞付着性、酸素透過性の諸性質が優れていることは医用材料に望まれる特性である。絹フィブリン膜をアルコール処理すると水に溶けなくなる。アルコール溶液中での処理時間を変えることで絹フィブリン膜の酸素透過量が制御できることが明らかとなった。絹膜の酸素透過量は、コンタクトレンズ素材に多く用いられる 2-ヒドロキシエチルメタクリレート共重合体とほぼ同等である。

人工皮膚素材のいちばん大切な機能特性は、水蒸気透過性である。絹が人工皮膚として適する水蒸気透過性を

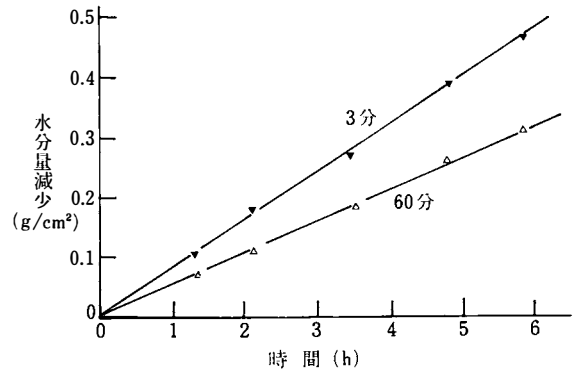


図-2 絹フィブリン膜における水蒸気透過量と不溶化時間の影響
不溶化時間 (分): ▼3, △60

持つか否かを調べてみた。図-2 は絹フィブリン膜に対する水蒸気透過性を調べたものである。メタノール処理による不溶化時間 3 分、60 分の試料膜の水分透過量は、1 日当りに換算するとそれぞれ 1 m² の膜で 19, 12 kg である。皮膚が損傷を受けたとき、患部の自己細胞が増殖するまでの間、浸出液が蒸発する程度の水蒸気透過性を持ち、微生物が通過しない機密性があり、かつ患部の治癒を促進する働きのある人工皮膚 (創復被覆剤) 素材に絹タンパク質が利用できるのではなかろうか。

5 絹の微細粉末

絹糸の微粉末は、繭糸等の繊維状試料を粉碎機により粉碎して調整できるが、こうした従来の方法では粒径が 20~70 μm 程度の大きいものしか得られなかった。再生絹フィブリン溶液の pH を 4 近辺にまで下げゲル状態にさせた後、凍結乾燥することにより絹の粉末を得ることができる。この凍結乾燥法をさらに改善したものに、「絹タンパク質の超微粉末の製造方法」(蚕糸・昆虫農業技術研究所, 特許第 1557142 号) がある。絹フィブリン水溶液にアルカリフォスファターゼ等の加水分解酵素を加えることで得られる沈殿物あるいは、上澄液をいったん凍結させた後、減圧下で乾燥することにより、粒径 3 μm 以下の超微粉末が得られる。絹の超微粉末の吸水性、吸湿性ならびに保水性を活かした化粧用の素材ができあがる。

6 グルコースセンサー

絹フィブリンは生体触媒である酵素に対して強い包括性を持っている。グルコースオキシダーゼ (GOD) を絹フィブリンで固定化した膜はグルコースを認識するためのバイオセンサーとして利用できる。酵素固定化絹膜を過酸化水素電極に装着し、これにグルコース溶液を

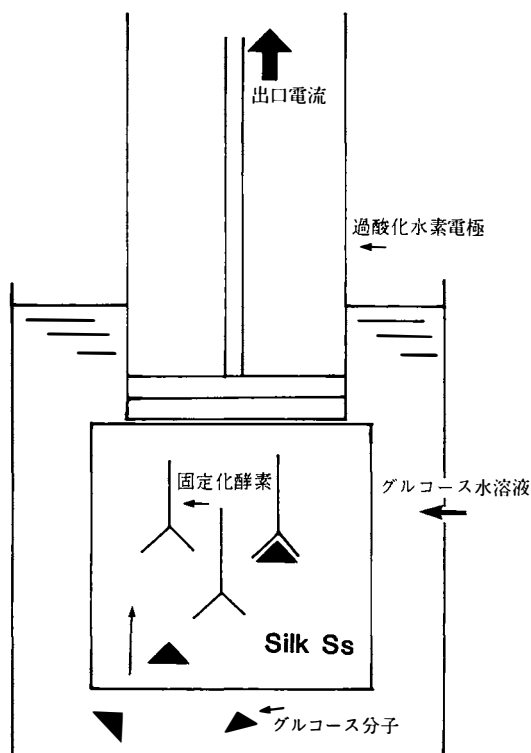


図-3 グルコースセンサーの構築原理図

接触させるとグルコースは固定化 GOD と反応してグルコン酸と過酸化水素が発生する。生ずる過酸化水素の量を過酸化水素電極で検出して電気信号量に変換することによりグルコース濃度が定量できる。これがグルコースセンサーの構築原理である。グルコースを定量する原理を図-3 に示す。

絹フィブロインを酵素固定化担体に用いて GOD を包括することにより、酵素活性の pH 領域が広くなり、膜の温度安定性が向上することから酵素固定化担体に絹を用いる効果がはっきり現れる。

7 抗血栓性医用材料

血液が接触しても血液凝固が起こり難い材料は血液適合性の良い医用材料として貴重である。抗血栓性機能を持つ素材は、医用材料を開発する上で必要不可欠である。絹フィブロイン膜の抗血栓性が、成犬を用いた *in vivo* 実験で確認されている。概要は次のとおりである。

細いポリエステル繊維表面に絹フィブロイン薄膜を被覆し、それを太い注射針を介して犬の大腿静脈内に挿入し、針だけを抜き取る。2 週間後に静脈を切開して材料表面での血栓付着の有無を観察したところ、血栓の形成が抑制されることが明らかとなった（坂部ら、1989）。

東京農工大学では、絹フィブロイン膜に血栓形成を阻害する酵素（ヘパリン）を包括させ、試料膜の環境 pH を制御することによりヘパリンを徐々に放出すること（徐放）が可能となることを見いだした。抗血栓性機能を付加した絹をヘパリンの徐放担体として利用することで、抗血栓性を付加した新たな利用が期待されている。

III 今後の展望

絹タンパク質は人体に対する生体適合性、細胞付着増殖性、酸素透過性、水蒸気透過性の諸点で優れた機能性を持ち、絹フィブロイン膜は湿潤状態で弾性的な特性を持つためバイオ材料として利用できる可能性が高い。将来的には、先端的な臨床化学分析用材料や高分子医療用材料としての利用も可能であろうし、人工肺や人工血管などの人工臓器用材料として絹を利用することも夢ではない。

絹フィブロインには、リジン、アルギニン、ヒスチジン等の化学反応性に富んだ塩基性アミノ酸が含まれているので、これに化学修飾をして天然にはない新たな機能を持つ医用素材をデザインすることができる。その結果、免疫工学や細胞工学といったバイオテクノロジーを支える先端産業の関連分野や先端医療分野への展開にも絹が大きく貢献できることを期待したい。先端材料として絹タンパク質を用いるためには、高分子化学、細胞学、免疫学、生物学、医学、薬学、生物学、基礎医学等の各種専門分野の研究者が境界領域の研究を効率的に進めることにより絹利用に関する新たな突破口がさらに開けるものと期待できる。

引用文献

- 1) GOTOH, Y. et al. (1992): Int. J. Biol. Macromol. 14: 198~200.
- 2) MINOURA, N. et al. (1995): Biochemical and Biophysical Research Communication 208: 511~516.
- 3) ——— et al. (1990): Biomaterials 11: 430~434.
- 4) 坂部寛ら (1989): 織学誌 45: 487~490.
- 5) 清水裕子ら (1995): 日蚕雑 64: 23~30.

昆虫ホルモンの多目的利用

農林水産省蚕糸・昆虫農業技術研究所 ^き木 ^{うち}内 ^{まこと}信

はじめに

昆虫のホルモンは成長、変態、生殖、休眠等の昆虫の生活史を特徴付ける多くの生理現象の制御に関与している。また、エネルギー・水分代謝や筋収縮などのホメオスタシスの維持もホルモンによって調節されている。1954年に BUTENANDT and KARLSON によりエクダイソン(α -ecdysone) が単離され、1965年に KARLSONらによりその構造が最終的に決定されて以来、多くの昆虫ホルモンが単離・同定され、その構造と機能が明らかにされてきた(本誌 49 巻 4 号 (1995) 特集「昆虫ホルモン研究の現状と問題点」参照)。

昆虫ホルモンはその化学構造および性質や合成・分泌器官によりいくつかは大別できる。化学構造・性質から見ると、lipid hormone と peptide hormone に分けられる。前者にはステロイドホルモンである脱皮ホルモンとテルペノイドである幼若ホルモンが含まれ、後者には前胸腺刺激ホルモンや脂質動員ホルモン等の多くのポリペプチドが含まれる。これらは合成・分泌の場所も異なっており、lipid hormone は上皮系内分泌器官で合成・分泌される末梢性ホルモンであり、一方、peptide hormone は神経分泌細胞で合成・貯蔵され、主として神経血管器官を経て分泌される。脱皮ホルモンや幼若ホルモンの働きは多岐にわたり、昆虫の種や発育ステージによって様々な作用を示す。また、ペプチドホルモンは種類数、機能とも多岐にわたる。詳しくは最近の教科書(NUHOUT, 1994)等を参照されたい。

昆虫ホルモンの産業的利用を最初に提起したのは WILLIAMS(1967)である。彼は、ひ素等の天然殺虫剤(第1世代)、DDT等の有機塩素剤をはじめとする有機合成殺虫剤(第2世代)に続く第3世代の殺虫剤として、昆虫自身が利用している幼若ホルモンを殺虫剤として利用する可能性を指摘した。彼の考えは現実のものとなり、幼若ホルモン活性物質等が昆虫成長制御剤(IGR)として利用されているが、使われる場面やホルモンの種類はまだ多くない。本稿では昆虫ホルモンの種類とその作用の概要ならびにこれまでの昆虫ホルモン利用について概観し、ホルモン及びホルモン関連物質の今後の利用の可能

性について考えてみたい。

I 幼若ホルモン活性物質の利用

幼若ホルモンはその名のとおりに、最初は幼虫形質を維持するホルモンとして見出されたが、その後の研究により、多くの昆虫の卵巣発育や休眠、アリ等の社会性昆虫における階級分化、アブラムシやバッタの相変異、ミツバチの分業等、昆虫に特徴的なほとんどの現象に関与していることが明らかになっている。このような作用の多様性は様々な利用の可能性を秘めている。実際、幼若ホルモンは多くの昆虫ホルモンの中で最も利用が進んでいる。ただし、実際に使われているのは昆虫が本来持っている幼若ホルモンそのものではなく、異なる化学構造を持ちながら幼若ホルモン活性を持つ juvenoid あるいは JHA (JH analogue) と呼ばれる類縁化合物である。特に、メトプレン (methoprene) は衛生害虫の防除用として古くから使われている。わが国では最近、フェノキシカルブ (phenoxycarb) 及びピリプロキシフェン (pyriproxyfen) が農薬登録された。JHA の IGR (Insect Growth Regulator) としての利用については竹田(1995)を参照されたい。

さて、幼若ホルモン(活性物質)は昆虫ホルモンの中で最も実用化が進んでいるが、それにはいくつかの理由がある。まず、幼若ホルモンそのものは不安定な物質で、昆虫体内では特異的エステラーゼによって速やかに分解されてしまうが、本来の幼若ホルモンよりはるかに安定で強い活性を持つ analogue (JHA) が次々と発見されたことがあげられる。例えば、フェノキシカルブはカイコの5齢初期に 10 pg を 1 回塗布するだけで齢期間の延長や蛹化率の低下がおこる (KAMIMURA, 1995)。また、JHA は脂溶性のため、虫体表面からも容易に体内に取り込まれ、経口的に摂取しても効果があるので、野外で散布して使用する農薬として適している。幼若ホルモンがステロイドホルモンやペプチドホルモンと異なり、節足動物に特有のホルモンであることも、他の生物、特にほ乳類に対する影響が少ないという重要な利点である。

昆虫ホルモンの利用は、世界的に見ると IGR として昆虫の正常な発育を阻害・かく乱して害虫を防除することが中心となっているが、わが国においては蚕糸業という特異な産業において、繭の生産性向上を目的とした利用

が行われてきた。幼若ホルモンの養蚕への利用の研究は1970年代はじめから開始され (AKAI and KOBAYASHI, 1971), 1978年にはmethopreneが増繭増糸剤「マンタ」として実用化されている。幼若ホルモンを5齢のカイコに投与すると摂食期間が延長し、その分、摂食量も増えるため結果として繭が重くなるというのが本来の用途であるが、経過が延長するという点に注目して、養蚕における最大の労働ピークである上簇作業を分散させるという目的にも利用される。

もう一つ、わが国におけるJHAのユニークな利用法として釣り餌への利用がある。鱗翅目の幼虫に過剰の幼若ホルモンを投与すると、幼虫が大きくなるばかりではなく、いつまでたっても幼虫のままで蛹にならない、いわゆる永続幼虫ができる。この現象に着目し、JHAを投与したハチノスツズリガの幼虫が釣り餌として売り出された。虫を大きくするばかりでなく、永続幼虫にすることによって、蛹や成虫になってしまう心配がなく、購入後いつまでも使えるようにしたところがポイントであろう。

II 脱皮ホルモンの利用

幼若ホルモンと比較すると脱皮ホルモン (エクジステロイド) の利用ははるかに遅れている。その理由の第一は有効なanalogueが見つかっていなかったことがあげられる。農薬として利用するためには大量の活性物質が安価に供給されることが不可欠であるが、脱皮ホルモンについては、比較的最近まで、ステロイド系以外の脱皮ホルモン活性物質は知られていなかった。各種の植物中にエクジステロイドが含まれていることは脱皮ホルモンの単離後まもなく知られていたが、農薬として使えるほど大量かつ安価に入手することはできなかった。

ところが、最近、ステロイド骨格を持たないにもかかわらず脱皮ホルモン様活性を持つベンゾイルヒドラジド系化合物 RH-5849 (図-1) が発見され (WING, 1988; WING et al., 1988), 農薬としての利用への道が開かれた。この化合物はエクダイソンのレセプターに結合すると考えられており (WING, 1988), カイコやハスモンヨトウの幼虫に投与すると直ちに新しい皮膚の形成が始まるが、正常に脱皮できずに死亡する (竹田ら, 1991)。この系統の化合物のIGRとしての実用化は急速に進み、わが国においても、テブフェノジド (RH-5992) が殺虫剤として農薬登録されている。ベンゾイルヒドラジド系化合物の興味深い点は、その生理活性が脱皮ホルモンとまったく同じではないことである。JHAは適量を投与すると天然の幼若ホルモンとまったく同じ生理活性を示すが、ベンゾイ

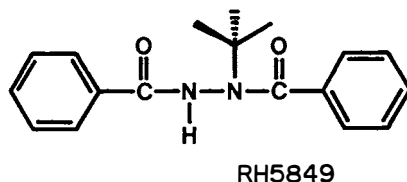
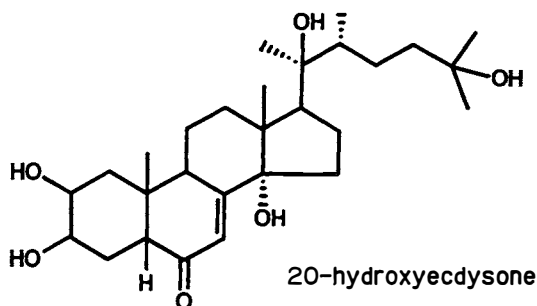


図-1 脱皮ホルモンとベンゾイルヒドラジド系脱皮ホルモン様活性物質 RH-5849

ルヒドラジド系化合物の場合は前述のように、新皮膚形成の誘導という点ではエクジステロイドと同じ作用を示すが、形成された皮膚の構造は不完全であり、正常に脱皮できないという点で大きく異なっている。正常な脱皮過程では、血中のエクジステロイド量は新皮膚の誘導が終わると速やかに減少し、その後、脱皮が起こるが、RH-5849の場合は、昆虫体内での分解がエクジステロイドと比較して著しく遅く、この違いが正常な脱皮の阻害をもたらしているものと考えられる。脱皮の阻害という点に注目すると、ベンゾイルヒドラジド系化合物は後述のホルモン活性阻害物質と捉えることもできよう。

殺虫剤としての利用は最近まで考えられなかった脱皮ホルモンであるが、養蚕への利用はかなり古くから検討され、実用化されている。ecdysone及び20-hydroxyecdysoneの化学構造が決定され、各種の植物にエクジステロイドが含まれていることがわかってきた1960年代には、植物由来のエクジステロイドをカイコに投与し、熟蚕化を促進させる研究が行われた (伊藤ら, 1968)。その後間もなく、1970年代はじめにはカイコの熟化促進剤としての脱皮ホルモン剤が市販され、実験室レベルではその効果が確認されたが (山本ら, 1972), 一般には普及しなかった。その後長い間、脱皮ホルモンの産業利用は事実上なかったが、近年、アフリカ産の植物から抽出した20-hydroxyecdysoneが比較的安価に入手可能となるとともに、養蚕業においても上簇作業の軽減の必要性が高まったため、熟化の促進と斉一化を目的と

したエクジステロイド製剤（主成分：20-hydroxyecdysone）が開発され、養蚕用 β -エクダイソン液として1994年2月に承認、市販されている。

III ペプチドホルモン利用の可能性

ペプチドホルモンは表-1に示すように、代謝調節、ホメオスタシスの維持、成長、脱皮・変態等昆虫の生活維持に広く関与している。これらのホルモンは生体内では極微量しか存在しないため、単離、構造決定が非常に困難であった。前胸腺刺激ホルモンや休眠ホルモンは生物検定によりその存在自体は古くから知られていたが、精製には多くの困難が伴い、最終的に構造が解明されたのはつい最近のことである。ところが、近年このような状況は大きく変わってきた。遺伝子の側からアミノ酸配列を決定することが可能となり、ここ数年で主要なペプチドホルモンの構造が次々と明らかにされている。

さらに、脱皮ホルモンや幼若ホルモンは無脊椎動物に特有なホルモンであるが、ペプチドホルモンについては脊椎動物との共通性が、少なくとも構造の上からは高く、遺伝子の解析により、脊椎動物で知られているペプチドホルモンに類似した遺伝子が次々に見つかっている。しかしながら、これらのペプチドが昆虫体内でどのように機能しているかは今後の研究に待つところが多い。

さて、ペプチドホルモンをその利用という観点から考えてみよう。表-1のとおり、ペプチドホルモンは脱皮ホルモンや幼若ホルモンと違い、それぞれ単機能的であ

り、種や発育ステージによる特異性も高い場合がある。また、ある特定の生理機能あるいは状態について、これを調節するホルモンは活性化に働くものと抑制的に働くものがセットになっていることが多い。アラタ体における幼若ホルモン合成の調節にはallatotropinとallatostatinが関与しているし、水分調節には利尿ホルモンと抗利尿ホルモンの存在が知られている。これらの特徴は特定の種あるいは発育ステージのみを対象とした選択性の高いIGRを目指す場合には有利な点である。一方、不利な点も多い。ペプチドホルモンは比較的高分子で、親水性も高いため、外部からの投与により昆虫体内に到達させるのが困難である。また、ペプチダーゼによる分解を受け易いという難点もあり、ペプチドそのものを利用できる可能性は少ない。このような問題点があるにもかかわらず、害虫防除への利用を意識した研究は行われており (KEELEY et al., 1992)、IGRや研究手段としての利用を進めるため、ペプチド鎖を構成するアミノ酸残基を別の分子で置き換えた擬似ペプチドの開発やホルモン活性を持つ非ペプチド化合物の探索が行われている (NACHMAN et al., 1993)。

IV 抗ホルモン物質

ホルモンは脱皮・変態をはじめとする昆虫の発育や繁殖過程を微妙なバランスを保ちつつ制御していることから、ホルモン活性を阻害することができれば有効なIGRとして利用できる可能性がある。BOWERS (1976) はこのような物質として、ムラサキカコウアザミから半翅目

表-1 昆虫の生理現象とこれに関与する主な神経ペプチド

生理作用	関与する神経ペプチド
I 代謝とホメオスタシス	
脂質代謝	AKH (脂質動員ホルモン)
糖代謝	HTH (高血糖ホルモン)
水分代謝	DH (利尿ホルモン), ADH (抗利尿ホルモン)
筋収縮	プロクトリン
心拍制御	CAH (拍動刺激ホルモン (神経ホルモンD)) CAP (拍動刺激ペプチド)
II 成長、脱皮・変態、生殖	
脱皮ホルモン合成	PTTH (前胸腺刺激ホルモン)
幼若ホルモン合成	アラトトロピン (アラタ体刺激ホルモン) アラトスタチン (アラタ体抑制ホルモン)
フェロモン合成	PBAN (フェロモン生成刺激ホルモン)
羽化	EH (羽化ホルモン)
休眠	DH (休眠ホルモン)
体色変化	MRCH (体色黒化赤化ホルモン)
タンニング	パーシコン
卵形成	OEH (卵巣エクダイソン合成刺激ホルモン)

の幼虫に早熟変態を起こさせるプレコセン I・II を発見した。後に、プレコセンはアラタ体の幼若ホルモン産生細胞の機能を破壊する細胞毒素として働くことが明らかにされた。その後、幼若ホルモン生合成の様々なステップを阻害するなどしてホルモン活性を阻害する物質が次々と発見され、これらは総称して抗幼若ホルモン (anti-JH) と呼ばれた。抗幼若ホルモンの作用としては、細胞毒や合成阻害のほかレセプターレベルでの競合等が考えられているが、プレコセン以外の物質は生体内での活性が明瞭でないものが多く (STAAL, 1986)、実験室レベル以外での利用の可能性は少ない。

一方、脱皮ホルモンの活性を阻害する物質も知られており、合成阻害物質の探索も行われている (ROUSSELL, 1994)。しかし、これらのほとんどはステロイド骨格を持つ物質であり、脱皮ホルモンの合成・作用機構の解析手段としての利用にとどまるものと思われる。このような中で、前胸腺におけるエクダイソンの合成を阻害し、かつカイコに早熟変態を起こさせる等の興味深い活性を持つイミダゾール化合物が知られている。KUWANO et al. (1983) は幼若ホルモン生合成を阻害する抗幼若ホルモンを目指して一連のイミダゾール化合物を合成し、実際にカイコの早熟変態を誘導する物質を見出した。中でも、KK-42 は強い活性を持つが、この化合物が、実はカイコヤトノサマバツタの前胸腺におけるエクダイソンの合成

を強く阻害することが明らかになった (KADONO-OKUDA et al., 1987; KIUCHI and AKAI, 1988; ROUSSELL et al., 1987; 図-2)。KK-42 による早熟変態の誘導機構については十分に明らかにはなっていないが、エクジステロイドの投与により早熟変態の誘導が阻止されることから、単純な抗幼若ホルモン作用ではなく、むしろ、血中エクジステロイド量の低下が原因と考えられる。KK-42 はまた、天蚕の卵休眠を打破する作用を持つが、その作用機構も解明されていない。

さて、これらのイミダゾール化合物はカイコの早熟変態を誘導し、本来、5 齢を経過するカイコを 4 齢で繭を作る、いわゆる 3 眠蚕にするが、おもしろいことに、投与時期によって繭の大きさが違ってくる (KIUCHI et al., 1985)。1 齢に投与した場合には無投与の場合とあまり変わらない大きさの繭を作るが、4 齢期に投与すると 2 分の 1 以下の繭になる。繭の大きさが小さくなるだけでは研究上おもしろいだけだが、繭が小さくなると繭糸が細くなり、細い糸からはやわらかい肌触りの織物を作ることができるので、実用上も意味を持ってくる。前述の幼若ホルモン剤を用いると、繭が大きくなるとともに繭糸も太くなるので、ホルモン処理だけで、同一の品種から太さで数倍の幅を持つ繭糸が作れることになる (図-3)。カイコはホルモン利用による発育制御の見本市といえるかも

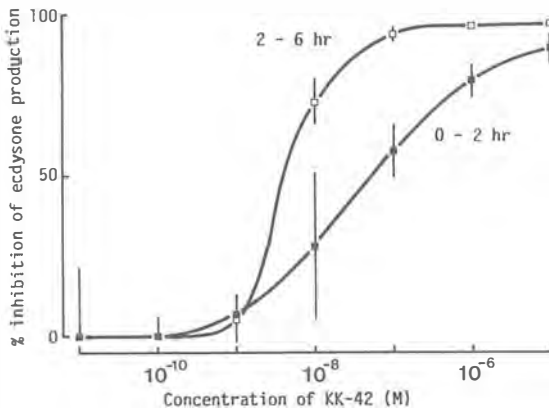


図-2 イミダゾール系化合物 KK-42 による前胸腺のエクダイソン合成阻害 (KIUCHI and AKAI, 1988)

吐糸開始 1 日後のカイコから前胸腺を摘出し、一対の前胸腺の一方は KK-42 を含むグレースの培地で、他方は対照区としてグレースの培地のみで培養し、対照区に対するエクダイソン合成量の減少で阻害の程度を表した。培養開始から 2 時間で培地を新しいものと交換し、さらに 4 時間培養した。培養 6 時間後では 10^{-8} M の濃度でエクダイソン合成がほぼ 100% 阻害されている。

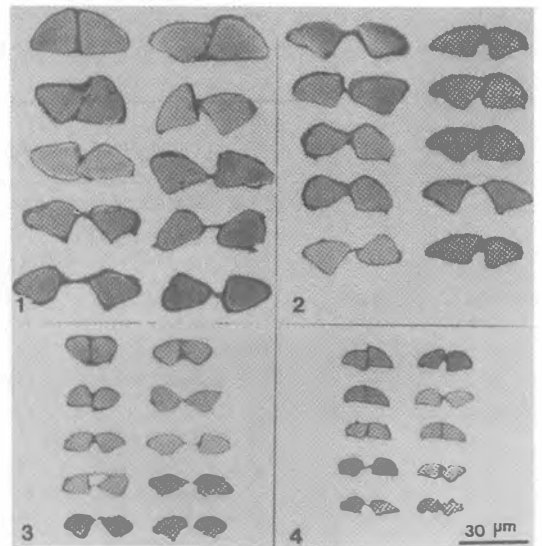


図-3 メトプレンおよびイミダゾール化合物投与により作出した異なる太さの繭糸の断面

1. メトプレン投与 (4 眠蚕), 2. 対照区 (4 眠蚕), 3. イミダゾール化合物 3 齢投与 (3 眠蚕), 4. イミダゾール化合物 4 齢投与 (4 眠蚕)

しれない。

V おわりに：昆虫ホルモンの利用方向

昆虫ホルモンの産業的利用は、今のところ、脱皮・変態等の阻害による農薬としての利用と養蚕における発育のコントロールにとどまっている。今後の利用の可能性はどうか。環境負荷の少ない農薬への要求は今後もいっそう強まることが予想されるので、IGRの害虫防除への利用は今後も引き続き進められるであろう。わが国における養蚕業は減少の一途をたどっているが、世界的には今後も利用される可能性が高い。全齢人工飼料による繭生産においては、ホルモンによる発育制御が生産性向上に大きく貢献するであろう。繭生産のみならず、カイコやその他の昆虫を利用した有用物質の生産においても、発育速度の調節や斉一化にはホルモンの利用が不可欠と考えられる。

これまでにない利用方法もいくつか考えられる。例えば、天敵昆虫の資質向上もその一つであろう。ホルモン処理により天敵の休眠や生殖を制御し、活動期間を延長したり、捕食性天敵を大型化して捕食効率を上げることも考えられる。施設栽培作物の受粉にミツバチが利用されているが、幼若ホルモン処理により外役に従事するハチの比率を上げ、群としての作業効率を上げることも可能かもしれない。今後、昆虫の利用範囲が拡大すれば昆虫ホルモンの利用場面も広がるであろう。逆に、ホルモ

ンをうまく使うことによって、新たな昆虫の利用方法を開発することも課題である。

引用文献

- AKAI, H. and M. KOBAYASHI (1971): Appl. Entomol. Zool. 6: 138~139.
- BOWERS, W. S. (1976): *In* The Juvenile Hormones (ed. L. I. Gilbert), pp. 394~408. Plenum Press, New York.
- 伊藤智夫ら(1968): 蚕試彙報 92: 21~40.
- KAMIMURA, M. (1995): Appl. Entomol. Zool. 30: 487~489.
- KADONO-OKUDA, K. et al. (1987): Develop. Growth and Differ. 29: 527~533.
- KEELEY, L. L. et al. (1992): Experientia 48: 1145~1148.
- KIUCHI, M. and H. AKAI (1988): *In* Invertebrate and Fish Tissue Culture, (ed. by KURODA, Y. et al.), pp. 60~63, Japan Scientific Societies Press, Tokyo/Springer-Verlag, Berlin.
- 木内 信ら(1985): 日蚕雑 54: 77~81.
- NIJHOUT, H. F. (1994): Insect Hormones, Princeton University Press, Princeton, pp. 267.
- KUWANO, E. et al. (1983): Agric. Biol. Chem. 47: 921~923.
- NACHMAN, R. J. et al. (1993): Internatl. J. Peptide and Protein Res. 42: 372~377.
- ROUSSEL, J.-P. (1994): Entomol. exp. appl. 71: 193~199.
- et al. (1987): C. R. Acad. Sci. Paris 305 (ser. 3): 141~144.
- STAAL, G. B. (1986): Ann. Rev. Entomol. 31: 391~429.
- 竹田 敏ら(1991): 植物防疫 45: 153~156.
- 山本一雄・河田 貢(1972): 蚕糸研究 82: 1~7.
- WING K. D. (1988): Science 241: 467~469.
- et al. (1988): ibid. 241: 470~472.

人事消息

(10月1日付)

小林春雄氏(畜産試企画連絡室長)は草地試験場長に
佐々木亮氏(農研センター総合研究官)は食品総合研究
所長に

鈴木慎二郎氏(草地試験場長)は退職

小林登史夫氏(食品総合研究所長)は退職

本田要八郎氏(北農試生産環境部ウイルス病研究室長)

は農研センター病害虫防除部ウイルス病診断研究室長に
藤岡正博氏(農研センター病害虫防除部主研(鳥害研究
室))は同研究室長に

岩崎真人氏(四国農試企画連絡室主研(企画科))は北農
試生産環境部ウイルス病研究室長に

竹中重仁氏(北陸農試水田利用部主研(病害研)兼企画
連絡科)は北陸農試企画連絡室主研(企画科)に

渡邊朋也氏(九州農試地域基盤研究部主研(情報処理
研)兼企画連絡室)は併任解除

寒川一成氏(九州農試地域基盤研究部情報処理研究室長)

は国際農林水産業研究センター生産利用部主研に

野田千代一氏(国際農林水産業研究センター企画調整部
主研(連絡調整科))は同センター沖縄支所作物保護研
室長に

樋口博也氏(九州農試地域基盤研究部主研(害虫行動研
究室))は蚕糸昆虫研機能開発部・併任に(平成8年3
月31日まで)

神崎亮平氏(筑波大学講師生物科学系)は蚕糸昆虫研機
能開発部・併任に(平成8年3月31日まで)

三代浩二氏(果樹試保護部(虫害研))は同部天敵微生物

研究室へ

(平成7年度新規採用者の配属先、10月1日付)

堀尾 剛氏は農環研資材動態部殺菌剤動態研究室へ

足立嘉彦氏は果樹試保護部病害第1研究室へ

岸本英成氏は果樹試保護部虫害研究室へ

山田憲吾氏は野菜茶試環境部病害第2研究室へ

善林 薫氏は東北農試水田利用部水田病害研究室へ

秋野順治氏は蚕糸昆虫研生体情報部行動調部研究室へ

(農蚕園芸局、10月1日付)

大森正和氏(農薬検査所検査第二部生物課)は植物防疫
課農薬第一班農薬国際調整係長に

福岡幸子氏(農薬検査所検査第一部技術調査課兼植物防
疫課)は併任解除

佐藤 雅氏(横浜植物防疫所業務部国際第一課兼植物防
疫課)は併任解除

長崎洋子氏(繭糸課庶務班庶務係長)は農薬検査所検査
第一部企画調整課検査管理官兼総務課併任に

農水省果樹試験場盛岡支場では平成7年5月22日付け
で電話のダイヤルイン化を導入したが、市内局番にま
ぎらわしい表現があったため再度お知らせする。

代表 0196-41-3164 (代表、庶務係)

病害研究室 0196-45-6156

虫害研究室 0196-45-6157

FAX 0196-41-3819

産業としての天敵昆虫と花粉媒介昆虫の利用

静岡県農業試験場 ^い池 ^だ田 ^ふ二 ^み三 ^た高

I 天敵昆虫利用産業の現状と問題点

1 歴史的背景

害虫防除に天敵を利用とした試みは古くからなされてきているが、中でも柑橘の害虫であるイセリヤカイガラムシ (*Icerya purchasi*) に対して、1911 年に台湾からベダリヤテントウ (*Rodolia cardinaris*) を導入し防除に成功をしたことは、生物的防除技術の先鞭として特筆されている事例である。この当時の背景には有効な化学薬剤がなかったことが大きな要因となっているが、以来、侵入害虫の防除や在来の害虫防除に対しても国外や国内の多種類の天敵を用いて防除試験がなされてきている (森・村上, 1981)。しかし、その中で実用性があると評価された天敵は非常に少ない。これらの一連の試験の特徴としては、果樹、水稻、畑作物など露地栽培作物が対象であり、実施は公的の試験研究機関によるものであった。ただ 1 例、1970 年にナシ及びりんごの害虫クワコナカイガラムシ (*Pseudococcus comstocki*) の天敵であるクワコナカイガラヤドリバチ (*Pseudaphycus malinus*) を T 薬剤会社が天敵昆虫として開発し市販も行ったが (守本, 1971)、農家技術としては成功をせず翌年で販売も中止となった。

防除上の問題を振り返ると、1960 年代後半から急速に増加した施設栽培では、害虫は露地栽培とは異なる発生パターンや発生量を示し防除回数の増加が始まり、1970 年代以降は、オンシツコナジラミに代表されるように、相次いで外国からの侵入害虫の定着とそれに伴う新たな被害が発生したが、それらの防除には開発目覚ましい化学農薬の使用が主流となった。しかし、一方では、侵入害虫を含めて薬剤抵抗性が極度に発達した害虫の出現や環境保護などの観点から化学農薬による防除に対して新たな問題を提起させてきている。このような中で生物的防除法が注目され、早くからヨーロッパやアメリカにおけるハダニ類に対するチリカブリダニ (*Phytoseiulus persimilis*)、オンシツコナジラミ (*Tyialeurodes vaporariorum*) に対するオンシツツヤコバチ (*Encarsia formosa*) などの効果が紹介され、その後わが国においても多くの作物で研究が行われて、それらの実用性は評価

されてきたが (森, 1968; 真梶・森, 1976 a; 真梶, 1981; 真梶・森, 1977 b; 矢野, 1988; 矢野・東, 1982)、公的機関からの継続的な配布や民間からの市販には至らず、天敵昆虫産業は育たなかった。

2 開発から登録までの現状と問題点

ところが、近年、ヨーロッパにおける急速な生物的防除の普及と環境保護の問題から、わが国でも生物的防除への関心が高まり、T 社を筆頭に数社が次々に天敵の試験を行い登録の取得計画が開始され、1995 年になり待望久しいチリカブリダニとオンシツツヤコバチの登録がおりて初めて市販が可能となり、農家の使用あるいは農家への指導が可能となった。さらに、日本植物防疫協会の 1995 年度生物農薬連絡試験の計画では天敵昆虫及び天敵微生物が 20 種あるなど、新たな天敵の防除効果が試験されている現状から、今後登録され市販される天敵の種類も増加すると予想される。しかしながらここで試験されている天敵の特徴は、ヨーロッパやアメリカですでに市販され実用性が認められている種類であり、わが国固有の天敵は今後の計画を含めて非常に少ない。つまり、最近の天敵昆虫産業の実態は、その開発と生産を外国に依存したものであり、天敵としての登録取得と販売を扱っているにすぎない。

ヨーロッパやアメリカでは天敵昆虫の市販に際しては、わが国のように一般薬剤と同様な登録が必要ということはない。そのため、会社は独自に海外からの有力種を探索してその大量生産技術を開発して市販し、農家の評価が高ければ普及するシステムとなっている。市販までの諸経費も少なくてすむことから小さな会社でも市場に参加できることになり、そのことが突発的の侵入害虫やマイナー害虫にも迅速に有力な天敵の開発に対応可能な基盤がある。また、農作物には多種類の害虫が発生するので、農薬でも多種類の薬剤を使用して防除が行われているように、実際の防除を行う上には天敵も同様に多種類の天敵が用意されていることが必要である。しかし、わが国では登録制度があることにより多くの天敵の登録には長時間を要することになり、生物的防除の迅速な普及には阻害の一要因となっていることは否めない。また、会社として採算のとれない天敵は登録を行わないなど採択権がすべて会社の意志にゆだねられているため、外国での新天敵の開発により今までの天敵が急に生

産中止され登録がとれても市販できない恐れもある。

本来、天敵昆虫産業としては、新しい天敵の開発—大量生産技術の開発—大量生産—登録の取得—品質管理—販売—防除指導を一貫して行う会社の出現が理想であるが、このような会社は、経費上の点からも数社に限定されてくものと考えられるが、一方では天敵の開発あるいは大量生産のみを扱う会社の出現も予想される。

3 市販から実用化までの現状と問題点

現在市販の天敵は前述の2種であり、当然これらの防除効果は期待できるが、わが国のイチゴ栽培を一つとっても栽培条件は複雑であるため、登録時条件の放飼時期、放飼量及び回数などで全ての栽培型には適用できないと思われる。また、殺菌剤を含めた薬剤の直接の影響や残効性については登録条件にはないので、今後の実用化には平行して多くの試験研究機関の協力がなく普及はしないと予想される。さらに、農家段階では、例えばA薬剤がハダニに効果が低下したのでA天敵に代えてみるという安易な考えで対応することが多く、今後の普及には相当のトラブルが生じるものと予想され、生物的防除法の理論の理解と技術を習得させることが早急に必要となっている。

ヨーロッパで見られるように作物ごとに一貫して各種の天敵を組み入れた防除を請け負う会社、あるいは害虫発生のモニタリングと天敵の販売を行う防除会社がわが国でも必要になってきている。特に、施設園芸では従来の栽培面積より広大化傾向にあり、1ha単位のガラス温室が登場しつつあるが、こうした施設で今後生物的防除を進めていく上には、防除を請け負うあるいは防除指導をしながら天敵を販売する会社の存在が必要となってくる。むしろ、そうした会社が出てくることが、わが国の生物的防除の早期に、しかも健全な普及を図る上には好ましいと考えられる。

害虫防除に対して化学農薬の依存度を低下させることは時代の流れとなっているので、その手法の一つである生物的防除の実用化のためには天敵昆虫産業の潜在的需要は非常に高いと考えられる。しかし、生物的防除技術の習得は難しく、指導者及び農家ともこの先長い時間を必要とする予想されることから、今後の天敵昆虫の産業化については長期的見通しのもとに、会社のみならず研究機関、指導機関、農家など多方面の協力で進めていく必要がある。

II 花粉媒介昆虫利用の効用と問題点

1 歴史的背景

わが国では、農作物は自然に交配するものと多くの人が

が認識し、その地における花粉媒介昆虫（ポリネーター）の存在にはかなり無関心で来たと思える。事実虫媒を必要とする多くの農作物にどのような花粉媒介昆虫があるかは果樹などで少数の報告があるが（小林，1972；前田・北村，1965a；前田，1971；津川ら，1967），一般には栽培上特に調査の必要もなかったことは確かである。一方、ヨーロッパやアメリカでは花粉媒介昆虫に対して非常に関心が高く、虫媒を必要とする作物の栽培に当たっては、花粉媒介昆虫の調査は必須の条件となっている。

しかし、わが国の気候的特性と植生の豊かさからくる昆虫相の多様性から、日本全土にわたって多くの種類のハエ、アブ、ハナバチ、チョウ、ガ、ハナカミキリなどの花粉媒介昆虫が生息し、農作物においても開花をすれば当然多くの個体が訪花し交配が完了するので、特に花粉媒介昆虫の存在を意識しないできていたのが事実である。

西南暖地一帯で栽培されるレンゲソウやかつての菜種、北海道の放牧場のシロツメグサ（ホワイイトクローバー）では在来マルハナバチの効果も十分に高いが、主に採蜜を主体にミツバチの導入を図ってきている。また、ウメ、リンゴ、ナシ、モモなどの低温期に開花する花では、野生の花粉媒介昆虫は主として越冬成虫が訪花するので、花数に比して個体数が少ないことからミツバチの導入が一部では使用されている。しかし、開花時には気温の低い日が多く訪花が不十分であること、気温が上昇した日は同時に開花する周辺の野生の草花に多数訪花するなどミツバチによる交配は不安定であり、それに代わる他の有望な花粉媒介昆虫もないために現状では人工授粉が古くから継続されている。

また、在来マルハナバチはリンゴやモモの花粉媒介昆虫として高く評価され（北村，1968a；KITAMURA・MAETA，1969b），人工巣の開発も行われたが（北村，1983b），1年1世代で増殖量も高くなく、ハチそのものの市販にはいたっていないが、現在でも農家の管理の元に保護されている。

2 近年の花粉媒介昆虫の需要の現状と問題点

前述のように、わが国の花粉媒介昆虫は、果樹では関心が持たれていたが、1960年代後半から栽培園地の拡大や栽培園地周辺の宅地化が進んだことにより野生の花粉媒介昆虫が減少し、人工授粉が以前より必要となつていくところもある。

また、同時期から施設栽培も急増し、そこで栽培されるイチゴ、トマト、ナス、採種用のアブラナ科作物などの奇形や結実不良は未受粉が原因であることが明らかと

なり、花粉媒介昆虫の存在が注目された。イチゴや採種用のアブラナ科作物ではミツバチの導入が、トマト及びナスでは植物ホルモン剤の処理が有効で前述の問題は一挙に解決した。1970年代後半から、それまで農家の手によって1花ずつ交配が行われていたハウスメロンでもミツバチが利用されるようになり、キュウイフルーツや柑橘の日向夏、柿などの大規模栽培では花粉媒介昆虫の存在が注目されミツバチの利用が拡大した。

少数ではあるが、アブラナ科野菜やタマネギなどの種子生産を目的にミツバチの積極的利用も図られている。野菜の開花はほぼ1か月以内と短く、この間曇天や雨天時ではミツバチの訪花は妨げられるが、全天候で訪花するマルハナバチの使用は明らかに種子生産量が増加するので、施設栽培下の採種生産においてはミツバチの使用は減少している。

さらに、1990年には数か月間の寿命とされる使い捨てタイプで、ミツバチの働き蜂2,000頭内外の入った弱小群が市販されるようになったが、比較的多い100~300m²の施設で栽培される作物にはむしろ好都合であり、周年栽培の温室メロンでは、夏期の高温時でも正常に訪花することから弱小群が1年中使用されている。

このようにわが国においても農作物栽培において結実を高めたり果実の奇形防止のため、人為的に多数の花粉媒介昆虫を導入する場合はミツバチのみに依存してきたといつてよい。

しかし、一方でミツバチの入手が困難の地域、導入には栽培面積が狭い、蜂アレルギーがあるなどの問題から、それに代わる花粉媒介昆虫として1970年代からシマハナアブが登場し(深沢, 1972; 小林, 1972)、民間からも市販され、一時はイチゴ、メロン、果樹類などで広範囲に使用された。現在は採算面から中止となっているが、復活を希望する声も大きく、今一度安価に生産できる産業化の方法を研究する必要もあると考えられる。

3 外国産の花粉媒介昆虫の登場と問題点

前述のように、施設栽培作物では花粉媒介昆虫は全てミツバチに依存し、露地栽培作物でも野外の花粉媒介昆虫が不足した場合、ミツバチの導入が補助的に行われている。ここで使用されているミツバチは、明治初期にヨーロッパなどから導入した種類でセイヨウミツバチ(*Apis mellifera*)と呼ばれている種類であり、わが国に古くから生息するニホンミツバチとは別種である。ニホンミツバチ(*Apis cerana*)はセイヨウミツバチと同様の花に訪花し、低温活動性は高いので低温期に開花する果樹では花粉媒介昆虫として有効である。しかし、繁殖力は弱く1群の働き蜂数も少なく、巣自体もろいなど採

蜜には不適のため営利を目的とした養蜂にはほとんど使用されず、花粉媒介を目的として巣が市販されたことはない。また、野外ではセイヨウミツバチに盗蜜されるなど競合できないため、セイヨウミツバチの導入地ではほぼ絶滅の状態になっている。

ヨーロッパでは古くからミツバチ以外にマルハナバチ類も有力な花粉媒介昆虫として評価されている。このハチはミツバチより口吻が長いこと、低温活動性が高いこと、蜜のない花にも花粉のみを集めに訪花するなどの特徴があり、リンゴなどの低温期に開花の果樹類や牧草の有力な花粉媒介昆虫として知られ、特に牧草のアカツメクサ(レッドクローバー)の花粉媒介には有効で、ヨーロッパからニュージーランドやオーストラリアへ導入された経緯もある。

このマルハナバチの中のツチマルハナバチ(*Bombus terrestris*)はミツバチが訪花しないトマトやナスにも訪花することが知られていたが、ヨーロッパで人工大量増殖に成功して販売が開始されたことから、一躍施設栽培のトマト、ナスの花粉媒介昆虫として注目され、現在ヨーロッパではトマト、ナスでは全部、その他の果菜類、果樹類でも急速に普及している。わが国でも筆者らが本種の花粉媒介昆虫としての成果に注目して、1992年の冬から本種を施設栽培のトマトなどの果菜類で試験をしたところヨーロッパと同様の結果を得たので、トマトを中心に普及につとめた結果好評をえている(池田・忠内, 1992a; 1995b)。特に、トマトでは、着果の安定、果形の均一、空洞のない充実した果実となり、植物ホルモン剤散布の省力、品質や商品性の向上など花粉媒介昆虫による成果が最大限に発揮されるので使用農家が急速に増えている。

ツチマルハナバチは、晴天の静穏時であればほぼ6°C以上で訪花活動し低温活動性が高いこと、雨天でも活動すること、紫外線カットの施設内でも訪花すること、農薬散布後の訪花忌避日数はミツバチより短いことなど農作物の花粉媒介昆虫としての適応性は優れたすべての作物に使用できるが、ミツバチに比べて巣としての寿命が短いこと、高温には弱いこと、高価であることなど、すべての農作物における使用には限界がある。

ツチマルハナバチという新しい花粉媒介昆虫の登場により、農作物における花粉媒介昆虫に対して関心が高くなってきているが、すでに果菜や果樹においては、花粉媒介昆虫による自然の交配が着果安定、外観、品質の向上には最良であることは周知されている。しかし、これまでにその最適な花粉媒介昆虫が不足していたため、交配に多くの労力を要してきた経緯があり有効な花粉媒介

昆虫の要望と需要の分野は広い。今後の労力不足の改善からも花粉媒介昆虫の需要はますますのびるものと予想される。新たな花粉媒介昆虫の開発、野外における一般の花粉媒介昆虫の保護なども必要となってくるが、当面ミツバチとマルハナバチ兩種を中心にして広範囲の作物で益々使用されていくものと思える。

引用文献

- 1) 深沢永光 (1972): 植物防疫 26: 479~482.
- 2) 池田二三高・忠内雄次 (1992 a): 農業及園芸 67: 1213~1216.
- 3) ——— (1995 b): ミツバチ科学 16(2): 49~56.
- 4) 北村泰三 (1968): 長野県園試報告 7: 13~18.
- 5) KITAMURA, T・Y, MAETA (1969): Kontyu 3(1): 83

- ~90.
- 6) 北村泰三 (1983 b): 長野県果樹試報告 1: 21~30.
- 7) 小林森巳 (1972): 植物防疫 26: 473~478
- 8) 前田泰生 (1971): 同上 25: 141~146.
- 9) ———・北村泰三 (1965 a): 昆虫 33(1): 17~34.
- 10) 真梶徳純 (1981): 植物防疫 35: 368~371.
- 11) ———・森 樊須 (1976 a): 果樹試報 E1: 87~102.
- 12) ———・——— (編) (1977 b): チリカブリダニによるハダニ類の生物的防除, 日植防協会, 東京, pp. 89.
- 13) 森 樊須 (1968): 植物防疫 22: 517~522.
- 14) ———・村上陽三 (1981): 昆虫学最近の進歩, 東京大学出版会, 東京, pp. 279~295.
- 15) 守本陸也 (1971): 武田研究所報 30: 198~216.
- 16) 津川 力ら (1967): 青森りんご試研報 11: 50~55.
- 17) 矢野栄二 (1988): 野菜・茶試研報A. 2: 143~200.
- 18) 矢野貞彦・東 勝千代 (1982): 植物防疫 36: 217~220.

新しく登録された農薬 (7.9.1~7.9.30)

掲載は、種類名、有効成分及び含有量、商品名(登録年月日)、登録番号(製造業者又は輸入業者)、対象作物: 対象病害虫: 使用時期及び回数など。(…日…回は、収穫何日前何回以内散布の略)。(登録番号 19052~19061 までの 10 件、有効登録件数は 5,589 件)

「殺虫剤」

MEP 液剤

MEP 0.10%

スミチオンスプレー (7.9.7)

19052 (武田薬品), 19053 (住友化学), 19054 (アグロス)

きく: アブラムシ類: 発生初期: 希釈せずそのまま散布する, ばら: アブラムシ類・チュウレンジハナバチ: 発生初期: 希釈せずそのまま散布する, さくら: アメリカシロヒトリ: 発生初期: 希釈せずそのまま散布する, つばき: チャドクガ: 発生初期: 希釈せずそのまま散布する

DDVP くん蒸剤

DDVP 16.0%

殺虫プレート (7.9.7)

19055 (日曹商事)

貯穀倉庫: 米: コクゾウ・コクヌストモドキ・ナガシクイ等の甲虫類・バクガ・ノシメコクガ等の蛾類: 保管中: 4 回以内: 庫内壁際及び坪の周囲に 2 m の高さに吊るしておく, 貯穀倉庫: 豆類: コクヌストモドキ・アズキゾウムシ等の甲虫類・ノシメコクガ: 保管中: 3 回以内: 庫内壁際及び坪の周囲に 2 m の高さに吊るしておく, 温室・ビニールハウス: きゅうり: アブラムシ類・ニセナミハダニ: 収穫前日まで: 3 回以内: ビニールハウス, 温室内の中央通路, 又は周辺部に直接作物に接触しないように吊るしておく, 温室・ビニールハウス: なす・ピーマン: アブラムシ類・ニセナミハダニ: 収穫 3 日前まで: 3 回以内: ビニールハウス, 温室内の中央通路, 又は周辺部に直接作物に接触しないように吊るしておく, 温室・ビニールハウス: いちご: アブラムシ類・ニセナミハダニ: 収穫 7 日前まで: 3 回以内: ビニールハウス, 温室内の中央通路, 又は周辺部に直接作物に接触しないように吊るしておく, 温室・ビニールハウス: 花き: アブラムシ類・ニセナミハダニ: 5 回以内: ビニールハウス, 温室内の中央通路, 又は周辺部に直接

作物に接触しないように吊るしておく

「殺菌剤」

オキシリニック酸・ペフラゾエート水和剤

オキシリニック酸 20.0%, ペフラゾエート 16.0%

ヘルシードスターナフロアブル (7.9.27)

19060 (住友化学), 19061 (宇都興産)

稲: いもち病・ごま葉枯病・もみ枯細菌病・ばか苗病・褐条病・苗立枯細菌病: 浸種前: 1 回: 10 分間種子浸漬(希釈倍数 20 倍)・24 時間種子浸漬(希釈倍数 200 倍)・種子吹き付け処理(種子消毒機使用)又は塗沫処理(希釈倍数 7.5 倍)

「殺虫殺菌剤」

カルボスルファン・トリシクラゾール粒剤

カルボスルファン 3.0%, トリシクラゾール 5.5%

ビームガゼット粒剤 55 (7.9.27)

19056 (ダウ・ケミカル)

水稻(箱育苗): イネミズゾウムシ・いもち病・イネドロオイムシ: 移植前日~移植当日: 1 回: 本剤の所定量を育苗箱の苗の上から均一に散布する

「殺虫植調剤」

ベンフラカルブ・イナベンフィド粒剤

ベンフラカルブ 5.0%, イナベンフィド 4.0%

オンコルセリタード粒剤 (7.9.27)

19057 (大塚化学), 19058 (中外製薬), 19059 (アグロス)

水稻(育苗箱): イネミズゾウムシ・ヒメトビウンカ・セジロウンカ・ツマグロヨクバイ・下位節間短縮による倒伏軽減: 移植 3 日前~移植当日: 1 回: 本剤の所定量を育苗箱の苗の上から均一に散布する

天 敵 微 生 物 の 改 変 と 利 用

北海道大学農学部応用生命科学科 飯 塚 敏 彦

は じ め に

近年の先進国型農業の目標は、環境に優しい持続的農業である。一般的な作物害虫の防除は、低コストの化学農薬の使用が中心であるが、作物栽培の場面場面では微生物農薬の使用も行われるようになってきた。例えば、ハウス内栽培作物の開花期の受粉にはマルハナバチの輸入によるといった使用例が多くなってきており、その際の害虫防除には BT 剤が使用されるケースがある。

BT 剤は 1965 年以降アメリカ・カナダ・ヨーロッパ

を中心に使用が認められ市販されるようになった。対象はそ菜、森林害虫ならびに薬剤耐性を獲得した害虫を中心に使われてきた。日本では、1982 年以来トアローCT 剤ならびに各国からの輸入 BT 剤が小規模作物の害虫防除に使用されてきている。1980 年代までは、人間や動物に無害で安全な微生物農薬といっても、そのコスト面では化学農薬と競争することが難しく、世界におけるマーケットも全使用農薬の 1%程度で推移した（飯塚，1990）。しかし、1985 年以降，BT 菌 (*Bacillus thuringiensis*) の殺虫性結晶タンパク質 (ICP) 遺伝子の研究が

表-1 *Bacillus thuringiensis* 菌株の分類

H-ANTIGEN (H-抗原)	SEROVAR (血清型変異株)	H-ANTIGEN (H-抗原)	SEROVAR (血清型変異株)
1	thuringiensis	20 a, 20 b	yunnanensis
2	finitimus	20 a, 20 c	pondicheriensis
3 a, 3 c	alesti	21	colmeri
3 a, 3 b, 3 c	kurstaki	22	shandongiensis
3 a, 3 d	sumiyoshiensis	23	japonensis
3 a, 3 d, 3 e	fukuokaensis	24 a, 24 b	neoleonensis
4 a, 4 b	sotto	24 a, 24 c	novosibirsk
4 a, 4 c	kenyae	25	coreanensis
5 a, 5 b	galleriae	26	silo
5 a, 5 c	canadensis	27	mexicanensis
6	entomocidus	28 a, 28 b	monterrey
7	aizawai	28 a, 28 c	jegathesan
8 a, 8 b	morrisoni	29	amagiensis
8 a, 8 c	ostrinae	30	medellin
8 b, 8 d	nigeriensis	31	toguchini
9	tolworthi	32	cameroun
10 a, 10 b	darmstadiensis	33	leesis
10 a, 10 c	londrina	34	kondudian
11 a, 11 b	toumanoffi	35	seoulensis
11 a, 11 c	kyushuensis	36	malaysiensis
12	thompsoni	37	andalousiensis
13	pakistani	38	oswaldocruzi
14	israelensis	39	brasilensis
15	dakota	40	huazhongensis
16	indiana	41	sooncheon
17	tohokuensis	42	jinghongiensis
18 a, 18 b	kumamotoensis	43	guiyangiensis
18 a, 18 c	yosoo	44	higo
19	tochigiensis	45	roskildiensis

急速に進展し、遺伝子改造 BT 剤の作成ならびに作物細胞でこの ICP 遺伝子を発現させて耐虫性作物作出が進むに従って BT 菌の新しい利用が注目されてきた。

I BT 菌の分類

殺虫性結晶タンパク質 (ICP) を産生する *Bacillus thuringiensis* (BT) は 1901 年日本の石渡繁胤博士によりカイコの卒倒病原菌としてはじめて発見されて以来、現在まで各種性質をもった菌株が世界各地で死亡昆虫とか土壌中から分離され (IIZUKA et al., 1995), その分類は鞭毛抗原に基づいて分類されるようになった。現在, 45 の H-抗原が認められ, 各菌株を serovar (血清型変異株) または subspecies (亜種) として記載されている (DELÉCLUSE et al., 1994)。その結果は表-1 に示した。しかし, この分類方法では同じ亜種の中にも殺虫活性の異なる菌株が存在することを正しく把握できない。このため, 近年, 各亜種に属する菌株が保有している ICP 遺伝子を同定する新しい方法が開発された (KALMAN et al., 1993; 浅野ら, 1993)。

II BT 菌の殺虫活性

BT 菌は土壌細菌で芽胞形成細菌であるが, 芽胞を形成する際, 結晶形態のタンパク質を産生する。亜種 *sotto* は典型的な菱形結晶を産生し (図-1), 亜種 *kurstaki* HD-1 は菱形結晶とサイコロ状結晶を同時に産生し (図-2), 亜種 *israelensis* は不定形結晶を産生する (図-3)。これら異なる結晶を産生する各菌株は対象昆虫を異にし殺

虫活性も異にする。

また, これら各種形態の結晶を食下した昆虫は, 5 分後には腸管麻痺を起し, 約 24 時間経過すると死亡に至る個体が出現する。これが一般的な中毒症状である。さらに, 結晶形態を異にする菌株は, 特異的な殺虫活性を示す。現在まで知られている対象昆虫は, 鱗翅目 (ガとチョウの類)・双翅目 (カ)・鞘翅目 (甲虫類) であり, 近年, 線虫やダニにも活性を示す BT 菌の存在が発表された (KIM et al., 1995)。

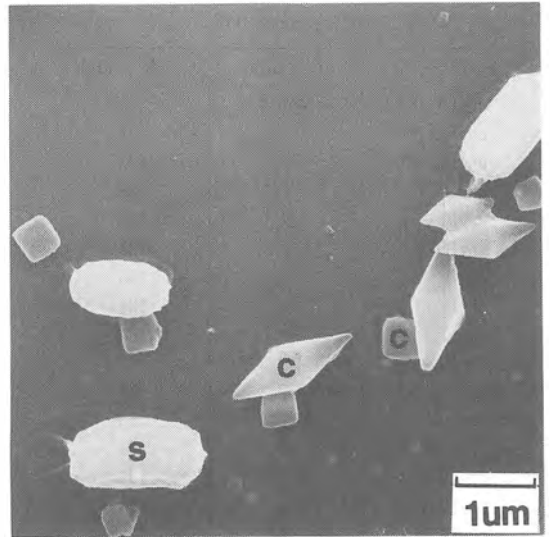


図-2 亜種 *kurstaki* HD-1 の 2 種の結晶 (C) と芽胞 (S)

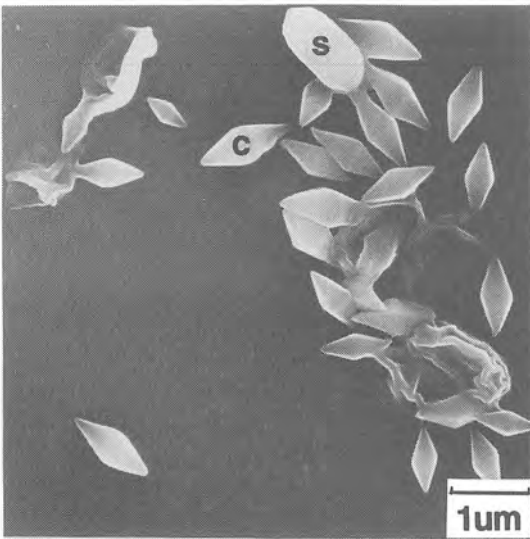


図-1 亜種 *sotto* の結晶 (C) と芽胞 (S)

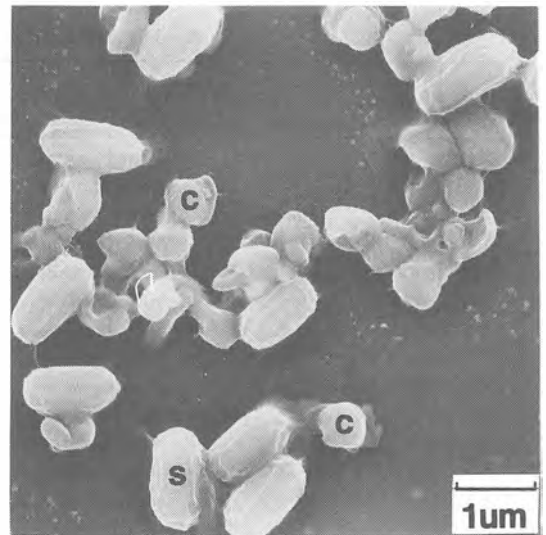


図-3 亜種 *israelensis* の結晶 (C) と芽胞 (S)

Ⅲ BT 菌の ICP 遺伝子

BT 菌株が異なる昆虫種に特異的に殺虫活性を示すのは、BT 菌株が保有する ICP 遺伝子を異にするためである。塩基配列を異にする多くの ICP 遺伝子が報告されて以来 (SCHNEFF et al., 1985; SHIBANO et al., 1985), ICP の分類の必要が生じ、異なる対象昆虫による ICP の分類が行われた (HÖFTE and WHITELEY, 1989)。これを最近のデータも含めて表-2 に示した。

また、数種鱗翅目に対し、これら各 cry I に属する遺伝

表-2 *Bacillus thuringiensis* の殺虫性タンパク質遺伝子 (ICP gene) の分類

遺伝子型	宿主昆虫	分子量 (kDa)
cryIA (a)	鱗翅目	133
cryIA (b)	〃	131
cryIA (c)	〃	133
cryIB	〃	138
cryIC	〃	135
cryID	〃	133
cryIE	〃	133
cryIF	〃	134
cryIG	〃	130
cryIIA	鱗翅目と双翅目	71
cryIIB	鱗翅目	71
cryIIIA	鞘翅目	73
cryIIIB	〃	74
cryIVA	双翅目	134
cryIVB	〃	128
cryIVC	〃	78
cryIVD	〃	72

子の殺虫活性をまとめると、表-3 のようになる。すなわち、cry I A (a) はカイコ (*Bombyx mori*) に特異的に強い殺虫活性を、cry I A (c) はイラクサギンウワバ (*Trichoplusia ni*) に、また、cry IC はヨトウ (*Mamestra brassicae*) やハスモンヨトウ (*Spodoptera littoralis*) に活性を示すことが報告されている (Ge et al., 1989; YAMAMOTO and POWELL, 1993)。

Ⅳ ICP の発病機作

鱗翅目昆虫が ICP を食下すると、通常アルカリ性の消化液で分解されてプロトキシシン (130~135 kDa) となり、さらに消化液中のタンパク質分解酵素で分解され殺虫活性ペプチド (60~65 kDa) が出現し、昆虫の消化管細胞膜の受容体タンパク質と結合する (KNOWLES and ELLAR, 1986; YAMAMOTO and POWELL, 1993)。殺虫活性ペプチドは、領域 I・II・III から成り (Li et al., 1991)、領域 II の部分に β -sheet 構造を有する部分があり、この部分のアミノ酸の一部が受容体タンパク質と結合し細胞膜に孔を明け、浸透圧異常を起し細胞の崩壊をもたらす、という機作が受け入れられている。

Ⅴ ICP 遺伝子改変による優良 BT 菌製剤の作成

上記のように ICP のアミノ酸配列の特徴とペプチド構造の解明が進んだ結果、殺虫性機作の解明も明らかにされてきた。このため、従来の BT 剤に新しく ICP 遺伝子を付加して殺虫活性を高める一方、対象害虫の範囲を広める BT 剤を作る試みが行われている。最近注目されている 3 例について紹介する。

表-3 鱗翅目昆虫に対する各種 cry I 遺伝子の殺虫活性

昆 虫 種 名	学 名	cry I タイプ							
		IA(a)	IA(b)	IA(c)	IB	IC	ID	IE	IF
シロイチモジヨトウ	<i>Spodoptera exigua</i>	±	±	—	—	+	+	±	+
ハスモンヨトウ	<i>Spodoptera littoralis</i>	—	—	—	—	+	—	+	
アトウスヤガ	<i>Ochropleura (= Actevia) fennica</i>	—	—	—	—	—	—	—	
イラクサギンウワバ	<i>Trichoplusia ni</i>	+	+	+	+	+	+	+	
タバコガの一種	<i>Heliothis virescens</i>	+	+	+	—	±	—	±	+
ヨーロッパアワノメイガ	<i>Ostrinia nubilalis</i>	+	+	+				+	+
ヨトウ	<i>Mamestra brassicae</i>	+	+	—	—	+	—	—	
オオモンシロチョウ	<i>Pieris brassicae</i>	+	+	+	+	+	—	—	
タバコスズメガ	<i>Manduca sexta</i>	+	+	+	—	+	+	+	
トウヒノシントメハマキ	<i>Choristoneura fumiferana</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
マイマイガ	<i>Lymantria dispar</i>	+	+	±	—	±	+	—	+
ヒメシロモンドクガの一種	<i>Orgyia leucostigma</i>	+	+	±	—	+	±	—	+
オビカレハ	<i>Malacosoma disstria</i>	+	+	+	+	+	+	+	
カイコ	<i>Bombyx mori</i>	+	±	—	—	+	+	+	
コナガ	<i>Plutella xylostella</i>	+	+	+	+	+	—	—	

1 サントス アグロ社 (Sandoz Agro Inc., USA) による遺伝子改変 BT 剤

山本敬司博士のグループによる研究で、カリフォルニア州における重要作物ワタの害虫シロイチモジヨトウ (*Spodoptera exigua*) を主な対象害虫に改変を試みられた BT 製剤である。

アメリカの農作物は、大規模化が行われているため、害虫による被害も大きい。特に、ワタとトウモロコシに対する害虫の被害が大きく、アメリカ全体のワタの害虫による被害は、カリフォルニア州では 7,280 万ドル、日本円で 65 億 5 千 2 百万円と計算されている。

ワタの害虫も cotton bollworm とよばれている *Heliothis zea* やタバコの害虫でもある *H. virescens* が知られている。このため、シロイチモジヨトウも含めて、これら鱗翅目害虫に効果的な殺虫活性を示す ICP 遺伝子である cry I C 遺伝子を従来の亜種 *kurstaki* 株に遺伝子導入することが行われた。BT 菌株に遺伝子を導入する際の一般的な方法は、CRICKMORE et al. (1990) によって試みられたようにプラスミドとして導入するのが普通であったが、KALMAN et al. (1995) はエレクトロポレーション法によって染色体 DNA に入れた。このため、従来の欠点であった遺伝子の脱落による殺虫性タンパク質産生の不安定化、ならびに培地に抗生物質を添加しておかなければならない高コスト化を改良した。

新しく作成された遺伝子改変 BT 剤は Bt 94 ならびに Bt 95 と名付けられ、殺虫性試験の結果も目的とした害虫のみならずコナガ (*Plutella xylostella*)、イラクサギンウワバ (*T. ni*) にも有効とされた。

何よりも注目されるのは、1993 年には連邦 EPA とミシシッピ州 EPA の許可を得てミシシッピ州で圃場試験が行われ、1994 年にはカリフォルニア州 EPA の許可を得て San Joaquin Valley にて圃場試験が行われたことである。カリフォルニア州では 1989 年オー克蘭ドの AGS 社によりオレンジなどの霜害防除のためアイスマイナス遺伝子改変をした *Pseudomonas* 菌をイチゴ圃場にテストしようとして自然保護団体の妨害を受け圃場試験ができなかった以来の出来事であり、遺伝子改変 BT 剤の使用が一般市民にも認知されてきた点でアメリカ中に注目されている。

2 エコジェン社 (Ecogen Inc.) による遺伝子改変 BT 剤 (CRYMAX WDG)

JOHNSON et al. (1995) は、本年 7 月にコーネル大学で行われた国際無脊椎動物病理学会例会で新 BT 剤 CRYMAX WDG について報告した。

宿主菌株は亜種 *kurstaki* (EG 7841) であり、異なる

cry I A (c) 2 遺伝子と cry II A を保有していたが、これに接合法 (transconjugation) を用いて、塩基配列の異なるもう一つの cry I A (c) と cry I C 遺伝子を導入し、新しく EG 4923 を作成した。この結果、イラクサギンウワバ (*T. ni*) ・シロイチモジヨトウ (*S. exigua*) ・コナガ (*P. xylostella*) ・モンシロチョウ (*Pieris rapae*) などにより強く殺虫活性を示す新製剤を得、農薬登録を行った、としている。

3 チバガイギー社 (Ciba-Geigy Corp.) による遺伝子改変 BT 剤 (Able™)

Ciba Crop Protection の報告 (1995) によると、従来の cry I A (a) ・ cry I A (b) ・ cry I A (c) ・ cry II A の遺伝子を有する亜種 *kurstaki* 株に新しく cry I E を導入し新製剤を作成し EPA に登録中であり商品名 WHIRL とする、とされている。しかし、殺虫活性などについてはまだ詳細に報告されていない。

VI 遺伝子改変耐虫性作物 (Transgenic plant)

BT 菌における ICP 遺伝子のクローニングと構造解析が 1985 年に初めて行われて以来 (SCHNEPP et al., 1985), すでに 50 以上の異なる ICP 遺伝子が報告されてきた。この結果、これらの遺伝子が示す殺虫活性についての情報も数多く得られている。

ICP 遺伝子の詳細が明らかになると、これら遺伝子を植物細胞において発現させ、化学殺虫剤を散布する必要のない耐虫性植物を作出する試みが行われ、1987 年タバコスズメガ (*Manduca sexta*) 耐性を獲得したタバコがはじめて報告された (VAECK et al., 1987)。

真核生物において BT 菌由来の ICP 遺伝子を効果的に発現させることは必ずしも簡単なことではない。殺虫効果をもった一定量が植物細胞で発現されるための工夫は、トウモロコシに症病をもたらす細菌 *Agrobacterium tumefaciens* のもつ Ti プラスミドに、カリフラワーモザイクウイルス (CaMV) の 35 S プロモーターをつなぎ、その下流に ICP 遺伝子の殺虫活性領域 (約 65 kDa のトキシン) を挿入し植物細胞にて発現させるもので、これらキメラ遺伝子にさらに別な植物遺伝子の一部を組み込んだりする工夫も行われるようになった。

すでに述べたように、アメリカにおける害虫の被害の大きい対象作物は、ワタとトウモロコシであるが、この他、ダイズ・コムギ・ソルガム・ピーナッツ・タバコ・パレイショなども対象とされて耐虫性植物作出が試みられている。1989 年経済新聞として著名なウォールストリートジャーナルで取り上げられた記事のまとめは、飯塚 (1989) によって行われたが、これを表-4 に示した。

表-4 遺伝子組み換え農作物が実験されている会社と場所

会社名	対象作物	実験場所
アグラシータス (Agracetus)	ワタ	ミシシッピー州
アグリジェネテック (Agrigenetics)	トマト	ウィスコンシン州
カルジーン (Calgene)	タバコ, トマト, ワタ	アリゾナ州, カリフォルニア州, ハワイ州, ミシシッピー州
クロップ ジェネテック (Crop Genetics)	トウモロコシ, イネ	メリーランド州, ネブラスカ州, ミネソタ州, イリノイ州
デュボン (Du Pont)	トマト, ワタ	デラウェア州, フロリダ州
モンサント (Monsant)	トマト, パレイショ, ワタ, ダイズ	イリノイ州, フロリダ州, カリフォルニア州, インディアナ州, アリゾナ州, アラバマ州, テネシー州
ローム・アンド・ハース (Rohm & Hass)	タバコ	ノースカロライナ州
サントス (Sandoz)	タバコ	ノースカロライナ州

1989年5月11日現在: USDA 提供のウォールスリートジャーナル紙記事から

タバコ細胞におけるより効果的な発現は BARTON et al. (1989) によって試みられ、タバコスズメガ (*M. sexta*) に対する有効性は明らかにされたが、タバコにおいて最も重要である葉の組織がダメージを受けることも認められ (BARTON and MILLER, 1993)、市場への利用は未だ実現されていない。

植物細胞における ICP 遺伝子の発現量の低さの問題は依然多くの研究者、会社によって研究が続けられ実用に耐えるように工夫されてきている。このため、現在、耐虫性植物として利用され得る種子の開発が進行してきている。

最近の情報として日本経済新聞 (1995年5月15日付け) は、「遺伝子組換えの耐害虫性イモ作付け」という記事を出し、連邦 EPA の許可を受け、アメリカ・モンサント社は、今秋収穫する種イモを農家に販売し、来秋にはコロラドポテトビートルに耐性のあるイモが商品として出回ることを報告した。

耐虫性作物の現状について、二つの例を取り上げてみる。

1 モンサント社 (Monsant Corp.) による耐虫性パレイショならびに耐虫性ワタの作出

モンサント社が開発した耐虫性パレイショは、ハムシ

の一種コロラドポテトビートル (*Lepitotarsa decemlineata*) からの食害を防ぐため、cryIIIA 遺伝子をパレイショに組み込み耐虫性を獲得させたものである。実験的には防除効果が認められ、種イモにも遺伝子発現効果が認められたため、農家への販売も許可され、来秋には、この耐虫性パレイショが市販される、ということである。

また、耐虫性ワタは、*H. virescens* と *H. zea* の食害からワタを守るため、cry I A (c) 遺伝子がワタに組み込まれ、葉での発現効果が認められたことから、これもワタ種としての販売が予定されている。

2 ノースラップキング社 (Sandoz seeds), チバガイギー社 (Ciba-Geigy Corp.), マイコジェン社 (Mycogen Corp.) 3 社による耐虫性獲得トウモロコシ種子の販売

これら 3 社は、いずれもヨーロッパコーンボーラーとよばれている害虫 *Ostrinia nubilalis* の食害からトウモロコシを守るため、トウモロコシに cry I A (b) 遺伝子を導入し発現させたものであり、耐虫性効果も認められて 1996 年市販が予定されている。

これら改造 BT 剤ならびに耐虫性作物が比較的早くアメリカで市場に出回るようになってきている背景には、アメリカ国として、バイオ産業の面で世界のリーダー国となろうという政策を取っているためで、事実、環境に優しい農薬の登録には、審査順位をくり上げて行う、という大統領命令がある。

しかしながら、耐虫性作物作出のため BT 菌からの ICP 遺伝子を利用するためにはいくつかの問題点があり、これらの改良が行われているのが現状である。第 1 は技術的な問題であり、害虫が単一タンパク質で、しかも低濃度で継続的に与えられていると耐性を獲得する、という点であり、このための解決には複数の ICP 遺伝子を導入するとか、発現量を高めて低濃度による耐性獲得を防ぐ、といった改良が行われている。この他、高等植物細胞内では外来遺伝子発現を妨げることも認められるためその点の改良も行われている。第 2 はコスト面であり、耐虫性作物作出に要する費用である。この点は、化学農薬利用における散布用機器購入、労働力、燃料といった諸費用の総額と比べると問題にならない (BOULTER, 1993)、とされている。第 3 は、環境問題である。化学農薬は対象が他の動物にも及びかつ土壌中への蓄積も行われるのに対し、耐虫性植物の場合、単にこの作物を食下した昆虫にしか影響を及ぼさない点で環境に優しい、とされている。人類に対する健康の問題では、化学農薬は微量でも体内の蓄積があるのに対し、耐虫性作物の場合

導入発現されたものはタンパク質であるため、体内で分解され健康上問題はない、とされている。

ま と め

BT 菌が発見されてから約 100 年、また BT 菌の分子生物学的研究がはじまってから 15 年、今、農業への利用が新しい展開を見せようとしている。

BT 菌が保有する殺虫性タンパク質については、なぜ自然界でこの菌がこのような性質を獲得したのだろうか、という質問によくぶつかる。植物、特に樹木とそれに寄生する昆虫の相互依存の歴史は古い。現在、新しい BT 菌を分離しようとするとき、私達は太木の根元の土壌をサンプリングしたり、害虫が大発生している植物の下の土壌を採集して BT 菌の分離を行う。そこでは、昆虫が死亡する際、BT 菌が寄生しているとその体内で増殖し芽胞となって何年も腐葉土の下で息づいている、という想定のもとでの分離である。また、地温が高い亜熱帯地方の方が、北海道のどの地方よりも、数多く BT 菌が分離される現実もある。

このようにして私達は新しい遺伝子をもった BT 菌を分離して農業上の害虫防除を効果的に行おうとしている。遺伝子の改変についても、どの ICP 遺伝子のどの部分を変化させると活性を高めたり、対象昆虫を変えさせたり、またプロモーター領域を変化させることによって発現の増減を行い得るのかの情報が得られてきている。

植物にこのような遺伝子を入れても決して植物は恒常的に受け入れてくれない、という意見は植物育種に関係している先生方のはじめのころの意見でもあった。しかし、現在のバイオテクノロジー技術は長足の進歩を遂げている。問題があればその解決に努力し対応されてき

た。

日本の研究者は世界の現状を正しく認識し、決してマインナス思考で足踏みしてはならないと思う。

引 用 文 献

- 1) 浅野眞一郎ら (1993) : 応用動物昆虫学雑誌 38 : 300~302.
- 2) BARTON, K. A. et al. (1989) : Plant Physiol. 85 : 1103~1109.
- 3) ——— and M. J. MILLER (1993) : Transgenic Plants 1 : 297~314.
- 4) BOULTER, D. (1993) : Phytochem. 34 : 1453~1466.
- 5) CRICKMORE, N. et al. (1990) : Biochem. J. 270 : 133~136.
- 6) DELÉCLUSE, A. et al. (1995) : *Bacillus thuringiensis* Biotechnology and Environmental Benefits 1 : (in press)
- 7) GE, A. Z. et al. (1989) : Pro. Natl. Acad. Sci. USA 86 : 4037~4041.
- 8) HÖFTE, H. and H. R. WHITELEY (1989) : Microbiol. Rev. 53 : 242~255.
- 9) 飯塚敏彦 (1990) : Bio Industry 7 : 48~55.
- 10) IIZUKA, T. et al. (1995) : *Bacillus thuringiensis* Biotechnology and Environmental Benefits 1 : (in press)
- 11) JOHNSON, T. B. et al. (1995) : ibid.
- 12) KALMAN, S. et al. (1993) : Appl. Environ. Microbiol. 59 : 1131~1137.
- 13) ——— et al. (1995) : *Bacillus thuringiensis* Biotechnology and Environmental Benefits 1 : (in press)
- 14) KIM, L. et al. (1995) : ibid.
- 15) KNOWLES, B. H. and D. J. Ellar (1986) : J. Cell Sci. 83 : 89~101.
- 16) LI, J. et al. (1991) : Nature 353 : 815~821.
- 17) SHIBANO, Y. et al. (1985) : Gene 34 : 245~251
- 18) SCHNEPP, H. E. et al. (1985) : J. Bio. Chem. 260 : 6264~6272.
- 19) VAECK, M. et al. (1987) : Nature 328 : 33~37.
- 20) YAMAMOTO, T. and G. K. POWELL (1993) : In KIM L. (ed.) Advanced Engineered Pesticide, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 3~42.

主 な 次 号 予 告

次 12 月号は下記原稿を掲載する予定です。

抵抗性品種の罹病化といもち病菌新レース発生の機構 生井恒雄
1994 年に西日本で多発生したオオタバコガとその加害作物 吉松慎一
北海道におけるジャガイモ半身萎ちょう病の発生状況と今後の研究課題 角野晶大
ゴルフ場の芝管理における病虫害診断エキスパートシステムの応用 星 岳彦・貫 和之・太田則夫
二酸化炭素くん蒸による貯蔵穀類の植物検疫消毒法

川上房男

連載：諸外国の植物検疫制度 (5) —— オーストラリアの植物検疫制度 —— 塚本和彦・笹井 司
(リレー随筆) 産地の研究室から —— 地域ブランドを育てる / (3) 大豆 (丹羽黒) 福西 務
(植物防疫基礎講座)
ウンカ・ヨコバイ類に対する稲芽出しを用いた新しい簡易効力検定法 曾根信三郎
総目次 —— 月別・項目別 ——

定期購読者以外のお申込みは至急前金にて本会へ
定価 1 部 800 円 送料 76 円

信号物質の害虫制御への利用と産業的展望

農林水産省蚕糸・昆虫農業技術研究所 わかむら さだお あらかき のりお
若村 定男・新垣 則雄

生物は様々な化学的な刺激を情報として受け取り、それに対する反応性を獲得することによって巧みな適応を成し遂げてきた。そのような生物個体間の交信に使われる化学物質、すなわち信号物質（セミオケミカル：semiochemical）を便宜的に次のように区別している。同種の生物個体間での交信に利用されているものをフェロモン、異種の生物個体間で作用するものをアレロケミカル（他感作用物質）と呼ばれる。後者の場合、放出者が適応的に有利と考えられる場合はアロモン（allomone）、受容者に有利な場合はカイロモン（kairomone）、両者ともに有利であればシノモン（synomone）と定義されている（NORDLUND, 1981）。

昆虫はきわめて多様性に富む生物群で、信号物質研究は昆虫を中心に進歩したといっても過言ではない。特に、農業害虫では害虫防除への利用を展望して、性フェロモン研究が進められてきた。本文では、最近の農業害虫に関する信号物質の研究例を中心に紹介する。害虫制御への利用場面について何らかの示唆を得て頂ければ幸いである。

I フェロモン

農業害虫では、鱗翅目害虫を中心に性フェロモン利用が進展してきたが、最近甲虫類の性フェロモンやカメムシ類の集合フェロモンの化学成分の解明が進み、野外における利用研究が始まっている。甲虫類では、ヒメコガネやドウガネブイブイなどのコガネムシ類の性フェロモンが解明された。また、チャバネアオカメムシやホソヘリカメムシでは誘引性の集合フェロモンが同定され、野外での誘引性の検討が進められている（大平・津田, 1995；水谷ら, 1995）。

キボシカミキリでは接触刺激性の性フェロモンが解明された。キボシカミキリの雄が触角で雌に触れると、①駆け寄って②抱え込み③体軸を合わせ④交尾器を出して交尾に至るという一連の行動が、雌の体表に存在する性フェロモンによって解発される（FUKAYA and HONDA, 1992）。駆け寄り行動を解発する成分と、抱え込み以後の行動を引き起こす成分と少なくとも二つの異なる機能を有する成分の存在が明らかにされている（FUKAYA and

HONDA, 1995）。最近、抱え込み以後の行動を解発する性フェロモン成分の一つが同定された（FUKAYA et al., in press）。この物質は雌成虫の体表全体に分布し雄成虫が口髭あるいは前脚のふ節で触れることによって受容される接触刺激性のフェロモンである。合成フェロモンをゼラチンカプセルなどの小さな物体に塗布するとこれに触れた雄は抱え込んで交尾器を出す行動を示すので、天敵微生物製剤との組合せによって感染率や水平感染率を高めるという利用法が検討されている。このタイプのフェロモンはマツノマダラカミキリ（FAUJAH et al., 1992）やスギカミキリ（KIM et al., 1992；1993）にも存在する。

II フェロモン利用の展開

性フェロモンの農業害虫防除への利用については、「性フェロモン利用の手引き」（編集委員会編、日植防）や本誌の特集号（第47巻第11号）に詳しいので、ここでは最近注目される事例について簡単に触れる。

ニカメイガの発生予察への性フェロモントラップの利用研究は、1987年から5年間にわたって8県において実施された「ニカメイチュウの発生予察法の改善に関する特殊調査」事業の中で著しい進展を見た。長年にわたるデータの蓄積がある予察灯による誘殺消長との比較では、越冬世代では誘殺数が同等かフェロモントラップがやや多いが、第1世代では少ない傾向が認められ（市橋, 1990；近藤・田中, 1991；上野, 1991）、この現象には水田の雌密度が関与している（KONDO et al., 1993；KONDO and TANAKA, 1994 b）が、両者の誘殺消長はおおむね平行関係にあることが示された。また、性フェロモントラップの誘殺数と被害量との関係については、一化期については誘殺数と産卵密度、あるいは被害量に相関関係が認められている（KONDO and TANAKA, 1994 a）。この点は被害発生の予測に重要なので、各地でさらに事例を踏まえて精度を高める必要があろう。一連の調査結果を踏まえて農水省植物防疫課は、「性フェロモントラップの利用によるニカメイガの発生予察方法」を取りまとめた（本誌 48：53～55（1994））。

性フェロモンを用いた大量捕獲法については、沖縄県でアリモドキゾウムシを対象にその可能性について精力的な検討が行われている（小濱ら, 1995）。

合成フェロモンを利用した交信かく乱剤はすでに9種

の害虫を対象とした6種の製剤が農薬登録されて実用化されている。従来型のもは、ハマキ類の共通成分を利用したもの以外は、一つの製剤は一種の害虫を対象としてきた。しかし、リンゴなどの落葉果樹などでは一部の種だけを対象としている限りたといえ防除効果が優れていても現場での殺虫剤散布回数の軽減に結びつかない(川嶋, 1993; 佐藤, 1986)。そこで、1991年以降、果樹害虫や野菜害虫で複数の種の異なるフェロモンを混合した、いわゆる同時交信かく乱剤を用いた防除実験が行われてきた。リンゴ害虫では、ハマキムシ類とナシヒメシクイ、モモシクイガ、キンモンホソガなど複数の性フェロモンを混合した製剤の開発が進められてきている(阿部, 1992; 川嶋, 1993; 佐藤, 1992)。

また、交信かく乱剤には殺虫剤を効果的に組み合わせることはいうまでもないが、補完的な防除手段とを組み合わせることによって総合的な防除効果が得られている。施設栽培では、シロイチモジヨトウやハスモンヨトウに対してはブラックライトトラップによる捕殺の組合せ(若村・高井, 1990; 1993)、コナガでは真空ポンプ(掃除機)による吸引捕殺(田中, 1992)などが提案されている。フェロモン剤そのものだけでなく、それに組み合わせる防除手段の効果や害虫密度と効果の関係を的確に把握しておくこと(田中, 1993)がますます重要になる。

III アレロケミカル(他感作用物質)

天敵昆虫が寄主に定位し、これに寄生または捕食する過程には寄主の生息場所の発見、寄主の発見と認知の過程が含まれる。これらの各段階において、寄主由来や寄主の加害を受けた植物が出す匂いが、信号物質として重要な役割を果たしている。そこには情報の手に入れ易さと信頼度の問題があるとされる(Louise and Dicke, 1992)。つまり、天敵昆虫がある特定の植物の匂いを、寄主探索の最初の手掛かりとする場合を考えると、探索の最初のステップはとにかくその匂い源に近づいていくことであるに違いない。しかし、植物の匂いという情報はありふれていて入手は容易であるが、必ずしも寄主がそこにいるとは限らない、すなわち寄主探索の手がかり情報としての信頼度は、必ずしも高くないかもしれないという疑問がある。

最近の研究では、植物が植食者に加害されると特有の匂い物質を放出することが明らかにされつつある。その匂い物質は揮発性が高いので、情報として比較的手に入れ易く、加害時に放出されるなら信頼度も高くなろう。すなわち、そのような匂いを手がかりにすれば探索の範

囲を狭めることができる。そうして寄主昆虫がいる植物にたどりつけば、寄主の糞や脱皮殻、噛み跡など信頼度が高い情報を得ることができ、寄主の発見がより確実になると考えられる。これらの信号物質が、寄主探索プロセスの各段階をどのように制御しているかを解明できれば、寄主と天敵の共進化に重要な情報が得られるだけでなく、野外での適切な施用法の開発を通じて、信号物質の害虫管理への利用法をあみ出せるであろう。以下、天敵昆虫の寄主探索行動に、信号物質がどのように関与しているかについて最近の研究成果を織り交ぜて考えてみたい。

天敵昆虫が餌となる生物を捕える方法は、待ち伏せ型と探索型の二つに大別できる。待ち伏せ型の捕食者には、アロモンを放出して餌種をおびき寄せて捕獲する種がいる。また、探索型の場合は、植物の出すシノモンや植食者から放出されるいわゆるカイロモンを手掛かりに寄主を探し回っている。

IV アロモン

ナゲナワグモの1種 *Mastophora* sp. は、粘球を糸の先につけてぐるぐる振り回して、この粘球に餌となる昆虫をからめ捕る奇妙な習性を持っている。このクモはアロモンとして、ある種のヤガの性フェロモンに似た物質を放出して、これに誘引されてきた雄ガを粘球で捕らえる(Eberhard, 1977)。

V シノモン

植物と、それを食べる植食者と、その植食者を食べる天敵は、三つの異なる栄養段階の生き物である。このような三者の相互作用を、三栄養相互作用(tritrophic interaction)と呼んでいる。最近、この三者の関係に化学的信号をめぐって新しい事実が次々と報告されている。

トウモロコシの実生は、シロイチモジヨトウ幼虫の食害を受けると、揮発性の高いテルペノイドを大量に放出するようになり、これに幼虫寄生蜂 *Cotesia marginiventris* が誘引されてくる。植物に物理的に傷を付けただけでは、このようなことは起こらないが、この傷にヨトウ幼虫の唾液を塗布すると、食害葉と同じ匂い物質を作り出すようになる(Turlings et al., 1990, 1991; Turlings and Tumlinson, 1992)。

同様に、捕食者のカブリダニは、ナミハダニの加害を受けた植物の生産した匂い物質に誘引されてくる。この匂い物質は加害葉ばかりでなく、未加害葉も含めて、植物全体から放出される(Dicke et al., 1990)。植物とチリカブリダニの間では、この匂い物質は、放出者である植

物と受容者であるチリカブリダニの両者に有利に働くので、シノモンということになる。

VI カイロモン

寄主の放出する性フェロモンは、比較的長い距離から寄主を探索する際にカイロモンとして利用されることがある。特に、昼間に配偶行動を行う半翅目昆虫の天敵昆虫において多くの事例が報告されている。

アブラムシの性フェロモンにコバチ科の寄生蜂が誘引される (HARDIE et al., 1994)。また、カイガラムシの性フェロモンにはツヤコバチ科の寄生蜂が誘引される (STERNLICHT, 1973; RICE and JONES, 1982)。さらに、カメムシ類の雄が放出する集合フェロモンに、ヤドリバエ科の寄生バエやクロタマゴバチ科の卵寄生蜂が誘引されてくることが、ミナミアオカメムシ (MITCHELL and MAU, 1971; HARRIS and TODD, 1980)、捕食性のカメムシ *Podisus maculiventris* (ALDRICH et al., 1984)、チャバネアオカメムシ (守屋ら, 1993)、アシビロヘリカメムシ (YASUDA and TSURUMACHI, 1995) で知られている。

鱗翅目の昆虫の性フェロモンをカイロモンとして利用している卵寄生蜂の例として、ヨトウガの雌成虫の性フェロモンに、*Trichogramma evanescence* が誘引される例 (NOLDUS and van LENTEREN, 1985) がある。また、クロタマゴバチ科の *Telenomus remus* はハスモンヨトウの近縁種 *Spodoptera frugiperda* の性フェロモンの存在下では寄主探索行動が活発になる (NORDLUND, 1983)。しかし、これらの鱗翅目昆虫は夜間に性フェロモンを放出するが、寄生蜂の探索行動は専ら昼間に限られる。したがって両者の行動には時間的なギャップがある。すなわち、夜間に放出されたフェロモンは明るくなる頃には、すでに蒸発して消失しているのではないかという疑問が生じる。これに対し、NOLDUS et al. (1991) は、ヨトウガの性フェロモンは植物の葉の表面に吸着され、そこから再放出されるため、少なくとも数時間は *T. evanescence* に対するカイロモン効果があり、時間的なギャップを埋めていると考えている。

卵寄生蜂には寄主の卵に到達するために、寄主成虫の体に付いて運ばれていく、いわゆる便乗 (phoresy) という特殊な方法を発達させている種もいる (CLAUSEN, 1976)。ドクガクロタマゴバチ *Telenomus euproctidis* は、タイワンキドクガのメス成虫の腹部末端の毛束の中に潜り込んで運ばれ、産卵が始まると直ちに雌ガから離れてガの卵に産卵する (ARAKAKI, 1990)。この寄生蜂は雌ガを発見する際、ドクガの性フェロモンをカイロモンとして利用している (新垣ら, 1995)。

揮発性が低くて、至近距離でカイロモ的な機能を有する刺激因として、鱗粉、卵自身、卵殻上の糊物質、寄主幼虫自身、糞、絹糸、脱皮殻、唾液、体液、マーキングフェロモン等が知られている (戒能, 1987)。鱗翅目やハバチ類などの幼虫をエサとしている捕食性のハリクチブトカメムシは、ハスモンヨトウの幼虫の匂いに誘引される。その匂い成分のひとつは、細菌やカビに対する防御物質ではないかと考えられている物質であった (安田ら, 1994)。

このように、いわゆるカイロモンと呼ばれる物質は、BLUM (1974) が指摘したように放出者にとっては本来アロモンやフェロモンである物質に対し受容者である捕食者や寄生者が適応した結果であるといえる。

VII アレロケミカル利用

異種間の信号物質を用いた害虫防除に関しては、まだ十分に研究されているわけではなく、実用例も少ないのが現状である。1970年の初頭において、天敵昆虫が用いている信号物質が発見されて以来、この信号物質を害虫防除に応用しようとする試みがなされてきた。その典型的な例は、カイロモン物質を作物に全面的に散布 (blanket spray) するというものであった。LEWIS et al. (1972) は、ガの鱗粉のヘキサン抽出液を植物に散布すると、卵寄生蜂 *T. evanescens* の寄生率が上昇したことを報告し、カイロモンによる害虫防除の具体的事例として、脚光を浴びた。これは小面積かつ寄主密度が高い場合に認められた結果であった。しかし、大面積で寄主密度が中程度または低密度の場合には、卵寄生蜂は、寄主卵のない植物の上で無駄な探索を強いられることになり、逆に寄生率が低下するのではないかと懸念された。実際に、CHIRI and LEGNER (1983) は、寄主の鱗粉抽出液をワタ畑に散布し、コマユバチ科の幼虫寄生蜂によるワタアカミムシの卵の寄生率を調査したが、散布効果はみられなかった。その後、カイロモン抽出液を珪藻土にしみ込ませて、寄主の産卵場所近くに限定散布すると、寄生蜂の局所的な探索を強化し、かつ広範囲な移動も妨げないという応用例が報告された (Lewis et al., 1979)。しかし、これは極めて多くの労力が必要で、広範囲な規模の施用には適しない非実用的なものであった。一方、LEWISら (1982) と NORDLUNDら (1983) は、ガラスハウス内での小規模な実験ではあるが、卵塊の近くに寄主の性フェロモン成分をしみ込ませた綿棒を置くと、寄生率が高まったと報告している。

近年、害虫の合成性フェロモンを用いた大量誘殺や交信かく乱による防除法が、一部実用化されている。先に

示したように、天敵昆虫が寄主の性フェロモンを手掛かりに寄主の探索を行っている事例がある。大量誘殺の場合、そのような天敵がフェロモントラップによって除去されてしまう可能性がある。一方、交信かく乱の場合には、天敵が処理区に誘引され活発に探索行動を行うプラスの面と、天敵自身も交信かく乱によって寄主に定位できないというマイナス面の、二つの可能性が考えられる。合成性フェロモンによる交信かく乱試験において、数種の寄生蜂については寄生率に影響がなかったと報告されている (BROWN and CAMERON, 1979; SOWER and TORGENSEN, 1979) が、寄主のフェロモンを探索に利用するタイプの天敵については、合成フェロモントラップや交信かく乱剤の天敵への影響を考慮する必要がある、このような観点を含めたトータルの防除効果を評価する必要がある。

最近、寄生蜂の寄主探索能力の高さの秘訣が、その学習能力にあることが明らかになってきた。寄生蜂は寄主が食害した部分に接触経験を持った後では、その食痕部からでる匂いを選好するようになる。このことを利用して、寄生蜂を放飼する前に、食害された作物の匂いを、寄生蜂に学習させることによって、対象圃場への寄生蜂の定着率や探索効率を高めることができるのではないかと期待されている (PAPAJ and LEWIS, 1993)。

植物が植食性昆虫の加害を受けた場合に、天敵を誘引する匂いを放出するようになる。その量や成分は植物品種間でかなりの変異があることから、加害を受けた際に、天敵を誘引する成分を多く生産する品種の育種が提唱されている (VET and DICKE, 1992)。

以上、信号物質の産業的利用については、性フェロモン以外はほとんど未着手といえるが、増殖した天敵の行動を制御して有効利用を図ろうとする場合など、今後様々な場面で信号物質の活用が期待される。

引用文献

- 1) 阿部憲義 (1992) : 北日本病虫研報 43 : 144~145.
- 2) ALDRICH, J. R. et al. (1981) : Entomophaga 26 : 149~156.
- 3) ARAKAKI, N. (1990) : J. Ethol. 8 : 1~3.
- 4) 新垣ら (1995) : 応動昆要旨 p. 80.
- 5) BROWN, M. W. and E. F. CAMERON (1979) : Environ. Entomol. 8 : 77~80.
- 6) BLUM, M. S. (1974) : Bull. Entomol. Soc. Am. 20 : 30~35.
- 7) CHIRI, A. A. and E. F. LEGNER (1983) : J. Econ. Entomol. 76 : 254~255.
- 8) CLAUSEN, C. P. (1976) : Annu. Rev. Entomol. 21 : 343~368.
- 9) DICKE, M. S. et al. (1990) : J. Chem. Ecol. 16 : 3091~3118.
- 10) EBERHARD, W. G. (1977) : Science 198 : 1173~1175.
- 11) FAUJIAH, B. A. et al. (1992) : Appl. Entomol. Zool. 27 : 19~30.
- 12) FUKAYA, M. and H. HONDA (1992) : Appl. Entomol. Zool. 27 : 89~97.
- 13) ——— (1995) : Appl. Entomol. Zool. 30 : 467~470.
- 14) ——— et al. : J. Chem. Ecol. in press.
- 15) HARDIE, J. et al. (1994) : Entomol. Exp. Appl. 71 : 95~99.
- 16) HARRIS, V. and J. TODD (1980) : Entomol. Exp. Appl. 27 : 117~126.
- 17) 戒能洋一 (1987) : バイオ農業・生育調節剤開発利用マニュアル, エル・アイ・シー, 254~277.
- 18) 市橋秀幸 (1990) : 今月の農業 34 (3) : 102~107.
- 19) 川嶋浩三 (1993) : 植物防疫 47 : 508~511.
- 20) KIM et al. (1992) : Appl. Entomol. Zool. 27 : 489~497.
- 21) ——— et al. (1993) : ibid. 28 : 525~535.
- 22) 小濱継雄ら (1995) : 応動昆講演要旨 p. 109.
- 23) KONDO, A. et al. (1993) : Appl. Entomol. Zool. 28 : 503~511.
- 24) 近藤章・田中福三郎 (1991) : 植物防疫 45 : 300~304.
- 25) KONDO, A. and F. TANAKA (1994 a) : Appl. Entomol. Zool. 29 : 55~62.
- 26) ——— (1994 b) : ibid. 29 : 279~281.
- 27) LEWIS, W. J. et al. (1972) : Ann. Entomol. Soc. Am. 65 : 1087~1089.
- 28) ——— et al. (1982) : J. Chem. Ecol. 8 : 1323~1332.
- 29) LOUISE, E. M. and M. DICKE (1992) : Annu. Rev. Entomol. 37 : 141~147.
- 30) MITCHELL, W. C. and R. F. L. MAU (1971) : J. Econ. Entomol. 64 : 856~859.
- 31) 水谷信夫ら (1995) : 応動昆要旨 p. 214.
- 32) 守屋ら (1993) : 果樹試報 24 : 73~90.
- 33) NOLDUS, L. P. J. J. and J. C. van LENTERER (1985) : J. Chem. Ecol. 11 : 781~791.
- 34) NOLDUS, L. P. J. J. et al. (1991) : Physiol. Entomol. 3 : 329~344.
- 35) NORDLUND, D. A. (1981) : in Semiochemicals (NORDLUND, D. A. et al., eds.), John Wiley & Sons, New York, pp. 13~28.
- 36) ——— et al. (1983) : J. Chem. Ecol. 9 : 695~701.
- 37) PAPAJ, D. R. and A. C. LEWIS (1993) : Insect Learning, Chapman & Hall, New York, 400 pp.
- 38) 大平喜男・津田勝男 (1995) : 応動昆要旨 p. 211.
- 39) RICE, R. E. and R. A. JONES (1982) : Environ. Entomol. 11 : 876~880.
- 40) 佐藤力郎 (1986) : 植物防疫 40 : 63~66.
- 41) ——— (1992) : 福島県試研報 15 : 27~91.
- 42) SOWER, L. L. and T. R. TORGENSEN (1979) : Can. Entomol. 111 : 751~752.
- 43) STERNLICHT, M. (1973) : Entomophaga 18 : 339~342.
- 44) 高井幹夫・若村定男 (1990) : 応動昆 34 : 115~120.
- 45) ——— (1993) : 植物防疫 47 : 503~507.
- 46) 田中 寛 (1992) : 植物防疫 46 : 300~303.
- 47) ——— (1993) : 同上 47 : 512~515.
- 48) TURLINGS, T. C. J. et al. (1990) : Science 250 : 1251~1253.
- 49) ———, et al. (1991) : Entomol. Exp. Appl. 58 : 75~82.
- 50) ——— and J. H. TUMLINSON (1992) : Proc. Nat. Aca. Sci. 89 : 8399~8402.
- 51) 上野臣一 (1991) : 関東東山病虫研報 38 : 145~148.
- 52) VET, L. E. M. and M. DICKE (1992) : Annu. Rev. Entomol. 37 : 141~172.
- 53) YASUDA, K. and M. TSURUMACHI (1995) : Appl. Entomol. Zool. 30 : 139~144.
- 54) 安田哲也・若村定男 (1994) : 応動昆要旨 p. 179.

昆虫の脳神経機能の工学的応用

筑波大学生物科学系 ^{かん}神 ^{ざき}崎 ^{りょう}亮 ^{へい}平

は じ め に

昆虫は、様々な変化に富んだ環境に適応して進化した結果、180 万種以上に分化したといわれる。我々が、ふだん何げなく目にする、昆虫の飛翔や歩行などの移動運動も、種によって実に多様である。障害物を回避したり、乗り越えながら歩行するアリ、アクロバティックな飛び方をしながらも失速することなく安定して飛行するハエ。小さな昆虫にどうしてこのような行動ができるのだろうか、その動きの美しさについて見とれてしまうことがある。また、共同して巣をつくり、女王を頂点にした階級構造によって社会的な生活を営むアリやハチの行動に至っては驚嘆に値する。

昆虫のこのような行動は、一般に外界の感覚情報が神経系によって処理された結果として生じる。わずか体長数 cm の昆虫が、外界の情報を適切にとらえ、上記のような行動、さらには、餌や交尾のパートナー・産卵場所の探索・帰巢・逃避など様々な合目的な行動を発現するのである(神崎, 1993)。

餌場を探しながら飛翔する昆虫を想像してみよう。彼(女)らは、時々刻々変化する外界の匂い・視覚・風によって生じる触覚など複数の感覚情報を正確に感覚器でとらえる。中枢神経系は、それらの様々な情報を瞬時に統合処理する。そして、適切な運動命令を下すことによって翅を羽ばたかせる。この操作が絶えず繰り返されることによって、昆虫は、目的の餌場まで安定して空中を飛んで行くのである。このような行動の制御が、小さな昆虫の、さらにその内部に納められた神経系によって行われているというのは、驚異というほかない。

工学の分野では、近年、複数の小さなシステム(サブシステム)が自律的に働き、お互いが協調しあうことで全体の秩序を保つ「自律分散」といわれる、より生命(生物)に近いシステムの開発が急がれている。このシステムは、従来の全体を一つに統合する中央制御システムに比べ、一部が壊れてもシステム全体に与える損害は最小ですむというロバスト(頑強)性を持つことから、産業システムへの利用が期待されている。

この自律分散のモデルの一つとして、昆虫の神経系が

注目されている。複数の感覚情報の並列的処理や、行動を制御する昆虫の神経機構の解明は、今後、神経機能を広く産業的に応用するためには、もっとも重要な研究の一つとなる。このような研究は、生物学者と工学者の緊密な連携プレーによって達成されるものである。

この章では、昆虫の行動を制御する上で最も基本となる神経系の働きについて、神経行動学的見地から解説する。そして、昆虫の神経系による運動制御のしくみをモデル化し、移動ロボットの制御に適用した例を紹介する。

I 昆虫の行動と神経系

1 昆虫のニューロン

昆虫の神経系は、脊椎動物の脳神経系と同じ構成要素である「ニューロン」からなり、膜電位の発生メカニズムやシナプスでの情報処理の機構も共通している。したがって、昆虫の神経機能を研究するための方法は、脊椎動物のそれとまったく同じである。

一方、昆虫の脳を構成する細胞数は、1 万～10 万個のオーダーで、100 億個を超える人間のそれよりもはるかに少ない(口絵参照)。これは、昆虫の神経系による感覚情報の受容処理や行動制御が、脊椎動物のそれに比べると単純な神経システムにより行われていることを示している。また、一般に、昆虫のニューロンは、特徴的な形態や生理機能を持つことから、個体間で比較的容易に同定することができる。このような特徴は、神経回路を研究する上で大きな利点となる。

2 定型的行動パターン

昆虫の行動の多くは遺伝的にプログラム化されており、型にはまったパターン(定型的行動パターン)を示す。このような行動は、感覚刺激→受容器→中枢神経系(CNS)→効果器(筋肉)→行動という、一連の神経系における情報処理の結果として発現する。

神経系の構成に基づいた定型的行動の発現の様式を図-1 に示した。定型的行動は、一般に外界の感覚刺激との対応関係が非常に厳密であり、通常はある種の特定な感覚入力(組合せ)によってのみ引き起こされる。このような刺激は、「鍵刺激」といわれる。鍵刺激は受容器で受容され、受容細胞の活動電位の頻度パターン変化として神経情報に変換される。次に、その情報は脳などの CNS 内

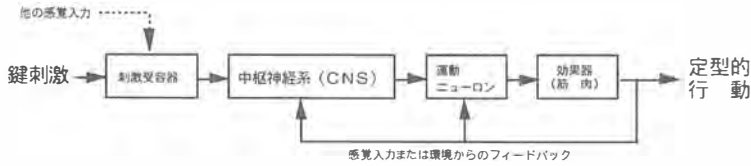


図-1 神経系の構成に基づいた定型的行動の発現の様式

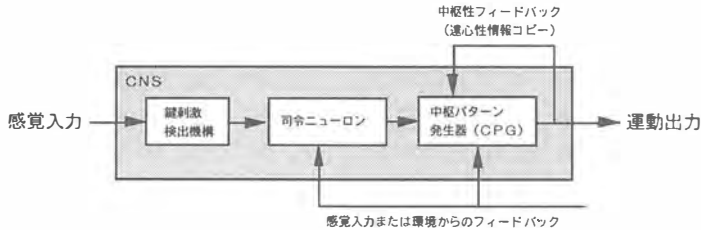


図-2 中枢神経系の機能の概念。図-1の中枢神経系（CNS）のみを詳細に示した。

の神経回路で処理され、行動を制御する運動出力情報に変換される。その情報は、運動ニューロンを介して効果器（筋肉）に伝達され、一連の筋肉群を協調性のあるパターンで収縮し、弛緩させることによって、合目的な行動を引き起こすわけである。さらに、自らの行動によって生じた感覚情報（例えば、自己受容器の情報）は、CNSまたは運動ニューロンにフィードバックされ、CNSの命令どおりの動きであったかどうかのチェックが行われ、適切な補正がなされる。このような一連の情報処理の繰り返しによって、安定した行動が発現する。

昆虫の定型的行動パターンにおいては、CNSへの感覚入力と、CNSからの運動出力である行動パターンが明確な対応関係を示す。昆虫のこのような特徴も、CNSの機能を研究する上での利点となる。

3 中枢神経系の役割

行動を解発し、制御する上で中心的な役割を果たすのが、CNSである。CNSは、図-2のような階層構造によって機能すると考えられる。(1)鍵刺激検出機構：受容器に入力された感覚刺激が定型的行動パターンを発現させるための鍵刺激であるかどうかを検出する機能。(2)中枢パターン発生器（Central Pattern Generator：CPG）として、一連の筋肉群の順序だった規則的な収縮・弛緩を起こすための運動パターンを形成する機能。反射弓を介した単純な運動である反射はこのCPGを介さないで、定型的行動パターンとは異なる。(3)CPGには複数の運動パターンがあり、それぞれ特定の鍵刺激と対応した運動パターンを出力すると考えられる。鍵刺激検出機構と対応するCPGを結び、それを活性化する

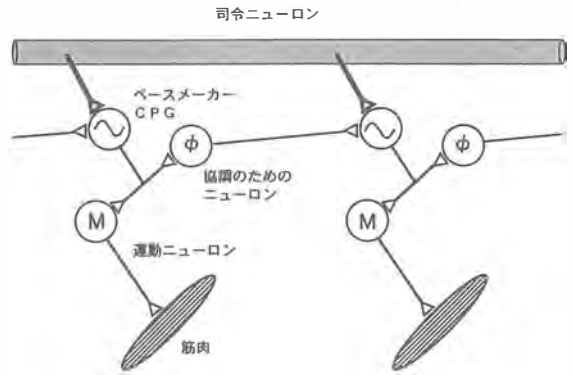


図-3 ザリガニの遊泳肢を制御するリズム発生回路。各遊泳肢にはリズムを発生する振動子として機能するニューロンがあり、司令ニューロンによってつながっている。

注：この図はあくまでも司令ニューロンの概念を示すものであり、実際の神経回路網は、ずっと複雑である。

単一またはあるグループのニューロンは、司令ニューロン（KUPFERMAN and WEISS, 1978）、または運動制御ニューロン（SHEPHERD, 1988）とよばれる。

4 司令ニューロン

司令ニューロンの概念は、WIERSMA and IKEDA (1964)が、ザリガニの腹髄の中を走る何本かの介在ニューロンを刺激すると、腹部の遊泳肢が、自然に見られる遊泳肢の運動と同様なリズム活動を生じることを見いだしたことに起因する。加える刺激には、リズム性が必要なく、刺激が持続する間このリズム運動が引き起こされたことから、彼らは、この種の介在ニューロンは遊泳肢のリズム活動を「司令（command）」する能力を持つと考え

た。このようにある特定の鍵刺激によって、興奮し、その興奮が結果的に一連の筋肉群に協調性のあるパターンで収縮と弛緩を引き起こす、単一または一群の介在ニューロンは「司令ニューロン」と呼ばれるようになった(図-3)。

BENTLEYやKONISHIは、「司令ニューロン」を次のように定義している(SHEPHERD, 1988)。「ある介在ニューロンが活動さえすれば、一群の運動ニューロンの興奮とか抑制を通じて、はっきり同定可能な行動の一部を引き起こされるとき、そのニューロンを司令ニューロンとよぶ。」さらに、KUPFERMAN and WEISS (1978)は、「司令ニューロンと呼ぶに当たっては、ある決まった運動出力が引き出されるのに、そのニューロンが必要かつ、十分であることが証明されなければならない。」としている。

最近の研究では、生体の様々な状態や外部環境の変化に適合した行動は、単一の司令ニューロンのみの作用によって生じるのではなく、複数の司令ニューロンが並列的な経路を形成することによって、それらのニューロンの活動全体のパターンによって実現されるものであると考えられている(SHEPHERD, 1988)。このような、司令ニューロンの概念に関しては多くの議論が交わされてきた。しかし、ある条件下では、1個のニューロンを刺激することによって、特異的な運動出力パターンを引き起こすことができるという事実が変わるわけではない。

例えば、秋の夜長に聞かれるコオロギのいくつかの歌

のパターン(誘引歌、求愛歌、戦闘歌)は、左右の前翅の複雑な擦り合わせのパターンの違いによって生じるものであるが、この一連の複雑な運動パターンは、脳から胸部神経節に出力される特定の下行性介在ニューロン(司令ニューロン)の興奮状態(スパイク頻度)を変えることによって制御されている。BENTLEY (1977)らは、このニューロンを様々な頻度で電気刺激することによって、異なった種類の歌を歌わせることに成功している。

中枢神経系による運動制御の階層的な概念は、その研究を進める上での枠組みとして重要であり、様々な運動パターンが司令ニューロンの切り替えによって生じるという考え方は、現象を単純化し過ぎてはいるものの、生物を規範とした工学モデルを考える上では魅力的である。

コオロギの例のように、動物のある行動パターンを外部の信号(例えば電気刺激など)で変化させようとしたとき、その行動パターンをつくりだす多種類の筋肉の一つ一つを統合して制御することは、制御すべき要素が多く、容易ではない。それよりも司令ニューロンを制御することによって多くの筋肉群の協調的な活動パターンを変え、行動を変化させた方がはるかに簡単であろう。

神経生理学的に解明された昆虫の神経系の階層構造をモデル化し、移動ロボットの運動制御に利用する研究が最近始まった。Case Western Reserve UniversityのBEERやQUINNらの昆虫規範型の6肢歩行ロボットの研究

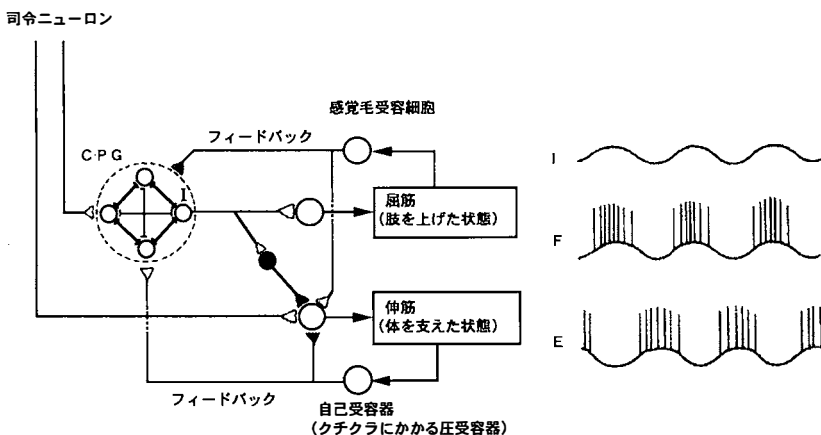


図-4 ゴキブリの歩行系のリズム発生器。1本の肢を制御する神経回路を示した模式図。バースト発射を形成する介在神経と屈筋(F)、伸筋運動神経(E)の典型的な活動パターンを右に示す。CPGを構成するニューロンは、その膜電位を絶えず振動させていた(I)。CPG内のニューロンのいくつかは、スパイク非発生型ニューロン(non-spiking neuron)であり、これがシナプスを介して肢の屈筋運動ニューロンを駆動する。△：興奮性接続、▲：抑制性接続(PEARSON, 1976を改編)

は、その中でも最も成功した例であろう (BEER et al., 1993)。

II 昆虫の神経機能の移動ロボットへの応用

昆虫の飛翔や歩行などの移動運動は、翅の上下運動、肢の前後・上下方向などへのリズム運動が基本である。これは、効果器（筋肉）の協調の取れたリズム運動によって発現する。このようなリズムは、上述のような CNS に内在する CPG によって形成される。昆虫は様々な協調の取れた移動運動を示すが、そのパターンを発生するための基本的な神経メカニズムはみなここに含まれている。昆虫の歩行や飛翔に関する CPG の存在は、PEARSON (1976) のゴキブリの歩行に関する研究 (図-4) や、BURROWS (1975) のバッタの飛翔に関する研究によって、明らかになっている。

CPG は、感覚刺激によって活性化された上位の中樞から下行する司令情報によって活性化され、制御される。さらにこの CPG は、筋肉やクチクラの自己受容器からのフィードバックや、中枢神経系内部における下位中樞から上位中樞へのフィードバックによっても制御されている (図-1, 2, 4)。

図-4 に示した、PEARSON (1979) のゴキブリの歩行を制御する神経回路 (flexor burst-generator model) を規範として、BEER et al. (1993) は、図-5 ような移動運動の制御回路のモデルを提唱した。彼は、このモデルをコンピ

ュータ上でシミュレーションすることによってさまざまな 6 肢歩行パターンを実現させた。さらに、QUINN は、そのシミュレーションの結果をもとに実際の 6 肢歩行ロボットを製作した (口絵参照)。

図-5 に示したモデルは、以下のように説明される。ペースメーカー (P, CPG) の活動は、肢の引き下げ (FT) と後方への振り (BS) を抑制し、前方への振り (FS) を興奮させる。結果として、肢は引き上げられた状態で、前方に振られることになる。ペースメーカーの活動 (バースト) の間では、肢は接地され (FT)、司令ニューロン (C) の持続的な興奮性情報によって、肢を後方に振る。肢が前方または後方への振りの極大点に達すると、それぞれの肢の角度を感知するセンサーからのフィードバック信号が生じ、それによって CPG の出力は調節を受ける。肢の前方への振りの角度を感知するセンサー (FAS) からの信号は、CPG の活動を抑制する。一方、後方への振りの角度を感知するセンサー (BAS) は、CPG を興奮させる。前方への振り角度センサー (FAS) は肢を下げたり (FT)、前方への振り (FS) を起こす運動ニューロンに直結している。

安定した歩行を達成するためには、それぞれの肢の運動は相互になんらかの関係でつながっている必要がある。BEER ら (1993) は、隣り合った肢のペースメーカー間に抑制の結合を入れ、司令ニューロンの出力の大きさを変化させることによって、早歩きでは、昆虫に通常見られる三肢歩行^{*1}が、そしてゆっくりとした歩行では、波状歩行^{*2}が実現されたことを報告している。

BEER 以前にも昆虫を真似た 6 肢歩行ロボットが制作されている。しかし、この場合、6 肢のそれぞれの運動の制御がすべて中央制御装置に依存しており、その歩行パターンはあらかじめプログラム化され、歩行パターンの変化は、プログラムを変更することによって達成されるという、複雑な制御を要したものである。

BEER ら (1993) は、全肢それぞれに独立した CPG を持たせ、隣り合った肢の CPG 間で、相互に抑制し、さらに運動出力によって生じた感覚入力による反射 (フィードバック) によって、CPG が修飾されるようになっている。司令ニューロンの活動の強弱を変化させることによって、歩行速度を変え、それに応じた歩行パターンを得ることに成功したわけである。このような昆虫規範 (自律分散) 的な制御では、その構築が単純であるばかりで

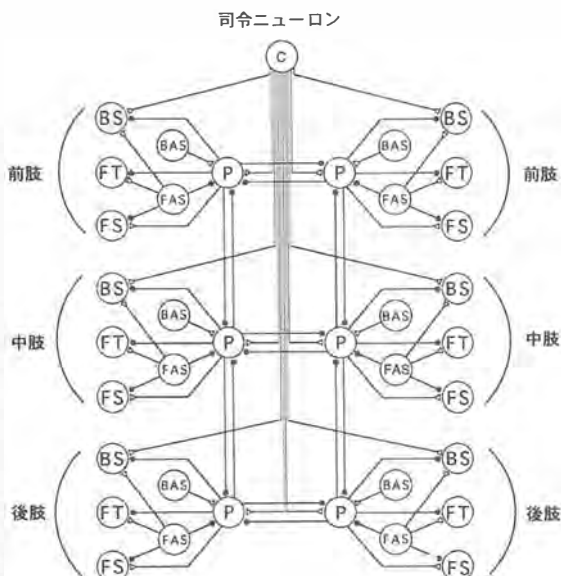


図-5 移動運動の制御回路。△：興奮性の接続、●：抑制性の接続。本文参照。(BEER and CHIEL (参考文献 1), 1993 を改編)

^{*1} (左前肢, 右中肢, 左後肢) と (右前肢, 左中肢, 右後肢) の 3 肢の踏み出しが交互に起こり、3 肢でからだを支えて移動する。

^{*2} 肢の踏み出しが、後ろから前へ順に移動し、肢の動きが波のようになる。

なく、肢が一つ破損しても他の肢は独立して動作できるので、未知の環境での行動にも適応できる可能性がある。

お わ り に

昆虫の神経系は、(1)それを構成する神経細胞数が少なく、神経回路が比較的容易である、(2)CNS への感覚入力と CNS からの運動出力の対応関係が明確である、などの特徴を持ち、神経機能を研究する上で優れたモデルとなる。

昆虫が、外界の情報を適切にとらえ、餌や交尾のパートナーの探索・帰巢・逃避など様々な合目的な行動を遂行できるのは、昆虫の腹側に存在するわずか数 cm の糸のような中枢神経系の情報処理による。この微小な神経系内に複数の感覚情報を並列的に処理する機能や、行動を適切に制御する機能が内在している。

昆虫の神経機能を工学的に利用するための研究は、まだ始まったばかりであり、BEERや QUINNらのように、ある程度の成功を収めたケースは世界的にみてもまだ少ない (BEER, 1993)。しかし、今後、Biology と Robotics の学際的研究が、世界的に推進されることは疑う余地がない。去る 5 月、つくばと名古屋で Biorobotics と Bio-Mechatoronics に関する国際ワークショップが開催され、Biology と Robotics の共生 (symbiosis) について

討論され、21 世紀への研究の一つの方向性として指し示された。わが国においてこのような国際ワークショップが開催されたにもかかわらず、国内では、生物学者と工学者の共同研究が、まだほとんど行われていないというのは皮肉なものである。

神経機能の工学的利用を考えるならば、そのモデルとなる昆虫の神経機能の基礎的研究を今後さらに推進することが必須であることはいうまでもない。さらに、生物学・農学・工学・物理学・数学などの研究者による学際的共同研究によって、昆虫神経機能の産業的利用を目的とした研究が、産官学規模の支援によって、さらに精力的に推進されることを切望する。

参 考 文 献

- 1) BEER, R. D. et al. eds. (1993): Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics, Academic Press.
- 2) BURROWS, M. (1975): J. Exp. Biol. 63: 713~733
- 3) 久田光男, 内藤 豊 (編) (1982): 行動生物学入門, 産業図書, 東京.
- 4) 神崎亮平 (1993): 植物防疫 47 (11): 493~498.
- 5) KUPFERMAN, I. and K. R. WEISS (1978): The Behavioral and Brain Sciences 1: 3~39.
- 6) 桑名芳彦 (1994): 遺伝 48 (9): 38~41
- 7) PEARSON, K. G. (1979): The Neurosciences, Fourth Study Program, The MIT Press: 145~147.
- 8) SHEPHERD, G. H. (1988): ニューロバイオロジー, 学会出版センター, 東京, 山元大輔訳.
- 9) WIERSMA, C. A. G. and K. IKEDA (1964): Comp. Biochem. Physiol. 12: 509~525.

本 会 発 行 図 書

農薬適用一覧表(平成 7 農薬年度)

農林水産省農薬検査所 監修

定価 3,500 円 (本体 3,399 円) 送料 340 円 A5 判 391 ページ

平成 7 年 9 月 30 日現在, 当該病害虫 (除草剤は主要作物) に適用のある登録農薬をすべて網羅した一覧表で, 殺菌剤, 殺虫剤, 除草剤, 植物成長調整剤に分け, 各作物ごとに適用のある農薬名とその使用時期, 使用回数を分かりやすく一覧表としてまとめ, 付録として, 毒性及び魚毒性一覧表及び農薬商品名・一般名対比表を付した。農薬取扱業者の方はもちろんのこと病害虫防除に関係する方の必携書として好評です。

連載：諸外国の植物検疫制度（４）

オーストラリアの植物検疫制度

農林水産省農蚕園芸局植物防疫課

つか
塚
ささ
笹もと
本
い
井かず
和ひこ
彦
つかさ
司

農林水産省横浜植物防疫所調査研究部企画調整課

はじめに

オーストラリアにとって農業は同国経済を支える重要な輸出産業である。しかし主要な農産物輸出先であるヨーロッパがEUとして統一市場を形成した1980年代後半から輸出量は頭打ち傾向にある。このため同国の農産物は、さらなる国際競争力が求められており、国家政策として農産物の品質維持向上を進めている。新たな病害虫の侵入は、同国内の農業生産に損失を与えるだけでなく、農産物輸入国の検疫制限が厳しくなり、その結果国際競争力を低下させることを意味している。このため同国の植物検疫の重要性に関する認識は高い。

同国の植物検疫は、FAOにおいて国際基準の策定が開始される以前から、病害虫危険度評価に基づいて検疫で対象とする病害虫（以下「検疫病害虫」）を特定し検疫措置を行っており、それに従い検疫体制を整備してきた

経緯がある。

本報告では「検疫病害虫」及び「病害虫危険度評価」に関して先進的に対応してきたオーストラリアの植物検疫制度について、①植物検疫組織、②病害虫危険度評価（以下「PRA」）、③PRAで決定された検疫病害虫に対する実際の輸入検疫システムについて紹介する。

I オーストラリアの植物防疫組織

1 オーストラリア検疫・検査局（AQIS）

植物検疫を担当している部門は「第一次産業エネルギー省（Department of Primary Industries and Energy : DPIE）」にある「検疫・検査局（Australian Quarantine and Inspection Service : AQIS）」である（図-1）。ただしAQISは植物検疫だけではなく、肉類・魚介類の検疫、食品の品質基準維持のための施策及び検査業務も行っている。AQIS全体では約1,600名ほどの

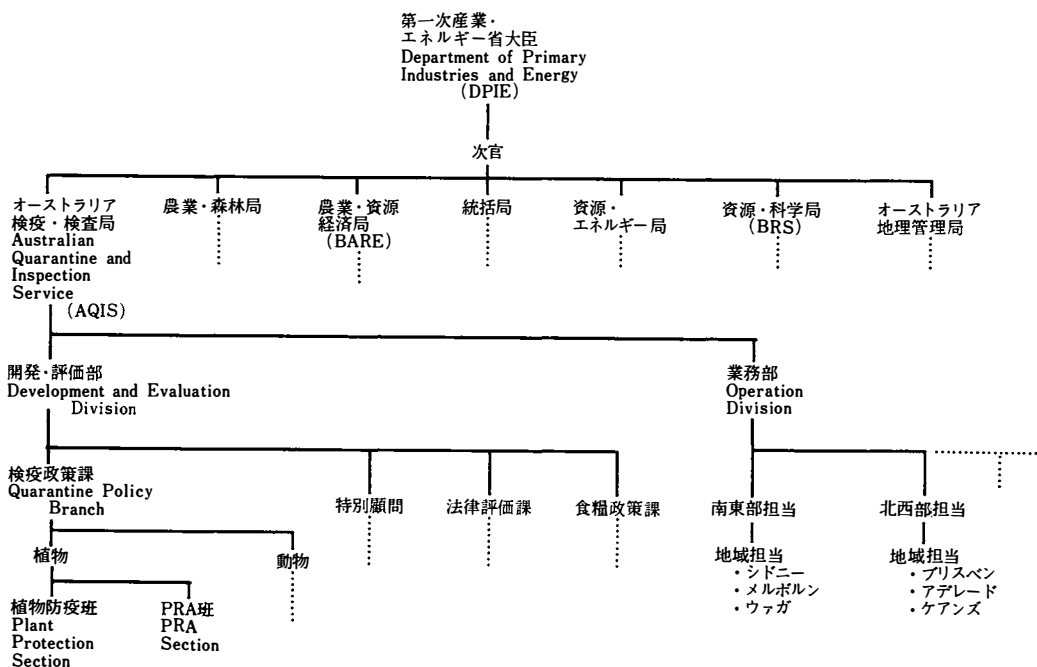


図-1 オーストラリア植物検疫関係組織図

職員がおり、輸出検疫、輸入検疫及び関係技術及びオペレーションサポートシステムの管理等に従事している。検疫検査関係ではAQISの職員とは別に州政府等の職員約560名が連邦政府の認可のもとAQISの職員として検査業務に従事しており、国際海空港、郵便局及び輸入認可業務、輸出検査等を行っている。

検疫・検査局は国際基準との適合、農産物品質基準策定と維持、政策との調整、PRA及び対外交渉等を行う「開発・評価部 (Development and Evaluation Division)」及び同国の港や圃場で行われる検査等を統括及び調整する「業務部 (Operation Division)」に分かれている。さらに開発評価部の「検疫政策課 (Quarantine Policy Branch)」は動物及び植物検疫担当に分かれており、植物検疫は「植物防疫班 (Plant Protection Section)」(6名)及び「PRA班 (PRA Section)」(5名)の2班において植物検疫に関する政策調整やPRAが実質的に行われている。

2 PRAを実施している機関

PRAの実施に関係があるのは検疫政策課の中の植物防疫班及びPRA班である(図-1)。PRAは通常、輸入者あるいは輸出国からの要求に基づきPRA班が実施するが、荷口となる植物が国内で重要な生産物であったり重要な病害虫が付着する可能性がある場合、同班から同省にある「資源科学局 (Bureau of Resource Sciences:

BRS)」あるいは各州の専門家に詳細なPRAが依頼される。さらに経済的評価については「農業資源経済局 (Bureau of Agricultural and Resource Economics: BARE)」に国内経済への波及といった観点で分析を依頼することもある。FAOのPRAガイドラインでいうステージI(病害虫の類別)、ステージII(経済的影響及び侵入の可能性)及び病害虫危険度管理の選択肢の検討(依頼)・提示までがPRA班の担当である。それらをもとに行われる対外交渉及び2国間のプロトコル作成が植物防疫班の担当となる。

II オーストラリアの病害虫危険度評価 (PRA)

1 PRAの要求から検疫措置決定に至る全体の流れ

輸入者、輸出者または輸出国の検疫当局からPRAの要求を受け入れた場合、当該項目が第一次産業エネルギー省内のコンピュータネットワークに登録される(図-2)。この後PRAの作業が開始され、最終的には当該病害虫の危険度統御のための選択肢が決定される。ここで特徴的なことはステージIII以降に公開協議 (Public Consultation) が設定されている点である。この期間中に各州及び関係業界代表者の意見を聞いて検疫病害虫に対する危険度管理の選択肢を決定できる仕組みになっている。

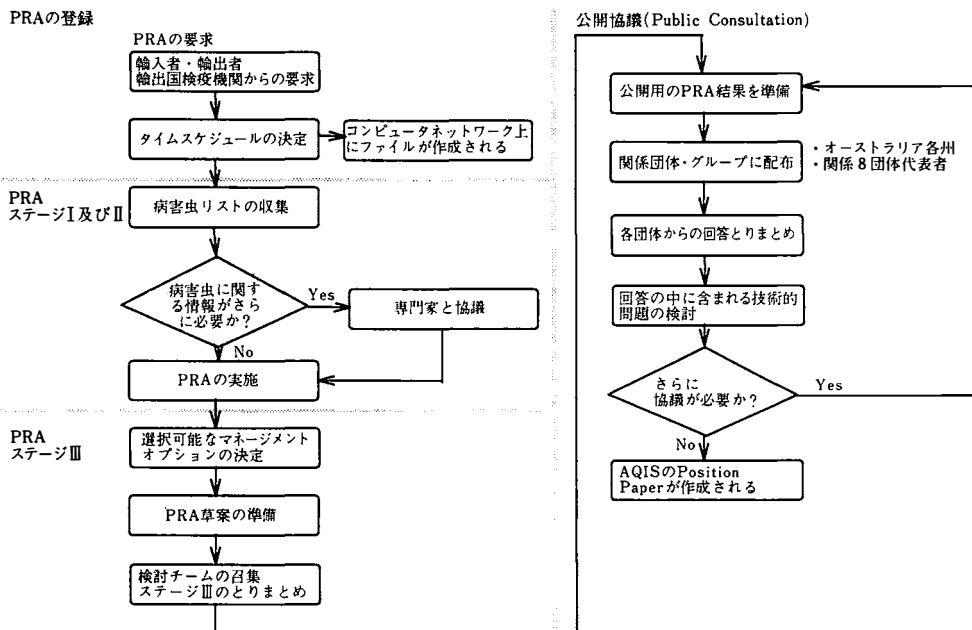


図-2 オーストラリアにおけるPRA全体の流れ

２ PRA の方法

オーストラリアの PRA の多くは荷口（註：FAO による用語定義では、「荷口」とは植物、植物生産物又は植物検疫上制限を受ける品目の集まりであり、ある国から他の国に移動させられ、かつ単一の植物検疫証明書で証明を受けるものである。）から開始される。はじめに当該植物に寄生する可能性がある病害虫リストが作成される。これには同省が管理している病害虫発生に関するデータベースを利用するが、必要に応じて当該植物に関係する病害虫リストを輸出国から提出させる。そのリストの中から過去に PRA を行っている病害虫及び同国に既発生の病害虫が除かれ（病害虫分類）、それ以外の病害虫に対してさらに PRA が進められる。

重要でないまたは特別な検疫措置（輸出国における検疫措置）が必要とされない病害虫に関しては、病害虫分類（Pest Categorization）が PRA の主な作業になる。このような PRA は AQIS の検疫政策課 PRA 班で行われる。

国内的に重要な病害虫、重要な商品作物あるいは輸出国に対して特別な検疫措置を要求しなければならない場合、病害虫分類よりもさらに詳細な PRA が実施される。ここでは、検討すべき項目（生物学的評価、繁殖能力、分布能力、経済的重要度等）について、文献・資料に基づき各項目の評価を行い、さらに各項目の評価から病害虫に対する総合的な危険性が検討・評価される。一方、この評価とは別に荷口に付着してきた病害虫が国内の好適環境に到達する危険性について、当該植物の形態、輸送方法、使用目的あるいは流通経路等から侵入危険性が評価される。当該病害虫の危険度及び侵入危険度の両評価を考慮して検疫措置をとる必要性、有効な検疫措置の種類が検討される。このような PRA は PRA 班が各病害虫の専門家あるいは BRS に依頼して行われる。

Ⅲ 検疫病害虫に対する実際の輸入検疫

１ 輸入許可制度

輸入許可制度とは、輸入者が植物を輸入する前に検疫当局から許可を得ることを義務づける制度である。この制度には以下の利点がある。

- ・輸入前に過去に同じ荷口（同一原産国同一植物）に対して PRA を行っているか否か確認をして、実施していない荷口に対しては PRA を開始する契機とすることができる。
- ・未発生国への検疫病害虫の侵入等、国外の検疫状況の変化に対して、許可証の発給を保留することで柔軟に

対応することができる。

- ・隔離栽培が必要な栽植用植物等では、施設使用状況や検査スケジュールに従い輸入量を調整することができる。
- ・輸入条件が必要とされる植物に対しては、その内容を輸入者に明示できる。

現在、オーストラリアが輸入許可の取得を要求している品目は

- ・栽植用生植物
- ・生果実及び生野菜
- ・一部のは種用の種子
- ・一部の加工用種子
- ・土
- ・生命体（遺伝資源等）

である。輸入許可証は、上記品目の種類に応じて４種類ある（図-3）。輸入許可の申請は各州の検査センターに行う。申請内容によって、過去に PRA が終わっている（輸入条件が定められている）植物または特別な検疫措置を、相手国に要求しなくともよいと評価されたものは輸入が許可される。なお、過去の PRA の結果は各州の検査センターが所有しているマニュアル（Operation Manual）に国別植物別に記載されており、提出された輸入許可申請の審査は、このマニュアルと照合することで行うことができる。

一方、輸入許可の取得が必要ない品目は

- ・切り花
- ・木材
- ・梱包資材及び容器

である。輸入許可が不必要な品目とは、個々の植物に対して PRA を行うのではなく、グループとして PRA を行い評価がなされているものである。

輸入許可の取得時期は輸入の数週間前が普通であるが、輸入後取得することも可能な品目もある。隔離検査が要求される植物は、事前に取得しておかなければいけない。有効期限は６か月～１年である。

２ 検疫の対象となる品目

通常の植物以外に、病害虫が付着する可能性のある梱包材、容器包装及び輸送機器（コンテナ等）、並びに土が付着している恐れがある品物は、それ自体が輸入検査対象になっており、消毒や輸送機器の登録等が義務づけられている。

３ 検疫証明書

検疫証明書の添付が必要な品目は、

- ・すべての花卉球根、塊茎
- ・すべての生果実、野菜

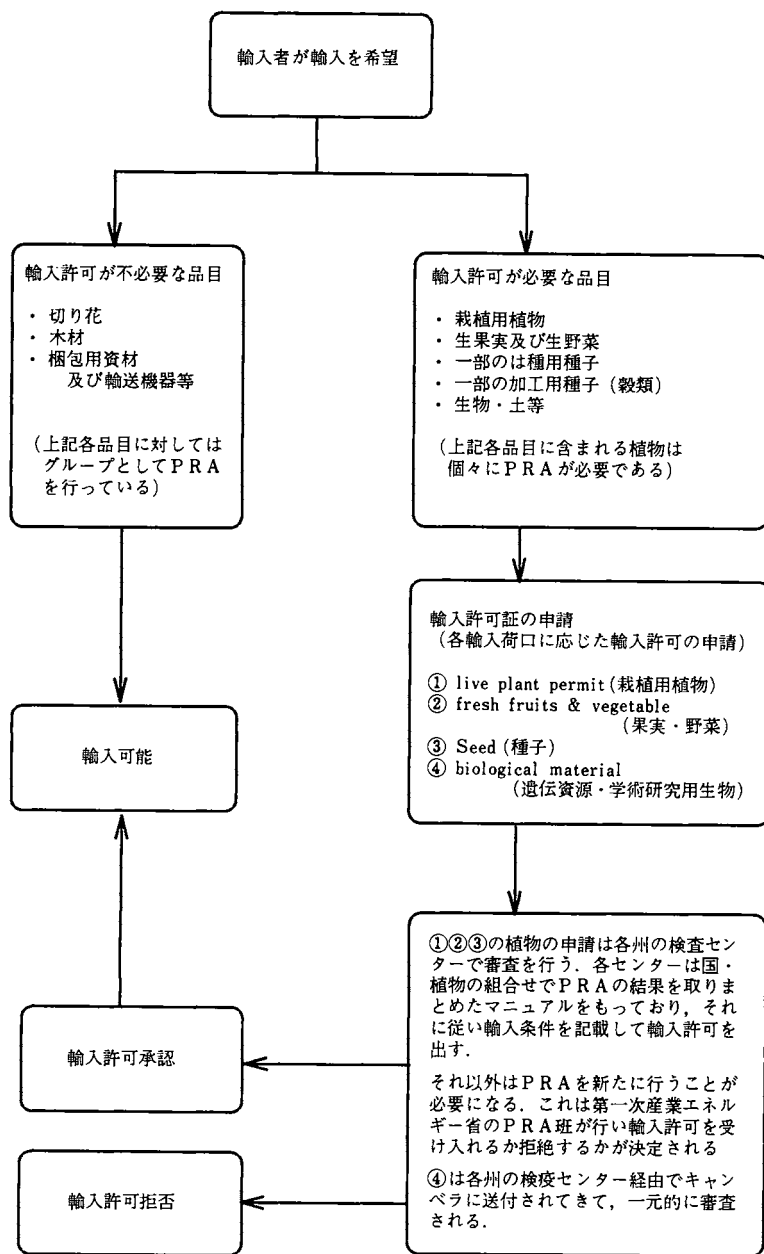


図-3 オーストラリアの輸入許可制度

- ・ すべての草本植物
- ・ すべての穀果
- ・ すべての植物培養体
- ・ 一部の種子
- ・ すべての樹皮 (Bark types)
- ・ すべての木本植物 (Woody plants)

である。原本以外の検査証明書のフォトコピー等は検査証明書として認めていない。

4 検疫措置の対象となる病害虫

「検疫病害虫」である病害虫に対してのみ検疫措置を実施する。したがって輸入検査において、植物病害虫が発見されても非検疫病害虫であれば検疫措置はとらない。検疫病害虫以外には、一部の雑草も検疫措置の対象である。

5 検査の流れ

基本的に輸入認可を得た後、荷口の輸入が行われる。

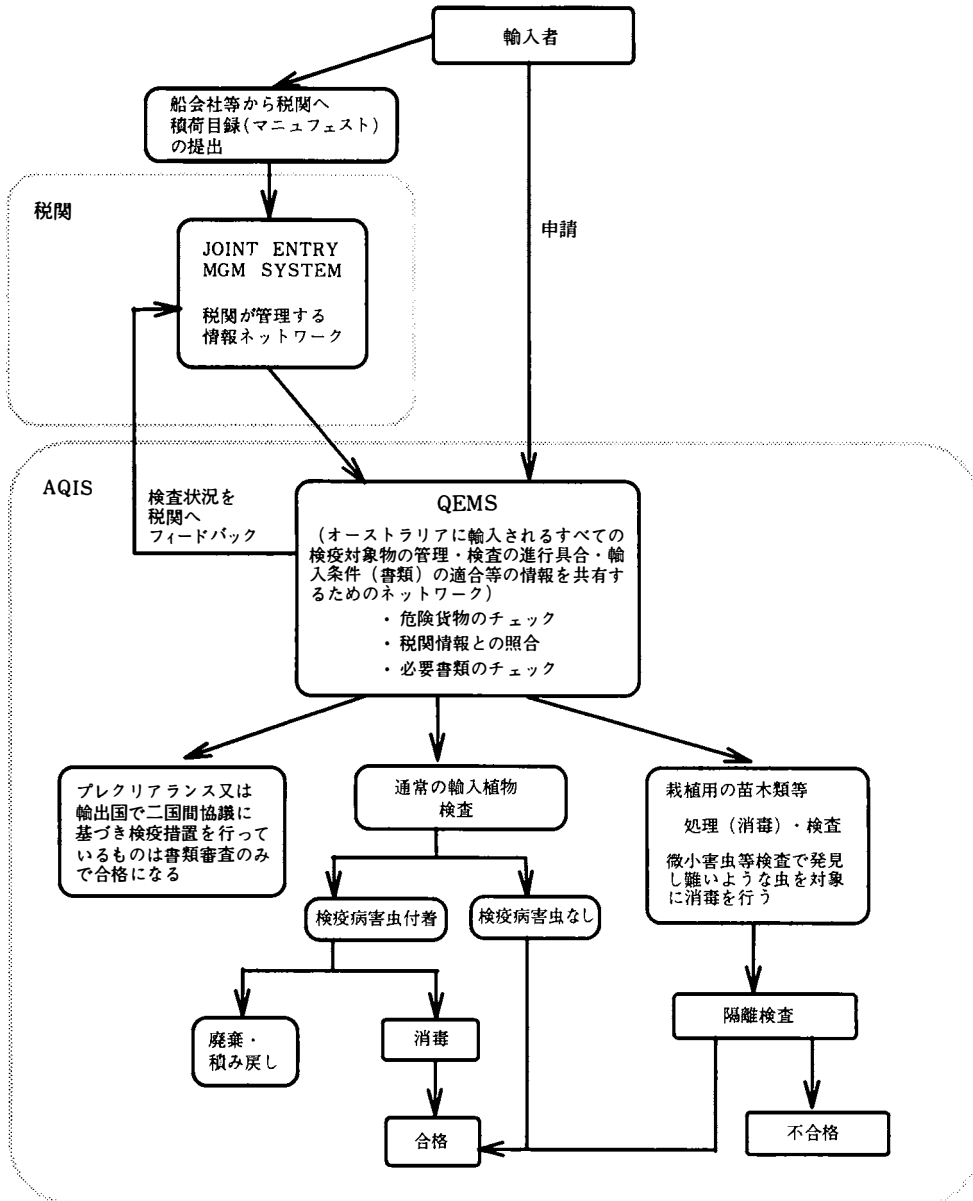


図-4 オーストラリアにおける検査の流れ

荷口に関する情報は、船会社等が提出する積荷目録を通じて豪州税関が管理する情報ネットワーク（JOINT ENTRY MANAGEMENT SYSTEM: JEMS）に蓄積される。同時にこの情報は AQIS が所有する検疫輸入管理ネットワーク（QUARANTINE ENTRY MANAGEMENT SYSTEM: QEMS）に送られてくる（図-4）。一方、輸入者は検査申請を各州の検査センターに提出するが、申請時にこの内容と税関から送られてきている当該荷口の情報が一致するかどうか確認される。

検査前に揃えておかねばいけない書類（証明書、輸入許可証）等の提出状況も同管理ネットワークの中で監視されており、これらの検査に入るための条件が全て満たされてから輸入検査を開始する。

輸入許可が必要ない植物に対しても輸入検査は必要である。一般的な植物は輸入検査を行い、検疫病害虫が発見された場合はその病害虫の種類によって、くん蒸または廃棄・返送が命じられる。なお、病害虫が検疫病害虫かどうか検査現場で直ちに同定ができないときは、専門

家に同定を依頼することになる。この際、消毒が有効な措置であると考えられる場合は、輸入者に同定結果がでる前に消毒をし荷口を合格とする選択肢が与えられる。通常は消毒を選択する輸入者が大半である。

病害虫が輸入検査による発見が困難で、二国間協議によって規定された特別な検疫措置（輸出国での栽培地検査等）に基づき輸出された植物の中には、輸入時の必要な書類審査だけで輸入が許可される場合もある。基本的に栽植用植物の輸入に際しては、肉眼検査で発見が困難な微小害虫を対象に消毒が行われる。この後、隔離施設で全量検査が行われる。

(1) 検査抽出量

二国間協議で取り決めのある場合は、そこで規定されている抽出量に基づき検査を行う。それ以外の通常の植物は生果実の場合は通常 600 果の抽出検査（信頼度 95%, 寄生率 0.5% 以下）が行われる。また栽植用苗木、球根または木材は全量検査が原則である。切り花は荷口の高さによって全量～30%の抽出検査が行われるが、荷口が輸出国において消毒が実施されていれば、抽出量が減じられる。

(2) 検査方法

輸入時の一般的な検査は、ルーベやハケ等を使っての肉眼検査である。種子に関しては篩を使って検査を行う。種子に対する室内検定及び精密検査は PRA の結果、種子伝染性の検疫病害に対する検査が必要であると評価された種子のみ行う。また PRA の結果指定された雑草種子の混入についても検査が行われる。

(3) 隔離検査

栽植用の苗木・穂木・球根等は基本的にすべて輸入許可及び隔離検査が必要である。隔離検査は登録のある検査施設、または政府の検疫施設で実施される。ただし、特に危険性の高い種類の植物は政府の検疫施設で検査を行わなければならない。一部の種子は実際に植え付け検査が行われる。検査方法は種苗の種類によって検査すべ

き検疫病害の種類が決められており、それに対する精密検定（接木、汁液接種、エライザ及び電子顕微鏡観察等）が行われる。

お わ り に

危険性がある病害虫のみを検疫対象にするオーストラリアの植物検疫体制が、その病害虫の決定手段である PRA を必要としていることは当然である。また同国のシステムでは植物が輸入される前に付着する可能性がある病害虫の評価を行い検疫病害虫を決定しておく必要があるが、輸入許可制度はその体制を支えるために重要な役割を果たしている。オーストラリアの植物検疫において「検疫病害虫」及び「PRA」という概念は「輸入許可」というシステムを用いて検疫現場に合理的に導入されている。

一方、植物輸入量が日本に比べて少ない、あるいは輸入者から検査料金を徴収できるシステムがあるという背景の違いが、同国での PRA に基づく植物検疫を可能にしている面も見逃すわけにはいかない。このような背景を無視し両国の植物検疫をその体制のみから単純に比較することは難しい。

引 用 文 献

- 1) AQIS (1994～1995) : Corporate Plan.
- 2) AQIS (1994) : Cargo Containers, Quarantine aspects and procedures.
- 3) Australian Government Publishing Service (1994) : Department of Primary Industries and Energy, Annual Report 1993～1994 : 81～86.
- 4) PHILLIPS, D. (1994) : Pest Risk Analysis of Seed-born Pests of Barley, Maize and Sorghum from the USA, and Barley from Canada.
- 5) ——— et al. (1994) : Pest Risk Analysis of Barley, Wheat, Maize and Sorghum from the USA and Canada, PART 2.
- 6) Department of Primary Industries and Energy (1990) : A Summary of the Plant Quarantine Import Requirements of the Commonwealth of the Commonwealth of Australia.

産地の研究室から/地域ブランドを育てる(2)

リレー随筆

かぶ＝飛騨紅かぶ＝

(岐阜県高冷地農業試験場専技室

たなか かず ひろ
田 中 一 弘)

はじめに

私達の祖先が今の世までに伝えている生活の知恵は数多いが、その中で、飛騨の山国の寒くて雪深い冬の暮らしを支えているものに、塩による保存食「漬物」があり、中でもふるさとの味として、他県の人にまで賞味されている「飛騨の赤かぶ漬け」がある。このカブ漬けが古い歴史の中で生まれたことは、年長の飛騨人ならば誰もが知っている漬物の代表である。

日本におけるカブの栽培歴は古く、それだけに数多くの在来品種が紹介されている。おそらくそれぞれの地域の自然条件や食文化等と相まって、品種(系統)が選抜されてきたものと思われる。

一方、岐阜県高冷地農業試験場は、高山本線の飛騨古川駅から入り、岐阜県北部の標高400～1,300 m地帯の夏季冷涼な気象特性を生かした地域農業の活性化に寄与すべく設置されている。大正12年に岐阜県立農事試験場分場として創設され、昭和11年岐阜県立農事試験場分場と改称、昭和41年に現在の岐阜県高冷地農業試験場に昇格・拡充された。平成3年野菜科を野菜花き科に改称、トルコギキョウ等高冷地特産花きの研究も行っている。

岐阜県の有色カブの概要

郡上郡高鷲村で栽培されている鷲見カブは、飛騨紅カブに似て茎葉に赤味はないが、万木カブに近いと思われる。美濃市乙狩地区には板山カブがあり、茎葉の緑色はやや薄く赤軸である。益田郡金山町の菅田カブ、下呂町の久野川カブはともに赤軸であり、福井県の大野カブの系統と推察されている。また吉城郡神岡町には古くから土着している長型の舟津カブがある。

東濃方面には、長野県の本曾紅及び信州紅カブが多いともいわれている。

最近、観光ブームの波にのり、ふるさとの味として一躍脚光を浴びている飛騨紅カブは、各地の種苗業者がそれぞれの地で採種・販売する例もあり、県内各地はもとより県外にまで栽培が及んでいる。

飛騨地方における飛騨紅カブの栽培は、約150 haを超えると見込まれている(農林水産統計年報)。生長が早く収量も多いので、近年は栽培面積が増加し、産地が形成され、中京及び京阪神市場への出荷や、地元の

加工業者に販売している。塩漬けしたナス、キュウリ、ミョウガ、キノコなどこのカブを混ぜて漬け、昆布、調味料などを加えたいわゆる品漬けは、天下一品の味と言われ、飛騨・高山の名物となっている。このほか千枚漬、糠漬、丸漬、切漬、長漬、酢漬など各種の漬物に加工される。

現在栽培されている「飛騨紅カブ」は、古くからあった「飛騨八賀カブ」から変異株として見いだされたものである。

飛騨八賀カブ

高山市の東方にある大野郡丹生川村は、古くから八賀郷と呼ばれていた。この八賀郷の日面地区を中心にして紫紅色の丸カブが古くから作られ、八賀カブと呼ばれていた。このカブは八賀郷に農牧を奨めた尾崎城主塩屋筑前守秋貞侯が伝えたものと言われている。当時は高山の役所の御用カブに指定され、江戸表にも届けられたという。

このカブは、温海カブや木曾谷のカブに類似し、偏球形で地下部まで紫紅色になり、肉質は緻密で甘味が強く貯蔵しやすい。葉はやや開き、ヘラ形の葉には毛が多く、洋種系品種とされている。葉、根ともに漬物にし、また貯蔵してナマスなどにも用いられる。

飛騨紅カブ

大正7年(1918)ころ、八賀カブの産地である丹生川村日面で、八賀カブの突然変異として発生した紅色のカブが発見された(別説によれば明治末、大正末ともいう。また場所も高山市内上野平ともいう)。これを



飛騨紅カブ

知った小阪吉造氏(現 コサカ種苗会社の先代)が年々採種と栽培を続け、その間に形が丸くやや扁平、色が鮮やかで根の内部が白く、葉は軟らかで首が細く、葉柄に紅色がささないものを選抜した結果、現在の飛騨紅カブが生まれた。

飛騨紅カブの栽培

当地方の作型は、秋まきが主で、一部春まき栽培が行われている。播種期は、春まきでは平均気温 10~11℃を適期としており、標高 500~650 m 地帯では 4 月下旬となる。また秋まきでは平均気温 20~21℃で、標高 800 m 地帯が 8 月中旬、500~650 m 地帯が 9 月上旬である。

土壌に対する適応性は広く、黒ぼく土壌や、有機質に富んだ沖積層の砂質、砂壤土などで良質なカブが生産できる。

カブは初期の生育を順調にさせることが、高い収量、品質を得るポイントといえよう(短期決戦型の作物としてとらえる)。株間を確保し、斉一な初期生育のための管理に努めれば、後半すこしぐらい天候が不順であっても、けっこう根が肥大してよい結果が得られるようである。

収穫は、春まきで播種後 60~70 日目、秋まきで 65~75 日目ころとなる。適期より早まきしたときやおそ取り、あるいは初期生育の不順な場合、カブが硬くなり、紅皮をむくとすきとおるようなアミ状態の見られることがある(当地方では木カブと呼んでいる)。

紅カブ栽培の管理で細かな技術を求められることは少ないが、近年根こぶ病の対策が課題となっている。

根こぶ病抵抗性品種の育成

1. 飛騨飛女カブ(昭和 62 年 6 月 10 日登録、第 1331 号)

高山市のコサカ種苗合資会社(前出)の堀覚太郎氏(故人)はいちはやく根こぶ病抵抗性品種の育成を手がけられた。この品種は根こぶ病抵抗性のカブ「Milan White」(母)に「飛騨紅カブ」(父)を交配して得た第二世代に「飛騨紅カブ」を戻し交配して育成された固定品種であり、根こぶ病に抵抗性の紅カブである。飛騨紅カブに比べて葉幅はやや大きく葉色はやや薄い。カブは扁平で直根は締まりがよく細い。色はやや淡い紅色である。ス入りや抽台はやや遅い。低温肥大性に



岐阜県高冷地農業試験場

は優れているほうである。

注意したいのは、根こぶ病抵抗性品種とはいえ、菌密度の高い圃場では、品種のみに頼ることなく、他の防除方法も併用することも考えておく必要がある。

2. 試験研究機関の取り組み

岐阜県高冷地農業試験場においては、大正末期~昭和初期に、飛騨地方に在来する各種カブの特性調査や、収量性向上のための試験を実施した記録がある。

その後、飛騨紅カブが一般栽培され、試験研究のテーマは少なかったが、昭和 60 年より根こぶ病抵抗性品種の育成に当たっている。

品種育成は、交配母本を「飛騨紅カブ」とし、父本に「77 b」「Gelria-R」「Siloga」「Milan White」を用いてきた。いずれも交配第一世代に「飛騨紅カブ」を 3 回戻し交配後自殖し、根こぶ病抵抗性がホモで飛騨紅カブの形質を有するものの選抜をすすめている。根こぶ病抵抗性については、交配父本 4 種とも大差ないが、形質や加工適性から「Siloga」を用いたものが有望とされる段階にある。

紅カブの選抜は、外観的な形質に加えて、加工適性(塩漬後の肉質、繊維、色彩、色むら、歯切れ等)が重要視され、他の葉菜類等に比べ、長期を要するものである。慎重な選抜が続けられており、近年中に有望品種の出ることが期待されている。

今なお「ふるさとの味」を求めて飛騨路は賑いをみせている。山の幸、川の幸をふんだんに生かした料理と、最も古くから飛騨人が作りあげた「赤かぶ漬け」は、無理に味つけされたものではなく、そのままの味わいと自負するものである。

中央だより

病/害/虫/発/生/予/察/ニ/ユ/ー/ス/

(7.9.19～10.18)

◆果樹カメムシ類、ミカンキイロアザミウマ

前回（9月18日）以降発令された注意報、特殊報は以下のとおりです。

果樹カメムシ類の発生は7月以降の高温少雨やスギ、ヒノキきゅう果等の餌が豊富である等の影響で多発傾向にあり、現在まで合計13件発表されています。

その他、ミカンキイロアザミウマの発生が引き続き各県で確認されており、発生地域が拡大しています。防除については各県の発生予察情報に留意し、適時適切な防除を行って下さい。

【注意報の一覧】計9件

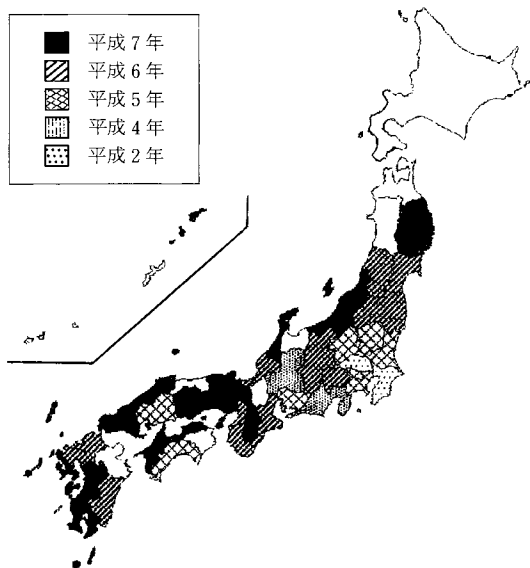
発表月日	県名	作物名	病害虫名	発生量
9/19	島根	大豆	ハスモンヨトウ	多
21	東京	野菜・花き類	マメハモグリバエ、ナモグリバエ	多
被害は施設・露地ともに11月頃まで続くと予想。苗の移動での分散防止に注意する。				
21	東京	野菜・花き類	ハスモンヨトウ	多
22	奈良	大豆・野菜類	ハスモン、シロイチモジヨトウ	やや多～多
キャベツ、ブロッコリーでは若齢幼虫食害による下葉白変に注意し防除。				
25	奈良	カキ（富有）	カメムシ類	やや多
28	高知	果樹	カメムシ類	多
29	愛媛	カキ、カンキツ等の果樹	カメムシ類	やや多～多
スギ、ヒノキのきゅう果等の餌が豊富で成、幼虫密度が高い。山林周辺、孤立した園で多い。				
10/09	静岡	カキ、ウンシュウミカン	カメムシ類	多
12	神奈川	カンキツ、カキ	カメムシ類	多
ほ場の発生状況に注意し、周辺の成虫数が多いので防除後も状況に応じ追加防除する。				

【特殊報の一覧】計5件

発表月日	県名	作物名	病害虫名	その他
9/19	石川	メロン、トマト	ミカンキイロアザミウマ	初確認
10/05	岩手	ナス、ピーマン	ミカンキイロアザミウマ	初確認
9/25	岐阜	ネギ	シロイチモジヨトウ	初確認
幼虫の齢が進むと急速に薬剤感受性が低下するので、ふ化直後の若齢幼虫を狙う。				
9/27	東京	リンゴ	リンゴ葉腐病	
病原菌は <i>Rhizoctonia solani</i> で、病勢進展すると特徴的な症状、菌体から診断は容易。				
9/28	神奈川	シキミ	クスアナアキゾウムシ	初確認
現在まで三重、高知県で確認されているが、他にクスノキ、タブへの加害が知られている。				
10/05	長崎	キク	ミカンキイロアザミウマ	初確認
平成2年以降、計38県で発生を確認。				

◆ミカンキイロアザミウマの特殊報発表状況

わが国では、平成2年6月に千葉県と埼玉県で初めて確認された。その後しばらくは分布の拡大は見られなかったが、平成5年以降発生地域が急速に拡大している。現在までの分布は下図のとおりであるが、38都府県で確認されている。

ミカンキイロアザミウマの
分布状況 (9月19日現在)

特殊報発表

平成2年 9月	千葉 埼玉	シクラメン・花卉類 ガーベラ・インパチェンス
平成4年 7月 9月	静岡 岐阜 岐阜 岐阜	キク・ハウスミカン バラ・キク
平成5年 1月 2月	愛知 群馬	バラ レタス

平成5年 4月	東京	花卉類
6月	栃木	ガーベラ・インパチェンス
8月	高知	カトレア・花卉類
9月	茨城	バラ
12月	広島	メロン・キク
12月	神奈川	シクラメン
平成6年 2月	山梨	シクラメン
4月	和歌山	バラ
5月	福岡	イチゴ
5月	長野	トルコキキョウ
6月	宮城	キュウリ・トマト
7月	宮崎	ガーベラ・カーネーション
8月	福島	キク
8月	山形	キュウリ・ナス園芸作物
10月	大阪	キク・カーネーション
12月	三重	ガーベラ・キク・バラ
12月	佐賀	イチゴ・バラ
12月	福岡	野菜・花卉類
平成7年 1月	奈良	バラ
2月	愛媛	バラ
4月	熊本	ピーマン
5月	熊本	ピーマン
5月	島根	花卉類
5月	香川	キク
5月	兵庫	バラ
5月	山口	バラ・花卉類
6月	鹿児島	キク・カーネーション
7月	京都	キク
7月	新潟	キュウリ, ナス
9月	岡山	キク
10月	石川	メロン, トマト
10月	長崎	キク
10月	岩手	ナス, ピーマン

○出版部より

☆『農薬適用一覧表 1995年版 (平成7農薬年度)』が出来上がりました。例年のように、殺菌剤・殺虫剤・除草剤・植物成長調整剤に分け、各作物 (芝は草種別) ごとに病虫害・雑草などに適用のある農薬を、その使用基準とともに一覧表にした資料。平成7年9月30日現在の最新の登録状況を収録。34ページに広告を掲載しておりますので、ご覧のうえでご注文下さい。

(A5判, 398ページ, 定価 3,500円, 送料 340円)

☆最近ミカンキイロアザミウマの発生が拡大しておりますが、出版部では、リーフレット (各B5判, カラー4P, 定価 200円, 送料 130円) として、ミカンキイロアザミウマ、マメハモグリバエ、タバココナジラミ、アルファファタコゾウムシの4種を発行しております。ご利用下さい。(50枚以上は送料サービス)

植物防疫

平成7年

11月号

(毎月1回1日発行)

= 禁転載 =

第49巻

平成7年10月25日印刷

第11号

平成7年11月1日発行

編集人 植物防疫編集委員会

発行人 岩本 毅

印刷所 三美印刷 (株)

東京都荒川区西日暮里 5-9-8

定価 800円 送料 76円
(本体 777円)平成7年分
前金購読料 9,000円
後払購読料 9,600円
(共に千サービス, 消費税込み)

—発行所—

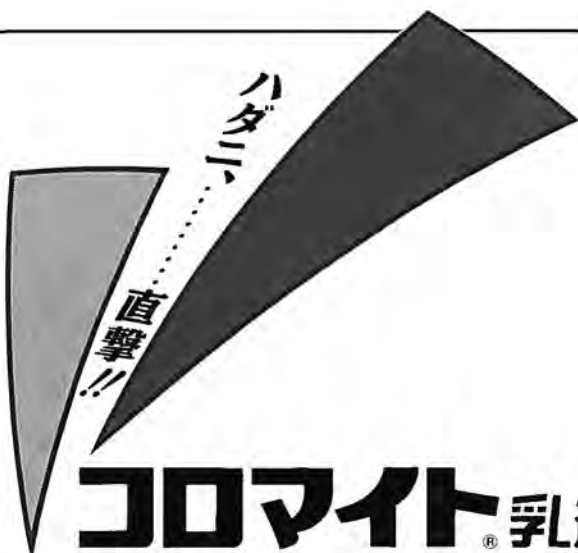
東京都豊島区駒込1丁目43番11号 郵便番号 170

社団法人 日本植物防疫協会

電話・東京 (03) 3944-1561~6番

振替 00110-7-177867番

効きめ
抜群
!



コロマイト[®]乳剤

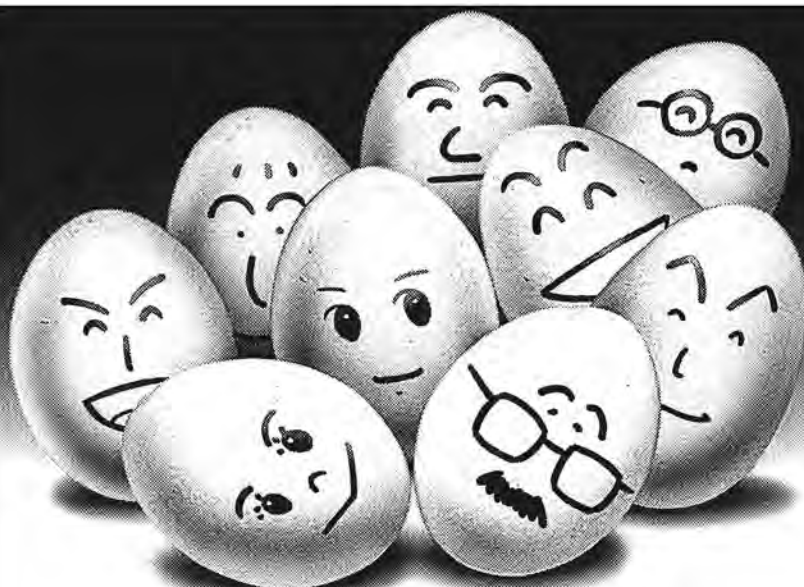
効きめ、速攻…分解が早く、環境にやさしい殺ダニ剤。

なし、もも、……………
なす、すいか、いちご(親株床)の
ハダニ退治に!



三共株式会社

農業開発普及部
東京都中央区銀座2-7-12 〒104



多様な個性。
多彩な発想。

- 殺虫剤/トレボン・オフナック・アニバース ●除草剤/シンザン ●殺菌剤/ネビジン
- 殺虫・殺菌剤/ドロクロール・クロールピクリン ●植物生長調整剤/純グリーン



三井東圧化学

TEL 03-3592-4617
FAX 03-3592-4282



三井東圧農業

TEL 03-3231-0666
FAX 03-3231-0699



苦勞話を聞かせてください。

栽培管理、病害虫・雑草対策、後継者問題……。

農業生産者の苦勞話は絶えません。

ゼネカは、限られた大地からより多くの作物を収穫する

世界中の、そして日本の農業生産者を

農業を通じてバックアップしています。

農作物の安定多収に貢献するゼネカ農薬。

除草剤

【水稲用】フジグラス粒剤
コントラクト粒剤／スパークスター粒剤
ゴーサイン粒剤／マメット SM粒剤
マメット粒剤／ベルーフ粒剤
オードラム粒剤

【果樹・野菜・非農耕地用】ブリグロックSL
マイゼット／タッチダウン／レグロックS
【芝用】クサレス水和剤
ローンベスト水和剤

殺虫剤

【果樹・野菜用】フォース粒剤
アクテリック乳剤／サイハロン水和剤
サイハロン乳剤／ビリープ水和剤
ビリマー水和剤／ビリマーナック水和剤

殺菌剤

【水稲用】ケス水和剤
【果樹・野菜用】アンビルフロアブル
アリエッティC水和剤／キャプタン水和剤
ロブキャプタン水和剤／ミルカーブ液剤

植物成長調整剤

【水稲用】
スプレクト粒剤／イネビタン粒剤
【果樹・緑花木用】
バウンティフロアブル
【非農耕地用】
トリミッドフロアブル
【花き・花木用】
ボンザイフロアブル

ZENECA

ゼネカ株式会社 農薬事業部
〒107 東京都港区赤坂8-1-22 赤坂王子ビル

■ 農薬に関する唯一の統計資料集

■ 登録のある全ての農薬名を掲載

1994 年版（平成 5 農薬年度）

農 薬 要 覧

農林水産省農蚕園芸局植物防疫課 監修

主 な 目 次

- I 農薬の生産、出荷—種類別生産出荷数量・金額／製剤形態別生産数量・金額／主要農薬原体生産数量／種類別会社別農薬生産・出荷数量／など
- II 農薬の流通、消費—果別農薬種類別出荷金額／農薬の農家購入価格の推移／など
- III 農薬の輸出、輸入—種類別輸出数量／種類別輸入数量／仕向地別輸出金額／など
- IV 登録農薬—平成 5 年 9 月末現在の登録農薬一覧／農薬登録のしくみ／など
- V 新農薬解説
- VI 関連資料—5 年度農作物作付（栽培）面積／主要病害虫の発生面積・防除面積／など
- VII 付 録—農薬の毒性及び魚毒性一覧表／関係機関等名簿／登録農薬索引／など

バックナンバー

- ◆ B 6 判・680 ページ
- ◆ 定価 5,200 円（本体 5,049 円）
- ◆ 送料サービス

- 1993 年版—5,200 円 送料サービス
- 1992 年版—5,200 円 //
- 1991 年版—5,000 円 //
- 1989 年版—4,400 円 送料 340 円
- 1983 年版—3,296 円 送料 310 円

※ 定価は税込価格です。

■ 品切絶版

1963～82, 84～88, 90 年版

■ ご注文は、個人は前金（現金・振替）で、機関は後払いも可、本会へ

しつこい害虫も即OK!

ミナキイロアザミウマ、コナガ、ネギハモグリバエ等

難防除害虫に卓効!

オンコル[®] 粒剤 5

特長

- 1 浸透移行性: 速やかに浸透移行し、植物全体を害虫から守ります。
- 2 残効性: 残効期間が長いので、薬剤散布回数を減らすことができます。
- 3 広い殺虫スペクトル: 広範囲の害虫に効果を示し、一剤で同時防除が出来ます。

※新たにキスジノミハムシ、アオムシ、アブラムシ等の害虫にも、登録が
拡大され更に使い易くなっております。



大塚化学株式会社

大阪市中央区大手通3-2-27
農薬部 / Tel.06(946)6241

頼・り・に・な・り・ま・す

ベフラン[®] 液剤25 塗布剤3

ディクタジン[®] 塗布剤

- 耐性菌に対して有効で、すぐれた予防効果・残効性があります。
- 経済的で使い易く、殺虫剤との混用が可能です。



- 大切な梨を胴枯病から守ります。
- 固着性・残効性もバツグンです。



ベフラン普及会
クミアイ化学工業株式会社・三共株式会社・八洲化学工業株式会社・サンケイ化学株式会社
事務局 **大日本インキ化学工業株式会社**
東京都中央区日本橋3-7-20 ☎03(5203)7870

天敵微生物の研究手法

岡田 斉夫 編者代表

B5判 222 ページ

定価 3000 円(本体 2,913 円)(送料 140 円)

近年、環境保全型農業の推進が謳われ、環境に対し負荷の少ない病害虫の防除技術がもてめられている。とりわけ、生態系がもつ病害虫の制御力を活用した病害虫管理技術の開発の重要性が指摘されている。このような病害虫管理技術の中で、天敵微生物を利用した防除法は、BT 剤の開発、実用化の成功以来、特に注目を浴びている。すでに農林水産省植物防疫課では、病害虫総合制御技術推進特別対策事業、ならびに防除多様化推進事業の一環として「天敵生物利用円滑化推進事業」を開始し、天敵生物の大量生産、製剤化などのための技術開発を推進しつつある。

このような情勢に鑑み、天敵生物のうち、将来とくに重要な役割を演ずると期待されている「天敵微生物」について実用化のための試験研究手法について、これまで研究に携わってきた第一線の研究者に依頼して解説していただき、雑誌「植物防疫」の特別増刊号として刊行することとした。

本書によって天敵微生物の実用化試験が推進され、環境負荷の少ないすぐれた多くの防除剤の開発に役立てば幸いである。

(本書「刊行によせて」より)

も く じ

I 基本操作

1. 天敵微生物実験上の基本的注意
2. 微生物実験室及び設備
3. 実験室内汚染の予防と対策
4. 天敵微生物実験安全対策

II 病因診断・天敵微生物の採集

1. 昆虫病の原因と分類
2. 病因診断
3. 天敵微生物の採集

III 天敵微生物の分離・培養・保存法

1. 天敵ウイルス
2. 天敵細菌
3. 天敵糸状菌
4. 天敵原生虫

IV 天敵微生物の同定法

1. 天敵ウイルス
2. 天敵細菌
3. 天敵糸状菌
4. 天敵微孢子虫

V 天敵微生物の力価検定試験法

1. 天敵微生物の濃度決定法
2. 生物検定法
3. 生物検定に影響を及ぼす要因
4. データの解析

VI 天敵微生物の安全性試験法

1. 欧米各国における安全性の評価法
2. 安全性試験の実際

VII 天敵微生物の大量増殖方法

1. 天敵ウイルス
2. 天敵糸状菌
3. 天敵微孢子虫

VIII 天敵微生物の野外試験方法

1. 試験設計
2. ポット試験方法
3. 圃場網箱及び枠試験方法
4. 圃場試験方法
5. 個別試験例

IX 共通基礎実験手法

1. 天敵細菌 *Bacillus thuringiensis*
2. 天敵ウイルス
3. 天敵糸状菌
4. *Bacillus thuringiensis* の血清学的手法によるタイピング

X 日本産昆虫の天敵微生物目録

1. 日本産昆虫のウイルス病
2. 日本産昆虫の細菌病
3. 日本産昆虫の糸状菌病
4. 日本産昆虫の原生動物病

上記図書のお申し込みは、直接本会（下記）までお申し付け下さい。

社団法人 日本植物防疫協会 出版部

〒170 東京都豊島区駒込 1-43-11

TEL (03) 3944-1561 FAX (03) 3944-2103 00110-7-177867

振替

★ 日産化学

奏でるのは、
実りの前奏曲。
プレリュード



- 優れた抗菌力で、馬鹿苗病、ごま葉枯病、いもち病を同時に防除します。
- 低温時でも安定した消毒効果を示し、他剤の耐性菌にも高い効果があります。
- 乳剤なので薬剤の均一性が高く、攪拌の必要がありません。
- 種粒への吸着(浸透)に優れているので、消毒後は風乾せずに浸種できます。

適用病害と使用方法

作物名	適用病害虫	希釈倍数	使用時期	本剤及びブクロラズを含む農薬の総使用回数	使用方法
稲	いもち病	1,000倍	浸種前	1回	24時間 種子浸漬
	ばか苗病	100倍			10分間 種子浸漬
	ごま葉枯病	40倍 乾燥種粒1kg当り希釈液30ml			吹付け処理(種子消毒機使用)又は塗抹処理

実りのプレリュード・種子消毒剤

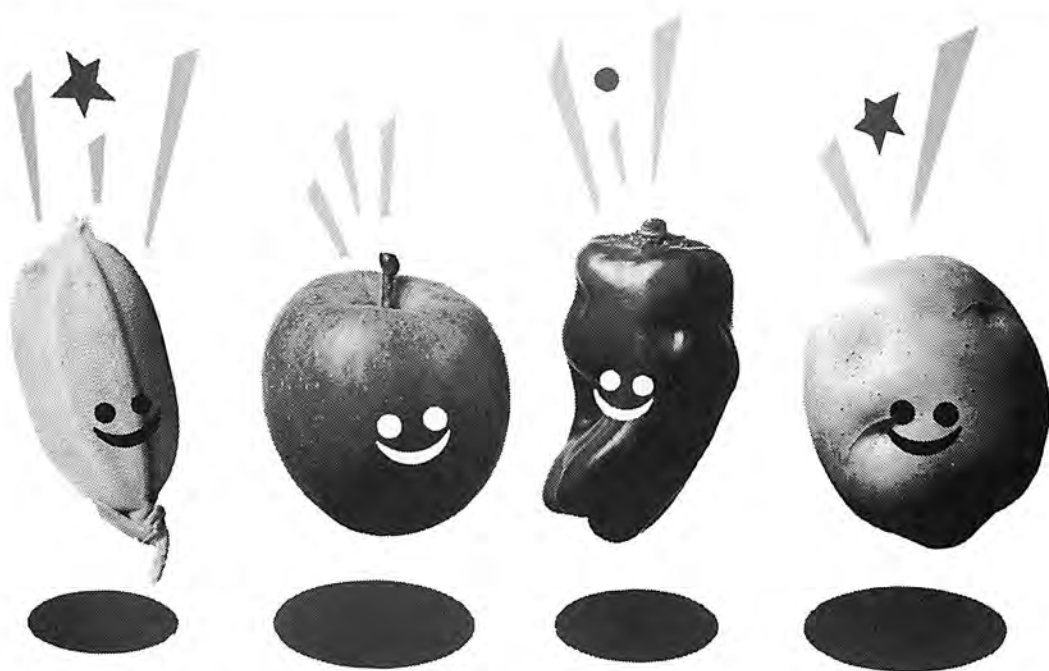


スポルタック® 乳剤

●ブクロラズ25% SPOR-TAK®

Rはシェーリングアジプロキシカルバレート(登録)の登録商標

元気な作物、おいしい作物。 私たちも推薦！



水稻から園芸までの総合防除に
当社の主力ライン・ナップ

いもち病、登熟向上に
フジワン

ウンカ・ヨコバイ類に
アプロード

もんがれ病に
モンカット

水田の一発除草に
フジクラス

ダニ防除に
ダニトロン

®は日本農薬株式会社の登録商標です。



日本農薬株式会社
東京都中央区日本橋1丁目2番5号



おいしい笑顔の応援団
アグロ・カネショウがお手伝い。



連作障害を

シャット・アウト!!

刺激臭が少なく、散布が簡単。
使いやすい土壌消毒剤



® 巴斯アミド 微粒剤

®ドイツ国BASF社の登録商標で、
本剤は同社で製造されたものです。

巴斯アミドはオゾン層にやさしい土壌消毒剤です。



アグロ・カネショウ株式会社
東京都港区赤坂4-2-19

■野菜・果樹・花の主要病害

灰色かび病、うどんこ病、つるがれ病、斑点落葉病、
黒斑病、黒星病に!!

ポリバリン® 水和剤

- 新複合殺菌剤。
- 耐性菌の灰色かび病
つる枯病、うどんこ病
に卓効。
- 安定した防除効果。
- よごれや、薬害も
ほとんどない。

①使用前にはラベルをよく読んでください。
②ラベルの記載以外には使用しないでください。
③小児の手の届く所には置かないでください。



◎資料御請求は、下記のところに御連絡ください。



JAグループ

農 協 全 農 経 済 連

※は登録商標です



自然に学び 自然を守る

クミアイ化学工業株式会社

本社：東京都台東区池之端1-4-26 専110-91 TEL 03-3822-5131



ORYZEMATE

いのちの輝きを見つめる **Meiji**

おかげさまで20年——。オリゼメート粒剤は21世紀をみつめて
新しい散布技術・製剤技術でさらにお役に立ちたいと考えています。



20TH Anniversary



明治製菓株式会社

104東京都中央区京橋2-4-16

平成二十七年十一月二十五日
昭和二十四年九月一日
第 三 行 刷
（植物防疫）
（毎月一回）
（第四十九卷）
（第十一号）
（発行）
（認可）

定価 八〇〇円（本体七七七円）（送料七六円）