

性フェロモン剤の安定利用技術

生物環境安全部 昆虫生態ユニット 杉江 元

1. はじめに一フェロモンとは

生物が体外に放出して他個体に生理的な影響を与える物質をフェロモンと呼んでいる。集合フェロモン、警報フェロモンなどいくつかの種類があるが、最も数多く研究されているのは性フェロモンである。今回はこれらのうち性フェロモンと集合フェロモンについて紹介したい。

昆虫が子孫を残すために、自然界で相手を見つけることは容易ではない。蛾の仲間では、雌蛾が性フェロモンと呼ばれる、雄蛾を誘引する物質を放出していて、未交尾の雌蛾を網かごなどにいれておくと、多数の雄蛾が集まって来る。この現象は昔から注目されていたが、その化学構造は、1959年になりカイコの性フェロモンで初めて明らかにされた。この性フェロモンは微量で非常に強い生物活性があり、生物学者や化学者に強い関心を持たれた。その後、性フェロモンに関して多くの研究が熱心に行われ、いまでは、多数の昆虫の性フェロモンの化学構造が明らかにされている。蛾の仲間についてはインターネット上でデータベースが公開されている (<http://www.nysaes.cornell.edu/pheronet/>)。日本に分布する、性フェロモンが存在すると考えられる約1100種の害虫のなかで、その構造が明らかにされているのは1割程度である。

2. 農業環境技術研究所でのフェロモンの研究

今までに農業環境技術研究所で研究されたフェロモンと利用の現状はつぎのようである。公共研究機関との共同研究で行われることが多い。

害虫名	対象作物	開発年次	発生予察	交信攪乱◎ 大量誘殺○	共同研究先
モモハモグリガ	果樹	84	◎	◎	福島県
アトボシハマキ	果樹	84			福島県
サンカメイガ	稲	85			
キンモンホソガ	果樹	86	◎	◎	福島県
ヒメコガネ	果樹	86	◎		
タバコガ	野菜	87	◎		
オキナワカンシャクシコメツキ	サトウキビ	87	◎	○	沖縄県
ミツモンキンウワバ	野菜	88			
イチジクキンウワバ	野菜	88			
サキシマカンシャクシコメツキ	サトウキビ	89	◎	○	沖縄県
タマナギンウワバ	野菜	90	◎		
ウリキンウワバ	野菜	91			
シバツトガ	シバ	93	◎	◎	千葉県
スジキリヨトウ	シバ	93	◎	◎	千葉県

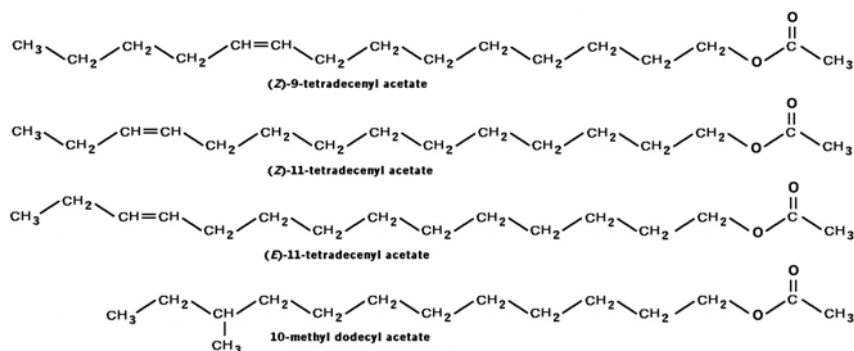
トビハマキ	果樹	94	◎	長野県
ナカジロシタバ	野菜	96		鹿児島県
チャバネアオカメムシ	果樹	97	◎	千葉県
ナガチャコガネ	茶	98		北海道

アカスジミドリカスミカメムシ	水稲	02		北海道
ハイマダラノメイガ	野菜	03		兵庫県
ツメクサガ	野菜	03		北海道
ミカンヒメコナカイガラムシ	果樹	04		果樹研
オオトゲシラホシカメムシ	水稲	05		山形県

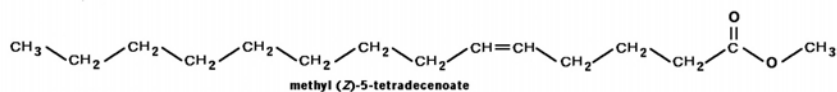
3. フェロモンの化学構造

性フェロモンは、同じ種の雌と雄とが出会うために使われているので種ごとに特異的である必要がある。万一、違う種が誘引され交尾が行われてしまうと、その種は絶滅してしまうおそれがある。このようなことを防ぐには、性フェロモンとしてそれぞれの昆虫で異なる物質を利用する必要がある。しかし、膨大な種類のいる昆虫の種ごとに対応できるだけ、性フェロモンとして使える数の化学物質はない。このため、性フェロモンは複数の成分の混合物である。例えば、チャノココクモンハマキでは(Z)-9-テトラデセニルアセタート／(Z)-11-テトラデセニルアセタート／(E)-11-テトラデセニルアセタート／10-メチルドデシルアセタートの64:32:4:2の混合物、リンゴココクモンハマキでは(Z)-9-テトラデセニルアセタート／(Z)-11-テトラデセニルアセタートの8:2の混合物が性フェロモンである。また、この成分のうち(Z)-11-テトラデセニルアセタートはハマキガに共通して含まれている成分である。性フェロモンとしての情報は成分の違いだけでなく成分の組成比も重要である。

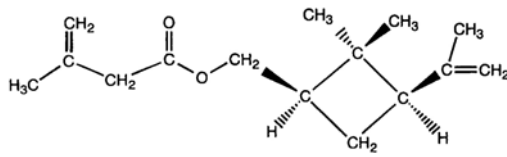
チャノココクモンハマキの性フェロモンの構造



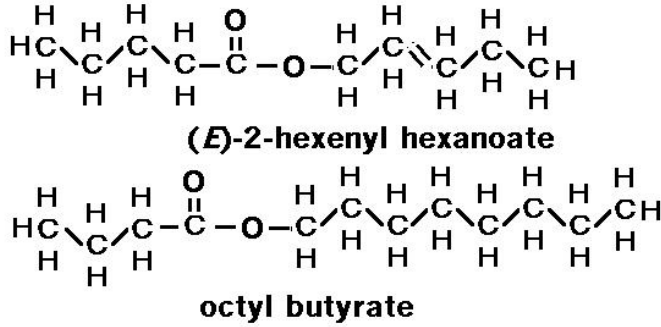
ヒメコガネの性フェロモン



ミカンヒメコナカイガラムシの性フェロモン



アカスジミドリカスミカメムシの性フェロモン



4. フェロモン分析の進め方

フェロモンの分析の例をチャバネアオカメムシの集合フェロモンの場合について紹介する。

(1) 集合現象の確認



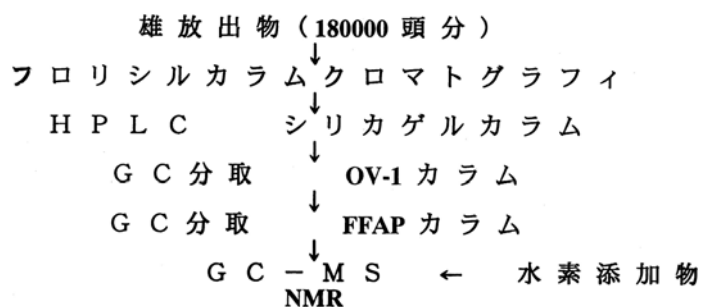
網箱の中にはえさを十分食べ成熟した雄成虫を入れてあり、雄雌成虫と幼虫が誘引されてくる。

(2) 集合フェロモンの捕集



左の容器中に十分えさを与えて飼育した雄成虫を入れてある。この容器中の空気をポンプで吸引し、雄成虫が放出する物質を流路に設置した捕集剤で連日集める。

(3) 集合フェロモンの精製



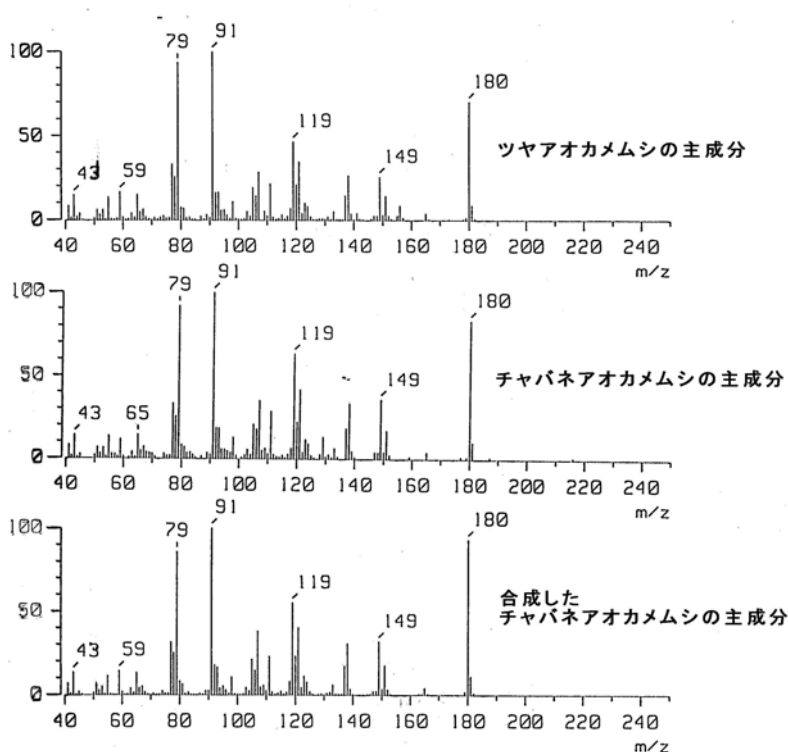
集めた放出物を2回クロマトで精製した。精製できたかどうかは野外で誘引活性があるかどうかで調べる。ガスクロマトグラフィでさらに2回精製することで、純粋なフェロモン物質が得られた。

(4) 野外での誘引試験



誘引活性を検定する試料は透明なカップの下にみえる綿ロープにつけた。誘引された虫は石けん水の入った桶で誘殺されるが、一部は、桶の周りに留まっている。

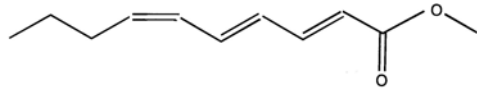
(5) MSスペクトルの測定



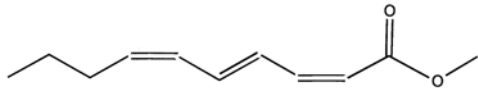
純粋な物質となった状態で機器分析を行い、化学構造を決めた。MSスペクトルから物質の分子量と化学組成などがわかる。また、NMRにより、さらに細かな構造が解明できる。

(6) チャバネアオカメムシの集合フェロモンの決定

チャバネアオカメムシの集合フェロモン



ツヤアオムシカメムシの集合フェロモン



ツヤアオカメムシに関しても同様の検討が行われ、両種の集合フェロモンの化学構造が明らかとなった。これら2種のカメムシの集合フェロモンは一部だけが違っていた。

(7) 製剤とトラップの検討



合成したチャバネアオカメムシの集合フェロモンは図に見えるように茶色のポリエチレンチューブに封入することで1月間以上誘引力を持続でき、このトラップと組み合わせることで発生消長の調査に利用できる。また、このフェロモントラップにはツヤアオカメムシとクサギカメムシも誘引される。

5. フェロモンの利用

フェロモンを使った防除法として、発生予察、交信攪乱、大量誘殺への利用が検討されている。性フェロモンは種特異的であるため、対象となる害虫だけに効果があり、天敵に対する影響が小さく、毒性がほとんどないので、環境に優しい防除法として期待されている。

(1) 発生予察：発生予察への利用に関しては、性フェロモンの誘引性を活用したフェロモントラップを、害虫の発生予察用に使うために研究が進められ、現在のところ30種以上の害虫を対象として利用可能となっている。自動的に誘殺数をカウントするフェロモントラップも市販されている。

(2) 交信攪乱：性フェロモンにより、雄と雌とは子孫を残すための重要な交信しているので、この交信を攪乱すれば子孫を残すことを妨害できる。雄蛾を高濃度の性フェロモンの中に置いておくと、雄蛾が性フェロモンによる信号に麻痺してしまう可能性がある。また、性フェロモンの成分が空気中を漂っている状態になると、雌が放出した性フェロモンの組成が変わってしまい、雄が雌を発見しにくくなる可能性も考えられる。そこで、チャノコカクモンハマキを対象にこのような交信攪乱が起きるかが検討された。誘引阻害を起こす物質を野外スクリーニングにより検討し、次に、選定された化合物により、小さな網室内で交信攪乱を行い、“つなぎ雌”を用いて、処女雌が交尾を阻害される程度を検討した。その結果、(Z)-11-テトラデセニルアセタートで交信攪乱が起こることが明らかにされた。さらに、茶園で交信攪乱の検討が行われ、合成された性フェロモン物質を徐々に蒸散させる製剤も開発され、茶の重要害虫である、チャノコカクモンハマキとチャハマキの二種を

同時に交信攪乱する製剤が利用できるようになった。このほか、りんご園でモモシンクイガを対象とした(Z)-7-イコセン-11-オンを成分とする交信攪乱製剤も市販されている。キャベツの害虫であるコナガ、ネギの害虫であるシロイチモジヨトウ、リンゴの害虫であるモモシンクイガ、キンモンホソガ、コスカシバ、モモハモグリガ、ナシヒメシンクイ、シバツトガ、スジキリヨトウでも利用が進められている。国外ではワタアカミムシに対する交信攪乱剤が広く用いられており、コドリング、ハスモンヨトウの1種に対しても使われている。

(3) 大量誘殺：性フェロモンの大量誘殺法への利用のために、ハスモンヨトウやサトウキビの害虫であるオキナワカンシャクシコメツキ用の大量誘殺用製剤が市販されている。しかし、この防除方法の成功例は少ない。

6. フェロモンの利用の問題点

(1) 複数害虫への対応

現状では、交信攪乱法を適用できる害虫の数は少ないので、たとえある種の害虫を性フェロモンによる交信攪乱により防除ができるようになっても、他の害虫の防除が問題となる状態である。例えば、茶園では交信攪乱でハマキガを防除するとチャノホソガが、キャベツ畑でのコナガに対する交信攪乱の場合にはタマナギンウワバやヨトウが問題となる。これらに対応するため、複数のフェロモンを利用した複数害虫対応のフェロモンの利用が始められている。以下の表は、複数害虫に対応したフェロモン製剤の例である。

適用害虫	作物	有効成分
コンフューザーP		
モモシンクイガ	もも	(Z)-8-ドデセニルアセタート(20.0)
ナシヒメシンクイ	なし	(Z)-11-テトラデセニルアセタート(16.0)
ハマキムシ類	ばら科果樹	(Z)-13-イコセン-10-オン(17.0)
モモハモグリガ		14-メチルー1-オクタデセン(25.0) 安定剤等(22.0)
コンフューザーA		
モモシンクイガ	りんご	(E,Z)-4,10-テトラデカジエニルアセタート(12.0)
ナシヒメシンクイ		(Z)-10-テトラデセニルアセタート(30.0)
キンモンホソガ		(Z)-8-ドデセニルアセタート(4.5)
ミダレカクモンハマキ		(Z)-11-テトラデセニルアセタート(21.0)
リンゴコカクモンハマキ		(Z)-13-イコセン-10-オン(9.5)
リンゴモンハマキ		安定剤等(23.0)
コンフューザーR		
モモシンクイガ	果樹	(Z)-8-ドデセニルアセタート(11.5)

ナシヒメシンクイ

リンゴコカクモンハマキ

ミダレカクモンハマキ

リンゴモンハマキ

(Z)-9-ドデセニルアセタート(1.5)

(Z)-11-テトラデセニルアセタート(31.0)

11-ドデセニルアセタート(0.6)

(Z)-9-テトラデセニルアセタート(5.5)

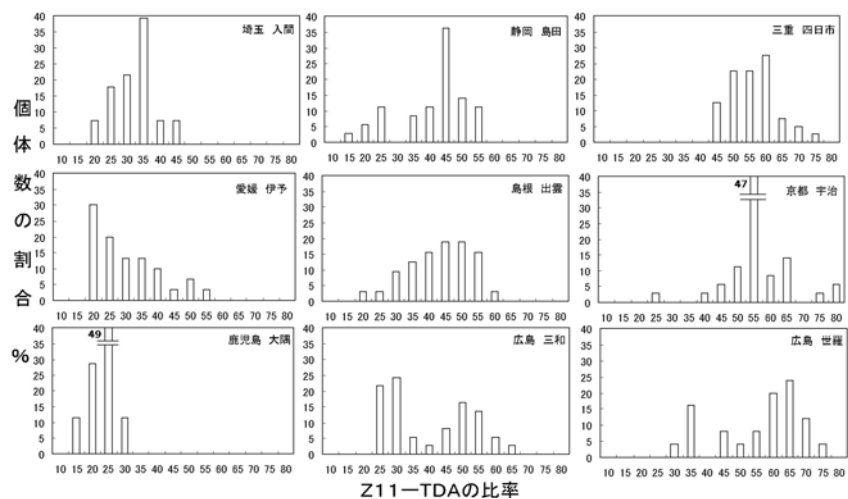
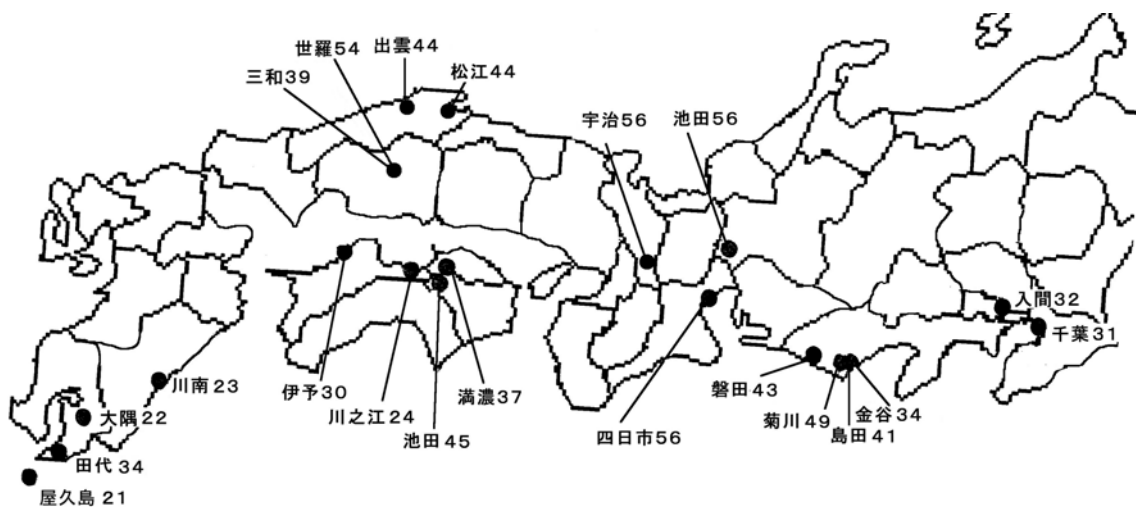
(Z)-11-テトラデセノール(0.1)

10-メチルドデシルアセタート(0.6)

(Z)-13-イコセン-10-オン(28.0)

(2) フェロモンの地理的変異

チャノコカクモンハマキ雌の放出する性フェロモンは(Z)-9-テトラデセニルアセタート(Z9-TDA): (Z)-11-テトラデセニルアセタート(Z11-TDA): E11-TDA: 10-メチルドデシルアセタートの 63:31:4:2 の混合物であり、これに雄が反応して種を維持している。本種の近縁種は数が多く、同じ物質を性フェロモン成分として使用し、共存しているため、その成分比が種の隔離に非常に重要な働きをしている。採集した同一個体群内では性フェロモン成分比は安定しており、飼育温度、世代数、日令などによる変化はなかった。しかし、各地から採集した本種の雌の Z11-TDA の比率 (Z11-TDA/Z9-TDA+Z11-TDA) は異なっていた。



性フェロモンの組成は、関東、九州地方では Z11-TDA の比率が低く、東海、近畿地方では高い傾向にあり、中国、四国地方ではばらついていて、地理的変異がある。また、それぞれの地域での性フェロモン中の個体毎の分析の結果、左の列は本種の性フェロモンとして報告されているのに近い Z11-TDA の比率の低い例、右の列は高い例、中央列は中間的な例である。近い距離にある広島県世羅町と三和町などでは 2 山の分布となり、これらの地域では、Z11-TDA の比率の違う個体群が共存している。

これらのことから、チャノコカクモンハマキの性フェロモンには地理的変異があるが、性フェロモン剤は発生予察用に使用できる。しかし、その誘引力には違いがあると考えられ、地域間での誘殺数の比較には注意が必要である。また、このような現象はアワノメイガなどでも報告されている。

(3) フェロモンの 1 成分を使った交信攪乱剤に対する抵抗性の発現

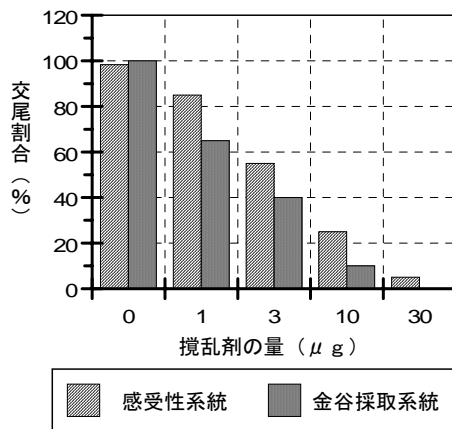
チャノコカクモンハマキの幼虫は、葉を食べたり、葉を巻いて作った住み場所に糞を残したりして茶葉の生産量や品質に悪影響を与える重要害虫である。



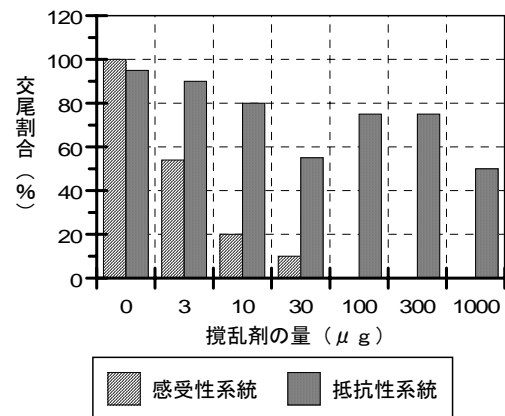
チャノコカクモンハマキ成虫 左：雄
右：雌

この害虫の性フェロモンは 4 成分からなっているが、そのうち Z11-TDA はハマキガの仲間にも共通的な性フェロモンの成分である。この成分を含む交信攪乱剤を茶園に設定すると、チャノコカクモンハマキの雄雌間の情報伝達が阻害して交尾の機会が減らすことにより幼虫の発生を少なくすることができることがわかり、当研究所の前身である農業技術研究所で、1985 年に Z11-TDA を用いた交信攪乱剤が日本ではじめて開発された。しかし、1996 年頃から一部の地域で、このフェロモン製剤の効果が低下した。フェロモン製剤に対して昆虫の抵抗性が生じたこのような例は世界的にも珍しい。静岡県金谷の茶園でチャノコカクモンハマキを採集し、これと、農業環境技術研究所で 40 年以上飼育を続けている系統を比較した。雄雌を容器に入れ、Z11-TDA が存在する条件で交尾した数を調べた結果、効果の低下した園から採集した個体と保存累代系統との違いは認められず、金谷採取系統に交信攪乱抵抗性の虫の割合が少ないと考えられた。そこで、抵抗性系統の確立を行った。抵抗性個体群発生地から 6,000 頭のチャノコカクモンハマキを採集し、Z11-TDA の存在する条件下で交尾した虫に産卵させて、Z11-TDA に対する抵抗性系統を選抜することを試みた。フェロモンの処理量を次第に増やしていき、採卵、飼育を繰り返し、約 5 年間にわたって 44 回の選抜を行った。この結果、感受性系統である保存累代系統では 1 L の容器中で 100 μ g の

Z11-TDA を処理することで完全に交尾を阻害できたが、選抜後には 1000 μg を処理しても半数が交尾する抵抗性系統が得られた。



感受性系統と金谷採取系統（初世代）における交信攪乱剤量と交尾割合の関係



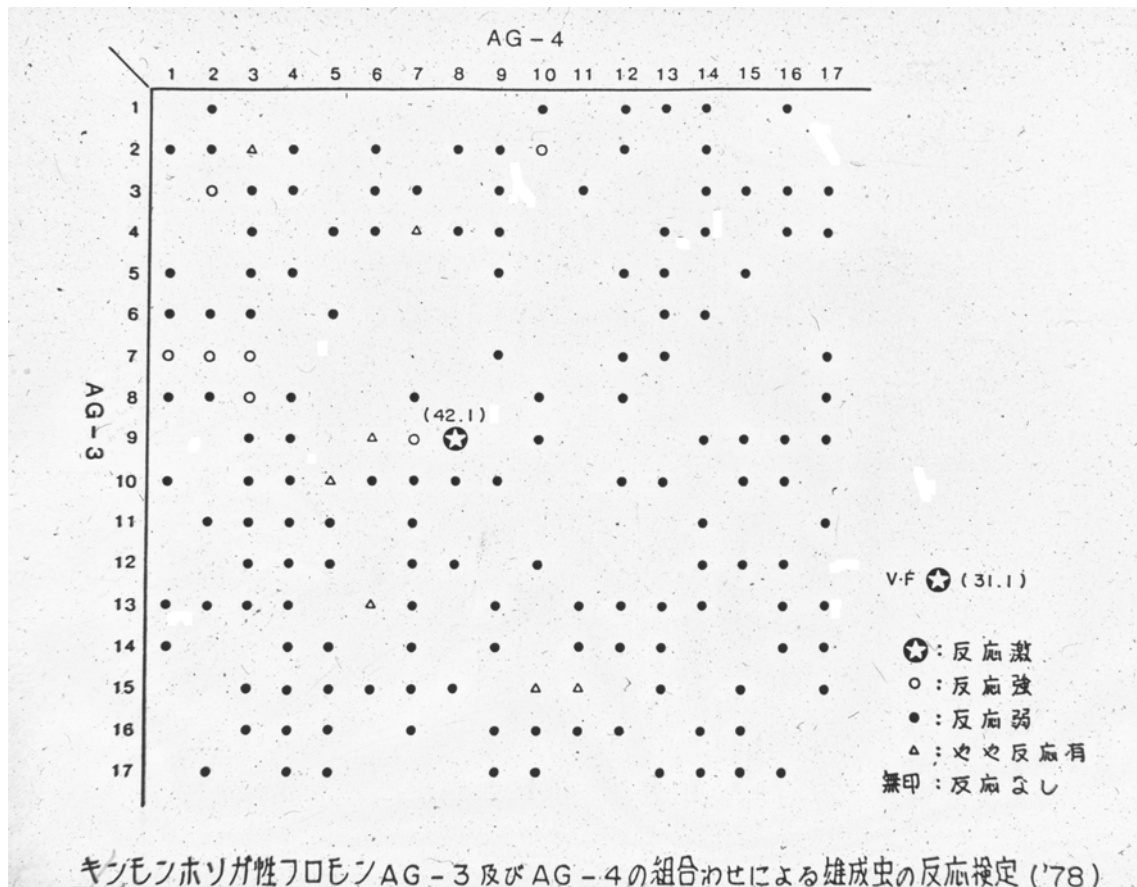
感受性系統（保存累代系統）と抵抗性系統における交信攪乱剤量と交尾割合の関係

チャノコカクモンハマキ性フェロモンの4成分のうちZ11-TDA以外に交信攪乱活性があるのは最も量の多い(Z)-9-テトラデセニルアセタート(略:Z9-TDA)だけで、E11-TDA、10-メチルドデシルアセタート(略:10Me-DDA)には活性がない。Z9-TDAは抵抗性が生じた攪乱剤に含まれていないが、抵抗性系統はこの成分に対しても抵抗性であることが明らかとなった。また、他の2成分には感受性系統と同様に交信攪乱活性がなかった。このように抵抗性系統はフェロモンの1成分では交尾を阻害されない。そこで、性フェロモン組成(Z9-TDA:Z11-TDA:E11-TDA:10Me-DDA 63:31:4:2)の混合物を用いて交尾阻害効果を検討した結果、抵抗性系統でも抵抗性を示さなかった。このことから、防除にはフェロモンの1成分でなく4成分からなる攪乱剤を使えばよいことが明らかとなった。抵抗性の原因については、雌の性フェロモンの変化、雄の感覚器官の麻痺からの回避、さらには種の変化など多くの仮説が提唱されている。環境に影響の少ない害虫防除法としてフェロモン利用の将来を考える上で、この原因の解明は重要である。

7. 今後のフェロモン研究の進め方

フェロモンの研究は、ブテナントたちが研究を始めた頃に比べると、クロマトグラフィーや分析機器の発達により、容易になったものの、構造決定までに10年以上もかかった例もいくつかあり、決して簡単ではない。生物、分析、合成に携わる研究者や、材料をひたすら集めたり、野外試験を熱心にやる人達のチームワークが研究の成功に必要な。しかし、このような研究グループを作るのは現在では非常に困難である。これまでの日本におけるフェロモンの研究は、世界に誇れるものであるが、これを支えてきたフェロモンの研究グループは縮小しつつある。これは、”化学構造の決定”は成果として分かり易いので、構造決定に携わった研究者は高い評価を受けるが、それを支えている研究者が注目されることはなく、評価にバランスがとれていないからである。以下の図はキンモンホソガの成分の決定でAG-4とAG-3にそれぞれ含まれる成分を決定するために行われた組み合わ

せ試験である。非常に強いと判定された組み合わせ以外にも強い組み合わせは他にもありフェロモンと判定するためには虫をしっかりと見つめる目がなくてはならないが、このような目の必要性はなかなか理解されない。



また、利用のための研究は構造決定以上に困難な研究であるが、あまり評価されることはないので、減りつつある。性フェロモンを利用してゆくためには、構造決定—利用法の検討—実用化試験というそれぞれの段階のバランスをとって、弱体化している部分を維持、強化するために予算と組織面での支援を始めることが必要である。

8. おわりに

害虫防除は環境との調和をはかってゆく必要がある。性フェロモンによる害虫防除は一つの方向である。しかし、利用できそうな性フェロモンのない害虫も多数いるので、万能ではない。最近、集合フェロモンや天敵昆虫、微生物などの研究も進んでいる。これらを組み込んだ、環境に優しい新たな防除体系をできるだけ早く構築する方向で研究が加速されることを期待したい。