

フェロモンの特性と利用技術

東京大学大学院農学生命科学研究科 た 田 つき 付 さだ 真 ひろ 洋

はじめに

「フェロモン」という語は、新聞・雑誌・テレビなどで馴染み深いものになった反面、本来の意味から著しく逸脱した用法も目にするようになった。生物学でいう「フェロモン」は、広汎な生物種に見いだされる同種個体間での情報伝達を担う化学物質である。中でも昆虫の性フェロモンは、超微量で劇的な効果を示し、種特異性が高く、しかも無毒という特性を持つため、1960年代には既に安全な次世代の害虫制御剤として注目された。そして現在、わが国では主要農作物害虫 20 数種を対象に発生調査用の性フェロモン剤が市販されており、さらにその半数近い種では防除用フェロモン剤に農業登録が採られている。このような事情からすると、フェロモンを新素材と呼ぶことは適当でないかもしれないが、普及の度合いを見ると、まだ一般に馴染み深い農業資材にはなっていない。

害虫の制御に利用されているフェロモンはいまのところガ類や甲虫類を主な対象とした性フェロモンと、クイムシ類などを対象とした集合フェロモンに限られている。ここでは、最も広く利用されているガ類の雌の性フェロモンを中心に特性と利用技術を述べるが、甲虫類をはじめ、その他の昆虫の性フェロモンについても基本的には同様と考えてよい。

なお、紙数の関係で具体的な資材（フェロモントラップ、誘引剤、かく乱剤、など）についての詳しい説明はできないので、これらについては、「性フェロモン剤等使用の手引き」（日本植物防疫協会, 1993）を、また、性フェロモン利用に結びつく生理生態学的原理と各論については、本誌特集号（47 巻 11 号, 1993）を参照されることをお勧めする。

I 性フェロモンの特性

1 生物学的特性

(1) 異性の誘引

害虫制御に利用されるのは、雌成虫が大気中にニオイ

として放出し風下から雄成虫を雌のもとに誘引する性誘引フェロモンである。ニオイとして作用するから効果は風下に限られるが、有効範囲は殺虫剤と比べればはるかに広い。

(2) ブレンドの重要性

大半の種が 2 成分以上を一定比率でブレンドしたものをフェロモンとして利用している。個々の成分ではフェロモン活性が示されない例も多い。通常、すべての成分を正しい割合で含む完全なブレンドが最大のフェロモン活性を示す。フェロモンを特徴づけている種特異性は、第一に成分の組成とその混合比率によって発揮される。ところが、好適なブレンドであっても他の類似成分がわずかに加わるだけで一挙に活性が抑制されてしまうこともよくある。これらの点はフェロモンを利用する際に特に重要である。

(3) 高感受性と至適濃度範囲

1 頭の雌に含まれる性フェロモン量は極めて微量で（主成分でも 1 ng 前後から数 100 ng 程度）、空中に放出される濃度も極めて低い。それにもかかわらず雄は数 10 m も風下でこれをキャッチできる極めて高感度の、フェロモンに特殊化した嗅覚感覚器をもっている。さらに雄の性フェロモンの受容には種に特異的な至適濃度範囲が存在し、濃度が低すぎればもちろん、高すぎても反応は生じない。同じ成分を性フェロモンとする 2 種の間では、性フェロモンの至適濃度範囲の違いが生殖隔離に機能している例も知られている。

以上述べた生物学的特性によって、性フェロモン利用の成否が左右されることもある。

2 化学的特性

(1) 物質の種類

すでに 300 種を超えるガ類の雌から性フェロモンが同定されているが、それらの成分の大多数は炭素数が 10 から 20 数個までの鎖状の脂肪族化合物（アルコール、エステル、アルデヒド、炭化水素、など）であり、比較的限られた範囲の物質がフェロモン成分に使われていることがわかる。なお、甲虫類では以上の化合物に加えて芳香族やテルペノイドなど、より広い範囲の物質が使われている。

(2) 毒性

一般にフェロモン物質の毒性は殺虫剤に比べれば著しく低いものである。したがって、自然界やフェロモンを利用する場合での人畜、野生動物、昆虫などに対する毒性は通常は問題にならない。逆にいうとフェロモンで害虫を直接殺すことはできない。

(3) フェロモンの物理化学的性質

ニオイとして作用することからわかるように、フェロモン成分は揮発性を有する。しかし、その程度はそれほど高くなく、拡散も激しくないで、あまり広がらずに風に乗って遠くまで流されていく。このようにしてフェロモン源から風下に形成されるフェロモンの流れを「ブルーム」とよぶ。気化したフェロモンは空気よりも重いので、風のない条件下では地上近くに溜まりやすい。

フェロモンはいずれも疎水性物質で、水には不溶だが脂質や高分子ポリマー（ゴム、プラスチック、皮）などには非常によく吸着される。また、吸着量がある程度以上になればそこから徐々に揮発する（徐放効果）。フェロモン物質には程度に差はあるが空気中の酸素や紫外線によって分解を受けるものが多い（特にアルデヒドや不飽和度の高い化合物）。

これらの特徴も、フェロモンの利用の仕方に特性とやらんで制限を与えるものである。

II 性フェロモンの利用技術

現在実施されている性フェロモンの害虫制御への利用法は、間接的利用である「発生調査」と、直接害虫の密度制御を目的とする「大量誘殺」、「交信かく乱」の3種である。これらのうち発生調査と大量誘殺は、性フェロモン本来の強力な誘引性を利用するものであり、交信かく乱はフェロモンの特性をうまく利用して、合成フェロモンなどによって雌雄間のフェロモンによる交信をかく乱するものである。

どの方法にも共通する技術的課題は、揮発性があってしかも分解されやすいフェロモン物質を長期にわたり安定して蒸発させることであるが、そのための最も普通の方法はゴムやプラスチックなどの高分子ポリマーへの含浸である。

1 発生調査

性フェロモンによる発生調査の目的は、フェロモントラップへの捕獲状況から発生や侵入の有無を知ること、捕獲数の消長から発生のピークを把握して殺虫剤の散布適期を予測すること、および、捕獲数を基に野外の害虫密度を推定して防除の必要性を決定することの三つである。したがって、発生調査では捕獲効率を一定にできる

ようにトラップの設置条件を管理することがポイントとなる。関係する事項は、誘引製剤（ルアー）およびトラップの種類、トラップの設置法（場所、密度、高さなど）である。

(1) 誘引製剤

誘引製剤は、好適な比率の性フェロモン成分のブレンダーが好適な濃度で蒸発するようにゴムセブタム（ゴムキャップ）、ポリエチレンカプセルなどにフェロモンを含浸処理したものである。市販の誘引製剤は密封してあるので、使用寸前まで開封せず冷暗所に保管しておく（ポリエチレンの製剤は低温で状態が変化して蒸発量に影響する恐れがあるのでフリーザーは不可）。製剤の取り扱いには汚染を防ぐため以下のような特別の注意が必要である；製剤は素手で触らずピンセットなどを使用する。残った分はガラス製のバイヤルに入れて密栓をするか、あるいはアルミホイルとサランラップで二重に包装して再び冷暗所に保管する。複数の種類の誘引製剤は一緒にせず別々に保管する。また、使用済みの製剤は焼却処分とする。

製剤には種類によって決められた有効期間が表示されているが、たとえ誘引活性が残っていても安定した効果を得るためにはこれを厳守することが必要である。なお、一つのトラップに2種以上の誘引製剤を入れると誘引阻害が生じることがあるので、問題ないことがわかっている場合を除いて避けるべきである。

誘引製剤は安定した誘引効力が得られるようにはなっているが、特に誘引力を高めた大量誘殺用製剤とは異なるので、防除には有効ではないだけでなく、防除に使用することは違法でもある。あくまで発生調査専用であるという認識が必要である。

(2) トラップ

トラップには粘着式、水盤式、ファネル式など様々な型式があり、それぞれ少しずつ特徴が異なるが、捕獲効率に通常は大きな差は認められないので、対象種や圃場の条件により適宜選択すればよい。ただし、種類によっては特定の型式のトラップに捕獲されにくい場合もある（指定されたトラップを使用すれば問題ない）。また、非常に発生密度が高い場合や大型種が対象の場合、粘着式ではすぐにトラップが捕獲された虫で飽和されてしまい正確な調査が不能になることがある。

トラップもフェロモンにより汚染される。トラップから製剤を取り除いた後もしばらくの間虫が捕獲されることがある。したがって、使用後のトラップを他の種類に転用することは避けるべきである。

(3) 捕獲データの取り扱い

目的が特定の害虫の検出、および発生ピークの把握である場合は安定した捕獲効率を得られるような配慮をしたうえで、捕獲の有無、あるいは捕獲数の推移をみればよい。しかし、生息密度の推定が目的の場合には、事前の十分な調査により捕獲数と実際の圃場の生息密度の間の関係を把握しておく必要がある。その場合、発生密度や季節(世代)、地形その他の環境条件によりトラップの捕獲効率が変わることがあるので、これらによる影響が認められる場合は補正の方法を確立しておく必要がある。

2 直接制御

直接制御の方法は大量誘殺法と交信かく乱法である。これらは全く異なる原理によるが、ともに雌の交尾率を低下させることを目的とする点では共通している。実際に密度制御の効果が表れるのは実施した世代の次の世代においてであり、この点が殺虫剤による制御と大きく異なっている。また、このタイムラグがあるために制御効果の判定が時として非常に難しくなる。

(1) 大量誘殺

性フェロモンの強力な誘引性を利用して雄を大量にトラップに捕獲することにより、性比を極端なアンバランス(雌大過剰)に導き、交尾率を下げて産卵数を減らし、次世代の密度を低下させようとする方法である。考え方そのものは非常にオーソドックスでわかりやすい。使用する資材も基本的には発生調査と類似した誘引製剤とトラップを使用するので一見簡単な方法に思えるのだが、実際にはこの方法の適用には以下に記すようにいくつかのかなり厳しい条件が科せられる。

第一に、用いる誘引製剤は野外の処女雌をしのぐ強い誘引性を持たねばならない。これを可能にするにはフェロモン成分の正確な同定がなされているとともに、雌の放出するフェロモン濃度より高い濃度のフェロモンにも雄が正常に反応できる(至適濃度範囲が雌の放出するフェロモンの濃度範囲を超える)かどうか一つのかぎとなる。いずれにしても、大量誘殺用の誘引製剤は発生調査用には要求されない厳しい条件をクリアしたものであり、このことから発生調査用の製剤を防除に使用できないことが理解されよう。製剤の取り扱いには発生調査用製剤と同様である。

第二に、用いるトラップは誘引効率が高いことに加えて捕獲した虫の収容能力が大きくなければならない。コンパクトで、しかも収容力の大きなトラップの開発が必要である。

第三に、一般に複数回の交尾が可能な雄の交尾能力を

考慮すると、高い割合で雄を除去する必要がある。しかも、要求される雄除去率の程度は野外密度に依存して高密度になるほど高くなり(効果の密度逆依存性)、非現実的な数のトラップを必要とする事態にもなりかねない。

(2) 交信かく乱

合成フェロモン成分や類似物質(これらは必ずしも誘引性を必要としない)などのかく乱剤を蒸発させて生息場所に漂わせ、雌雄間での微量の性フェロモンによる交信をかく乱*し、交尾を抑制する方法である。この方法も大量誘殺法と同様、雌の交尾率低下による次世代の個体数減少を目指す。さらに、交尾の抑制に付随して生じる雌の交尾遅延が産卵やふ化に悪影響を及ぼすこともある。大量誘殺法の適用が上に述べたような原因で限定されるため、性フェロモンによる害虫制御法としては交信かく乱法が主体となっており、好結果も多く報告されている。

交信かく乱法では、誘引性を利用する場合とは全く異なり、対象種の生息する圃場一面に雌の放出するよりはるかに高濃度のかく乱剤を漂わせることが必要なので、誘引製剤と比べてはるかに大きな蒸発速度が得られるかく乱製剤が必要である。市販されている製剤で最も普通に使われているのはポリエチレン製のチューブである。チューブ内に封入されたフェロモンはポリエチレン層を透過して表面に達し、徐々に蒸発する。蒸発量のコントロールはポリエチレンの重合度と厚さ、およびチューブの長さでなされる。果樹、茶樹のハマキガ類やヨトウガ類では、20 cm 程度の長さの製剤を1〜数本取り付け付けたポールを一定間隔で圃場内および周辺に設置するが、コナガではロープ状の長いチューブを圃場に張り渡す方法が採られる。もう一つのタイプはハマキガ類などで使われるテープ状の製剤で、フェロモンを含浸させた層と蒸発制御する素材をラミネートしたものである。かく乱製剤の取扱いは誘引製剤と同様だが、含有量をはるかに多いので汚染防止には一層の注意が必要である。

処理効果を左右する要因は、第一に単位面積当たりのかく乱剤の蒸発量であり、第二にいかにして処理圃場内に均一にかく乱剤を分布させるかである。これらに関連

* かく乱の機構としては、(1)フェロモンを受容する触角上の感覚器官あるいは中枢における感受性低下、すなわち「慣れ」、(2)雌が放出・形成するフェロモンブルームのかく乱剤によるカムフラージュ、(3)誘引性のあるかく乱剤では雄をめぐる製剤と雌との競合、などが挙げられる。かく乱剤の組成、処理量(蒸発量)、製剤の設置方法などにより、これらの一部あるいは全部が総合してかく乱効果をもたらすと考えられる。

するのは、製剤の数量（数あるいは長さ）、製剤の設置密度あるいは設置間隔、および処理する圃場の面積などである。均一な分布を実現するためには処理面積をできるだけ大きくすることや、圃場の内部だけでなく周辺部まで含めて処理することなどが有効である。常時強い風の吹く圃場や斜面に位置する圃場では蒸発したフェロモンが流出しやすく、十分な濃度の保持が難しいことが多い。

3 フェロモンによる制御の問題点

フェロモンの持つ特性から、フェロモンによる害虫制御には独特の問題点がいくつか存在する。十分な効果を得るためには、これらをよく理解した上での利用が望まれる。

(1) 効果の密度逆依存性

雌の交尾率を下げることで次世代密度の低下を図るという方法では、必然的に低密度になるほど効果が現れやすくなる。密度がこれ以下になれば効果が上がる、というレベルを示すことは難しいが、毎年世代を追って密度の上昇が見られるような虫では、まだ被害が目立たない初期の低密度の世代にフェロモン処理をすることが有効である。高密度条件下ではいきなりフェロモン処理を行っても効果は得にくい。他の手段、例えば殺虫剤処理により、ある程度密度を下げてからの処理が有効になる。

(2) 処理圃場外からの飛び込み

雌の交尾率を下げるのが目的であるから、たとえ処理圃場内でフェロモン処理の効果が上がっても、処理圃場の外で交尾を済ませた雌が処理圃場に侵入してくれば産卵抑制はできなくなる。フェロモンによる害虫制御で常に問題になるのがこの点である。これを防ぐには処理する圃場の面積を十分にとるほかはないが、どのくらいの面積が必要かは種によって活動範囲が異なるので一概には言えない。また、同一種であっても、そのときの生

息密度、気象条件などによっても移動距離は変化し得るものである。

(3) 効果の判定

フェロモン処理による防除効果を判定することは、既に述べたように必ずしも容易ではない。フェロモン処理中の効果（処理効果）は次に述べる各種のモニタリング法で推定が可能であるが、それが直ちに次世代の密度抑制につながるとは限らないところに難しさがある。

処理効果は、大量誘殺でも交信かく乱でも処理圃場内外の雌をサンプリングして交尾の状態を調査し、処理圃場内の未交尾雌の率が外部より明らかに高ければ効果ありと判断できる。しかし、差が認められないときには、処理効果が十分でないためなのか、外部からの飛び込みがあったためなのかの区別はつきにくい（いずれにしても密度制御効果は望めない）。つなぎ雌法（処女雌の片翅を糸でしばり、ポールなどにつないで圃場に一夜置いた後回収して野外雄との交尾の有無を調査する方法）が実施できれば一層確実に処理効果の判定ができる。交信かく乱法では上記のほかに発生調査用のトラップ（モニタートラップ）を設置して、処理区での誘引が抑制されていればかく乱効果ありと判断できる。

モニタリングでフェロモン処理の効果ありと認められたら、次世代の密度抑制効果が問題になる。処理から次世代発生までにはかなりのタイムラグがあるので、処理直後から時間を追って、産卵数、若齢、老齢幼虫の密度をそれぞれ処理圃場内外で比較調査できれば理想だが、それが困難ならば次世代による被害だけを調査して効果を判定する。なお、これらの調査時には処理圃場への既交尾雌の侵入、天敵や競争種の存在など、密度に直接影響を与える要因にも留意しなければならない。

フェロモン処理の効果は何世代かを経て徐々に現れることも考えられるので、長期にわたる密度変動の調査を要する場合もある。