

性フェロモン剤を利用したアメリカシロヒトリの防除

—シミュレーションモデルの応用昆虫学への適用—

農業環境技術研究所 ^{やま}山 ^{なか}中 ^{たけ}武 ^{ひこ}彦

はじめに

近年、めざましい計算機の発達と昆虫の生態学的知識の蓄積を受けて、害虫防除にシミュレーションモデルが応用されるようになってきた。その代表として1970年代初頭から提唱されてきた総合的害虫防除 (IPM) と、その意思決定のためのシステムズモデルがある (中筋, 1997)。日本でも、ミカンハダニ (古橋ら, 1983) やコブノメイガ (宮下, 1994) などを対象として優れた研究がなされている。しかし、このようなシステムズモデルの流れをくむ害虫発生予測モデルは、構築された野外の状況と極めて適合がよいものの、一般に膨大なデータ量を必要とし、そのようなデータ収集の努力にもかかわらず、別の場面では全く役に立たないことがある。

一方で、理論生態学から応用されたモデルというのは、簡潔な表記であることが多いが、複雑な現象をシンプルに書き下す作業で様々な仮定が置かれるため、一般性の高い論理的に表現できても、具体的な防除効果を定量的に判定するには不向きである。また、その中で使われる数式は現場で防除にあたる多くの研究者にとっては専門外であるため、どのような使い方をすれば、現実の防除戦略に応用できるかわかりづらいものが多い。

害虫防除の現場においては、いまだに試行錯誤的な防除効果の判定が中心的役割を占めており、シミュレーションモデルが効果的に使われているとは言い難い。膨大なパラメータを必要とせず、防除に直接結びつくモデルとはいかなるものなのか、「性フェロモン剤を利用したアメリカシロヒトリの防除」を例にとって考えてみたい。

I アメリカシロヒトリの大量誘殺法実地試験

筆者を含む研究グループは1994~1996年にかけて東京都江東区豊洲の街路樹 (プラタナス) で合成性フェロモンを使った大量誘殺試験を実施した。第一世代成虫期

Controlling the Fall Webworm, *Hyphantria cunea* (DRURY), with Synthetic Sex Pheromone: A Spatially Structured Model as an Implementation for Applied Entomology. By Takehiko YAMANAKA

(キーワード: シミュレーションモデル, フェロモン防除, 大量誘殺法, 格子モデル)

には、粘着版を1週間で埋め尽くすほどオス成虫が捕獲されたにもかかわらず (1994年には約一か月で59個のトラップにより4,708匹を捕獲している)、次世代の被害を軽減することはできなかった。それどころか、処理区に隣接する対照区よりも多くの被害を出してしまったこともある (山中ら, 2001)。

被害を減らすことができなかった原因として、様々な要因が考えられたが、特にフェロモントラップがオス成虫の分布に及ぼす影響について着目した。その理由は、捕獲の様子を防除試験現場で実際に観察したところ、合成フェロモンに引き寄せられるオスのうち捕獲されるのはほんの少数で、ほとんどは周囲を飛び回るばかりであり、交尾時間帯を過ぎて、多くのオスが周囲の葉裏や下生えに定着していたからである。この観察から、オスを大量におびき寄せてそのうちの少数しか捕獲せず、逆に密度を増加させているという可能性もあるのではないかと。つまり、大量誘殺法の防除効果には、単純にオスの残存数やメス数といった数の問題だけでなく、オス成虫の交尾・誘引・探索といった行動パターンが引き起こす、空間的・時間的分布の変化が大きく影響するのではないかと考えたわけである。

ところが、害虫の分布がどのように変化してゆくか、実際の防除現場で綿密に調査することは、超小型テレメトリーでも使用しない限り困難だろうし、たとえ分布を把握できたとしても、風速・温度・降水量などの条件が大きく作用して、はっきりした傾向を読み取ることができない恐れもある。そこで、コンピューターシミュレーションによって、フェロモントラップの持つ捕獲と誘引の効果の解析を試みることにした。

II 格子モデルの構築

大量誘殺法の効果を検討するためのモデルは、KNIPLING & MCGUIRE (1966) を手始めにいくつか見られるが、その多くがオスとメスの数の変化を数式で表現したものであり、オスの空間分布に与える影響を解析するには使えない。一方、NAKAMURA & KAWASAKI (1977) や BYERS (1993) などは、フェロモントラップの誘引・捕獲メカニズムを空間的に解析するため、個体ベースのランダムウォークを基本とするシミュレーションを行って

いる。こうしたランダムウォークシミュレーションを応用することも考えられたが、個体ごとに位置座標を保持する構造はモデルを極端に重くし、数多くのオス成虫の挙動を追跡するには膨大なメモリと実行時間が要求される。そこで、単純にオスを遷移確率によって振り分け交尾・捕獲を判定するセルを面的につなぎ合わせる、格子モデルを使うことにした。

1 モデルの基本構造

モデルは40 m×40 mごとに区切られたセルの格子状空間を想定し、各セル内でのオス・メスの行動を遷移確率によって決定する確率論的モデルである。縦横41セルずつ(約269 ha)の全体空間内に、11セル四方の防除対象エリア(約19.4 ha)を設定する(図-1)。境界条件は反射壁(エリアの端に行き当たるとエリア内に折り返す)で、Moore近傍(縦・横・斜の計8セルを隣接セルとし、各々のセルの状態はそれを囲む隣接セルの状態に影響される)とする。オス・メスとも全体空間からランダムに羽化し、オスはセル間を動き回るが、メスは羽化後ランダムに配分されたセル内にとどまり、交尾するまで動かない。プログラムはC++言語により、Microsoft Visual Studio 6.0 (Microsoft®) を使って構築された。

2 格子内での遷移確率

セルは、フェロモントラップを設置するかしないかの2通りがある。トラップを設置しないセルでは、オスはメスを求めて「ランダム」探索飛翔を続けるか、隣接セルに「移出」してしまうかのどちらかである。ランダム探索飛翔をしているオスは、このセル内のメスと、久野(1978)のランダム交配モデルに従って交配する。一方、トラップを設置したセルでは、「ランダム」・「移出」以外に、「捕獲」と「拘束」のケースが追加される。図-2

を参考にさせていただきたい。ここで、「拘束」とは、フェロモントラップから放出される高濃度のフェロモンに定位飛翔を続けて周りを飛び回る状況を想定している。この「拘束」の確率を組み込むことで、フェロモントラップの誘引の効果が表現されている。「拘束」という行動様式に割り振られたオスは、メスの探索を行うことができないので交尾できないし、トラップに捕獲もされない。ここまでの、図-2でグレーの矢印で表現される部分である。さらに、「拘束」されているオスは、次のタイムステップで続けて「拘束」される確率が高くなるだろうし、「ランダム」飛翔するオスより捕獲される確率が高くなってはならない。そこで、前のタイムステップで「拘束」されたオスは別確率で「ランダム」、「移出」、「拘束」、「捕獲」を再定義する必要がある。この過程を、図-2の黒の矢印で示した。

通常、こうしたシミュレーションモデルでは、各々のパラメタを連続的に変化させることで、最も結果に影響するパラメタを調べる感度分析を行うことが望ましい。しかし、今回のモデルでは、パラメタが互いに依存しあっているため、全てのパラメタについて感度分析を行うと、結果が煩雑になり焦点を絞りにくい。そこで、単独のフェロモントラップまわりの局所的な2次元平面上のランダムウォークシミュレーションを別に構築して(図-3)、これをもとに最も一般的と思われる遷移確率をDefault値として設定し、この値を基準に代表的なパラメタセットを三つ設定して(表-1)ケースシミュレーションを行った。ランダムウォークシミュレーションに関してはYAMANAKA et al. (2002)を参考にしてほしい。

3 シミュレーションの流れ

雌雄それぞれ10,000匹ずつを30日間にわたり正規分布に従って羽化させ、1日ごとにシミュレーションを実

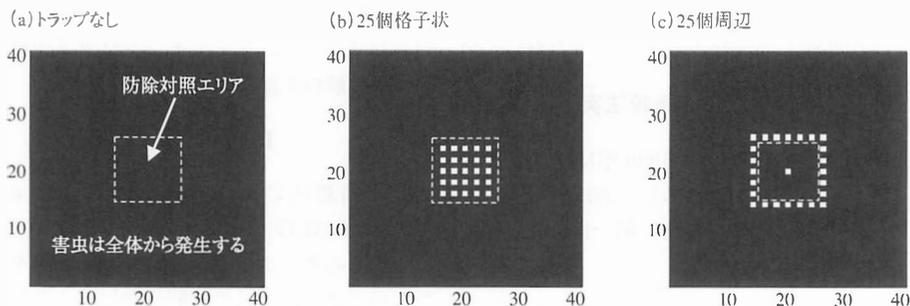


図-1 格子モデルによる仮想防除試験設定

(a) : 全体空間(41×41セル)の中に防除対象エリア(11×11セル)を設けて、(b) : 25個のフェロモントラップを規則正しく並べた場合と、(c) : 中心にただ一つだけ設置しその他24個は防除対象エリアのすぐ隣のセルに囲込むように配置する場合の二つのトラップ配置を検討する。

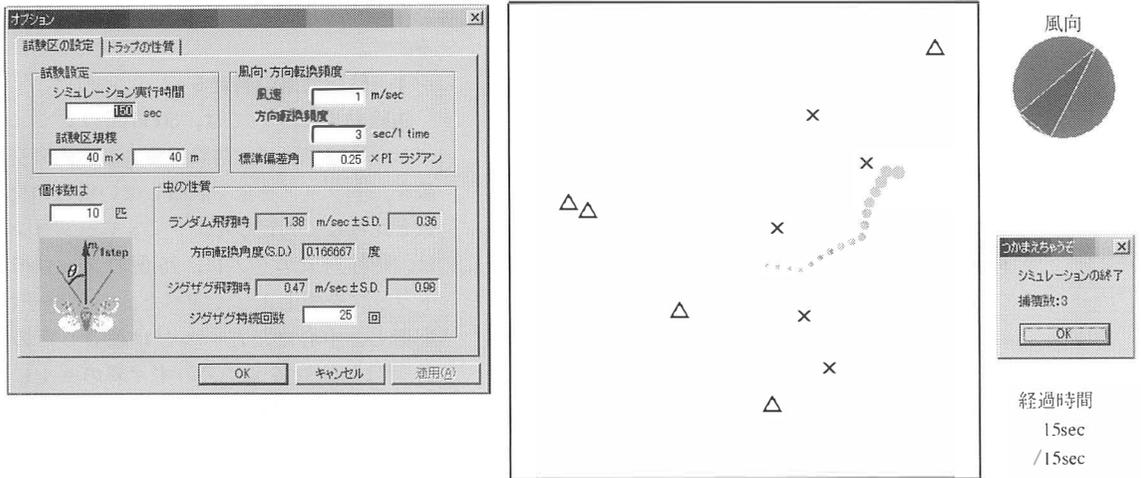


図-3 ランダムウォークシミュレーション。風が播らぎ、フェロモンルームが蛇行する状況を想定している。オス成虫のランダム飛翔・ジグザグ飛翔・風上飛翔など、細かい行動パターンを組み込んで、「捕獲」、「拘束」、「ランダム」、「移出」の遷移確率を計算する。左のプロパティシートは試験設定のためのパラメータを入力するもので、右がシミュレーションの実行画面。×は拘束されるオスを、△はランダム飛翔するオスを、●はフェロモンルームを示す(YAMANAKA et al., 2002)。

表-1 シミュレーションを行ったパラメータセット

	トラップなしのセル		トラップありのセル				トラップあり (前タイムステップ 拘束された個体)			
	移出	ランダム	移出	ランダム	拘束	捕獲	移出	ランダム	拘束	捕獲
捕獲なし	0.750	0.250	0.280	0.407	0.313	0	0.004	0.076	0.920	0
Default	0.750	0.250	0.280	0.407	0.308	0.005	0.004	0.076	0.893	0.027
捕獲率大	0.750	0.250	0.280	0.407	0.303	0.01	0.004	0.076	0.866	0.054

表中の値は、各セル内オス成虫の次タイムステップの行動遷移確率を表す。

技術を施設栽培などで使用する場合は、高濃度フェロモンを常時維持できるため、メスの放出する低濃度フェロモンに反応しなくなる馴化 (habituation) や、メスのフェロモンを覆い隠してしまう隠蔽 (camouflage) などの作用機構が主に働くと考えられるが、一方、ひらけた果樹園などでは、地域全体に高濃度のフェロモンを行き渡らせ続けることが困難となるため、オスがニセの匂いに惑わされて時間と労力をロスする現象 (false trail following), つまり、このモデルで組み込んだ拘束の効果も大きく利いてくることが想定される。

一方、捕獲率が2倍になった場合には64.4の交尾数に抑えることができ、確かにDefaultに対して防除効果はあがっているものの、これでは大幅な改善とはいえない。これまで捕獲効率を上げるため、フェロモントラップの研究・改良が様々になされてきているが、コストの問題、害虫の交尾行動様式の複雑さなどの要因が関係していて、大きな捕獲率のアップは難しいのではないかと思われる。こうした結果から、フェロモントラップの改

良にさらにエネルギーを注ぐよりは、別の方策を考えたほうがよいと考えた。

2 有効なトラップ配置の検討

そこで、「拘束」の効果を逆にうまく利用することができないか、トラップの配置を変えてシミュレーションを行ったのが「25個周辺」配置である(表-2)。このトラップ配置では、フェロモントラップの数や捕獲率を変えていないにもかかわらず(しかも試験区内にはトラップが一つしか設置されていない!), Defaultのパラメータセットで25個格子状配置に比べて3割強も交尾数を軽減できた。注意していただきたいのは、このモデルでは、一つのセル内でオスがフェロモントラップに拘束されると設定しているだけで、周囲のセルからかき集める効果は入っていないことである。つまり、フェロモントラップの有効域があまり広くない場合でも、周辺を囲い込むようにフェロモントラップを配置すると、周囲からの侵入に対してバリアーの役目と内側からの吸出しの効果を持ち得ることを示している。しかも「捕獲なし」の

表-2 防除対象エリア内の合計交尾数

パラメタ トラップ の配置	捕獲なし (捕獲分は 拘束に加算)	Default	捕獲の効果大 (Defaultの 2倍)
トラップなし	213.8(±15.0) ^a	213.8(±15.0) ^a	213.8(±15.0) ^a
25個格子状	243.0(±16.4)	88.7(±7.9)	64.4(±10.0) ^b
25個周辺	180.9(±13.9)	56.9(±8.3) ^b	39.2(±6.3)

平均捕獲数±標準偏差を示した。データは平方根をとって分散分析し、トラップ配置とパラメタセットの間に相互作用が見られたため、すべての処理に対してTukey-Kramer法により多重比較を行った。同じ添え字は1%水準で有意差なしと判定されたものを表し、その他はすべて有意差ありである。

場合にも、防除効果が得られる可能性がある。サチュレーションが大きな問題になる場合や、交信かく乱的要素を加味したい大量誘殺防除に有効だと言えるだろう。

おわりに

今回紹介した格子モデルは、野外での観察からヒントを得て、アメリカシロヒトリ個体群のダイナミクスの中から第一世代成虫期という一部分を切り出して防除効果を考えてみたものである。もちろん、別モデルでパラメタを推定する間接的な手法をとっており、今回の結果がすべての状況に当てはまる結論とは言い切れないので、今後、野外での実証試験へフィードバックされてゆくことが望ましい。しかし、オスの行動カテゴリを4種類に分類し、確率的に振り分けるといって、ごく簡単な構造のシミュレーションモデルであるにもかかわらず、応用面で非常に有益な示唆が得られた。

もちろん、害虫個体群と関連するシステム全体を記述する大掛かりなモデルも、環境問題や複合防除手段の統合などに取り組む上で、まだまだその重要性を失ってはいない。しかし、一年生の作物をオープンなフィールドで管理しなくてはならない、多くの農業従事者やその指導者にとって、こうしたアプローチは必ずしも有益であるとは言い難い。一方、今回のモデルのように、野外での防除試験からヒントを得て、個々の現象を説明するモ

デルを作ってみるアプローチがあってもよいのではない。そして、様々な角度から害虫発生と防除効果のメカニズムを解析するならば、問題となっている事象が明確になるし、解決への糸口も見つかりやすくなるだろう。例えば、アメリカシロヒトリのフェロモン防除でも、生活史と宿主植物の季節性の関係に着目すると、別のモデルが成り立つ。これについては拙文「昆虫の発生パターンのモデル：都市緑地の害虫アメリカシロヒトリを例に」(山中・嶋田, 2002)を参考にさせていただきたい。

農業環境は、人の手が入らない自然環境に比べて比較的均質であり、管理記録が詳細に入手できるので、昆虫の生態を研究する上でも格好の素材である。実際の防除試験の中でアイデアを思いつき、構築したモデルが、昆虫を含む野生動物個体群の挙動の本質を突いたものになる可能性すらあり得る。高性能のコンピュータが手ごろな値段で手に入り、優秀なソフトが数多く存在する現在、シミュレーションモデルの構築は、極めて身近なものになったと言える。モデルの専門家だけでなく、実際に防除試験に携わる現場の研究者にも、広くシミュレーションモデルが利用されていくことを願っている。

稿をとじるにあたり、東京都江東区でのアメリカシロヒトリ防除試験を指導していただいた田付貞洋教授(東京大学・応用昆虫)と、防除試験格子モデルのアイデアと解析方法について助言をいただいた嶋田正和助教授(東京大学・広域システム科学)に心から謝意を表すしだいである。

引用文献

- 1) BYERS, J. A. (1993): J. Chem. Ecol. 19: 1939~1956.
- 2) 古橋嘉一ら (1983): 静岡柑試報 19: 41~50.
- 3) KNIPLING, E. F. and J. U. McGUIRE (1966): USDA Agr. Inf. Bull. 308: 1~20.
- 4) KUNO, E. (1978): Res. Popul. Ecol. 20: 50~60.
- 5) NAKAMURA, K. and K. KAWASAKI (1977): Appl. Entomol. Zool. 12: 162~177.
- 6) 中筋房夫 (1997): 「総合的害虫管理学」, 賢養堂, 東京, 273 pp.
- 7) 宮下武則 (1994): 植物防疫 48: 366~369.
- 8) 山中武彦ら (2001): 環動昆 12: 175~183.
- 9) ———・嶋田正和 (2002): 「生態系とシミュレーション」(楠田哲也・巖佐庸編) 朝倉書店, 東京, pp. 78~90.
- 10) YAMANAKA, T. et al. (2002): Ecol. Model.: in press.