

シミュレーションモデルとハダニの生物的防除

——モデルの理解と有効利用——

北海道大学農学部応用動物学講座 齋藤^{さいとう} ゆたか 齋藤^{ゆたか} うらの 齋藤^{うらの} さとる 知^{さとる}

はじめに

本誌に「ハダニ防除のためのシミュレーションの利用」と題する小文(齋藤, 1989)が書かれて、8年が経過した。この間に、ハダニ類の防除資材として輸入天敵であるチリカブリダニの農業登録が複数の企業によって申請され、認可が下りるに至った。わが国の天敵利用による生物的防除は、ようやく軌道に乗り始めたかに見える。しかし、その天敵を生物農薬として広く普及・実用化するためには、まだいくつかの問題が残っているように見える。それらは、利用するためのノウハウが必ずしも明りょうではないこと、また利用後にどのような問題が起きるか(これは導入天敵全般における問題、広瀬, 1994)が予測できないことなどである。このような問題の一部がコンピューターシミュレーション手法の導入によって解決可能であると考えられるが、残念ながらいまだにその有効性が十分認識されているとはいえない。あるいは、認識があっても利用する上で思わぬ障害にぶつかっているように見える。そこで、本稿では、その利用方法を紹介するとともに、シミュレーションについて、そのさわりを解説した。

I シミュレーションモデルにできること

齋藤ら(1996 a, b)は、生物的防除実用化のための差分型のチリカブリダニ-ハダニの相互作用系記述モデルを報告した。このモデルは、①できるだけ現実に近い条件設定で、②できるかぎり単純で、③農業の現場で利用できるように、開発されたものである。その意味で、齋藤(1989)で分類したモデルの目的のうちで、「効果予測」と「デモンストレーション用」を目指している。まず、齋藤ら(1996 a)のシミュレーションモデルで、どのようなことが可能になるのかを見ていくことにしよう。

1 ハダニの発生と被害の予測

まず、天敵(チリカブリダニ)の初期値をゼロとおく。予想される温度変化データを入力し、現在発生して

いるハダニ雌数、および他のステージ(卵~第二若虫)を初期値として入力すれば、将来の任意の日の被害の発生状況が予測できる。また、複数回の様々な農薬の散布条件を加えることが可能なので、それを最初に設定すれば、ダニ剤の散布効果あるいは他の害虫防除のための薬剤散布の影響を予測することができる。

ただし、このような作業(以下の天敵利用の場合も同様に)のためには、予測しようとする環境の将来の温度条件のデータが必要となる。それは入手不可能だから、平年、高温年、低温年についての最高気温、最低気温、それらの発生した時間および平均気温のデータファイルをあらかじめ作成して、それらによって幅を持った予測を行うことになろう。また、農薬についても、現段階のモデルでは当該薬剤によるハダニの各ステージ別の生存率についてのデータ(今のところ、24時間以内の生存率)をあらかじめ入力する必要がある。温度条件は場所、時期によって様々なので、モデル内にあらかじめ組み込むことは困難だろうが、各種農薬の殺ダニ効果については、その種類が限られていれば、農薬名・使用濃度等を入れれば自動的にその効果をモデル内に組み込むように将来改良することは容易である。

2 カブリダニの効果予測

本モデルの主要目的は、チリカブリダニを放飼したときに、どのぐらいの期間でハダニを防除できるのか、その時期までにハダニがどのぐらいの数に達し、またどの程度の被害がでるのかを予想することにある。1で述べたデータに加えて、放飼カブリダニ雌数を最初に入力することで、これらのデータを得ることができる。結果を参照しながら、初期放飼カブリダニ数を適宜変更することで、希望する時期、希望する被害程度に防除するための適正なカブリダニ数を割り出すことも可能である。

3 適正な放飼カブリダニ数の算出

2の最後に書いた方法でも、希望する防除効果を得るための放飼カブリダニ数を計算できるが、かなりの試行錯誤が必要である。そこで、それを簡便化するために、希望する防除日を入力することで、それを達成するために必要な放飼カブリダニ雌数を自動的に算出できるようにした。ただし、被害程度については、あらかじめそれを設定して必要なカブリダニ数を算出するルーチンは組まれていない。それには、植物の生育とハダニの加害とによって決まる「被害の発生状況」をシミュレートする

Simulation and Biological Control in Spider Mites—What is the Simulation Model and How to Use It—. By Yutaka SAITO and Satoru URANO

(キーワード: ハダニ科, カブリダニ科, システムズモデル, 捕食者, 被食者)

サブモデルの精度を高める必要がある。現在この作業中なので、完成次第、本モデルに組み込む予定である。

4 作物別効果予測

齋藤ら (1996 b) は、シミュレーションモデルの適合性テストを行った結果、1種の作物における生物的防除をほぼ完全にシミュレートできるモデル (のパラメータ値) を、そのまま別の作物に適用すると適合性が悪くなることを見いだした。また、チリの捕食効率と分散率を変化させると適合度が劇的に改善されることから、作物によるモデルの適合度のふれは、チリの餌ハダニ発見効率によって決まる「捕食効率」と餌不足によって起こる「分散率」を主な原因とし、これらには作物の持つ物理的的形状が強く影響している可能性が高いことを示した。

実際に、イチゴとキュウリでの結果から、捕食率は前者が後者の1.25倍高いと推定された。このような推定は、もとより他のパラメータが確定されていることが前提となっているが、その前提が正しければ、このモデルを用いて、形状が異なる (ほふく性, つる性等) 作物ごとに上記2パラメータを実測された生物的防除の経過データから推定することができるだろう。これは、本来あらかじめとっておくべきだが、実際には採取困難なデータである。天敵にとっての環境の物理構造の効果をモデルから推定するという、モデルの別の使い方の一例として紹介しておく。

II 齋藤ら (1996 a) のシミュレーションモデル

モデルの概要を解説するのが本文の目的であるが、ここでその全体像を示すと、それがかえって煩雑さのために理解を妨げるおそれがあるので、ここではその中から具体的な例 (関係) を二つ取り出して、このモデルの作られ方について解説することにする。モデルの全体像については原論文を参照されたい。

1 温度とハダニの発育

シミュレーションしようとする系内の t 日目のハダニの幼虫数を「 $x_{2,t}$ 」と書くことにする。「 $x_{2,t}$ 」は、基本的には、1日前 ($t-1$) に卵であったハダニ「 $x_{1,t-1}$ 」の一部が発育して、新たに「幼虫」に加わったものと、1日前の幼虫数「 $x_{2,t-1}$ 」から、第一若虫に発育することで「いなくなった分」を差し引いた残りである。これを式 (差分式) で書けば、

$$x_{2,t} = d_1 \times x_{1,t-1} + x_{2,t-1} - d_2 \times x_{2,t-1} \dots \dots \dots (1)$$

なお、ここで d_1 は卵がふ化する速さ (日当たりふ化率) であり、 d_2 は幼虫が第一若虫へ発育する速さ (幼虫発育期間の逆数) である。

ところで、 d_1 と d_2 は、昆虫やダニの研究者にはおな

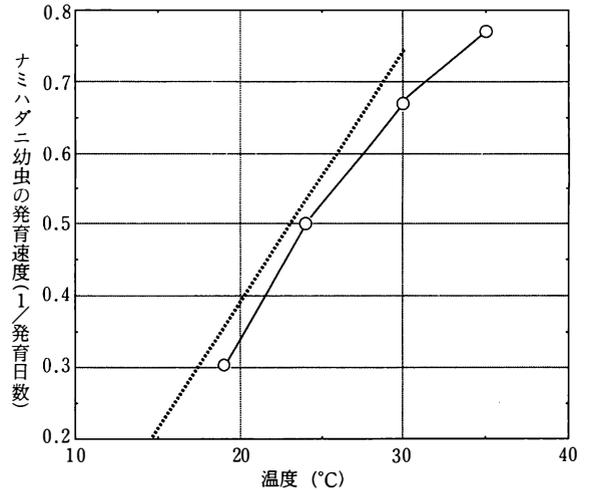


図-1 ナミハダニの発育速度と温度 (HAZAN et al., 1973 より作成)

白丸が HAZAN et al., 1973 が報告した、ナミハダニ赤色型で測ったデータ、直線はモデル内で使用した回帰直線 (本文の $d_1 = b \times T_t + c$ に相当) である。なお、回帰直線は、SAITO (1979) のナミハダニ緑色型のデータを加えて計算されているため、プロットされたデータと一致しない。

じみの、「いろいろな温度条件下」におけるふ化率や発育期間のデータに基づいて計算される率 (変化速度) 変数である。ダニのような変温動物では、 d_1 , d_2 ともに温度によって変化するから、いずれも温度 T_t (t 日の温度) の関数として書くことができる。例えば、 d_1 と温度との関係は、図-1 に示すように、基本的に温度の上昇に伴って d_1 が高くなる。それが直線で近似できるなら、回帰直線によって温度と d_1 の関係を以下のように設定できるだろう。 $d_1 = b \times T_t + c$, ただし、 b と c は回帰係数である。 d_2 についても同じような式が書ける。また、もし関係が直線的でないときは、それらを曲線回帰 (多次多項式回帰) するか、図-1 のように、各測定値間を直線で補完してそれぞれの直線式を作り (2点を通る直線を導けばよい)、温度に応じてそれらの直線式を選ばせればよい。

具体的なプログラムの流れを例示すれば、まず t 日目の温度 T_t が入力 (あらかじめ読み込んでおく) されると、次にその温度が該当する率変数を式が決定する (あるいは、2点間直線補完の場合では、温度の値によって論理式で場合分けをする)。つまり、式に T_t を代入して、 d_1 (あるいは d_2) を得る。その d_1 と d_2 を式 (1) に入れ、同時に既に数値の入っている1日前の状態変量 ($x_{1,t-1}$ と $x_{2,t-1}$) を使って、 $x_{2,t}$ が計算できるはずであ

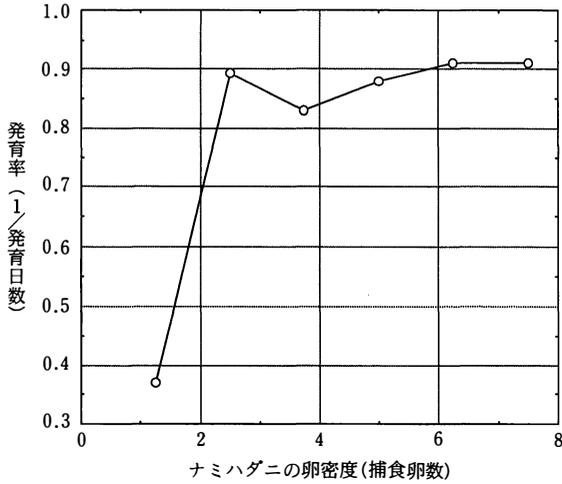


図-2 チリカブリダニ第一若虫の捕食量と発育率の関係
TAKAFUJI and CHANT (1976) のデータをもとに計算した。ただし、横軸は *Tetranychus pacificus* の第一若虫を供給したときのデータを卵に換算したものである。そのため、密度が必ずしも捕食量と一致するとは限らないが、ほぼそれを反映すると思われる。

る。要は、コンピュータプログラムにおいて、命令の実行順序の指示を間違えなければ、この部分は確実に動くはずである。

なお、式(1)では簡便化のために、 $x_{2,t}$ に関与する二つの重要な要因を除いてあるので注意されたい。それらは、「 t 日目」においてハダニ幼虫がカブリダニによって捕食されて死亡する速度(被捕食死亡率)と、植物の加害の進行による餌条件の劣化による死亡・分散率(1日間で系外に分散または死亡する速度)である。前者については次項でふれる。

例としてハダニの幼虫数の変化について述べたが、この計算はすべての発育ステージについてほぼ同様に適用できる。しかし、成虫雌については産卵と加齢という二つの要素がからむので、式が複雑になる。雌の加齢と産卵数の変化は、従来のシミュレーションモデルにおいて、それを数式化する様々な試みがなされてきた。しかし、産卵パターンによく近似する曲線式の提案は、メモリーや計算速度に制限のある場合には重要だが、昨今の発達したハード環境では、観察値をそのままプログラムに書き込むことが可能になっているので、実際の作業にはあまり問題にならない。むしろ、ハダニやカブリダニのように長命な雌の加齢をどう扱うかが問題となろう。本モデルでは、雌に仮想的な多数のステージ(25°Cで1日で経過する)を設定して、それらのステージの経過時間が温度によって変化するとし、そのステージ別に産卵

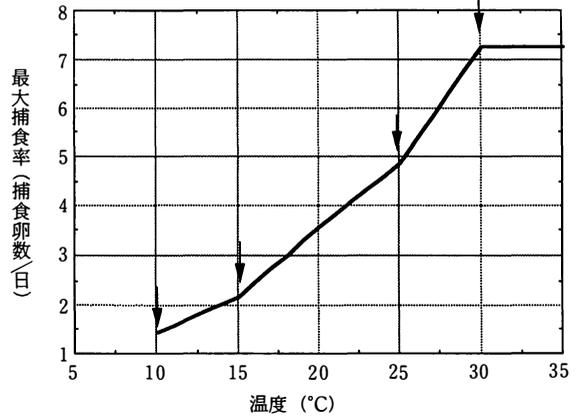


図-3 チリカブリダニ第一若虫の最大捕食率(餌が十分あるときの1頭の捕食卵数)の温度による変化(TAKAFUJI and CHANT, 1976をもとに作成)この関係は、プログラム内では、10~15°C未満、15~25°C未満、25~30°C未満および30°C以上(矢印)が4本の直線の式によって記述されている。

数(これも温度によって変わる)を割り当てるという方法をとっている。

2 チリカブリダニによるハダニの捕食

天敵であるチリカブリダニがハダニの発生している系においてどのようにそれを捕食し、また食べた量に応じて自分自身が発育・産卵するかという部分が、このシミュレーションモデルにおいて最も複雑で難しい部分である。ここでは、チリカブリダニ(以下、チリと略称する)の第一若虫(以下、単に若虫と略称、なお、幼虫は餌を食べない)について、その骨格を示してみよう。

まず、「 t 日目」におけるチリの若虫の数を $Y_{3,t}$ とする。 $Y_{3,t}$ は餌が十分食べられる条件であれば、式(1)で示したハダニと同様に、

$$Y_{3,t} = e_2 \times Y_{2,t-1} + Y_{3,t-1} - e_3 \times Y_{3,t-1} \dots \dots \dots (2)$$

となる。ただし、 e_2 は幼虫、 e_3 は若虫の日当たり発育率である。

では、式(2)において、チリ若虫がハダニを食べるといふ「効果」はどこに反映されるのだろうか。幼虫は餌を食べずに若虫になれるから、 e_2 はハダニを捕食することと無関係である。一方、若虫が次のステージである第二若虫に発育するには、一定量のハダニを食べることが不可欠だから、 e_3 が捕食に関係することになる。 e_3 は、したがって、餌が十分食べられるとき(最大捕食率実現時)を最大値として、実際に食べられた餌が減少するほど小さな値になり、餌を全く食べられないならゼロになるような、「食べることのできたハダニ数」の関数であることがわかるだろう。ただし、式(2)は単純化し

であるので、実際には餌が食べられないことで飢えて死亡することを別に考慮しなければならない(ここでは省略)。

それでは、 e_3 は具体的にどのように測られているのだろうか。図-2に25°Cの温度条件下での「食べることができた餌量」と「チリ若虫の発育率」との関係を示した。また、図-3には「最大捕食率」が温度によってどう変化するかを示した(なお、この図はTAKAFUJI and CHANT (1976)のデータをもとにしている)。餌ハダニは *Tetranychus pacificus* である)。発育速度(日当たり発育率)が、ハダニの場合と同様に温度に依存することは容易に理解できると思う。したがって、チリ若虫の発育率 e_3 は大ざっぱに言えば、「食べることのできたハダニ数」と「温度」の関数になっていることになる。コンピューター内に、これら餌量別・温度別のチリ発育率を式によって組み込んでおけば、まず第一段階の発育率と捕食量との関係が決定されることになる。

しかし、既に気づかれていると思うが、上記の「食べることのできた餌量」というものが、今現在、環境中にいるハダニの数、その存在様式、さらにチリがそれを発見できる確率、チリの個体間の競争などに関係していることは明らかである。これらの関係を逐一説明するのはここでは避けるが、その中で特に重要なのは、ハダニの分布様式(植物の形態)に関係して決まるチリの餌発見確率である点は既に述べた。

また、上記の e_3 の計算でチリがハダニを食べてしまったわけだから、その食べられた分は式(1)のハダニの数の計算に反映されなければならない。それは、式(1)に、 $t-1$ から t の間に食べられて死亡した幼虫の数を組み込めばよいので、

$$x_{2,t} = d_1 \times x_{1,t-1} + x_{2,t-1} - d_2 \times x_{2,t-1} - e_3' \times x_{2,t-1} \dots\dots\dots (1)'$$

ここで e_3' は幼虫当たり被捕食率である。

紙面の制約で、本当に基本的な関係についてだけの紹介になってしまったが、BASICによるプログラミングは、数日練習すれば誰にでも可能なことである。臆せず、自力でプログラムを試みることで、本文がなんと当たり前前のことを書いているのかが実感いただけると思う。

III どうすれば有効利用できるか

まとめに替えて、この点について少し言及してみよう。シミュレーションモデルというものができて、さてそれを第三者が有効利用しようとするとき、まず第一にぶつかるのが、コンピュータープログラムの理解という問題である。齋藤(1989)が述べたように、シミュレーシ

ョンプログラムはワープロタッチで利用できるような汎用性が高く、かつ利用が容易なものであることが望まれる。確かにそのとおりなのだが、現段階のプログラムは、残念ながらその段階には達しているとはいえない。

これは、構築者である筆者らにその責任があると考えべきだろうか? 昨今のように、研究成果の「量」によって業績が評価される時勢では、言い訳がましさを承知で言わせてもらえば、汎用性や使いやすさを追求するような「実際的な作業」は大学等の研究目的としてなじまないのである。それを実行しようとすれば、半年あるいはそれ以上をプログラム改良作業、それも入力容易さや分かりやすさを向上させるためだけに、費す覚悟が必要となろう。それをするための時間を、筆者らはとても割けそうにない。

したがって、このような作業は、それを実際に利用する現場に近い技術者や研究者が中心になって、作成者らと協力しながら進めていただくほかはないのである。しかし、現実にはこのような重要な中間段階を無視して、プログラムを手に入ればすぐに有効利用が可能だと誤解されている向きがないとは言えない。同じような傾向は、本モデルが貢献しようとしている生物的防除それ自体にも見られるように思われる。天敵資材を増殖し、販売すれば防除が成功するという安易な姿勢が散見されるのである。

生物的防除にしても、それをサポートするコンピュータシミュレーションにしても、結局はそれを理解し、うまく活用できる人間がいなければ実用化はとうていおぼつかない。そのような能力は、大学院などでその分野を十分研究した者に求めるべきだと考えるが、現場サイドでは、このような人材は、とかく敬遠されがちなのは遺憾である。とにかく、今最も必要なのは、それらの技術を深く理解し、実際に有効利用することのできるインテリジェンスなのだということを、地域の試験研究機関や企業の責任ある人たちに再認識していただきたいものである。知識と能力を兼ね備えた「生物的防除士」のような職業が社会的にも認知されて、コンピュータシミュレーションをその一つの武器として、害虫防除の現場をより安全に、確実なものにすることが望まれる。

引用文献

- 1) HAZAN, A. U. et al. (1973): *Acarologia* 15: 414~440.
- 2) 広瀬義躬 (1994): *植物防疫* 48(7): 297~300.
- 3) SAITO, Y. (1979): *Appl. Ent. Zool.* 14: 83~94.
- 4) 齋藤 裕 (1989): *植物防疫* 43(7): 380~383.
- 5) ————ら (1996 a): *応動昆* 40: 103~111.
- 6) ————ら (1996 b): 同上 40: 113~120.
- 7) TAKAFUJI, A. and D. A. CHANT (1976): *Res. Popul. Ecol.* 17: 255~310.