



# ワタリバッタ大発生シナリオと確率モデル

中央大学理工学部物理学教室

香取 眞理

中央大学大学院理工学研究科

木崎 伸也

## 1 はじめに

中国やアフリカなどでは、ときおりバッタが大発生し、付近の緑を食い尽くすという話を聞いたことがある人もいるでしょう[1]。大発生したバッタは、5000億匹もの巨大な群れとなって数100～数1000kmも飛行して、広範囲の農作物に甚大な損害を与えます。このようなバッタの群飛あるいは群飛するバッタそのものは、特に飛蝗（ひこう）と呼ばれています[2]。

例えばアフリカで猛威をふるう飛蝗は、アフリカワタリバッタという名前のバッタです。さぞかし特殊なバッタかと思いきや、文献を調べてみると、日本で見かけるトノサマバッタの亜種に過ぎないということです[3,4,5,6]。

バッタは生息密度の大小によって、群居相と孤独相、そしてこの両者の中間段階にある移行相というようにいくつかの相(状態)を持ち、全く同一种でありながら、相変異を起こすとその形態や行動パターンが大きく変化するのは、大発生する飛蝗は群居相という状態にあるバッタであり、日本でふだん見かけるトノサマバッタはおとなしい孤独相にあるバッタなのです。生息密度の変化は、雨季と乾期という季節変化に伴って、バッタが季節移動をすることによって引き起こされます。そして、群居相への変異は、バッタたちが季節移動を2～3世代繰り返すうちに累代的に行われるのです。群居相のバッタが増すと、お互いを集合させようとするフェロモン(情報伝信物質)の発散量は相乗的に増加し、さらに密生して群居相化を促進してついに大発生となるのです。

群居相のバッタは、孤独相のものに比べて後脚が短くなる代わりに羽が長くなり、長距離飛行に適した体形になっています。そればかりでなく、エネルギー代謝のメカニズムも長時間飛行を可能にするように変化させていることも明らかにされています[7]。このような相変異の末、季節風を利用して群飛するのです。

ふだんはおとなしい孤独相のバッタが、攻撃的な群居相へとその生活様式のスイッチ・オーバーを起こすというバッタの相変異はとても興味深い自然現象です。遺伝子レベルでは全く差異がないのに、環境変動や他のバッタとの相互作用によって大きくその行動を変化させるというのは、同一の $H_2O$ という分子から成るにもかかわらず、温度や圧力を変えると氷(固体)、水(液体)、水蒸気(気体)というように大きくその物性が変化する、いわゆる相転移現象を思い出させます。

そればかりか、いままではおとなしくて目立たなかった少年や少女が、おそらくは対人関係のストレスの長期の蓄積の末に、突然「きれて」攻撃的な行動に出るといって、最近頻りに報道されている一連の事件をも鬚髯させます。

最近私たちは、自分たちが得意な統計物理学の手法・考え方をを用いて、何とかこのバッタの相変異の確率モデル[8]を作れないものかと試行錯誤をしています。

群居相のバッタがどうして飲まず食わずに数1000kmも飛行することが出来るのかを、分子メカニズムのレベルで解明した茅野氏[7]の言葉として、次のようなものが文献[3]のp.273に引用されています。「自然現象は複雑なカオス(混沌)の世界であり、ひとつの事象が科学的に究明されたからといって、すべてが説明さ

れたとはいえない。」バッタの大発生のメカニズムは、いろいろなファクターが絡まりあった複雑現象です。本号特集企画に際して、著者は編集部より「複雑系と確率モデル」という課題で原稿を書くことを依頼されました。私たちのバッタの研究は、この課題(すなわち、物理現象の解明に役立ってきた確率モデルの手法が、果たして複雑系の研究にも有効なのかという問題)に対して、少なくとも一つのケース・スタディ(事例的研究法)としての意義があるものと考えて本稿を書いてみました。

## 2 孤独相から群居相への相変異

一般にバッタ類は、産卵場所としての裸地と、摂食とかくれ場としての草地の両方の生活の場を必要とします。飛蝗の代表であるアフリカワタリバッタの大発生中心地の1つは、サバンナ(南)と砂漠(北)とにはさまれた、ナイジェル河中流の洪水堆積平原です。堆積平原の低地は年中湿地平原ですが、高地は雨期には草原、乾期には裸地となるのです。

アフリカワタリバッタは、このような雨期と乾期との環境変化に応じて、平原とその周辺の半砂漠地帯との間を往復移動して、年3~4世代を繰り返します。

ワタリバッタの「相説」をはじめて提唱したUvarovは、バッタの季節移動が相変異と密接な関係にあると考えました。私たちの確率モデルは、このUvarovの説を基礎にしているので、まずはこのUvarovの大発生のシナリオを説明しましょう。図1を参照して下さい。

- (1) まず平原内の裸地と草地とが共存するバッタにとって棲みやすい地域で、増殖し個体数が増加する。
- (2) 雨期には平原内の高所も草原化するので、成虫たちは裸地を求めて周辺の半砂漠地帯へ移動する。
- (3) 広大な半砂漠地帯で繁殖を繰り返し、気候などが好適ならば個体数が増加する。
- (4) 乾期になると、今度は半砂漠地帯には草地が消失してしまうので、草地を求めて再び堆積平原に戻ってくる。
- (5) 乾期には草地は平原低地に限られているので、広大な半砂漠地帯で生息していたバッタが、いっきに狭い場所に集中することになる。このことにより個体数密度が急激に大きくなる。このときにバッタは群居相へと変異する。

ここで注意すべきことは、生息密度の急増によってただちにバッタは孤独相から群居相へと変異するのではなく、それには少なくとも2世代以上を要するということです。つまり、完全な孤独相の状態から、完全な群居相の状態に至るまでに、途中いくつかのレベルがあるのです。

個体数密度が高く混み合った状況で、他のバッタと何度も何度も接触を繰り返すうちに、段々と群居相化のレベルが上がっていきます。面白いことに、あるレベルに達した成虫が生んだ卵から孵化した幼虫は、はじめからそのレベルにあるということです。そしてその幼虫が、依然として混み合った状況下で成長していくと、さらにレベルが上昇するのです。このように、レベルアップのプロセスは親から子へと引き継がれて累进的に進行するのです。

もちろん、群居相化のレベルが高くなったバッタであっても、密度の低い状況におかれれば、逆にレベルは下がっていきます。乾期の集中化のあと雨期に入ると、バッタたちは広大な半砂漠地帯で分散しますので、そのときには群居相の割合は減少することになります。

しかし、乾期の集中化の効果が上回っていれば、群居化のプロセスが何度でも季節移動を繰り返すうちに累積的に進行し、ある段階に達すると群居相のバッタ

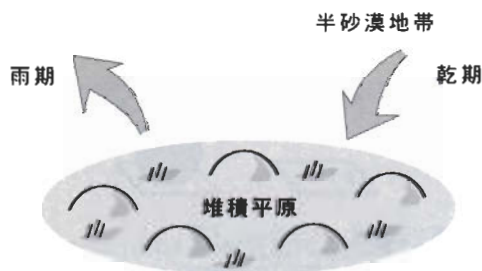


図1 バッタの季節移動の様子。



の大量発生ということになるのです。

群居相のワタリバッタが大発生する年と、そうでない年とでは何が異なるのでしょうか。ナイジェル河中流の洪水堆積平原の場合には、ナイジェル河流域各地の雨量分布の年次的な変動が重なり合って、草地と裸地との面積の割合が年ごとにかなり不規則かつ大幅に変動することが原因であると考えられています。

### 3 変動格子上的確率モデル

いよいよ私たちの数理モデルをお見せする段です。これは名づけて「変動格子上的確率モデル」というものです。どうしてこのようなモデルを考えることにしたのかを、順を追って説明しましょう。

#### 3.1 どうして格子モデルなのか

バッタが生息する堆積平原あるいは半砂漠地帯は、本当ならば高所・低所という起伏があるのですが、単純な平面としてしまいます。ここでは、1辺が $L$ の正方形とします。

さて問題のバッタですが、1匹1匹がどのように発育・増殖したり、死亡したり、移動したりするのか詳しくは考えないことにします。もっと大雑把(おおざっぱ)に考えることにして、バッタの集団を1つのかたまりとしてまとめて、それを1つの「粒子」として表現することにします。

バッタの集団は、空間的に広がりをもっているのですが、それが平面のどの位置座標にあるのかを正確に指定することは出来ません。そこで、 $L \times L$ の正方形を $L^2$ 等分して正方格子にします。そして、その各々の単位小正方形(これをサイトと呼ぶことにします)ごとに、その中のバッタ集団の数と状態を集約して表すことにします。このようなモデルを、格子モデルといいます[8]。

1つのサイトの中には、1つのバッタ集団しか存在できないものとします。それ以上のバッタ集団が発生したとしても、餌となる植物が限られているので生存出来な

いのです。1つの集団を1つの粒子で表すことにします(図2)。

前節で説明したように、バッタは孤独相から群居相へと生息密度が上昇するにつれて、レベルアップしていきます。私たちのモデルでは、16レベルあるものとなりました。すなわち、完全な孤独相をレベル1とし完全な群居相をレベル16とします。

$L \times L$ の正方格子の横 $i$ 列縦 $j$ 段目のサイトを、サイト $(i, j)$ と呼ぶことにします。サイト $(i, j)$ の上に1つの変数 $S(i, j)$ を割り当てることにします。1つのバッタ集団は、いろいろなレベルのバッタの集まりです。しかし、あるレベルのバッタの子はまたそのレベルにあるので、1つのバッタ集団のバッタのレベルは大体一致してくるはずですが、いま、このバッタ集団の中でもっともポピュラーなレベルが、 $l$ であったとしましょう( $1 \leq l \leq 16$ )。このとき、変数 $S(i, j)=l$ とすることにします。

バッタは増殖しますし死亡します。その兼ね合いで、あるときにはバッタの集団は空間的に拡大し隣りのサイトの領域にも侵入していきます。また、あるときにはバッタ集団は解体され消滅することでしょう。格子モデルでは、このような時間発展を次のように表現します。まず増殖ですが、サイト $(i, j)$ にいた粒子は、ある場合には2つに分裂し、そのうちの1つは前後左右の四方の隣接サイトのうちのいずれかに移るものとします。四方のうちどこを選ぶのかは、まったくランダムとします(図3(a))。他方、ある場合には粒子は消滅します(図3(b))。

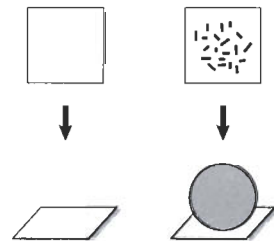


図2 バッタ集団を1つの粒子で表す。ただし、1つのサイト内には2つ以上の粒子(バッタ集団)が共存することは出来ない。

粒子増殖の際は、新たに生まれた粒子は親粒子と同じレベルにあるとします。ただし、1つのサイトには1つの粒子しか置けないという制限がありましたから、四方のサイトのうちから選んだサイトの上に、すでに粒子があるときには、その分裂(増殖)はキャンセルされます。

### 3.2 どうして確率モデルなのか

さて、それでは具体的にはどのような場合に粒子(バッタ集団)は増殖し、またどのようなときに消滅するのでしょうか。それは、そのバッタ集団をつくっている個々のバッタの発育の仕方、生殖行動や産卵・孵化の状況また成虫の寿命によって決まるはずですが。しかし、個々のバッタの振る舞いを詳しく調べて、そのデータから集団の時間発展の仕方を導くということ自体、とても難しい問題です。また私たちは、個々のバッタ集団の時間発展の仕方を正確に知りたいというよりは、もっと大きなスケールでバッタの集団が増殖して大発生するからくりに興味があるのでした。このような状況でモデルを作るのはどうしたら良いのでしょうか。ここで確率というものを利用するのです。

バッタ1匹1匹を見るのではなく、その集団を最小単位としてモデルを作る私たちの方法を、粗視化の方法といいます。要するに大雑把に見るといえることです。大雑

把にしか見ていないので、ある特定のバッタ集団がその後増殖するのか消滅するのかを、確定的に言うことは不可能です。しかし、ある確率でこうなるはずであると言うことは出来ます。

ニュートン方程式で記述される力学系のように、次に起こる変化が確定しているのではなく、次に起こりうる変化の実現確率(これを遷移率といいます)のみが確定しているのです。しかし、起こりうるケースのうちのどれが実際に実現するのかがランダムです。このようなプロセスを確率過程といいます。また、確率過程で記述される数理モデルを特に確率モデルと呼ぶのです。

こういふと、確率モデルはなんだかいい加減なモデルであるという印象を受ける人もいるかもしれません。しかし詳細を気にしないので、容易にコンピュータ・プログラムが作れて、かなりの数の粒子から成る系に対しても計算を実行することが出来るのです。そして集団全体としての振る舞いを調べることが可能になるのです。1匹1匹のバッタは本質的には日本で見かけるものと同じなのに、それがあるときには大発生して群飛するというワタリバッタの生態系の研究には、まさにぴったりの手法なのです。膨大な数の粒子が、その影響をお互いに及ぼしあいながら形成する複雑系の記述には、確率モデルが有効なのです。

さて、ここでは粒子(バッタ集団)の消滅率を1に規

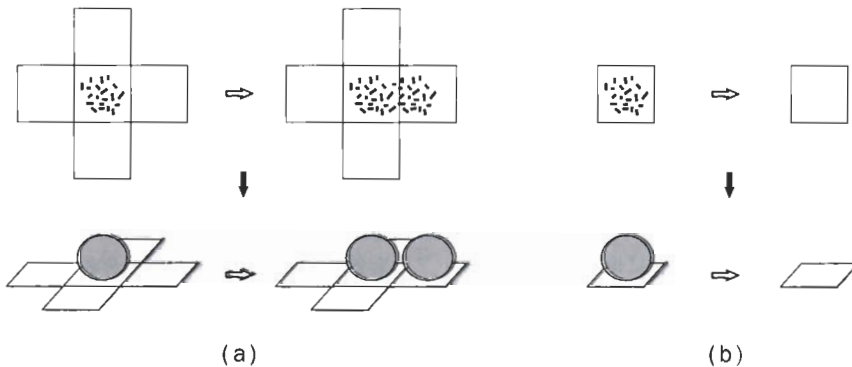


図3 (a) 粒子(バッタ集団)は遷移率 $\lambda$ で増殖する。増殖した粒子は、四方の隣接サイトのうちの1つをランダムに選んでそこに移る。この図の場合は右サイトが選ばれた。(b) 粒子(バッタ集団)は遷移率1で消滅する。





格化して、これに対して粒子（バッタ集団）の増殖率を $\lambda$ 倍とします。また、レベル $l$ にあった粒子は遷移率 $\mu$ で下のレベル $l-1$ に落ちていくことにします（ただしレベル1のときには、もうそれ以下には落ちません）。これは、放っておけばバッタ集団は段々と分散化し個体数密度が下がっていくので、レベルも自然と下がっていくという傾向を表しています。

増殖率 $\lambda$ がある臨界値 $\lambda_c = 0.412$ よりも小さいと、消滅の効果の方が勝ってしまいバッタ集団はすべて消滅してしまいます。そこで以後は $\lambda > \lambda_c$ とします。このような、生存か絶滅かという「相転移」は、コンタクト・プロセスという確率モデルを用いることによりすでに良く調べられています。詳しくは文献[8]を読んで見て下さい。

レベル低下率 $\mu$ を正にすれば、どのような初期状態からスタートしたとしても、結局は、粒子はすべてレベル1（完全な孤独相）に落ち込んでしまいます。日本のトノサマバッタの場合は、まさにこのようなケースになっているのでしょう。

それでは、ときおり大発生するナイジェル河中流の堆積平原のアフリカワタリバッタの場合はどうなのでしょう。前節で強調したように、この場合にはバッタ集団の周期的な季節移動による集中が鍵なのです。

### 3.3 どうして格子を変動させるのか

私たちのモデルでは、バッタが生息できる領域は $L \times L$ 個のサイトからなる正方格子です。バッタは、雨期には広大な半砂漠領域へ移動し、乾期には平原に戻り裸地と草地とが共存する限られた地域に集中します。この変動を表すために、モデルの格子サイズ $L$ を周期的に変動させることにします。具体的には図4のように、100時間ステップ毎に $L$ を $100 \rightarrow 200 \rightarrow 400 \rightarrow 200 \rightarrow 100 \rightarrow 200 \rightarrow \dots$ と変動させるのです。

$L=100 \rightarrow 200 \rightarrow 400$ と拡大するときには、図5(a)のようにサイトの位置も相似的に移動させます。逆に $L=400 \rightarrow 200 \rightarrow 100$ と縮小するときには、図5(b)のよ

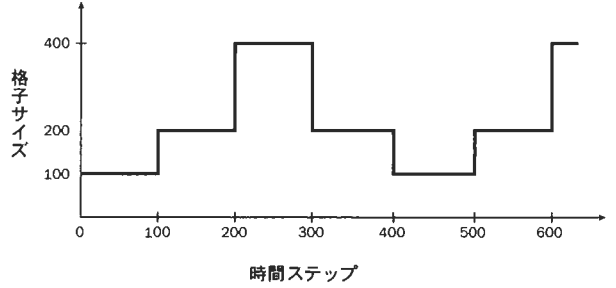


図4 格子サイズ $L$ を周期的に変動させる。

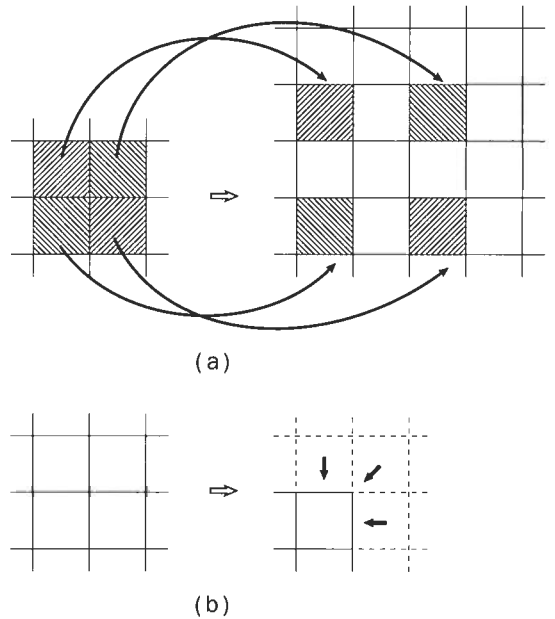


図5 (a)格子サイズ拡大のとき。(b)格子サイズ縮小のとき。

うに4つのサイトを1つのサイトにまとめてしまうことにします。

格子サイズ縮小の際に、粒子（バッタ集団）の集中化→密度増加→群居相へのレベルアップが起こります。これを表すために、粒子の状態を表す変数 $S(i, j)$ はどのように変化させたら良いのでしょうか。私たちは次のようなルールを採用しました。

いま図6(a)のように、4つのサイト $(i, j)$ ,  $(i+1, j)$ ,  $(i, j+1)$ ,  $(i+1, j+1)$ にそれぞれ、1個、0個、1個、1個の計3個の粒子があり、この3粒子の状態がそれぞれ、

$S(i, j), S(i, j+1), S(i+1, j+1)$ で与えられているとします。

格子サイズの縮小によって、これら3個の粒子はすべてサイト  $(i, j)$  に移されます。つまりこのサイトには3個のバッタ集団が集中したことになります。このとき、図6(b)のように、すべての粒子のレベルを3つずつアップさせることにします。一般に、格子サイズの縮小時に1つのサイトに  $m$  個の粒子が集中したときには、すべての粒子のレベルを  $S(i, j) \rightarrow S(i, j)+m$  とレベルアップします(ただし、16で頭打ちとします)。

また、粒子が集中した結果、1つのサイトに2個以上の粒子がのってしまうことがあります(図6(b)では3個

でした)。このようなときには一番下の粒子だけを残して、それ以外の余分の粒子はすべて消してしまうことにします。これは、乾期のバッタ集中によって群居相へレベルアップしたものの、食料が不足して余剰のバッタ集団が死滅する様子を表しています。こうして、図6(c)のように、あらたな変数  $S'(i, j)$  が定まります。

次の節では、このモデルのコンピュータ・シミュレーション結果をお見せします。その際、レベル1~4をまとめて孤独相、レベル5~10を移行相、レベル11~16を群居相として示すことにします。

以上の遷移ルールをまとめたのが図7です。ここで点線矢印は増殖、実線矢印は一定率での遷移(消滅とレベル低下)を表しています。また、太い点線矢印は格子サイズ縮小時のレベルアップのプロセスを表します。

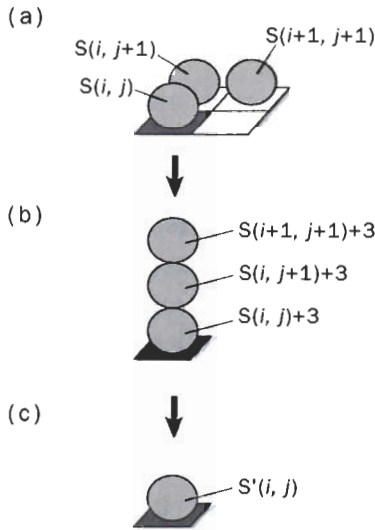


図6 格子サイズ縮小時の変数  $S(i, j)$  の変化の仕方。

#### 4 コンピュータ・シミュレーションの結果

粒子(バッタ集団)の増殖率  $\lambda$  は、臨界値  $\lambda_c$  よりも少し高い値である0.42に設定しました。消滅率は1に規格化してあるので、変化させるパラメータはレベル低下率  $\mu$  のみです。

2000時間ステップまでは格子サイズを  $L=100$  に固定しておいて、それ以降に図4のように周期的に変動させました。

図8(a)は  $\mu=0.016$  の場合を、(b)は  $\mu=0.01$  の場合をそれぞれ示しています。ともに、実線は孤独相にあるバッタ集団を表す粒子の個数の時間変化を表し、破線は群居相のバッタ集団を表す粒子の個数の時間変化を表しています。

レベル低下率  $\mu$  が比較的大きいときには、群居相のバッタ集団がそれほど増えることはありません。しかし、図8(b)のように  $\mu$  がある程度小さいと、格子サイズの変動を繰り返すうちに、徐々に孤独相のバッタ集団の個数は減少していき、その分だけ群居相のバツ

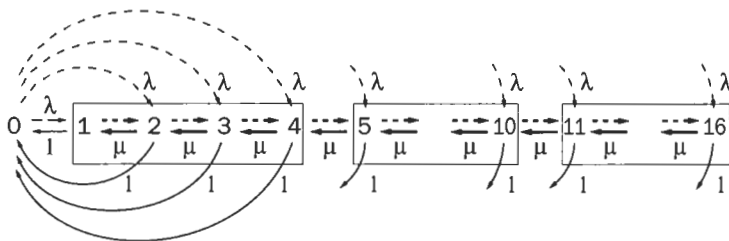


図7 遷移ルールをまとめたダイアグラム。0は空サイトの状態を表す。1~16はバッタ集団の群居相化のレベル。レベル1~4をまとめて孤独相、5~10を移行相、11~16を群居相とする。



タ集団の個数が増えていきます。この図の場合は、6000時間ステップを越えたあたりで、ほとんどのバッタ集団が群居相になっています。ここで、群居相の大発生が起こったこととなります。

図9は、格子上でバッタ集団の様子のスナップショットを示したものです。(a)は、図8(a)の時間ステップ5500のときのものです。白いところは空のサイト、グレーの点は孤独相と移行相のバッタ集団を表す粒子です。黒い点は群居相のバッタ集団を表す粒子です。(b)は図8(b)の時間ステップ6300のときのスナップショットです。群居相のバッタが大量発生している様子がうまく表現されています。

## 5 おわりに

複雑系の研究の目的は、「複雑性の客観的な尺度」とか「複雑系の定義」とかいったものが依然として不明瞭である現時点では、やはり複雑な自然現象を解明することであると思います。1節の最後に孫引きした茅野氏の言葉のように、解明することなど土台無理なのかもしれません。そのような絶望的な課題に対して従来は、複雑な要因の中のある1側面だけでもいいから取り出して、それを科学的・分析的に解明しようとしてきたのでした。

複雑系に対して同じく不完全な記述であっても、あ

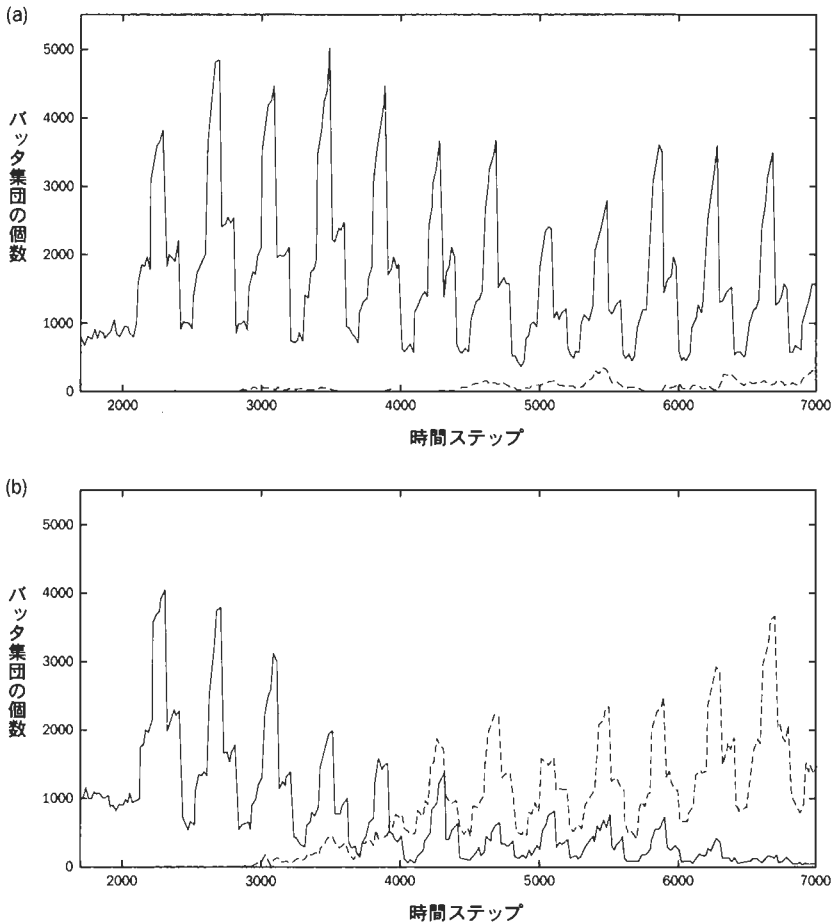


図8 コンピュータ・シミュレーションの結果。(a)  $\lambda=0.42$ ,  $\mu=0.016$ の場合。(b)  $\lambda=0.42$ ,  $\mu=0.01$ の場合。実線は孤独相にあるバッタ集団の個数を表し、破線は群居相にあるバッタ集団の個数を表す。

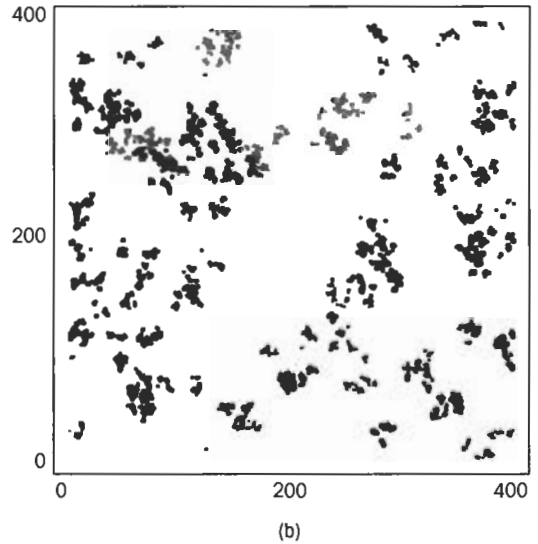
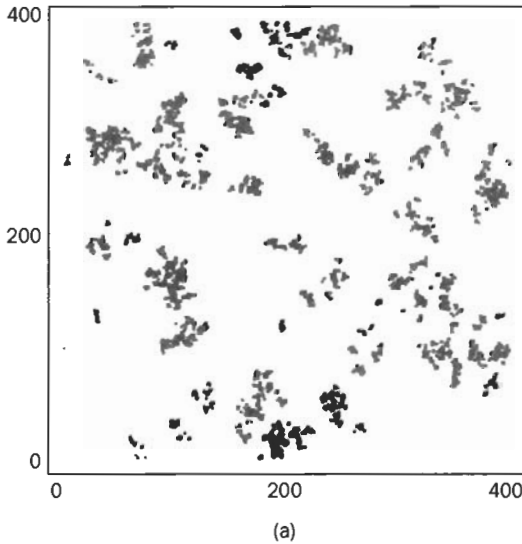


図9 コンピュータ・シミュレーションのスナップショット。(a) 図8(a)の時間ステップ5500のとき。(b) 図8(b)の時間ステップ6300のとき。白は空サイト、グレーの点は孤独相と移行相のバッタ集団、黒い点は群居相のバッタ集団をそれぞれ表す。

る詳細を切り取って見るのではなく、全体像を眺めてみてはどうかというのが本稿の主張です。私たちはそのために確率モデルというものを使ったのです。全体像を眺めるというのは、その現象がどのようなからくりで起こるのかを示すシナリオを考えるということです。コンピュータ・シミュレーションの結果は、Uvarovの描いたシナリオをうまく表現しているように思えます。

コンピュータの発展は、シナリオとか「からくり」とかいった、従来はなんだか文学的で頼りなかったものを、モデル計算を通して数値的に具現化することを可能にしたと思います。しかし、自然現象の解明を目的にするなら、やはり実験や実測データとの比較をして、モデルの正当性・有効性を調べなければなりません。この、実際のデータと比較検討するには、ネットワークの整備が威力を発揮するようになってきたと考えます。本稿の最後に、バッタの異常発生に関連したサイトのリストを付けておきます。

本研究はまだスタートしたばかりです。今後の発展については、私たちの研究室のホームページで公開していこうと思います。本稿に興味を持って下さった読者はそちらをご覧ください。(http://www.phys.chuo-u.ac.jp/labs/katori/katori-j.htm)

#### 参考文献

- [1] パール・バック作、小野寺 健訳：大地、第1部23節、岩波文庫
- [2] C. B. ウィリアムズ著、長澤純夫訳：昆虫の渡り、築地書館(1986)
- [3] 木村 滋：昆虫に学ぶ、工業調査会(1996)
- [4] 小沢正昭：群れの科学 -- 大きさの調節機能 --、研成社(1991)
- [5] 巖 俊一、花岡 資：生物の異常発生(生態学講座32)、共立出版(1972)
- [6] 巖 俊一：巖 俊一生態学論集、思堂社(1988)
- [7] 茅野春雄：昆虫の長距離飛行の分子メカニズム、科学61、No. 11、pp.743-751(1991)
- [8] 香取真理：複雑系を解く確率モデル(ブルーバックス)、講談社(1997)

#### 関連サイト

- 1 <http://www.fao.org/news/global/locusts/Locusthome.htm>  
国連のFOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONのサイト。現在のアフリカでのサバクワタリバッタの孤独相と群居相の分布の様子や、群飛するバッタの写真が公開されています。
- 2 <http://www.biol.wits.ac.za/zoology/locust/dynsim.htm>  
降雨と卵の孵化の関係と、バッタの移動を考慮したチャイロワタリバッタのモデルが説明されています。
- 3 <http://www.soils.umn.edu:8002/academics/classes/ipm/chapters/showler.htm>  
サバクワタリバッタによる被害と、それに対する対策と問題点が詳しく書かれています
- 4 [http://www.afrc.go.jp/seika/data\\_nises/h07/nises95007.html](http://www.afrc.go.jp/seika/data_nises/h07/nises95007.html)  
農林水産研究WWWサーバの蚕糸・昆虫農業技術研究所の研究成果のページ。トノサマバッタの体色変化の写真が公開されています。