

1. はじめに

環境問題は今や、社会的に大きな問題と認識されつつある。そのため、各分野においてこの問題に関係する研究やその実用化が行われており、社会基盤整備の分野でも例外ではない。社会基盤整備のなかでも農村地域の整備は地域を整備するうえで重要性を増し、総合的な農業農村整備が注目されつつある。これは、従来は農村の生産性だけが重視されたが、現在ではそのシステム全体の環境に対する貢献や人にとっての快適性が見直されているからである。農村基盤整備において景観やビオトープの創出、生態系の保全を目的とした整備が進みつつあるのもその一例である。そして保全・復元・創出を含めたビオトープの計画は、ますます各地に増えるであろう。しかしビオトープを計画するにあたって、最適な形状や配置を決定することは困難である。そこで我々はビオトープの形状や配置を検討するときに、その指針となるようなシミュレーションの構築を目標としている。

さてビオトープの保全・復元・創出の目的は、地域の生態系を保全し、生物種の多様性、遺伝子の多様性を実現することである。しかしよく知られているように、孤立して存在するビオトープは、多くの野生生物、特に数タイプのビオトープからなるバイオシステムを生息のために要求する種にとっては、あまり意味のあるものではない。そのため孤立したビオトープを創出したり保護したりしても、多くの生物種が存在することはできない。すなわち、個々のビオトープはネットワーク化されることによって初めて大きな効果が生じると言われている¹⁾。

一方例えばフランスでは、農村整備にともない、農地整備面積の2%までの用地を「予備地」として公共利益のために利用できる法律がある²⁾。近年では、この予備地を用いて、孤立したビオトープを連結させるための生態的回廊にする場合も多い。これにより農地の集積化・整形という生産性の向上と環境の保全とを両立させることができる。日本でも、農地整備にともない、ビオトープや生態的回廊を生み出す動きが進みつつある。また、耕作放棄地をビオトープである、または生態的回廊であるとポジティブに捉え、その配置を適切に行うことで、豊かな自然を創出するのに貢献させることも可能と思われる。

では、ビオトープはどのような形状で、どのように配置すれば良いのであろうか。J.M.Diamond らによる実証的研究³⁾により、国際自然保護連合 (IUCN) は次に示す原則を提唱している⁴⁾。

- A) 生物生息空間はなるべく広いほうがよい。
- B) 同面積ならば分割された状態よりも一つの方が良い。
- C) 分割する場合は、分散させないほうが良い。
- D) 線上に集合させるより、等間隔に集合させたほうが良い。
- E) 不連続な生物空間は生態的回廊で繋げたほうが良い。
- F) 生物空間の形態はできる限り丸いほうが良い。

しかし、これはあくまで原則であり、具体的な計画につなげるのは難しい。ビオトープの形態については杉山による先進的な研究⁵⁾があるが、「形態一般を網羅するような分類形態を構築した上で、系統的に説明する」ことを目指したものであり、具体的な計画に利用することは難しい。また、清水⁶⁾は、環境移行帯の形状と自然復元の方法について考察しているが、概念とアイデアの提示に留まっている。

そこで、我々は具体的なビオトープネットワーク計画の善し悪しを判断できるようなシミュレーションの開発を目指すことにした。目的としているのは、地理情報システムなどを利用してコンピューター上に対象地域のモデルを構築し、そこへあたかも生物のように繁殖して、種の増減や、棲み分け、補食行動などを伴う人工的な生き物（人工生命）を住まわせることである。そして、良いビオトープネットワークの下では、人工生命が繁栄するようにする。

しかし、ここまでのモデルを一度に構築することは不可能なので、今回は限定された資源と空間における単一集団の成長速度を適切に表現できる人工生命を開発し、さらにそれらの人工生命が、IUCN が提唱するビオトープの形状と配置に対する6つの原則のうちの幾つかを満足するのを確認することを目的とした。そこで人工生命には、その簡単なモデルと規則からは予測もできない生物や生態の構造にも似た複雑なパターンを生み出すことで知られているセルオートマトン法⁷⁾を用いた。

2. 方法

2-1. セルオートマトン

セルオートマトン法では、同じ大きさの正方形（以下セルという）で区切られた碁盤の面のようなものを想定する。すると図-1 で示したように、あるセル A には、隣接する8つのセルが存在することとなる。この隣接するセルの状態によって、各セルの状態が影響を受け、その変わり方のルールを定める。このルールを時間 $t=0$ における各セルの状態に適用し、この結果 $t=1$ における各セルの状態が決まる。これを繰り返していくのがセルオートマトン法の原則である。

ところで、セルオートマトン法にはライフゲームという有名なゲームがある。図-2 のように、ライフゲームには生物を表す斜線のセルと、生物がない白のセルの2種類があり、そのルールが決まっている。それは生物の誕生を意味する出現のルールと、生物の死を意味する消滅のルールである。詳しくは、斜線の生物セルは2~3個の隣接する生物セルがないと死んでしまつて白の空白のセルになるという消滅に関するルールと、白の空白を表すセルに3個の隣接する斜線の生物セルがあると空白のセルに新たに生物が生まれ斜線の生物セルになるという出現に関するルールである。この出現と消滅に関するルールを一度繰り返したら一世代とし、何世代にも渡って計算することで生物セルの数が実に様々な増減を示す。

2-3. ロジスティック曲線

今回はまず、このようなセルオートマトン法を用いて、1種個体群の増加と減少を的確に表現するルールを制定することを目的とする。一般にある生物集団の個体数を x とし、生存率・出生率を常にほぼ一定であるとすると、個体数 x の増加率は個体数に比例し、その結果個体数は時間とともに指数的に増加することになる⁸⁾。しかし現実の生物集団がいつまでも指数的に増殖できるわけではなく、増殖の止まる定常期がおとずれる。それは、個体数が増大するにつれて、それぞれの個体にとっての環境が悪くなり、餌や営巣場所など成長・繁殖に必要な資源が得にくくなるからである。このように高密度で増殖が停止することを表すのによく使われるのが次のロジスティック方程式である。

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right)$$

ここで、 x : 個体数、 t : 時間、 r : 内的自然増加率、 K : 環境収容力である。

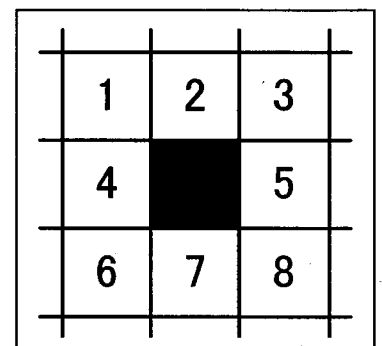


図-1 2次元セルオートマトン法での隣接セル

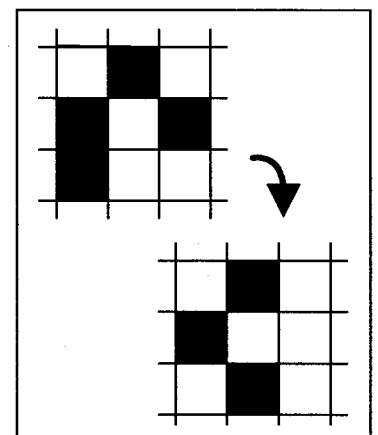


図-2 ライフゲームでの1世代変化

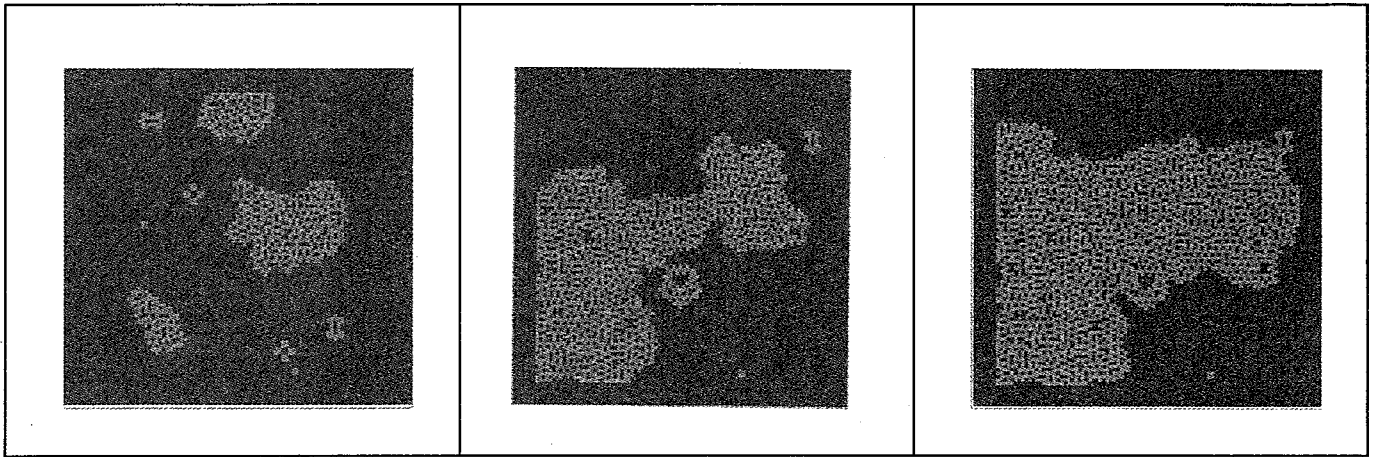


図-3 ビオトープ内での生物の増加過程 (左から 40 世代 80 世代 120 世代)

我々はセルオートマトン法において、前述のライフゲームのように各セルに2つの状態（生物がいるとしない）を定義する。そして、あるセルAに隣接する8つのセルにおいて、生物がいる状態のセルが0,1,2,7,8個存在するときセルAの生物を死滅させるか誕生させない。生物のいる状態のセルが3,4個存在するときセルAの生物を生存させるか誕生させる。生物のいる状態のセルが5,6の時には変化しないというルールを設定した。即ち、生物の密度があまりに低いかあまりに高いと生物が増殖できないが、適度な密度であれば増殖するというルールである。図-3は、このルールに従ったときの生物の増殖途中を表示したものである。この場合、総セル数が10000個（縦100セル、横100セル）で、その中央にセル数7396個（縦86セル、横86セル）のビオトープが存在していると仮定している。そして、ビオトープ以外の場所では生物は生存できず、この法則は以後の計算でも同様に用いる。ちなみに色の薄い部分が生物の生存しているところである。

個体数の変化についてはセルオートマトンの性質上1回限りの計算では非常に特殊となるので、実際には初期値を変えて何ケースも計算し、その平均を計算結果とする。図-4には結果を計算するまでのフローチャートを示した。

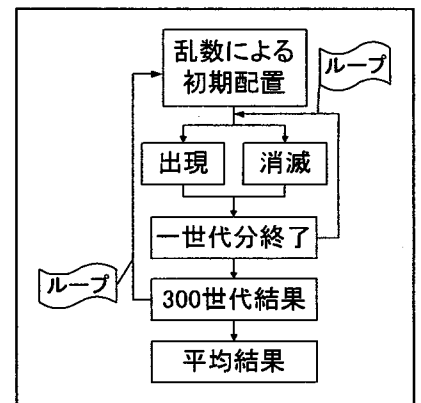


図-4 フローチャート

以上のような計算を行い、前述のルールを用いて個体数の増減変化をグラフにしたものが図-5である。このときビオトープセル（生物が生存可能なセル）の総数は4225個（縦65*横65）である。そして乱数を用いて同じ数の生物を様々に配置したケースを考えて、それぞれ計算し、各世代について生物数の平均を求めた。するとその生物数の変化はロジスティック曲線に類似した曲線となり、我々のルールによって表された生物の増減が、適切に単一集団の個体数変化を表していることが分かる。

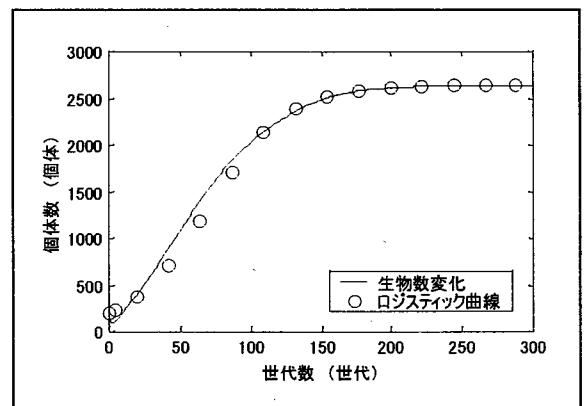


図-5 生物数の変化とロジスティック曲線

したがって、このルールを用いてビオトープの形状を検討していくことにする。なお、ビオトープ以外の場所では生物が全く生存できないという仮定は引き続き採用する。しかし前者の仮定のもとではIUCNの原則のうちC), D), E)の成立を確認することは困難であるため、今回は原則A), B), F)の確認を目指した。

3. 結果

3 - 1. 「原則 B) 同面積ならば分割された状態よりも一つの方が良い」についての確認。

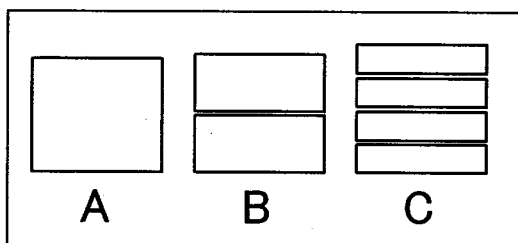


図-6 3種類のビオトープ形状

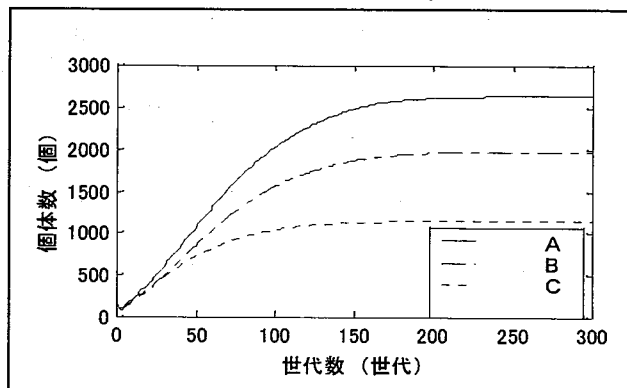


図-7 各ビオトープ形状の個体数変化

原則 B) についての確認のため、図-6 に示すような、3 種類のビオトープ形状を考えた。正方形のビオトープとそれを 2 分割したものと 4 分割したものであるため、各形状についてビオトープセル数は 4096 個と等しくなっている。

図-7 に 300 世代までの各ビオトープの生物集団の個体数の変化を示す (いずれも 100 ケースについての平均である)。明らかに、分割されたビオトープよりも、分割されていないビオトープの方で生物集団の個体数が増加していることが分かる。これにより、原則 B) の成立は確認されたと思われる。

3 - 2. 「原則 F) 生物空間の形態はできる限り丸いほうが良い」についての確認。

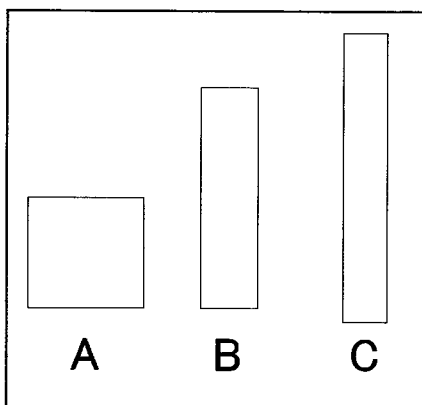


図-8 3種類のビオトープ形状

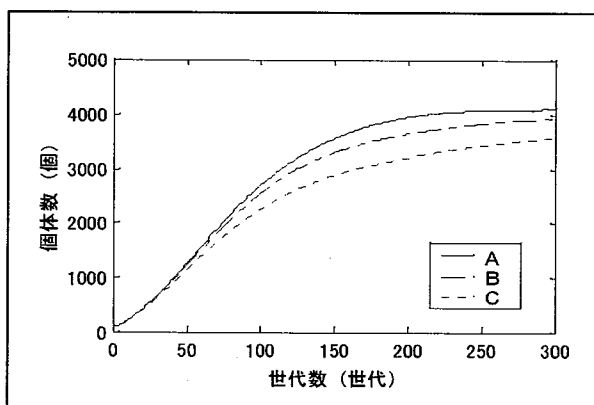


図-9 各ビオトープ形状の個体数変化

次に原則 F) の確認のために、図-8 に示すような 3 種類のビオトープ形状を考える。各形状の辺比は 1:1、1:4、1:6 の長方形である。ここで原則 F) はできる限り「丸い」方がよいとされているが、これは次に示す理由から図-8 の形状を比較することで確認されると考える。まず原則 F) の意味は、ビオトープ形状が同面積である場合ひずんだり曲がりくねったりしているよりも中心にかたまっているほうが良いという意味である。次に我々のセルオートマトン法は隣接セルを数えるときに、斜め方向と横や縦方向を同じ条件で計算している。これらの理由から、図-8 で示した 3 種類の形状を比較することで、原則 F) を確認できると考えた。

図-9 に 300 世代までの各ビオトープの生物集団の個体数変化を示す (いずれも 100 ケースの平均である)。明らかに、形状が円に近いビオトープの方が、形状がひずんでいるビオトープより生物集団の個体数が増加している。これにより、原則 F) の成立は確認されたと思われる。

3 - 3. 「原則A) 生物生息空間はなるべく広いほうがよい。」についての確認

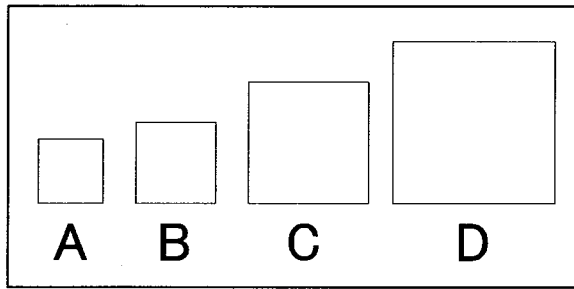


図-10 4種類のビオトープ形状

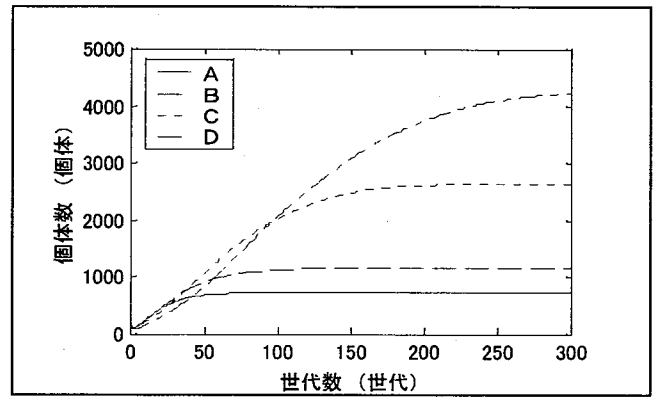


図-11 各ビオトープ形状の個体数変化

原則A)の確認については、ビオトープ形状として図-10に示す4つの正方形を考える。各ビオトープのセル数は40*40、50*50、75*75、100*100の4種類である。

図-11にビオトープの大きさの変化による個体数の変化を示す。ビオトープの大きさが大きくなれば、生存している個体数が増加することは明らかである。

そして図-12に個体数変化速度曲線を示す。個体数変化速度とは100ケースの個体数平均から1世代間で変化した個体数を求め、それを9世代ごとに移動平均したものである。図から分かるように、ビオトープの大きさが大きくなると、時間が経過しても個体数変化速度は小さくならず繁栄が長く続く事が分かる。これにより、原則A)の成立が確認されたと思われる。

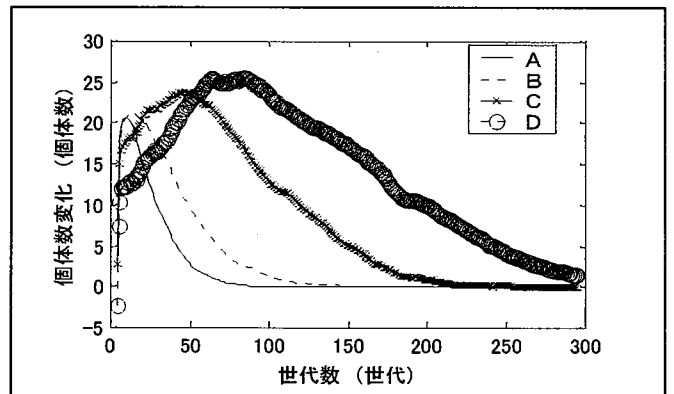


図-12 各ビオトープ形状の個体数変化速度

4. まとめ

以上のように、セルオートマトン方を用いると、簡単なルールを設定するだけで、ロジスティック曲線を近似することができ、さらにIUCNが提唱するビオトープの形状と配置に対する6つの原則の内、以下の3つの確認を行った。

- A) 生物生息空間はなるべく大きいほうが良い
- B) 同面積なら分割された状態よりも一つの方が良い。
- F) 生物空間の形態はできる限り丸いほうが良い。

この3つの原則は個々のビオトープの形状について述べたもので、複数のビオトープについての配置に関するものではない。今回は確認していない原則をあげると以下の3つである。

- C) 分割する場合は、分散させないほうが良い。
- D) 線上に集合させるより、等間隔に集合させたほうが良い。
- E) 不連続な生物空間は生態的回廊で繋げたほうが良い。

この3つの原則については、我々が用いているセルオートマトン法で確認することは難しい。なぜなら今回用いたセルオートマトン法では生物が存在できるビオトープセルと、生物がまったく存在できないセルの2種類しか仮定していない。一方この3つの原則を見ると、複数のビオトープ間にわたって生物が交流しやすいように考えられているので、ビオトープ以外での生物の生存を考えなければならない。よってこの3つを

確認するには、生物が存在できるセルと生物が全く存在できないセルと、さらにその間となる生物は存在できるがビオトープセルほど生存できないというセルの3種類を仮定しなければならない。

従って、本シミュレートの改良は、ビオトープ以外の領域でも何%かの割合で生存できるという仮定を導入することであり、その導入によって原則 C)、D)、E) のシミュレートの実現を期待している。

また清水が指摘しているように、生態系にとっては、ビオトープそのものの形状はもとより、環境移行帯の形状も重要であり、それをどのようにしてシミュレーションに取り入れていくのかも重要である。つまり環境の違いを表すためにはそれぞれの環境についての適切な評価が必要であり、それをもとにしたシミュレーションへの取り込み方が今後の課題である。

その他には、ビオトープ本来の目的を達成しているかを確認するシミュレーションの構築が必要である。これは、ビオトープが生物種の多様性と、種内での遺伝子の多様性を達成することであり、そのためには今回のセルオートマトン法では1種類の生物に限定したところを多種の生物を繁殖させてシミュレーションしなければならない。

しかし、いずれにしてもこのようなシミュレーション方法を確立することは、実際にビオトープを計画する場合に重要であり、特に比較的自然に恵まれた農村部において、適切なビオトープネットワークを構築する為には必要なものであると考える。今後このようなシミュレーションの方法を確立し、合理的な農業経営と自然保護とを両立できるような農業農村整備事業を計画できることを願っている。

参考文献

- 1) (財)日本生態系協会：ビオトープネットワーク ぎょうせい、p.42 (1994)
- 2) 農村開発企画委員会：農地整備は農村空間整備のための道具、海外農村開発資料第28号、pp.30-31 (1991)
- 3) J.M.Diamond: The island dilemma : lessons of modern biogeographic studies for the design of natural reserves, *Biological Conservation*, 7, pp.129-146 (1975)
- 4) IUCN 日本委員会：地球環境の危機 (1980)
- 5) 杉山 恵一：ビオトープの形態学、朝倉書店 (1995)
- 6) 清水 哲也：自然環境復元境界編、農村ビオトープ (フタクタルエコトーンと鳥類の生息環境)、信山サイテック、pp.127-186 (2000)
- 7) 加藤泰義ほか：セルオートマトン法、森北出版 (1998)
- 8) 巖佐 庸：数理生物学入門、共立出版社、pp.2-7 (1998)