

1. はじめに

21世紀を迎えて、自然環境の保全・復元・創出への気運はますます高まっている。そのため、地盤工学の分野でも自然環境に与える影響を考えた新たな技術や製品の開発が求められている。また、社会基盤整備の中の生態系保全型水田整備事業をはじめとする農業農村整備事業では、農業の振興はもちろん自然環境の修復についても同時に行っていかなければならない。そのためには、農村や農地の調査と共にビオトープの調査を基にビオマップを作成し、農村・農地内や周辺のビオトープの形状と配置に工夫を凝らすべきである。しかしビオトープの調査では主に生息環境ごとの生物の種類とその捕獲数が対象となっているため、形状と配置についての評価は定性的に存在するだけである。しかし、自然環境の修復を行う場合にはビオトープの形状と配置を定量的に検討する必要がある。そこで我々はビオトープの計画段階で形状と配置を評価するためのシミュレーションの構築を目指している。

2. 研究の目的

我々はセルラオートマトンを利用した人工生命を使って、ビオトープの形状と配置を検討できる方法の開発を目指している。すでに、我々の人工生命の個体数変動はロジスティック曲線と良く似た増加曲線を示しており、そのうちの一つを使って国際自然保護連合(IUCN)の提唱するビオトープの形状と配置の原則(図-1)を満足することを確認した^{2),3)}。しかし、これは我々の開発した1種類の人工生命が原則を満足したことを確認したにすぎない。そこで、セルラオートマトンのルールを変更して別の種類の人工生命も同じような挙動をすることを確認しなければならないが、セルラオートマトンのルールは無限に存在している。そこでまず、生命の増加はロジスティック曲線に従うという前提の下で、セルラオートマトンのルールとロジスティック方程式の係数 r (内的自然増加率)と K (環境要因)の関係を考察し、次に r と K の数値について考察する。将来は性質の異なる様々な人工生命を使って原則の検討が行えることを目指す。

2. 方法

2-1 シミュレーション

シミュレーションには人工生命としてセルオートマトン法を用いている。セルオートマトン法とは、平面を多数の格子に区切ったセルに生物を配置し、単純なルールを使って増減させるものであるが、単純なルールからは想像もつかない程複雑な増減を示す人工生命である。今回の実験ではこの単純なルールを様々に変化させ、各ルールについて個体数の増加曲線をロジスティック曲線に近似し、ロジスティック方程式の係数である内的自然増加率 r と環境容量 K とを求めた。そして、各ルールと係数の関係を考察

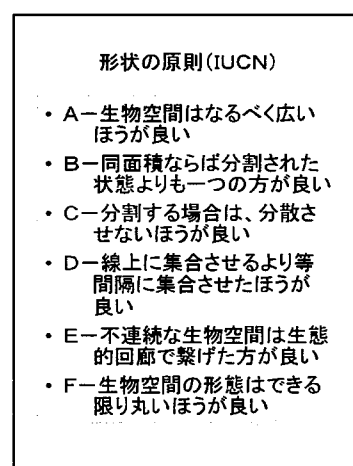


図-1 形状の原則

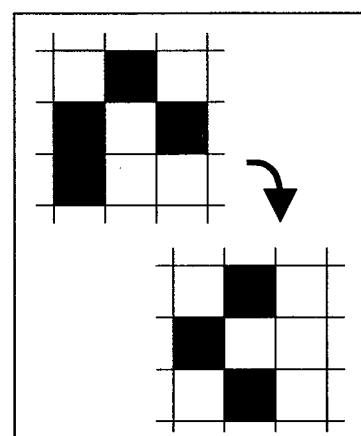


図-2 0,1,4,5,6,7,8,9匹で消滅、3匹で出現

している。

まず、セルオートマトン法のルールについて説明する。生物を表すセルの周りには8個のセルが存在し、この8個のセルに何匹の生物が存在するかによってそのセルの次の状態が決まる。つまり生物が消滅するか生き残るか、また新たに生物が生まれるかは各セルの周囲8つのセルによって決定される。例えば、「周囲に2～3匹の生物がいると生き残りそれ以外ならば消滅する。周囲に3匹の生物がいるとき新たに誕生する」（消滅条件 01456789、出現条件 3）というルールの場合には図-2のように変化する。この変化を何回も繰り返すことによって個体数が増減するのでそれを記録する。ルールを設定する時には、周囲の生物が多すぎても少なすぎても消滅し、生き残ることの出来る条件のうち適当な量があると出現するようなルールとしている。

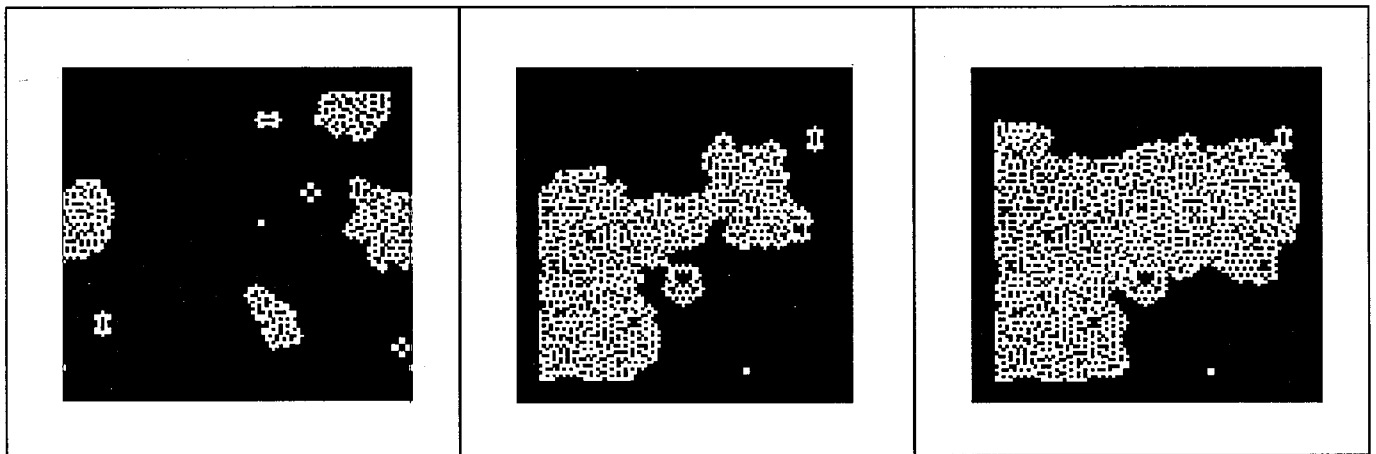


図-3 シミュレーションの生物の増加過程 (左から 40 世代 80 世代 120 世代)

図-4は今回用いたプログラムのフローチャートである。最初に乱数を使って生物を配置し、これを初期値とする。次に、あらかじめ設定したルールに従って消滅と出現を300回繰り返し、個体数の増減を得る。しかし、セルラオートマトン法は初期の配置状態から一定のルールに基づいて増減を繰り返すので、初期値によって結果が決定されている。つまり、1回の計算では非常に特殊な結果となるので、今回はその作業を100回繰り返し、世代ごとに平均したものを個体数変化としている。こうして得られた結果の中で、時間ごとの個体数変化がロジスティック曲線とよく似た形状を示すものをロジスティック方程式で近似しその係数を求める。

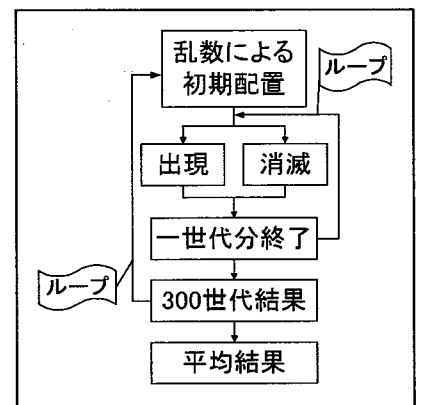


図-4 フローチャート

2-2. ロジスティック曲線

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

x : 個体数 t : 時間 r : 内的自然増加率 K : 環境容量

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、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¹⁾。しかし現実の生物集団はいつまでも指数的に増殖できるわけではなく、個体数の量がある値まで増えると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・繁殖に必要な生息空間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。ロジスティック方程式では r が

内的自然増加率として生物本来の個体数の増加率を表し、Kが環境容量としてある一定の空間内で生息できる生物数の最大値を表している。そしてこの方程式によって描かれる曲線は、生物が生息空間にのみ制約を受けて増加するときの個体数変化を示す。つまり、ロジスティック方程式は資源が無限にある有限な空間内での生物の個体数変化を示すものである。

今回のシミュレーションでは生物の生息可能な範囲は一定であり生息に影響を与えるような条件を仮定していないので、個体数変化がロジスティック曲線(図-5)になることによって人工生命が生物を適切に表していると考えられる。

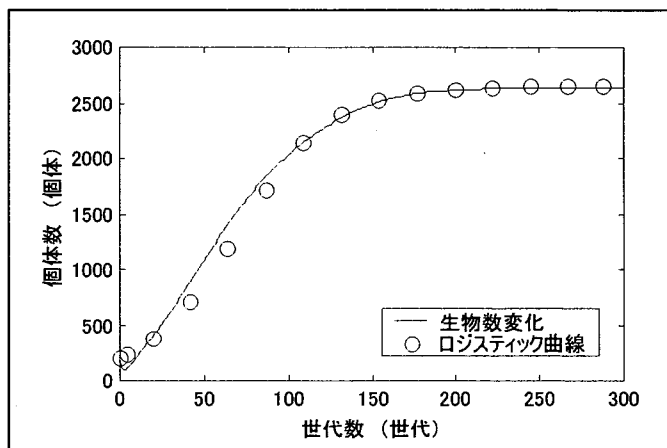


図-5 シミュレーションの個体数変化とロジスティック曲線

4. ルールと r (内的自然増加率), K (環境要因) の関係

4-1 ルールとロジスティック曲線

人工生命のルールには2種類の条件がある。それは生物の出現条件と消滅条件である。消滅条件は実際の生物がそうであるように多すぎても少なすぎても死ぬというもので、出現条件は消滅しないような条件で適切な数が周囲にいると新たに生まれるとしている。生物の生息する空間は200*200の正方形とし、境界となる左右と上下の端についてはそれぞれループするようにつながれている。

そして、各ルールについて300世代までの個体数変化を計算した。個体数の変化の特徴としては大きく分けて、ロジスティック曲線のように指数的に増加し徐々に増加率が下がって一定となるものと、初期値から個体数が激減しその後ほとんど最後まで変わらずに一定となるものの2種類に分かれた(表-1, 図-6)。結果からは出現条件に2ないし3が含まれているもの以外は増加していない。これは、周囲8つのセルの状態によって出現するかどうか決定されるためであり、初期の配置にもよるが出現条件に2や3が含まれない場合は初期状態から拡大していくことが難しいと考えられる。

表-1. ルールとロジスティック曲線

		消滅条件				
		012678	01278	01678	0178	018
出現 条件	2			○	○	○
	3	x	○	○	○	○
	4,5,6,7	x	x	x	x	x
	23			○	○	○
	34	○	○	○	○	○
	45,56,67	x	x	x	x	x
	234			○	○	○
	345	○	○	○	○	○
	456,567		x	x	x	x
	2345			○	○	○
	3456		○		○	○
	23456				○	○

x……ロジスティック曲線でないもの
 ○……ロジスティック曲線となるもの
 無……データ無し
 例) 消滅条件 018 …… 周囲に0か1か8個の生物がいると消滅
 出現条件 45,56, …… 周囲に4か5個の生物がいると出現する条件と、周囲に5か6個の生物がいると出現する条件の二つ

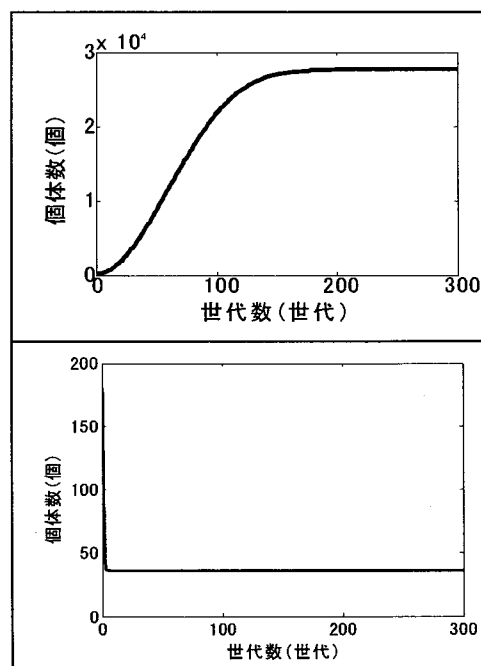


図-6 個体数曲線の代表例

4-2 消滅条件と r, K

次に、生物個体数曲線がロジスティック曲線になったルールの r (内的時間増加率) と K (環境容量) を比較する(図-7)。グラフは各消滅条件によって r と K がどのように変化するかを表している。これによると、消滅条件が 801 と最もすくないとき、つまりこの中で最も消滅しにくい条件の時に K (環境要因) の値が大きくなっている。ロジスティック方程式における K の値は、生物が仮定されている条件(資源が無限に存在し生存可能領域が有限)のもとで生息できる個体数の最大値を表しており、セルオートマトンにおいて消滅する条件を減らすと個体数の最大値が増えている。しかしこのことは、全てに当てはまるわけではなく、例えば消滅条件が 678012 と最も多い場合の K の値は消滅条件が 78012 や 7801 の一部よりも大きく、消滅条件が少なくなる事によって K の値が小さくなるとはいえない。つまり、消滅条件だけが K の値を決定しているのではなく出現条件も K の値に関係していると考えられる。次に、消滅条件ごとの r (内的自然増加率) の値については消滅条件が 678012 と 78012 が共に低い値で集中している。しかしその他の条件では横に広がって散在している。もともとロジスティック方程式の r は一匹の生物が持っている単位時間あたりの増殖率であり、今回用いたシミュレーションのルールでは消滅条件よりも出現条件に影響を受けやすいと考えられる。

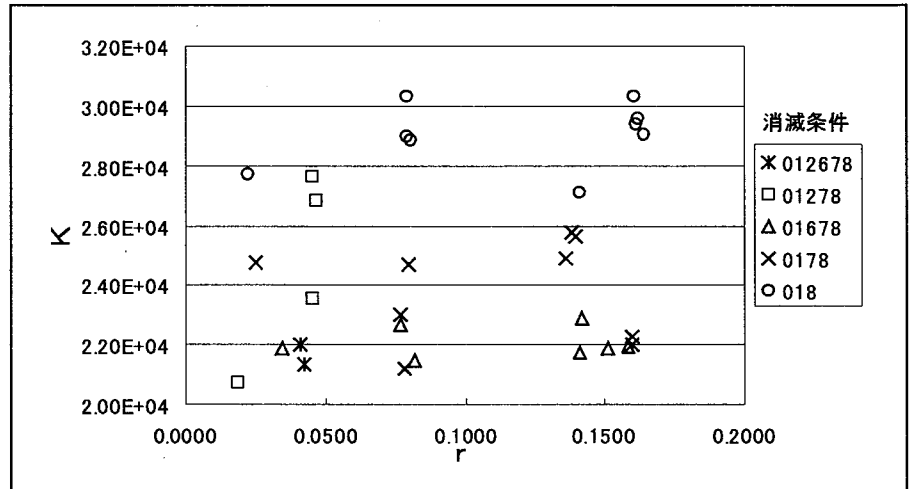


図-7 消滅条件ごとの r と K

4-3 出現条件と r, K

そこで、出現条件ごとの r と K について考察するため右図のようなグラフを用いる(図-8)。出現条件に 2 を含むものの方が 3 を含むものより r の値が大きくなっている。出現条件は 3 よりも 2 のときの方が増加しやすいというのは容易に理解でき、また、他の場合も出現条件が増えると r の値が増加する傾向にあり、r の値は出現条件によって影響を受けると考えられる。ところが例外的な結果も同時に存在し、出現条件が 3 4 と 3 4 5 については r の値がほとんど

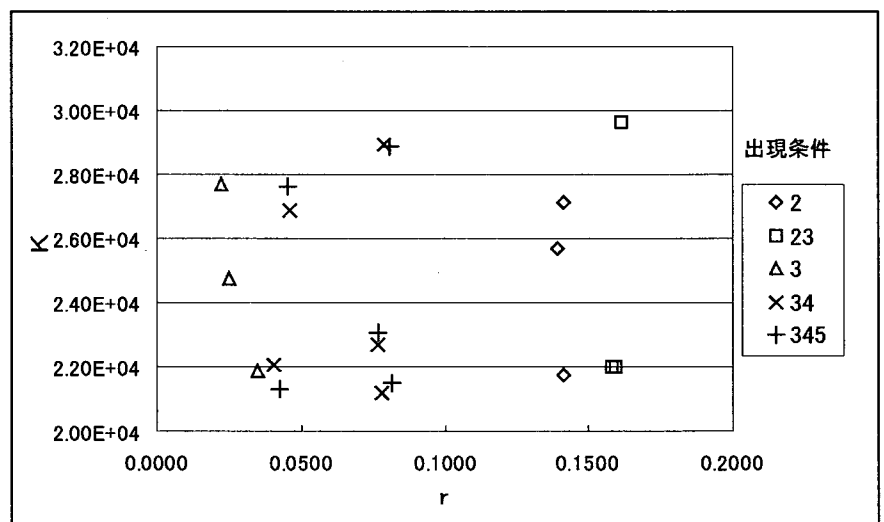


図-8 出現条件ごとの r と K

変化していない。二つの人工生命の違いは出現条件に 5 を含むかどうかであり、両者にあまり違いが見られないのであれば周囲に 5 個の人工生命が存在しにくいことを表している。

4-4 ルールと r, K

そこで、出現条件が34と345については実際のrとKの数値から考察する(表-2)。この二つの出現条件については、図-8では互いに良く似た値を示しそれぞれ近い値どうし消滅条件が同じではないかと予測できるが、表-2の数値表によると消滅条件が67801と7801のときを比較するとそうではないことが分かる。また、Kの値についても消滅条件が増えているにもかかわらず大きな値を示すものもあり、Kと出現条件とは関係がないような結果となった。

今回の研究でルールとK, rの関係については、K, rの値はセルオートマトンの出現条件と消滅条件にある程度影響を受けるものの、例外も多く存在することがわかった。今後、意図的にKやrの数値を変更する時には実際に計算して確認することが必要である。

表-2 出現条件34と345のK, r

出現条件	消滅条件	r	K
34	678012	0.041	22042
34	78012	0.046	26862
34	67801	0.077	22661
34	7801	0.078	21185
34	801	0.079	28961
345	678012	0.043	21324
345	78012	0.045	27654
345	67801	0.082	21472
345	7801	0.077	23040
345	801	0.081	28850

5. r, Kの値についての考察

測定した人工生命はKの値が20753から30331、rの値が0.018から0.161の間を示した(表-3)。まず、環境容量であるKの値については生息可能な場所の大きさにかかりの影響を受けるが、今回の研究で用いた人工生命の生息領域の大きさは40000個で統一されているので、値を比較すると最小と最大で1.5倍の違いとなった。また内的自然増加率のrについては最小と最大が約9倍となる。そこで、rの最小値と最大値の増加する時間の違いを知るため個体数が2倍になるまでの時間を求める。rの単位時間を日で考えるとすれば以下の式からその日数が計算できる。

表-3 ルールと r, K

消滅条件	出現条件	r	K
678012	34	0.041	22042
678012	345	0.043	21324
78012	3	0.018	20753
78012	34	0.046	26862
78012	345	0.045	27654
:	:	:	:
:	:	:	:
801	234	0.164	29078
801	345	0.081	28850
801	2345	0.161	29380
801	3456	0.079	30322
801	23456	0.160	30331

$$r \text{ (年間増加率)} = (0.161 + 1)^{365} - 1 = 0.4611 \times 10^{25}$$

すると、rの最小値である0.018は総個体数が2倍になるまでに38.5日かかり、最大値の0.164では4.2日となるので、個体数が2倍になるまでにかかる時間も約9倍となる。では、実際に生物のrがどのような値を示すかについて例をあげると、農作物の害虫であるマメハモグリバエ⁴⁾の雌は1日あたりの内的自然増加率が約0.16、花の害虫となるミカンキイロアザミウマ⁵⁾では0.14との報告がある。そして、生物界では種によって寿命や一回の産卵数が異なることからrの値は10の6乗程度のひらきがあると考えられている⁶⁾。ここで人工生命のrの値について考えると、その値は0.018から0.161であり約10の1乗しか開きがない。しかし、シミュレーションの単位時間である1世代の解釈の仕方を変更すればrの値に幅を持たせることができる。そこで、r=0.161を用いて単位時間の1世代を1日とした場合と1年とした場合について考える。1日あたりの増加率が0.161であるからその1年あたりの増加率は次のように計算できる。

$$2 \text{ 倍になる時間} : t = \log_e 2 / r = 0.6931 / r$$

これを1年あたりの増加率が0.164の場合と比較すると10の24乗以上の開きがあるので、研究で測定したrは10の1乗の開きでも問題は無いと考えられる。

それよりも今回の研究で得られた成果として重要なことは、 r と K の組み合わせにおいて様々な値を持ったセルオートマトンのルールを発見できたことである。このことは図-7,8において各ルールの r と K を表した点が偏ることなく散在していることから分かる。

これまでの研究では図-7,8のたった1点(出現条件 34、消滅条件 01278)を示す人工生命がビオトープの形状評価が可能であることを確認しただけであり、セルオートマトンのルールを変更した人工生命がビオトープの形状評価を可能とするかどうかの確認が出来ていない。つまり r や K が異なる値を示すとき人工生命がビオトープの形状評価が行えるかは分かっていない。さらに、ルールが無数に存在していることを考えると確認の作業は不可能にも思える。しかし今回の実験で人工生命の r と K に多数の組み合わせが見つかったのでこのなかから代表的な組み合わせを選び出し確認することが出来る。 r と K の代表的な組み合わせを持ったそれぞれの人工生命が適切にビオトープの形状を評価するならば、ルールの異なるその他の人工生命においても形状評価を行えると考えている。

6. 参考文献

- 1) 巖佐 庸：数理生物学入門、共立出版社、pp.2-7 (1998)
- 2) 大野 三宅：「人工生命によるビオトープ形状の検討」, 農業土木学会誌 69(9), 2001.9, pp.67~70(2001)
- 3) IUCN 日本委員会：地球環境の危機, 1980
- 4) シミュレーションモデルによるマメハモグリバエの動態の推定, 静岡県農業試験場,
http://www.affrc.go.jp/seika/data_kan-tou/h08/index.html#seisan-kankyuu
- 5) 中尾 茂夫：ニホンナシ「幸水」の果実のまだら症状と輪紋病被害の同時防止対策, トーメン農業ガイド
No.81/A(1996.10.1) http://www.tomen.co.jp/agro/guide/t_81a.htm
- 6) Eugene P.Odum 三島 次郎訳：「BASIC ECOLOGY 基礎生態学」, 倍風館, pp.251 (2000)