2004－CG－115　（7）
2004／7／12

互いに競争関係にある二種の群れのシミュレーション

佐藤　大輔　　吉田　典正

魚や鳥などの群れの動きを表現する研究は、Craig Reynolds による Boid アルゴリズムを初めとして，多数行われてきた．従来の研究は主として群れの動作に関するものが多いが，異なる２種の魚（生物）が同じ餌を競い合うなどの互いに競争関係にある状況において，２種の魚（生物）の個体数をなんらかの法則に従わせて時間とともに変化させるような群れのシミュレーションを行う研究は行われていない．本研究では，２種の魚（生物）が，Boid アルゴリズムに基づいて群れを作りながら行動し，数理生態学におけるロトカ・ヴォルテラの式に基づいて出産・成長・死亡を繰り返しながら個体数を変化させる手法を提案する．

Simulation of Two Kinds of Boids in Mutual Competition

Daisuke Sato and Norimasa Yoshida

Various kinds of research have been conducted concerning the coordinated animal motion of boids, such as bird flocks and fish schools. Most of the research is related to the behavior of boids and does not deal with two competing boids. We present a method that the schools of fishes are formed by the boid algorithm and the numbers of fishes of two competing boids are changed with time through their birth, growth, and death based on the Lotka-Volterra's equation in mathematical ecology.

１．はじめに

映画やゲームなどにおいて，鳥や魚などの群れの動きを自動的に生成する手法は不可欠なものとなっている．そのような手法として Craig Reynolds による Boid アルゴリズム[1]が有名であり，ゲームプログラマにとっても非常に重要な手法である[2]．近年のコンピュータの処理能力の向上により，複雑なシミュレーションが可能となってきており，より複雑な現象を表現し取り組んでいくべきであろう．そこで，本研究では，２種の魚が互いに競争関係にあるような状況において，それぞれの個体数の変化を支配する法則を取り入れ，時間とともに個体数を変化させるシミュレーションを行う．現実世界では，例えば，太刀魚とさわらは，同じイワシを餌として回遊する．本研究では，このように２種の生物が競争関係にある状況を想定し，シミュレーションを行うが，現実の状況に近いということを目的とするのではなく，映画やゲームなどで有用になるように，制御可能な形で時間とともに個体数を変化させることを目的とする．

Boid アルゴリズム[1]は，各個体を引き離し(Separation)，整列(Alignment)，結合(Cohesion)という３つの単純なルールに基づき自立的に動かすことによって自動的に群れを形成させる．その後，第４のルールである回避が追加されている．Tu と Terzopoulos らによる Artificial Fish[3]では，物理法則(physics)，運動(locomotion)，知覚(perception)，ふるまい(behavior)を統合的にモデル化し，魚とその環境についてのモデル化を行っている．鵜沼，安生，武内[4]らは，人間を対象として，人間の心理的な要因に基づく考察を基礎とし，行動科学に基づいて群集の表現を行った．松延，水森，蔡ら[5]は，各個体の動きを運動方程式として記述し，自己組織化理論によって Boid ア

日本大学　生産工学部
College of Industrial Technology,
Nihon university

ルゴリズムでは表現できなかった群れの非定常状態の表現や敵に襲われた時の逃避行動を表現している. Boid アルゴリズムでは一度群れが形成されると定常状態になり群れ中で魚の位置が入れ替わるというような状態を表現できないが，文献[5]の手法では非定常状態を扱うことができる.

上記のように群れに関連する様々な研究が行われているが，２つの群れが同じ餌を争うなどの競争関係にある状態で，時間とともに群れの個体数をなんらかの支配法則に従って変化させる研究は行われていない．本研究では，コンピュータゲームや映画などを対象とし，２種の魚の群れが同じ餌を争うことを想定し，出産・成長・死亡を繰り返しながら個体数を変動させるシミュレーションの作成を行う．群れの生成には Boid アルゴリズムを利用し，個体数の変化には数理生態学におけるロトカ・ヴォルテラの式を用いた．ロトカ・ヴォルテラの式を用いることによって，パラメータを制御することによって個体数の制御を行うことができる．ロトカ・ヴォルテラの式のパラメータによって，2 種の個体数を同じ数から始めた場合でも，一方の種のみが死滅したり，両方の種が共存したりといった状況を表現できるようになる.

２． Boid アルゴリズム

Boid アルゴリズム[1]は 1986 年に Craig Reynolds が提案したもので, 群れを成す個体すべてに共通の簡単な３つのルールを与える．そのルールに基づき個体どうしが相互作用することによって群れを形成させるアルゴリズムである．Boid アルゴリズムの３つのルールを次に示す.

① 結合(Cohesion)
群れの中心に向かう処理.
② 引き離し(Separation)
一定距離以上仲間に近づかせない処理.
③ 整列(Alignment)
仲間と進む方向およびスピードを合わせる処理.

本研究では，魚が泳ぐためのフィールド（本研究の実装では２次元としたが容易に３次元に拡張が可能である）を作成し，その上に個体（魚）を表現する．個体はフィールドを囲む４辺を障害物と認識してそれを避けながら行動する．個体は Boid アルゴリズムに従って移動し，自分の種と同じ種の個体を発見すると，その個体に近づいて群れをなす.

３．ロトカ・ヴォルテラの式

ロトカ・ヴォルテラの式[6]は，互いに競争関係にある２つの種を考え，時刻 t でのそれぞれの群れの個体数の変移を微分方程式によって表した式である．ロトカ・ヴォルテラの式を次式に示す.

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= (\varepsilon_1 - \lambda_1 N_1 - \mu_{12} N_2) N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= (\varepsilon_2 - \lambda_2 N_2 - \mu_{21} N_1) N_2 \end{aligned} \qquad (3.1)$$

ここに，t は時刻，N_i は種 $i(i = 1 \text{ or } 2)$ の個体数，ε_i は内的自然増殖率，λ_i は種内競争係数，μ_i は種間競争係数である.

式(3.1)は，餌などの生息に必要な資源をめぐっての種内での競争と他種との競争などの過密効果によって個体群の増殖率が個体数の増加に比例して減少する式となっている.

この式から 2 つの種の Δt 時間先の個体数を繰り返し求めることによって２つの群れが相互に影響を及ぼし合いながら個体数を変動させることができる.

式(3.1)が 0 になるとき，その種は自主的安定状態であるという．すなわち，他種の個体数が変化しなければ，Δt 後の自種の個体数も変化しない．ロトカ・ヴォルテラの式を理解するためには，自主的安定状態になるための条件を探してグラフを描くことが望ましい．式(3.1)の左辺を 0 と置くことにより，種１は次式を満たす時に自主的安定状態となり，

$$N_2 = -\frac{\lambda_1}{\mu_{12}} N_1 + \frac{\varepsilon_1}{\mu_{12}} \qquad (3.2)$$

種２は次式を満たす時に自主的安定状態となる.

$$N_1 = -\frac{\lambda_2}{\mu_{21}} N_2 + \frac{\varepsilon_2}{\mu_{21}} \qquad (3.3)$$

横軸を種１の個体数 N_1，縦軸を種２の個体数 N_2 とし，式(3.2)および(3.3)のグラフを描くと次の４種類に分類することができる。

(a) $\dfrac{\varepsilon_1}{\lambda_1} > \dfrac{\varepsilon_2}{\mu_{21}}, \dfrac{\varepsilon_1}{\mu_{12}} > \dfrac{\varepsilon_2}{\lambda_2}$

(b) $\dfrac{\varepsilon_1}{\lambda_1} < \dfrac{\varepsilon_2}{\mu_{21}}, \dfrac{\varepsilon_1}{\mu_{12}} < \dfrac{\varepsilon_2}{\lambda_2}$

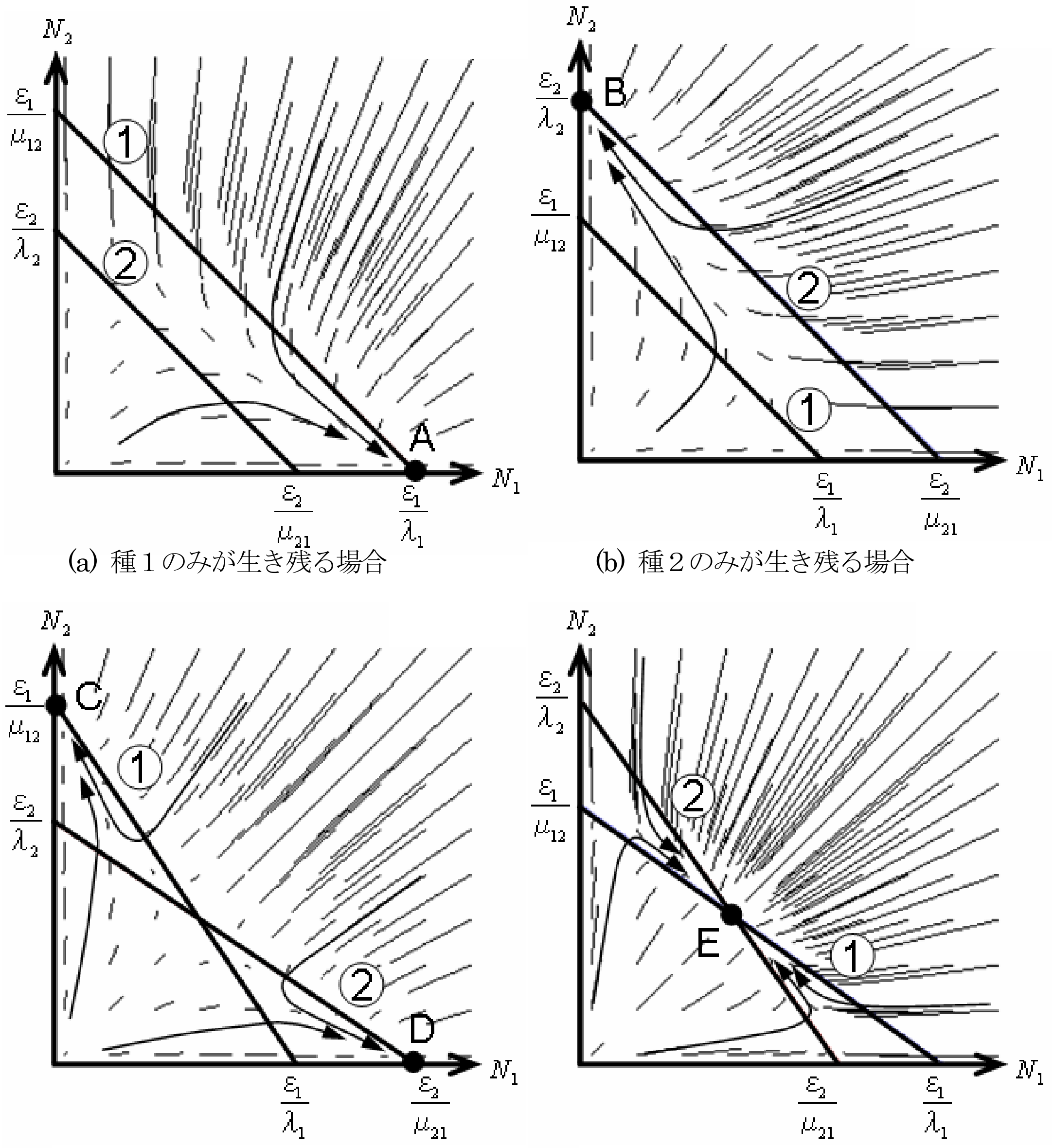
(c) $\dfrac{\varepsilon_1}{\lambda_1} < \dfrac{\varepsilon_2}{\mu_{21}}, \dfrac{\varepsilon_1}{\mu_{12}} > \dfrac{\varepsilon_2}{\lambda_2}$

(d) $\dfrac{\varepsilon_1}{\lambda_1} > \dfrac{\varepsilon_2}{\mu_{21}}, \dfrac{\varepsilon_1}{\mu_{12}} < \dfrac{\varepsilon_2}{\lambda_2}$

これら，それぞれの場合を，図１(a)-(d)に示す.

図１の各グラフおいて，①の線は式(3.2)（すなわち種１の自主的安定状態）を，②は式(3.3)（種２の自主的安定状態）を表す．また，グラフ上の各細線は，種１および種２の個体数がある状態からの一定時間での変化をプロットしたものである．すなわち線の長さが長いほど急激に変化し，短いほどゆるやかな変化を表す．上側の直線より上の点からスタートするとその直線に向かい，下側の直線より下の点からスタートするとその下側の直線に向かい，上側の直線と下側の直線の間に入ると各安定状態に向かって進むようになる．

図１(a)において，①より上側の点からスタートすると①の直線に向かい，②より下側からスター



(a) 種１のみが生き残る場合

(b) 種２のみが生き残る場合

（c）種１または種２が生き残る場合

(d) 種１と種２が共存する場合

図１　ロトカ・ヴォルテラの式の４種類のケース

トすると②の直線に向かうが，①と②の間に入るとAで表される安定状態の点に向かう．すなわち，両種の個体数が１以上である場合には，両種の個体数をどのような状態からスタートしても，種２が死滅し種１のみが生き残る点 A にたどり着き，そのときの種１の個体数は$N_1 = \varepsilon_1 / \lambda_1$である．

同様に，図１(b)の場合には種１が死滅し種２のみが生き残る B の点に収束し，そのときの種２の個体数は$N_2 = \varepsilon_2 / \lambda_2$である．

図１(c)の場合には，スタートする点によって種１が死滅して種２のみが生き残るCの点に収束するか，種２が死滅し種１のみが生き残る D の点に収束する．種２が生き残った時の個体数は$N_2 = \varepsilon_1 / \mu_{12}$であり，種１のみが生き残ったときの個体数は$N_1 = \varepsilon_2 / \mu_{21}$である．図１(c)の場合には，①と②の直線の交点も安定状態であることに注意されたい．しかし，そこからわずかでもずれると，C または D の点に収束する．

図１(d)の場合は両種が共存する D の点に収束し，そのときの種１の個体数は

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{\lambda_2 \varepsilon_1 - \mu_{12}\varepsilon_2}{\lambda_1 \lambda_2 - \mu_{12}\mu_{21}} \\ N_2 &= \frac{\lambda_1 \varepsilon_2 - \mu_{21}\varepsilon_1}{\lambda_1 \lambda_2 - \mu_{12}\mu_{21}} \end{aligned} \tag{3.4}$$

となる．

以上のように，ロトカ・ヴォルテラの方程式を利用すると，始めた個体数に依存せずに一方の種が死滅して他方が生き残る場合（図１(a)(b)）や，始めた個体数によってどちらかが死滅し他方が生き残る場合（図１(c)）や，始めた個体数に依存せずに両方の種が共存する場合（図１(d)）をパラメータを設定するだけで，表現することができる．すなわち，どのようなシミュレーションを行いたいかによって，内的自然増殖率ε_i，種内競争係数λ_i，種間競争係数μ_iを決定し，それぞれの種の個体数を決定すれば，どのように個体数を変化させて安定状態にたどり着くのかを決定することができる．

４． 出産，成長，死亡による個体数の変動

本研究では，シミュレーション開始時に２つの種の個体がそれぞれ１匹以上存在し，その２つの種の群れが互いに影響を及ぼし合いながら時間と共に個体数を変動させるシミュレーションを行う．個体は，親の個体から産まれ，成長し，出産期を迎えて必要ならば子供の個体を出産し，しばらくして死亡する．群れの中のすべての個体はこのようなサイクルを繰り返して種の生存を後生に受け渡す．そのため，個体が出産する子供の数によって群れ全体の個体数が時間と共に変動する仕組みになっている．すなわち，すべての個体が２匹の子供を出産する設定のときには，その群れは時間と共に膨大な個体数へと変化する．また，すべての個体が子供を出産しない設定にしたならば，その群れは時間とともに絶滅する．

４．１ 成長

個体は親から産み落とされることによってフィールド上に出現する．出現時はサイズが小さく，時間と共にサイズを大きくする事によって成長を表現する．

４．２ 出産

固体がある程度成長したら，子供を産むことができる出産期となる．本研究では，簡略化のため，雄・雌の区別を省略し，どの個体も子供の個体を産めるものとしているが，区別をすることも可能である．

魚は一般にたくさんの卵を産むが，卵が孵化して無事に大人まで成長できる魚の確率はとても少ない．たくさんの卵を産み，孵化して死んでいく様子をパソコン上でシミュレーションすることは本研究の目的からはずれるので，簡略化のために産み落とした子供は確実に大人になるという想定のもと稚魚の多死を省略している．また，卵が孵化する様子のシミュレーションも省略し，サメなどの哺乳類のように胎児が親から直接産まれるものとする．

出産期に産む子供の数は群れ全体で同じ値をとるように設定し，次の３パターンがある．

① ２匹の子を産む
群れの中のどの個体も出産期になると子供を２匹産み，群れの個体数は増加する．

② １匹の子を生む
群れの中のどの個体も出産期になると子供を１匹産み，多少の変動はあるが結果的に群れの個体数は一定である．

③ 子を生まない
群れの中のどの個体も出産期になっても子供を産まず，群れの個体数は減少する．

本研究では，上記のように設定しているが，個体ごとに生まれる子供の数を変化させたり，産まれる子供の数が３匹以上にしたりすることも可能である．上記のような設定を用いた理由は，個体数の増加，減少，および維持をもっとも単純な方法で行うことができる手法だからである．

出産数を３つのパターンに分けて群れの個体数の増加，減少，維持を表現するが，どのパターンを使用するかはロトカ・ヴォルテラの式を使って求めた個体数によって決定し，それについては４．４で述べる．

４．３　死亡

個体はあるランダムに決められた時間以上経過すると死亡する．死亡した個体は動きを止め，徐々に薄く小さくして最後に存在を消すことによって死亡を表現する．

４．４　個体数への反映

互いに影響を及ぼしあう２つの種の群れの個体数を変動させるためには，ロトカ・ヴォルテラの式を使って求めたΔt 時間先の個体数を実際の個体数に反映させることが必要である．現在の個体数をx，ロトカ・ヴォルテラの式を使って求めたΔt 時間先の個体数をy としたときに，次の処理を行う．

(1) $x < y$ の場合
群れの出産数を２匹として個体数増加を促す．
(2) $y < x$ の場合
群れの出産数を０匹として個体数減少を促す．
(3) $x = y$ の場合
群れの出産数を１匹として個体数を一定に保つ．

出産期になった個体は，現在の個体数とΔt 時間先の個体数から，何匹生むべきかを自分で判断し実行する．ロトカ・ヴォルテラの式に厳密に従う分けではないが，ほぼ式に従った個体数の変動を行うことができる．本研究では，厳密性よりも，個体数の変動の様子をコントロールすることを目的としているので，このような手法は本研究の目的を満足している．

５．　実行結果

図２に，本システムの実行結果を示す．図２(a)は，システムのスタート時で種１，種２ともに１０匹ずつである．図２(b)は出産の様子を，図２(c)は個体の死亡の様子を表す．

図２(d)-(f)は，図２(a)の状態の種１および種２ともに１０匹の状態からスタートして，種２のみが生き残る状態を表している．この設定では，図２(d)に示すように，最初は両方の種とも増加するが，あるところから種１の個体数が減少し始め（図２(e)），最後には種２のみが生き残る（図２(f)）．

図２(g)-(i)は，同様に種１および種２ともに１０匹の状態からスタートするが，両種が共存する場合である．図２(g)-(i)に示すように両種ともに増加していき，あるところで図２(i)に示すように両種が共存するようになる．

図３(a)に図２(d)-(f)の場合の個体数の変化を、図３(b)に図２(g)-(i)の場合の個体数の変化を矢印付の曲線で表す。

６．まとめ

本研究では，２つの種が同じ餌を争うなどの競争関係にある場合に，数理生態学におけるロトカ・ヴォルテラの式に基づいて個体数を変化させる手法を提案した．各個体は，時間が進むにつれ，成長し，一定時間以上経過すると死亡する．各個体数の制御は，ロトカ・ヴォルテラの式によって求められたΔt 時間先の個体数によって，子を産む数を制御することによって行った．

ロトカ・ヴォルテラの式を利用することによって，それぞれの種の個体数が０でない決められた数からスタートした場合でも，パラメータの設定によって，一方の種だけが生き残ったり，両方の種が共存したりという状況を容易に制御可能である．また，最終的に収束する個体数もパラメータによって設定可能である．

本研究では，互いに競争関係にある２種に対するロトカ・ヴォルテラの式を用いたが，捕食者―被食者系のロトカ・ヴォルテラ方程式も存在する．今後は、これも含め，数理生態学の成果を取り込んだ，群れのシミュレーションを行っていきたいと考えている．

参考文献

[1] Craig W. Reynolds, “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 21(4), Jul. 1987, pp.25-34.

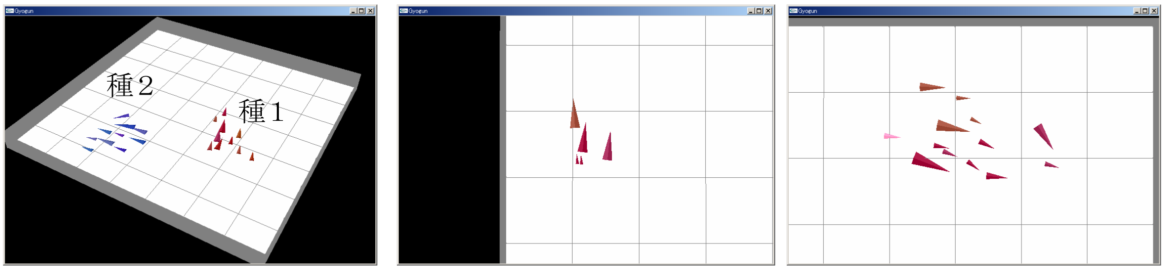
[2] Steven Woodcock, “群れの生成：グループの行動をシミュレーションするシンプルなテクニック”, Game Programming Gemes, ボーンデジタル, 2001, pp.295-307.

[3] D. Terzopoulos, X. Tu, and R. Grzeszczuk, “Artificial fishes: Physics, locomotion, pereception, behavior”, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), pp.43-50, 1994.

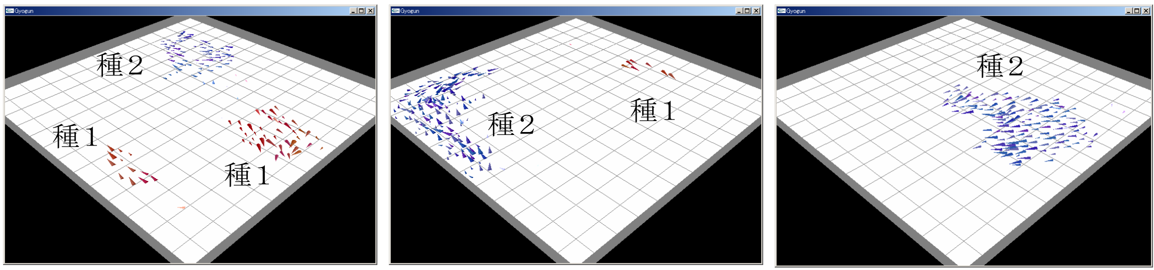
[4] 鵜沼，安生，武内: “群集行動のモデリング－仮想都市空間における人の群れと環境とのインタラクション”, 電気学会論文C, Vol. 115, No.2, pp.212-221, 1995.

[5] 松延，水森，蔡, “自己組織化理論を用いた群れのアニメーション作成”, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会, 122, 2003, pp.59-64.

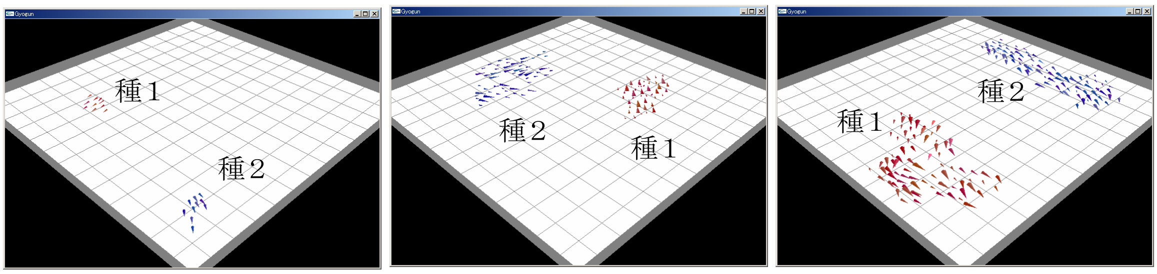
[6] 寺元英著, “数理生態学”, 朝倉書店, 2000.



(a) 種１，２ともに１０匹　(b) 出産　(c) 死亡

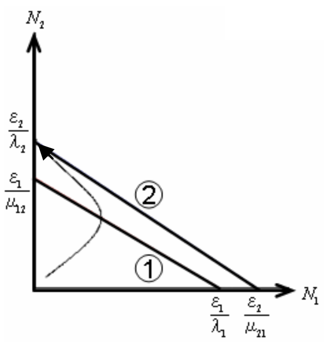


(d) 種２が最後に生き残るが まずは両種とも増加する　(e) 種１が死滅していく様子　(f) 種２だけが生き残った状態

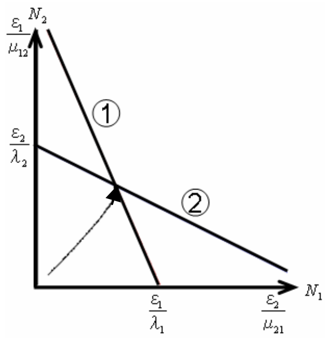


(g) 両種が共存する場合　(h)両種ともに増加する　(i) 両種が共存している状態

図２　実行画面



(a) 種２が生き残る場合



(b) 両種が共存する場合

図３　個体数の変化