

TABLE OF CONTENTS

Newsletter of the Japanese Society for Mathematical Biology No. 77 Supplement Sept 2015

【2014年度 修士論文・博士論文要旨集】

【修士論文】 久保 裕貴・道下 誠	1
【博士論文】 本城 慶多	4

日本数理生物学会 ニュースレター

Sept 2015 Supplement **77**



Boids の規則を用いた動物の群れ形成モデル： 規則の強さによる群れパターンを判別する相図

久保裕貴

九州大学大学院 システム生命科学府 数理生物学研究室

Yukikubo@kyudai.jp

1 はじめに

さまざまな種類の動物が特徴的な群れの行動を示すことが知られている(Vicsek and Zafeiris, 2012)。例として、アリの行列や魚の群れ(メダカの学校のように身近に感じられるものもある)、多数の鳥が見せる非常に同調した飛翔を挙げることができる。また、ヒトに関しても、通路において同方向を目指す人たちが自然と形作る列など、群れ行動を示すことがある。

Reynolds (1987)は、鳥の群れの動きをコンピュータグラフィックスの分野において先駆的に取り入れた。それは Boids (Bird-oid: 鳥もどき)と呼ばれるシミュレーションプログラムで、それぞれの Boid 個体は、Alignment (整列)、Cohesion (引き寄せ)、Separation (回避)の三つの規則に従って群れを作り出す。

本研究では、Boids の規則を用いて、規則の相対的な強弱関係を操作できるシミュレーションモデルを構築し、表れる群れパターンを判別できる相図を作った。また、モデルを詳しく調べるために群れの大きさについての解析を行った。

2 Boids の規則

Boids の三つの規則はそれぞれ以下のような行動プロセスを表す。

Alignment: 周りの個体の進行方向に自身の進行方向を合わせる。

Cohesion: 周りの個体の中心位置へ向かう。

Separation: 周りの個体に衝突することを避ける。

これらの規則を用いて、動物の群れ形成モデルを構築し、その挙動を調べた。

3 群れパターンを判別する相図

従来の群れモデルでは、現実の動物行動に似せる観点が強くなり、相互作用の範囲や規則の適用法がやや複雑に定められていた。本研究では、Boids 規則を可能なかぎりシンプルに適用し、Alignment (整列) と Cohesion (引き寄せ) の強弱関係から、群れのふるまいの状態を示す相図を作成した(図1)。

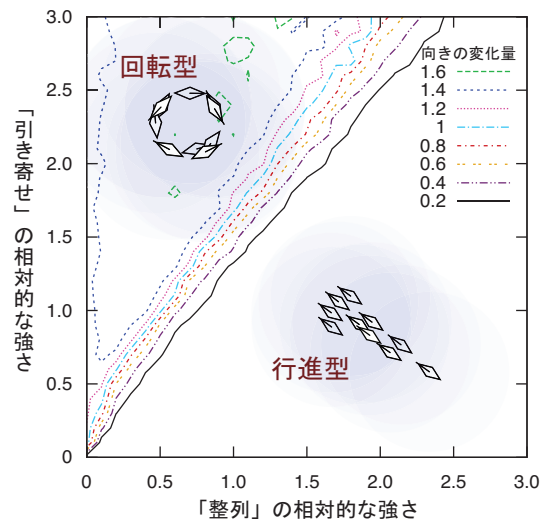


図1. 群れの二つの型を分ける相図

4 「回轉型」の半径を算出する公式

「回轉型」の群れでは、複数の個体が集まり回転円が形成されると、群れ全体はほとんど動かないため、半径を計算できる。回転円の半径を求める公式は、「個体の速さ」と「一回の移動における個体の向き変化量の適用割合(強化係数)」の関係で簡潔に記述された。

参考文献

[1] T. Vicsek, A. Zafeiris - Physics Reports, 2012.

[2] C.W. Reynolds - Siggraph Computer Graphics, 1987.

1. 研究の背景

有性生殖の存在理由は、M.Smith によって「有性生殖の 2 倍のコスト」という命題が提起 (Smith,1971) されてから、様々な仮説が提出されているが、一般解として実際の有性・無性の生物の分布をも説明できるものは、未だ見出されていない。Williams が「変化する環境に、有性生殖は優位性を持つ」(Williams,1975) という魅力的な仮説を提出し、それに対して、Smith は注目しながらも、数理とシミュレーションで検証し、「世代毎に環境の相関が変化するという特殊な環境においてのみ、有性生殖は優位性を持つ」と、事実上 Williams の仮説を否定した。その見解が現在でも議論の前提として捉えられている。

2. 研究内容

(1) シミュレーション 1 … 変わる環境における、有性・無性両集団の頻度推移

私は Smith のシミュレーションを分析し、そこでは有性生殖の一番の特徴である多様性が制限的に扱われていることを知った。そこで、多様性が制限的にあつかわれなかった条件でのシミュレーションを作成した。つまり有性集団では、「殆どの個体は、異なる表現型を持つ」且つ「表現型の異なる個体は、殆どが異なる適応度を持つ」という条件にシミュレーションの設定を変更した。その結果は Smith のものとはかなり異なるものとなった。

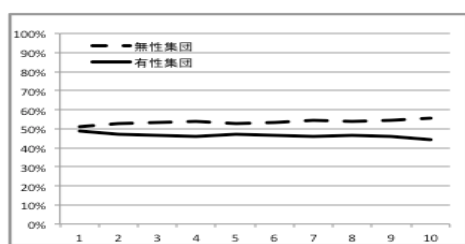
(シミュレーション 1: 変化し続ける環境で、有性集団と無性集団を競わせ、10 世代間の頻度を調査

* パッチ数:200/環境が変化 各パッチ/親の数:6 個体 夫々の子の子の数:6 個体の例

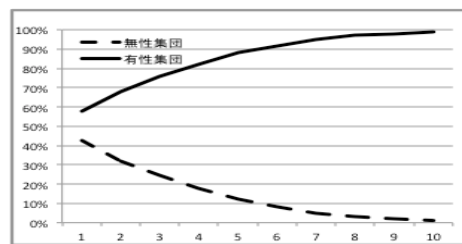
* 有性集団:実線 無性集団:破線 縦軸:頻度 横軸:世代数 当初の頻度は各 50%ずつ

(図 1:環境に相関がない場合/Smith オリジナル)

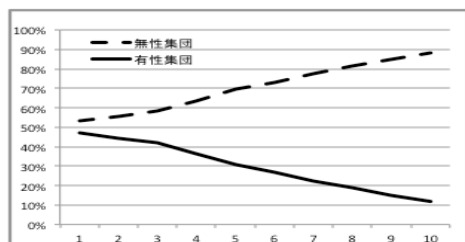
(図 2:有性の多様性大/モディファイ版)



(図 3:環境に相関がある場合/Smith オリジナル)



(図 4:同左/有性の多様性大/モディファイ版)



Smith のオリジナルのシミュレーションでは、環境に相関があると有性の優位性が失われるが(図 3)、

有性に多様性を多く持たせると環境に相関がないときと同じように、有性が優位性を持つことが分かった。また Smith のシミュレーションによる有性・無性の両集団の頻度は集団が持つ表現型の数とその分散（標準偏差）で表せることが分かった。

* 有性集団の任意の世代の頻度。 $F_s = NE / (2Fa' / Fs' + NE)$ ここで、 F_s : 有性集団の頻度 N : 子の数 E : 有性の子の表現係数に関する標準偏差効果(この事例では 0.6) $'$ は前世代を表す。2 は 2 倍のコストから派生する。

(2) シミュレーション 2 … 有性・無性両集団の表現型数の減少推移

次に有性と無性の両集団が表現型をどの程度の間ながく保持できるのかというシミュレーションを行い、下記の結果を得た。

(シミュレーション 2: 変化し続ける環境での表現型の減少スピードを調査)

(図 5): 有性集団: 実線 無性集団: 破線 縦軸: 表現型数 横軸: 世代数 当初の表現型数は理論上 2^{10} から始まる。

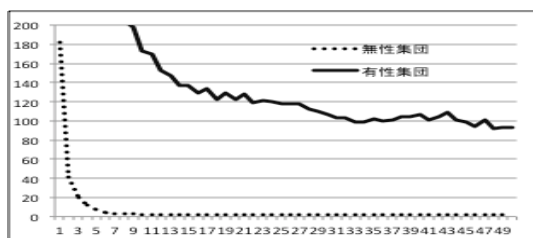


図 5 は変化し続ける環境の中で、当初多くの表現型を有する有性・無性両集団が、選択によりどれ程長く表現型数を維持できるかをシミュレーション。左図例は、有性集団は優性・劣性の 2 層の allele を設定。環境は 4 ブロック。表現型と同じ標準偏差を持つランダム性を加味。

上図のように、無性集団はあっという間に表現係数を失うが、比較有性集団は長い間表現係数を保持していることが分かった（様々な条件でシミュレーションを行ったが、10 世代目では略 100 倍、30 世代目では略 50 倍の表現型数を持つ）。

(3) 結論 … 2 つのシミュレーションを通じて

- ① シミュレーション 1 から、両集団の頻度は表現型の数とその分散（標準偏差）で決まること、また環境の相関の有無に関わらず、有性が優位を持つ場面の多いことが分かった。
- ② シミュレーション 2 から、殆どの集団では、無性集団は僅かな表現型数しか保持せず、有性集団はかなりの数の表現型数を保持していることが分かった。
- ③ シミュレーション 2 の (10~30 世代目の) データをシミュレーション 1 (モディファイ版にランダム性を加味) に投入し、10 世代の推移を調査したところ、ランダム性の (標準偏差の) 大きさが表現型のその 1/2 より小さい場合には、有性集団が圧倒的な優位性を持つことが分かった。
- ④ 以上より、有性集団はその多様性に基づく競争力が無性集団を凌駕することから、有性生殖が存在・維持されていると考える。この考え方により、有性・無性の分布も説明できると考えており、次の課題とする。
- ⑤ しかしながら、この考え方は前提として、a. 変化する環境 b. ランダム性は一定内の大きさ c. 表現型の標準偏差は一定内の大きさ を置いており、この検討が課題である。

以上

博士論文

Game-theoretic models of human behavior: Malaria prevention and emissions trading

本城 慶多

日本学術振興会特別研究員 DC1
北海道大学大学院環境科学院環境起学専攻

要旨

ゲーム理論の人間社会への応用例として、蚊帳ゲーム (Mosquito net game) と排出権取引ゲーム (Emissions trading game) を紹介する。蚊帳ゲームは、マラリアの流行地域で暮らす人々の蚊帳利用を説明する非協力ゲームである。殺虫剤処理された蚊帳はマラリアの予防に有効であり、さまざまな機関が流行地域への配布を行っているが、その一部は経済活動 (魚を獲る網, 魚を干す網, 農作物を保護する網など) に転用されている。蚊帳ゲームのプレイヤーは、蚊帳をマラリア予防に用いる戦略 T と、蚊帳を経済活動に転用する戦略 F のどちらか一方を選択する。戦略 T は選択したプレイヤーの感染確率を低下させる (個人効果)。一方、戦略 F は選択したプレイヤーの労働生産性を上昇させる (転用効果)。また、蚊帳は共同体効果をもち、プレイヤー全員の感染確率を低下させる。共同体効果は戦略 T を選んだプレイヤーが多いほど強いものとなる。なお、マラリアに感染したプレイヤーの労働生産性はゼロとする。蚊帳ゲームのナッシュ均衡を求めたところ、戦略 F が個人合理的な戦略になりうることが分かった。所得の低い地域では、蚊帳の転用により生じる期待利得が、マラリア感染に伴う期待損失を上回る。それゆえ、感染確率が非常に高い状況であっても、蚊帳の転用が個人合理的な戦略となる。ただし、蚊帳の転用は必ずしも社会合理的 (パレート効率) ではなく、所得の低い地域は社会的ジレンマに陥る可能性がある。蚊帳ゲームの結果は、蚊帳の転用が貧困の問題と密接に関連していることを示唆している。

排出権取引ゲームは、京都議定書で導入された国家間排出権取引を説明する協力ゲームである。排出権取引は、温室効果ガスを排出する権利 (排出許可証) の割当と取引を通じ

て、社会全体の排出量を調整する制度である。許可証が不足した国は、追加の許可証を他国から購入する必要がある、そのコストは排出量を削減するインセンティブとなる。ところが、京都議定書に基づく国家間排出権取引では、許可証の価格が低迷しており、十分な排出削減につながっていない。排出権取引ゲームにおいて、買い手は少なくとも1人の売り手と提携を結んだ場合に限り、許可証を購入する。買い手は許可証の代金を売り手に支払う代わりに、提携から何らかの利益（国際協調の利益）を受け取る。許可証の価格は、提携メンバーの交渉によって決まり、個人合理性と社会合理性を共に満たすものとする。シャプレー値を用いてプレイヤーの交渉力を評価したところ、需要側交渉力（DBP）が供給側交渉力（SBP）を上回ることが分かった（ $DBP \geq SBP$ ）。許可証価格は買い手の支払意思額（WTP）と供給側交渉力の積で表される（ $P = WTP \times SBP$ ）。需要側と供給側の交渉力がトレード・オフの関係にあることから（ $DBP + SBP = 1$ ）、支配的な買い手の存在は許可証価格の低迷につながる。市場データを用いた分析によると、買い手の高い交渉力は、京都議定書が抱える欠陥（弱い遵守強制力、許可証の過剰な割当、アメリカの不参加など）に由来する。排出権取引ゲームは、不完全競争下において許可証の価格が下落するメカニズムを簡潔に説明している。