

Distinction Game

西村信一郎

電子技術総合研究所 知能システム部

email: nshin@etl.go.jp

1 群れを区別すること

誰もが知っている通り、多くの動物や昆虫は群れをなして生活している。これら群れをなす種は常に次のような問題を解決しなくてはならない：「自分はどの群れに属すべきか？」群れをなす動物は自分がどの群れと行動すべきかを判断する能力がある。少々極端な話ではあるが、だれもシマウマとチーターが一つの群れをなすとは思わないだろう。シマウマは、すくなくともチーターの群れを見分ける能力を持っている。一つの群れは一つの種で構成されていることがほとんどである。¹ また多くの種では、同じ種で構成されている他の群れの侵入を拒む。アリや類人猿などがその例に挙げることができる。

群れを区別しなければいけない理由とそのための機構は色々ある。しかしそれがどうであろうとも、群れを区別することは共通の問題をはらんでいる。群れの特徴の一部だけをもって区別しなければならないということである。群れの特徴の全てをとらえることには意味がない。第一にそれは膨大すぎてとらえることは困難であるし、第二に群れの特徴の全てをとらえることができたとしてもすぐに変化してしまうため、群れの区別という問題にはまるで役に立たないからである。

しかし、群れの特徴の一部だけで区別をおこなうことは、必然的に区別の失敗の原因となる。アリが巣の匂いで仲間を区別するとき、近くに巣を造っている多の群れと近い匂になってしまうかもしれない。だからと言ってさらに沢山の

¹ただし鳥類や魚類では、混合種の群れはよくみられる。文献 [1] 等を参照のこと。

特徴をとらえようとする、今度は同じ巣に住んでいるアリを敵と認識してしまう結果になってしまうだろう。

「区別は困難であるが、それでも区別しなければならない状況」は、生物にとって一般的な問題であり、これが色々とも面白い結果をもたらすに違いない。この報告では、区別の困難性が「協力関係」や「宿主-寄生体関係」と密接な関連を持っていることを指摘する。これらの関係は、生物学、特に生態学においてメインテーマであるが、区別という観点から述べられていることはあまり見受けられない。

2 モデル

区別する能力の進化を考えるため、以下のようなモデルを考える。A 種と B 種の二つの種が存在し、どちらとも同じ種に属する個体を見分けて集まらなければならない。どのように同じ種を見分けるかは個体によって異なる。どちらの種とも、見分ける方法を少しずつ進化させる。自分の種を見分けられない個体は子孫を残せず、より正確に自分の種を見分けることのできる個体は子孫を残すことができる。接触して有性生殖をしなければならない地上の動物にとってこの仮定は自然である。しかしモデルを単純にするため、有性生殖は直接扱わない。

Breder は魚群の理論的研究のため、個体を質点とみなして魚群を力学的なモデルで研究した [2]。また、Shimoyama らは質点に「頭の向き」という自由度を新たに加えて、色々な群れのパターンを出現させることに成功した [3]。ま

た, Nishimura らは, この方法をベースに prey-predator のダイナミクスを研究した [4]. これらの研究をモデルを基礎にしよう. 個体 i の位置ベクトルを $\vec{r}_i$, 頭の方角を示す単位ベクトルを $\vec{n}_i$ とすると,

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = g\vec{E}_i + \vec{n}_i, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \sin(\psi_i - \theta_i) \quad (2)$$

ここで, g は定数, θ_i は頭の向きの角度表示, ψ_i は, 速度 $\frac{d\vec{r}_i}{dt}$ の角度表示, $\vec{E}_i$ は後で詳しく説明するが, 単位ベクトルである. もし, $g\vec{E}_i = 0$ ならば, 最終的に個体 i は頭の向き $\vec{n}_i$ に進み続ける.

単位ベクトル $\vec{E}_i$ は, 個体が好む「パターン」への方向を表している. このパターンは 2 個体で構成され, この 2 個体の頭の角度はある決まった角度 Δ_i にほぼ等しく, さらにある一定時間以上保たなければならない. 2 個体間の距離はある定数以下でなければならない. これを「ターゲットパターン」と呼ぶ. (ターゲットパターンについては, 文献 [5] も参照.) 図 1 には, ターゲットパターンとそれに近づこうとしている個体が描かれている. 重要なことはどの角度を好むかは個体によって異なることである. 個体はこのターゲットパターンを利用して自分と同じ種を見分けなければならない. 複数個ターゲットパターンがある場合には, 最も近いものが選ばれる. 個体には円盤上のスコープがあり, それより外にあるターゲットパターンには向かわない. また, ターゲットパターンに自分自身が含まれることはない.

個体は次に述べる「ゲーム」の得点に従って子孫を残すことができる. 個体は同種の個体に囲まれたときには得点が高くなり, 異種の個体に囲まれた時には得点が低くなる (図 2). このルールは自分の種を見分ける能力を高くする効果を持つ.

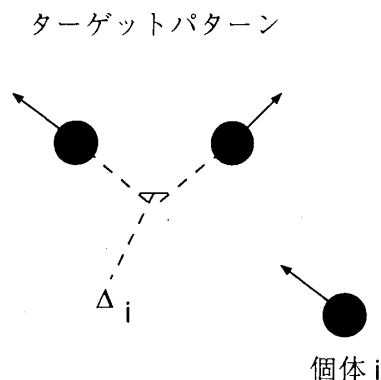


図 1: 左上の 2 個体の頭の相対角度が Δ_i のとき, 右下の i 個体はその方向に向かう. このとき, 左上のペアをターゲットパターンという.

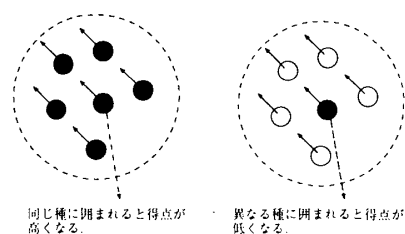


図 2: 左図: 同じ種の個体に囲まれたとき得点が高い. 右図: 違う種の個体に囲まれたとき得点が低くなる.

このゲームは, あるステップ数続けた後, 最終的な得点によって子孫を残す個体と消滅する個体が決められる. 得点順に並べたとき, 上から 3 番目の個体は子孫を残すことができ, 下から 3 番目は消滅する. この操作は, A, B 種について独立に行う. A 種の子孫は必ず A 種であり, B 種についても同様である. 子孫を残すとき mutation がおこる, つまり, Δ_i は少し変化して手渡される. A, B 種の個体が同じ Δ_i を持つことは許されているが, 実際にはそのような状況に進化しないことが容易に予想できる. もしそうになってしまうと, 2 種は完全に混ざってしまい, 平均得点は下がってしまうことになるか

らである。

尚、紙面の都合上詳しい説明ができないので、文献 [6] の “Distinction Game Dynamics” の章を参考のこと。

3 結果

十分に進化させた後にどのような運動が見られるかを示す。図 3 から読みとれることは、一方の種が集まって、片方の種がバラバラになってしまうということである。初期条件とランダムシードを変えて何度もシミュレーションを繰り返すと、ほとんどの場合同じような状態になることがわかった。これを “typical case” と呼ぶことにしよう。しかしまれに違う進化状態を見ることができる。図 4 では、2 種が交互に集まっていることが見てとれる。これを “untypical case” と呼ぶ。

以上の二つの事柄は、次の図ではっきりとする。図 5 は、横軸が時間、縦軸がそれぞれの種に対して平均距離をはかったものである。左図 (a) は typical case のものである。片方の種が集積し、片方が分散することがよくわかる。右図 (b) は untypical case のものであり、両種が逆位相で集まっている。

どのように進化していくかを述べよう。図 6 は、ターゲットパターンの判定条件である Δ_i の A, B 種内における平均が、時間とともにどのように変化していくかを示したものである。図中 2,3,4 は typical case に対応する。片方の種が $\Delta_i = 0$ に「落ちる」と、もう片方はふらふらとうろつく様子がみてとれる。図中 1 は typical case に対応し、どちらの種も大体一定の値に落ち着いていることがわかる。

typical case では、二つの種が「宿主-寄生体 (host-parasit) 関係」にあると解釈できる。図 8 は、二つの種の平均得点の差を表したものである。横軸と縦軸はそれぞれ種 A, B の Δ_i の平

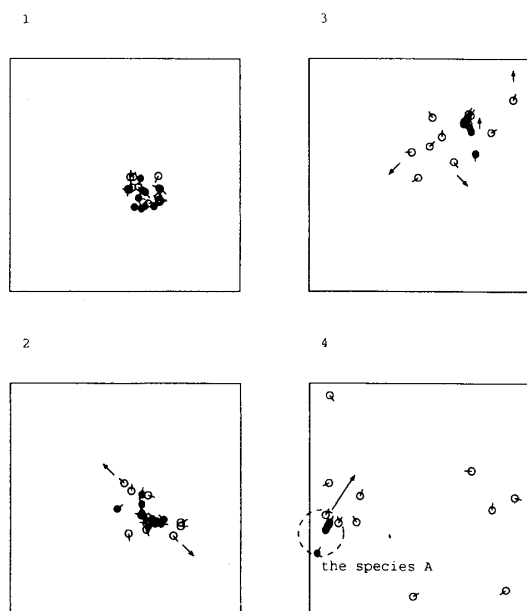


図 3: typical case のときのスナップショット。白丸と黒丸で違う種を表現している。(1)–(4)の順で時間が進んでいる。最終的に黒い種のだけが群れを作り、白い方はバラバラになる。

均値である。ただし、進化は行わず、同じ Δ_i の値で何度も計算して平均した。この図から、片方が 0 に近い値をとったときに 2 種の平均得点の差は最大になることがわかる。図 9 は、片方の Δ_i を変化させたときの、もう片方の平均得点である。この図から、 Δ_i のとき、平均得点はほぼ最小になる。以上の二つの図から、 $\Delta_i = 0.0$ をとった種の平均得点は上がり、もう片方の平均得点は著しく下がることになる。

図 7 は、実際にどのようなことがおこっているのかを模式的に表現したものである。最初に黒があつまり、そのターゲットパターンを利用して白が集まり、その間に黒が分散し、今度は黒が白のターゲットパターンを利用して集まる。これを何度か繰り返した後、白が使えないパターンになり、白がバラバラになる。途中で互いに相手を利用しあう状態を経て、最後に黒の「裏切

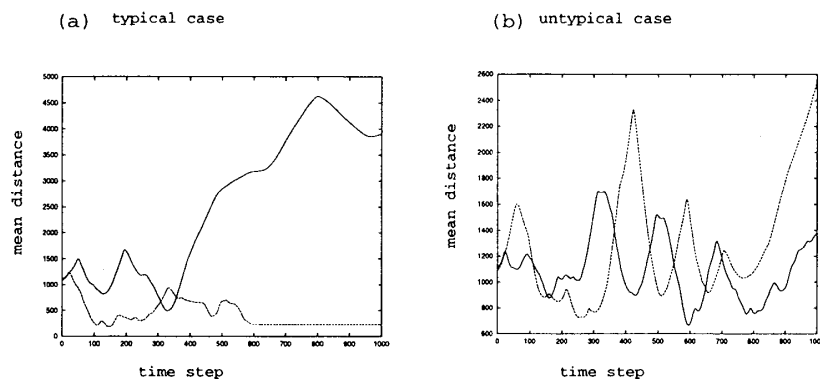


図 5: 横軸はステップ数で, 縦軸は平均距離. (a) 片方の種だけが集まり, もう片方はバラバラになる. (b) 逆位相で振動している. つまり, 交互に集まっている. よく見ると, (a) でも, 途中で逆位相で振動していることが見てとれる.

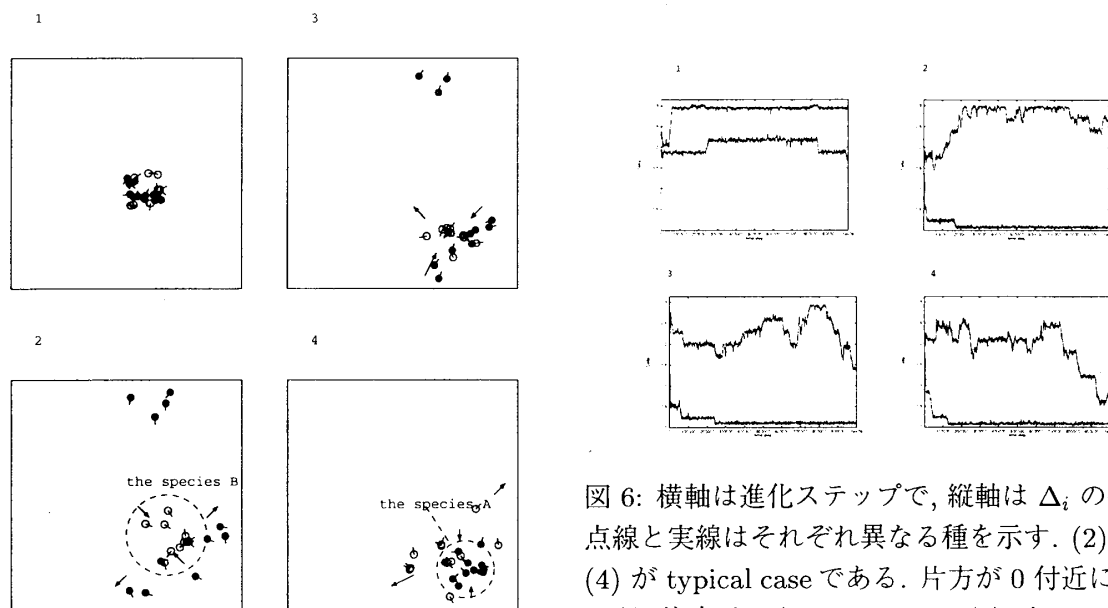


図 4: typical case のときのスナップショット. 最初に白い方が心持ち集まり (2), 次に黒い方が集まっている (4).

図 6: 横軸は進化ステップで, 縦軸は Δ_i の平均. 点線と実線はそれぞれ異なる種を示す. (2), (3), (4) が typical case である. 片方が 0 付近に落ちるが, 片方はふらついている. (1) は untypical case で, typical case に比べ, 両方ともほぼ落ち着いた値に収束する.

り」によって白が分散してしまう。これが、片方の得点が高く、片方の得点が低くなる原因であると思われる。模式図で白はどんなターゲットパターンを選んでも最終的にはバラバラになってしまうので、色々な値をさまようことになる。なぜ、片方が集まっているときに片方が分散してしまうのかは、残念ながらよくわかっていない。

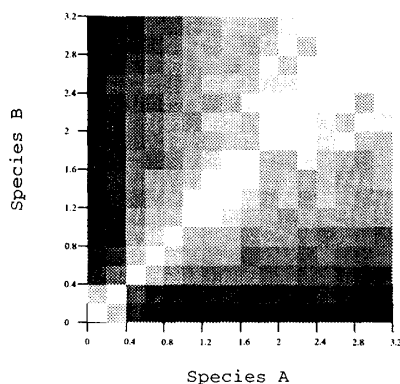


図 8: 両種の平均得点の差をグレースケールで表示した図。横軸と縦軸は、それぞれ種 A, B の Δ_i の平均を示す。色が濃いほど、二つの種の平均得点の差が大きい。

untypical case では、二つの種は「互惠 (mutual cooperation) 関係」にあると解釈できる。この互惠関係はどの程度強固なものか考えるため、二種が互惠関係にあるとき、むりやり片方をとりのぞいたとき、残った片方がダメージを受けるかを調べた。(1) 1 種しかいない場合、(2) 2 種が存在する場合、(3) 初めに 2 種存在するが、途中で片方を取り除いた場合の 3 つの場合で、平均距離の分布が異なるかどうか検定した。その結果、平均距離がもっとも小さいのが (2) の分布で (1), (2) の順に大きい。したがって、互惠関係があるときがもっともバラバラになりづらいが、途中で互惠関係が断たれたときは、最初から関係がなかったときに比べ、バラバラになりやすいことがわかった。untypical case は 図 7

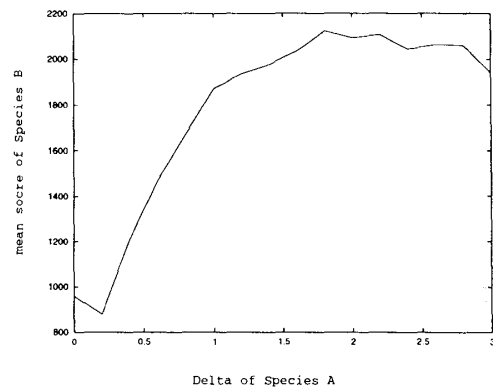


図 9: 横軸は、種 A の Δ_i の平均で、縦軸は種 B の平均得点 (全ての平均 Δ_i で平均したもの)。種 A の平均 Δ_i が 0 に近いとき、種 B の平均得点は低くなる。

で、最後の「黒の裏切り行為」がなく、交互に密集・分散を繰り返していると考えられる。

4 議論

結果では、2 種は互いのパターンを利用している状況を説明した。即ち、自分の群れをターゲットパターンで認識する状況は見られなかった。ターゲットパターンは自分の群れと他の群れを区別する「タグ」として利用できないものであったのだ。だがしかし、進化的になにもおこらなかったわけではなく、二つの進化状態があった。一つは片方だけが群れを維持することである。自分自身を認識できなくても、もう片方が群れを作ることや妨ぐことができるならば、結果的に自分の群れを維持することができる。もう一つは、交互の集まることにより、二つの群れが混合することを防ぐことだ。時間的に役割を交換していると考えてよい。

結果は、もちろんモデルの特殊な特徴に依存して得られたものであるが、上の結果に対する解釈は妥当なものであり、機構はまったく違う

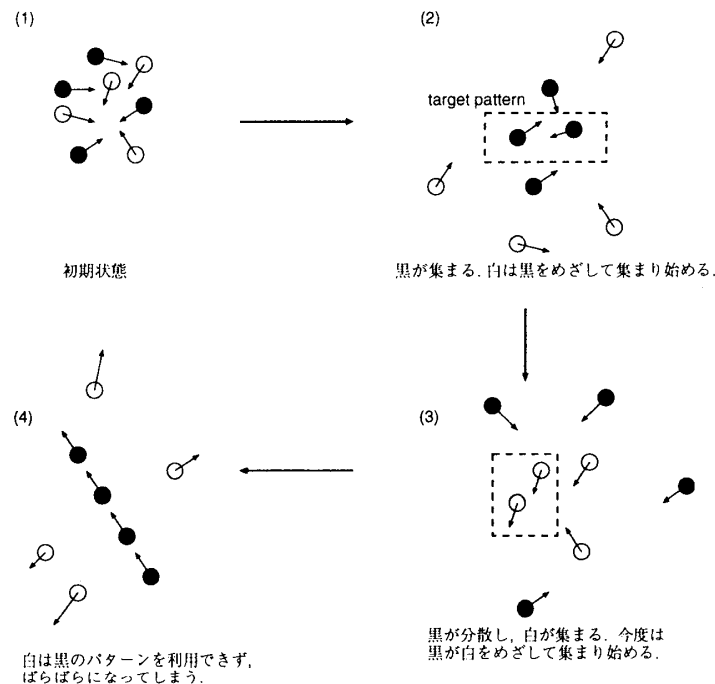


図 7: (1) 最初にランダムに置かれる。(2) 黒い方の種が先に集まり、白い方にとってのターゲットパターンができる。それに向かって白い方の個体が集まる。(3) 今度は白が密集し、黒がそれを利用してあつまる。(4) typical case では最終的に黒い方の種が白の利用できないパターンになり、白がバラバラになる。

ものであるだろうが、自然界に十分存在しうる。注目すべき点は、宿主-寄生体関係と互惠関係を「区別できないこと」と結びつけて議論できることである。区別が可能であるのならば、2 種の間になんの相互作用もないだろう。区別できないからこそ、2 種の間に相互作用が生まれたのだ。

自然界における宿主-寄生体関係と互惠関係を「区別」という観点から議論すべきである。区別の観点がもっともしっくりいくのが、免疫系である。ウイルスと免疫系が長年攻防してきたのは、結局免疫系に自己抗原と非自己抗原の決定的な区別ができないからだ。しかもウイルスにはまったく自分自身を認識する能力はなく、せいぜいできることと言えばターゲットとなる細胞の表面とそうでないものを区別するだけだ。免

疫系も自己抗原にはなるべく反応しないという性質によって消極的にしか自己認識できない。

今回のモデルでは、「ターゲットパターン」を用いて区別の問題を議論したが、2 個体の頭の相対角度だけで定義した。したがって、複雑化していくことができない。進化的に認識すべきパターンを複雑化するような機構を取り入れることが今後の課題である。

参考文献

- [1] Malcolm Edmunds. *Defence in Animals*. Longman Group Limited, London, 1974.
- [2] C. M. Breder. *Equations ascriptive of fish*

school and other animal aggregations. *Ecology*, 35(3):211–129, 1954.

- [3] N. Shimoyama et al. Collective motion in a system of motile elements. *Physical Review Letters*, 76(20):3870–3873, 1996.
- [4] Shin I. Nishimura and Takashi Ikegami. Emergence of collective strategies in a prey-predator game model. *Artificial Life*, 3:243–260, 1998.
- [5] S. I. Nishimura and T. Ikegami. Emergence and maintenance of relationships among agents. In H. Kitano C. Adami, R. Belew and C. Taylor, editors, *Artificial Life VI*, pages 438–442. MIT Press, 1998.
- [6] Shin I. Nishimura. *Simulated Group Motion of Artificial Animals*. PhD thesis, the Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 1999. <http://infidel.c.u-tokyo.ac.jp/~shin> から取り寄せできます.