生物行動の数理モデル化に関する一考察

2008MI242 竹田純一郎
指導教員：小藤俊幸

1　はじめに

さまざまな環境，状況における生物集団の行動を知ることは，生物学に限らず，工学的な観点からも興味深く，そうした生物行動に関する研究が従来から盛んに行われてきた．例えば，文献 [3] では，ダンゴムシをはじめとして，タコやカニなどについて，行動観察を中心とした研究が紹介されている．また，ゲーム理論などの数学的な手法や計算機シミュレーションを用いて，数理的な方法に基づく研究も行われている（例えば，[1, 2] 参照）．

文献 [4] では，コオロギのオスどうしの争いについて研究がされている．具体的には，オスどうしを実際に戦わせる実験を行い，実験結果に基づいて、数理モデルを導出している．さらに，得られたモデルで生物学実験の結果が説明できることを計算機シミュレーションによって示している．

本研究では，この研究を参考にし，より単純化した数理モデルを用いて，コオロギのオスどうしの争いについて考察する．

2　生物学実験

ここでは，文献 [4] に述べられているクロコオロギ (Gryllus bimaculatus) を使った実験を紹介する．クロコオロギは地中海原産で，日本では八重山諸島に生息する黒いコオロギである．オスどうしが遭遇すると，触覚を打ち振るわせながら前傾姿勢を取って相手を威嚇する．相手の威嚇に対してどちらも退かなければ，相手の体にかみつくなどの闘争行動が始まる．闘争は一方が退くと決着し，勝者は敗者を追い払うことになる．

こうした闘争行動に関して，[4] は２種類の実験を行っている．一つは，時間を置いて，２度の対戦を行わせるというものである．３～４日隔離したオスどうしをシャーレに入れ接触させ，闘争を促す．これを 10～20 ペア行う．闘争に決着が付いたら，一旦引き離し，15 分後に前と同じ相手や別の相手に接触させる．その際の行動を観察したところ，次のような結果が得られたと言う．１回目の接触では，75 %の個体が闘争するが，１回目の敗者のうち，２回目も闘争するのは 10～20 %で，残りは争いを避けて逃げるか，相手に関心を示さなかった．

この結果から，対戦に勝ったコオロギは，引き続き闘争行動を行う優位な個体となり，負けたコオロギは闘争を回避する劣位な個体になりやすいと結論付けている．以下，優位な個体を強気コオロギ，劣位な個体を弱気コオロギと呼ぶことにする．

２つめの実験は，集団行動に関するものである．大，中，小の３種類の長方形の容器（アリーナと呼んでいる）に，それぞれ４匹のコオロギを放し，行動を観察したところ，次のような結果が得られたと言う．大のアリーナの場合，複数のコオロギが強気コオロギであった．中のアリーナの場合，１匹だけが強気コオロギで，残りの３匹は弱気コオロギとなった．小のアリーナの場合，４匹とも弱気コオロギとなった．

3　青沼の数理モデル

文献 [4] では，さらに，仮想コオロギを用いた計算機シミュレーションが紹介されている．仮想コオロギ（以下，単にコオロギと呼ぶ）は平面内の領域を直進とランダムな方向転換を繰り返しながら移動する．各コオロギには，パーソナルフィールドと呼ばれるコオロギを囲む円形の領域が設定されていて，２匹のコオロギのパーソナルフィールドが重なったとき，両者は接触したとみなす．

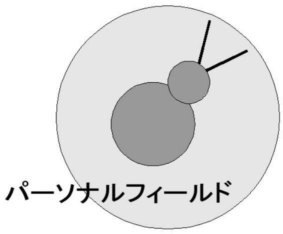

図 1　仮想コオロギ

接触したコオロギは確率 P で闘争を回避し，相手が闘争を回避し，自分が回避しなかった場合にのみ，闘争に勝ったとみなす．したがって，両方が負ける場合もある．コオロギが闘争を回避する確率 P はコオロギの弱気度と呼ばれる指標 w で $P = w$ と定まり，指標 w は対戦の勝敗によって，次式のように定まる．

$$w_{n+1} = k\, w_n + \varepsilon_{\mathrm{loss}}\, \eta_{\mathrm{loss}} - \varepsilon_{\mathrm{win}}\, \eta_{\mathrm{win}} \tag{1}$$

ここで，w の添え字 n は時間の経過を表し，シミュレーションでは１ステップが 100msec に設定されている．また，k $(0 < k < 1)$, $\varepsilon_{\mathrm{loss}}$, $\varepsilon_{\mathrm{win}}$ $(\varepsilon_{\mathrm{loss}} > 0, \varepsilon_{\mathrm{win}} > 0)$ は定数であり，η_{loss}, η_{win} は次のような関数である．

$$\eta_{\mathrm{loss}} = \begin{cases} 1 & \text{(負けたとき)} \\ 0 & \text{(そうでないとき)} \end{cases} \tag{2}$$

$$\eta_{\mathrm{win}} = \begin{cases} 1 & \text{(勝ったとき)} \\ 0 & \text{(そうでないとき)} \end{cases} \tag{3}$$

大，中，小の３種類の広さの長方形領域に４匹の仮想コオロギを置いて，シミュレーションを行った結果，大領域では，２匹が強気コオロギ，２匹が弱気コオロギ，中領域では，１匹が強気コオロギ，３匹が弱気コオロギ，小領域では，４匹とも弱気コオロギになったと言う．なお，強気コオロギと弱気コオロギは，弱気度 w が 1/2 より小さければ，強気コオロギ，1/2 より大きければ弱気コオロギのように区別されている．

4　簡易化したモデル

コオロギが２匹だけの場合を考える．この場合，アリーナの広さは，２匹が遭遇する確率に置き換えて考えることができる．両者がランダムに動くものとすると，アリーナが広いほど遭遇する確率は低くなり，逆に、狭いほど遭遇する確率が高くなる．

また，[4] のモデルでは，対戦したコオロギの両者がともに逃げなかった場合は，少なくとも一方が逃げるまで対戦を繰り返すことになっている．この部分も簡単化し，両者がともに逃げなかった場合は引き分けとする．

２匹のコオロギをコオロギ０とコオロギ１とする．時間は $n = 0, 1, ...$ の離散的な時刻を考えて，時刻 n におけるコオロギ０の弱気度を $w_0(n)$，コオロギ１の弱気度 $w_1(n)$ とする．また，p_{enc} を両者が遭遇する確率とし，$0 \leq p_{\mathrm{enc}} \leq 1$ の値を与える．

各時刻 n において，２匹のコオロギの弱気度を以下のように定める．まず，区間 [0, 1] 上の一様乱数を生成し，値が p_{enc} より大ならば，両者は遭遇しなかったものとし，時刻 $n+1$ での弱気度を次式で定める．

$$w_i(n+1) = kw_i(n)\ (i = 0, 1) \tag{4}$$

乱数の値が p_{enc} 以下ならば，両者は遭遇したものとする．新たに区間 [0, 1] 上の一様乱数を２つ生成し，第１の乱数の値が $w_0(n)$ 以下ならば，コオロギ０は闘争を回避し，第２の乱数の値が $w_1(n)$ 以下ならば，コオロギ１は闘争を回避する．勝敗は，両方とも回避した場合は，両方とも負け，一方が回避し，他方が回避しなかった場合，回避しなかったほうの勝ち，両方とも回避しなかった場合は引き分けと決める．

そのような勝敗のもと，コオロギ i（i は０または１）の弱気度を以下のように定める．コオロギ i が負けた場合，

$$w_i(n+1) = kw_i(n) + \varepsilon_{\mathrm{loss}} \tag{5}$$

コオロギ i が勝った場合，

$$w_i(n+1) = kw_i(n) - \varepsilon_{\mathrm{win}} \tag{6}$$

とし，引き分けの場合は，(4) とする．

5　数値実験結果

図２に，遭遇確率を $p_{\mathrm{enc}} = 0.4,\ 0.8,\ 0.85$ の３通りに変えて計算した結果を示す．横軸が n で，□がコオロギ０の弱気度 $w_0(n)$，$*$ がコオロギ０の弱気度 $w_1(n)$ を表している．パラメータの値を $k = 0.8, \varepsilon_{\mathrm{loss}} = 0.5, \varepsilon_{\mathrm{win}} = 0.3$ にとり，初期値を $w_0(n) = w_1(0) = 0.8$ で与えた場合の計算結果である．

遭遇確率が低い場合 ($p_{\mathrm{enc}} = 0.4$) は，２匹とも強気コオロギになったのに対して，$p_{\mathrm{enc}} = 0.8$ では，コオロギ０が弱気コオロギ，コオロギ１が強気コオロギとなった．さらに遭遇確率を上げると ($p_{\mathrm{enc}} = 0.85$)，２匹とも弱気コオロギになった．

パラメータの値を $k = 0.8, \varepsilon_{\mathrm{loss}} = 0.5, \varepsilon_{\mathrm{win}} = 0.3$, $p_{\mathrm{enc}} = 0.8$ にとり，初期値を $w_0(n) = 0.1,\ w_1(0) = 0.8$ で与えた場合の計算結果を図３に示す．この場合は, 両方とも強気コオロギになっている．

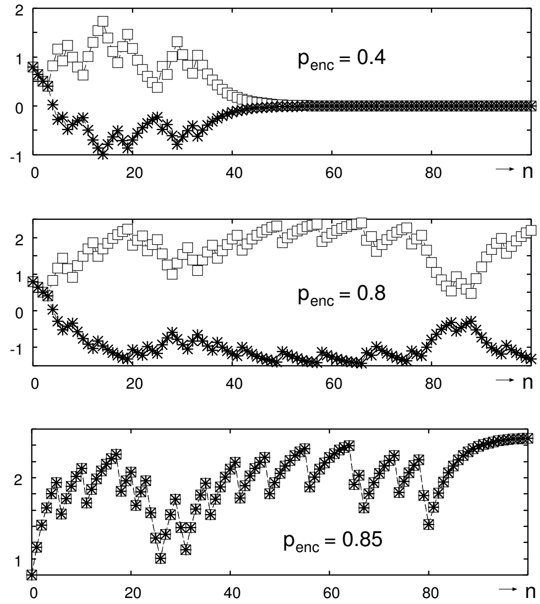

図２　数値実験結果

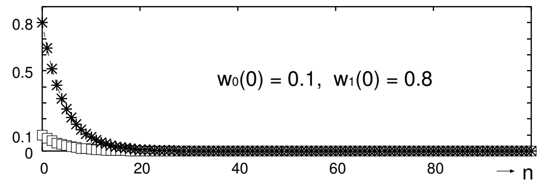

図３　初期値を変えたときの結果

6　おわりに

コオロギにも学習能力があることを新たに知り, 闘争行動の選択機構が, 以前の闘争経験に影響を受けるのが興味深い発見となった. 負けても諦めず, 果敢に闘争する強い精神を持ってもらいたい.

２匹が遭遇する確率 (容器の大きさ) によって, 強気, 弱気が変化するのが面白い.

参考文献

[1] 有田隆也：『人工生命』，改訂２版，医学書院，2002.

[2] J. メイナード-スミス（寺本英・梯正之 訳）：『進化とゲーム理論　– 闘争の論理 – 』，産業図書，東京，1985.

[3] 森山徹：『ダンゴムシに心はあるのか –新しい心の科学–』，PHP 研究所，東京, 2011.

[4] 太田順・青沼仁志（編著）：『社会適応　– 発現機構と機能障害 – 』（シリーズ移動知第４巻），オーム社，東京，2010.（第２章「行動選択–コオロギは集団内でどのように振る舞うか？」）