群れ形成過程において規則を探索するカニ

Soldier crabs explore behavioral programs in swarming process

○ 村上　久（神奈川大学）園田 耕平(立命館大学) 都丸

武宜(早稲田大学) 郡司 幸夫(早稲田大学)

Hisashi MURAKAMI, Kanagawa University
Kouhei SONODA, Ritsumeikan University
Takenori Tomaru, Waseda University
Yukio GUNJI, Waseda University

Abstract: Recent empirical researches have revealed that diversity of individual moves in real animal groups co-exists with swarming behavior as a whole in contrast to previous theoretical researches. Such individual internal movements within the group would be caused from a balance between attraction and repulsion interaction among individuals. In this study, we investigate how individuals in the swarm of soldier crabs (*Mictyris guinotae*) balance between attraction and repulsion actions within the group, using simplification of programs derived from time series of attraction-repulsion decision making of an individual. First, we reveal that individuals perpetually explore and update their behavioral programs. Moreover, we show that such updation appears as a critical phenomena rather than erroneous random motions, preserving characteristics of the logical structure.

Key Words: Swarm, Critical phenomena, Lattice theory

1. 背景

鳥や魚など動物の群れは、リーダーや指揮者が不在であるにもかかわらず、一個の秩序だった集団としての振る舞いを組織化する。このような群れに対する従来のモデルでは、個体が行う近傍内の他個体との三つの単純な相互作用を群れ形成の基本原理とする。すなわち、向きの平均化して揃える整列規則、離れ過ぎた個体に近づく集合規則、近づき過ぎた個体と離れる離散規則である[1,2]。個体は、集合規則に従いまとまり、整列規則によって向きを揃え、離散規則によって一定の個体間距離を得る。結果として群れの相互作用ネットワークは安定な格子状の構造に収束する。ここでは個体の運動は群れ形成にとっての安定から遠ざけるゆらぎとして考えられる[3]。

しかしながら、近年の実測データに基づく解析および実験によると、現実の動物の群れは、動的な内部構造を持ち、個体は群れに対して相対的に内部で絶えず運動し、他個体と位置を入れ替えていることがわかりつつある。一見して個体の運動は、群れを壊すようにも思われるが、多様な他個体との相互作用を可能にして頑強な情報伝達・群れ形成をもたらすものであり、個体の多様性と集団形成の共立を示すものである。一方でこのような個体の群れ内部の運動は、どのような相互作用によってもたらされるのだろうか。本研究では、群れが形成された後も継続される個体間における集合と離散の駆け引きに基づくと考え、個体の集合と離散における意思決定に焦点を置き、ミナミコメツキガニの運動解析を行う。特に、個体の意思決定を各時刻において集合・離散と二値化し、同様に近傍の左右に位置する他個体の意思決定を二値化することで、ブール関数を用いいて、現在の自分と近傍個体の行動から次の自分の行動を得る遷移規則を評価する。第一にこの遷移規則は絶えず切り替えられるが、それが単にランダムでなく臨界的であること、第二に、遷移規則から束を構成することで、乱数ビット列からは得られない特異な論理構造が取り出せることを明らかにする。これらの結果は、規則の更新を伴う振る舞いは個体の自律性に由来し、そこから群れと共立する個の多様性が現れることを示唆する。

2. 方法

2.1 実験セットアップ

本研究では沖縄県西表島の船浦湾河口干潟に生息しているミナミコメツキガニを対象として、実験室内で自然に作られた群れを撮影し、その運動解析を行う。このカニは潮が満ちている際には、干潟上に穴を掘り、そこに潜んでいるが、干潮になると表面に現れ、摂餌しながら大規模な群れを形成しながら集団的に運動する。我々は日中の干潟表面に現れたカニを採集し直ちに琉球大学熱帯生物圏研究センター西表研究施設内の実験室に持ち込んだ。実験で観測する群れの大きさは100匹に設定され, 実験室に持ち込まれたカニは画像解析を容易にするため甲羅にマーカーが付けられ、実験装置に移された。

実験装置の大きさは長辺180cm, 短辺120cm, また装置側面の高さは10cmであり、底面には干潟から持ち込んだ砂泥を薄く敷くことで、より実際の生息環境に近づけた。この実験装置頭上に設置したビデオカメラ（Panasonic HDC-TM700, 1920×1080 pixels）によって30分間, カニの運動が撮影された。実験は干潮時刻の前後一時間に実施された。以上のように得られた動画から, 画像解析ソフト（Library Move-tr/2D ver. 8.31; Library Co. Ltd., Tokyo, Japan）を用いることで各個体の時系列座標が得られた。なお、100匹のうち1匹のマーカーが実験実施中に剥落したため、本解析には99匹分のデータを用いる。また以下では時間インターバルはdt=1.0 [sec]とする。

3. 結果

3.1 運動規則の切り替えに見る臨界性

まず各個体の各時刻における集合・離散の意思決定を定義するにあたって、個体の近傍前方における他個体の分布を調べる。ここで近傍前方とは, 半径 dr（本稿では dr=20[cm]とした）を持つ円のうち、$p_{i,t}$ に対して速度 $v_{i,t}=p_{i,t} - p_{i,t-1}$ から定義される進行方向の前方半分である。なお $p_{i,t}$ は t における個体 i の位置座標である。このように定義された近傍

において進行方向の左右いずれかのうち、$p_{i,t+1}$においてより他個体の多おくいる方向へ進んだ場合、tにおけるiの行動は集合行動、そうでない場合は離散行動と定義する。

続いて、上記の近傍を左右に分割したときの、それぞれの近傍にいる他個体の意思決定を二値化して定義する。これは、tにおいて（左右いずれかの）近傍内にいる他個体が集合・離散のいずれの行動が多数派だったかによって決定される。

上述の二値化において集合行動を1離散行動を0とすることで各個体の意思決定を時間にそったビット列として見なし、このビット列を算出するような関数を以下のように二種類の仕方で遷移関数によって推定した。一つ目は各個体の履歴に基づいて現在が決定されるとするものだ（[3]を参照)。すなわちビット列中のあるビットを$x_{t,i}$と表記したとき、例えば3変数の関数は$f(x_{t-3,i}, x_{t-2,i}, x_{t-1,i})= x_{t,i}$を満たすように決定される。二つ目は近傍内他個体の意思決定にも基づくとするものだ。すなわち個体iの時刻tにおけるビットを$x_{t,i}$と表記し、左右の近傍他個体におけるビットをそれぞれ$rx_{t,i}$ 、$lx_{t,i}$としたとき、関数は$f(rx_{t,i}, x_{t,i}, lx_{t,i})= x_{t+1,i}$を満たすように決定される. 一方で動物の行動をこのように決定論的に決めようとしても、いずれ関数として矛盾に帰着してしまう。例えば, 上記のカニの運動から得られた関数fにおいて、ある入力x_0に対して出力x_1が得られていたが, ある時を境に出力x_2が得られたとする。このようなときfは一対多写像となり、関数として矛盾する。我々はしかし、このような出力の不一致が起きたとき、関数は更新されたと考えることにし（不一致の起きた入力のみ更新され、他の入力は引き継がれるものとする)、$f_{i,m}$を個体iのm番目に更新された関数であるとする。絶えず移り変わる環境に対して、あるいは自律的に動物がこのように規則を更新していくことは十分に考えられるだろう。

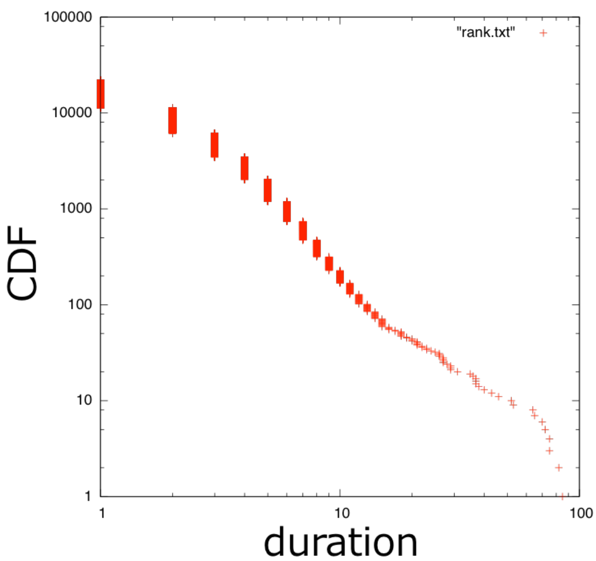

Fig. 1 Cumulative distribution of duration between updates of behavioral programs

我々は、このように定義した遷移関数が更新されるまでにかかる時間の分布を調べたところ、ベキ則を示すがわかった。この結果は、カニが絶えず自身の行動規則を探索し、それが臨界的で多様なものであることを示している(Fig.1)。

3.2 束論による規則遷移の解析

続いて我々は各個体について、100 step 毎における運動規則を元とする順序集合をもとに、最大元交操作から得られる束を解析した[4,5]。

上述の運動規則はブール関数で表せるため、それぞれの規則は、各入力に対する出力のビット列として表すことができる。ここで二つのビット列 $A=a_1a_2 \ldots a_n$ および $B=b_1b_2 \ldots b_n$ において、任意の i に対して $a_i \leq b_i$ であるとき,ビット列 A よりビット列 B が大きいといい、$A \leq B$ とかく。上述の運動規則からなる元を集めたものから、順序集合が得られるが、一般には束にならない。カニの運動規則の遷移の論理構造を調べるため、この順序集合に最大元交操作を行うことで、束を構成する。まずここで代数操作としての上限下限を導入する。二つのビット列 $A=a_1a_2 \ldots a_n$ および $B=b_1b_2 \ldots b_n$ に対し、その上限、下限を、交と和、すなわちそれぞれ $A \cup B = \max(a_1, b_1)\max(a_2, b_2) \ldots \max(a_n, b_n)$ 、$A \cap B = \min(a_1, b_1)\min(a_2, b_2) \ldots \min(a_n, b_n)$とする。目下の順序集合$S$の任意の二つのビット列の元$A$と$B$について$A \cap B$を計算し,$A \cap B$ が S に属していないなら、これを新たに S に加える.こうして $A \cap B$ によって新たなビット列が現れなくなるまで、この操作を繰り返 す。最後に n ビット列における最大の元である、n個全ての桁が1のビット列をこれに加える。ここで、最大元交操作後のS（$T(S)$とする）は交には閉じているが、和には閉じていない。そこで、下限はそのままに上限の定義を次のように変更する；$A \vee B = \cap \{X \in T(S) \mid A \leq X, B \leq X\}$。ただし W をビット列の集合としたとき,その下限 $\cap W$ は、$A \cap B$ 同様に、Wの全てのビット列に関して、各桁で最小の数を選び、並べてできるビット列となる。

束における重要な構造である、分配律（任意の元、A、B、C に対して $A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$とその双対が成立）と相補律（全ての元が補元を持つ、すなわち任意の元Aについて$A \vee A^c = 1$、$A \wedge A^c = 0$が成立する元が存在A^c）を調べるため、それぞれの程度を評価する分配性と相補性が定義された。束の元の数をN 、補元の存在する元の数をMとするとき、相補性はM/Nで与えられる。よって相補性は≤1であり、1のとき相補束となる。補元の存在する元における補元数の総和をMで割ったものが平均補元数で、これが非分配性として定義される。よって非分配性≥1であり、分配束のとき1となる。結果として、相補性については、実験とコントロールの双方において、高い相補性は見られなかった。一方で非分配性に関しては、実験がコントロールに対し有意に低かった（t検定 t = -5.6042, df = 160.704, p-value = 8.901e-08）(Fig.2)。

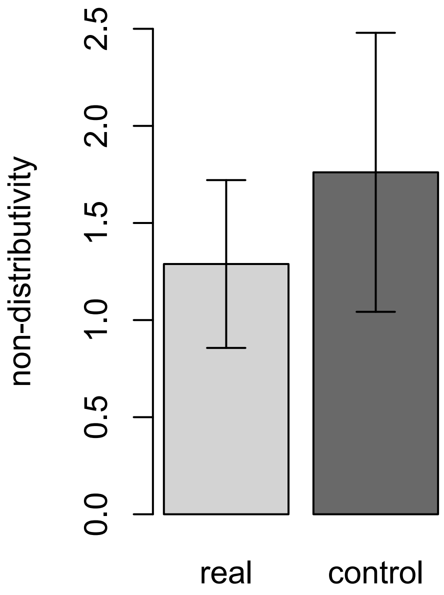

Fig. 2 Non-distributividy of real (pale gray) and control (dark gray) experiments

4. 考察

本稿ではミナミコメツキガニの群れの自由な振る舞いから得られた運動データを用いて, 個体の集合・離散の規則を調べ、まずその更新がベキ則を示すことからカニが絶えず自身の行動規則を探索し、それが臨界的で多様なものであることを示唆した。続いてこの更新の遷移を詳しく調べるため、束を用いて解析を行った。ここで得られた結果、非分配性が低い、すなわち分配律の程度が高いことは、少なくともカニの運動規則が持ちうる種類の限りにおいて対称性を持つことを意味する。簡単には同一の入力の組み合わせにも関わらず正反対の行動を取りうるということだ。通常バランスを取りながら、密集しようとする各カニは、近傍他個体が集合しようとすると同様に集合し、近傍他個体が離散しようとすると同様に離散すると考えられるかもしれない。しかしこのような集合・離散の兼ね合いのみでは、群れの膨張収縮の継起は見られても激しい個体位置の入れ替えを考えることはできない。一方でカニはある場合に近傍他個体の行動とは独立に、しかし単にランダムではなく、通常時の規則を反転させる形で流用しながら、バランスを取っていることが結果から示唆される。従って近傍他個体の配置や密度などより詳細な解析が必要となってくるが、このような個体の運動の多様性が群れ形成において基礎的である集合離散行動レベルですら見いだされるといえるだろう。

参考文献

(1) Couzin ID, et al., Collective memory and spatial sorting in animal groups. J. Theor. Biol. 218, 1–11 (2002).
(2) Olfati-Saber R., Flocking for multi-agent dynamic systems: algorithms and theory.*IEEE Trans. AC*. 51(3),401-420(2006)
(3) Murakami H, et al., Criticality on attraction-repulsion decision making: an analysis of a swarm of soldier crabs using simplification of program. (in prep)
(4) Brown FM, Boolean Reasoning: The Logic of Boolean Equations. 2nd. ed. New york: Dover Publications. (2012)
(5) Davey BA, and Priestley, Introduction to Lattices and Order. 2nd. ed. Cambridge. Cambridge University Press. (2002)