動的ネットワークとしてのミナミコメツキガニの群れ

Soldier Crab Swarm as Dynamical Network

○村上 久(神戸大学) 西山 雄大(新潟大学) 新里 高行(筑波大学) 榎本 洸一郎(はこだて未来大学) 戸田 真志(熊本大学) 森山 徹(信州大学) 飯塚 浩二郎(信州大学) 郡司 ペギオ幸夫(神戸大学)

Hisashi MURAKAMI, Kobe University, hssh415@gmail.com
Yuta NISHIYAMA, Niigata University
Takayuki NIIZATO, University of Tsukuba
Koichiro ENOMOTO, Hakodate Future University
Masashi TODA, Kumamoto University
Toru MORUYAMA, Shinshu University
Kojiro IIZUKA, Shinshu University
Yukio-Pegio Gunji, Kobe University

Based on inherent noise of a swarm of soldier crabs, we constructed bipartite network in which crabs anticipate their moves each other. We show this network has robust structure, despite that its edges are dynamically changed.

Key Words: Swarm, Soldier crab, Dynamical network

1. 緒言

群れは従来、実際の個体間相互作用を確かめられることなく、主に数理モデルを用いた研究がなされてきた。もっとも古典的とされる BOID[1]、それを簡略化した SPP[2]に代表される多くの群れモデルでは、Velocity Matching (VM)、すなわち各個体が一定半径の近傍を持ち、その中で他個体と向きを平均化する事で揃える規則、が群れを形成するにあたって最も重要な規則であるとされてきた。当然 VM のみでは、全ての個体の向きは収束し一定方向に進み続ける集団となるから、群れらしくするために、個体の向きに外部から摂動が加えられる。つまり VM は、群れ構造を安定に維持させるように働く。これらのモデルは、群れ一般をうまく説明するものと考えられ、また実際にイナゴの群れに見られる相転移現象などを示してきた[3]。

一方で、近年新たにステレオカメラやソナーを用いて、ムクドリやニシンの群れの数千数百の個体数を識別また追跡し、内部構造を調べようとする研究が報告されている。特に注目すべきは、Cavagna et al.が発見した、スケールフリー相関[4]と群れ内部の拡散に関する研究[5]だ。スケールフリー相関が、瞬間的な観測として、群れ内に群れの大きさに対して一定比率の大きさの相関の高い構造を示すのに対し、群れ内部の拡散に関する研究では、時間に幅を持たせた観測として、群れは強く拡散しており、構造を大きく変化させていることを示す。これら二つからわかることは、群れは、従来のモデルで考えられてきたように構造を維持しようとしているというよりも、むしろ常に新たな構造をつくり続けている、ということである。

我々は、沖縄以南に生息し大規模な群れを成すミナミコメツキガニ(Mictyris guinotae)の運動の特徴から、群れがその内部

ゆらぎをうまく利用しており、群れ形成において重要な役割を持つという示唆を受けた。ここでいう内部ゆらぎが意味するものは、群れを形成しながらその内部で激しく個体位置を入れ替えたり、向きを交差させたりすることであり、従来のモデルにおける群れの維持と対立する外部からの摂動とは異なるものである。我々は各個体の運動の履歴に着目し、それをこの内部ゆらぎと捉えることで、内部ゆらぎ(運動履歴)が群れ形成に積極的に関わっていることを示した[6]。

本稿では、我々が文献[6]で行った解析の過程で得られる、運動履歴に基づくネットワークを調べ、群れ内部で新たに作り続けられる構造について見てゆく。

2. ミナミコメツキガニの群れと個体の運動履歴に基づくネットワーク

2.1 解析を行った群れ

我々は干潟の平面上を運動するミナミコメツキガニの時系列に沿った個体位置を得るため、やぐらを用いてビデオカメラを干潟上に設置し、通過するミナミコメツキガニの群れを垂直上方から撮影した。

なお、群れは纏まりのあるものを選ぶため、文献[7]の群れの選定基準を以下のように単純化した基準を満たすものの一つの群れとし、それぞれにおいて時系列にそって各個体の座標を追った。

$$\sqrt{IIDs} < AvD \quad (1)$$

ここで $IIDs$ は、各個体の他の全個体との距離の平均であり、 AvD は、全ての $IIDs$ の平均である。つまり、集団からあまりに距離の離れた個体は、その集団に属していないことにな

る。これら三つの群れの特徴は Table 1 にまとめられた。

また、群れ 09271500 は群れ 09271453 の時間にして数分後の群れであり、複数の個体が重複していると考えられる。一方で群れ 07190751 は上記の二つの群れとは独立した時間・場所で撮影されたものである。

Table 1. Swarm events are labeled according to the date and time of session.

Event	09271453	09271500	07190751
Number of crabs	267	258	119
Velocity (mm/sec)	28.8	32.6	29.7
Swarm size (mm)	772.7	934.0	809.9
Polarity	0.861	0.898	0.744

2.2 履歴に基づくネットワーク

我々は、Ref.[6]でミナミコメツキガニが運動履歴をどのように利用しているかを調べるために、以下の手順で解析を行った。まず微小観測区間 dt で等分割される各個体の運動軌跡を用意した(Fig.1A)。各個体の軌跡はそれぞれ異なる色で表示され、この場合 5 つに分割されている(分割の個数を P で表す。今は $P=5$ となる)。このとき、分割して得られた遷移のうち、先頭の遷移に対して、それに続く遷移は履歴であると見なす事が出来る。次に、履歴遷移の始点を先頭遷移の始点に集めてくる事によって、遷移のコレクションを作る(Fig.1B)。このとき、先頭遷移(すなわち、この場合の現在の遷移)は遷移の終点が密集している場所(すなわち、自他の過去の運動方向においてより人気のある方向)を指していることがわかったのであった。一方で、絶えず変更されるミナミコメツキガニの向きが意味するところは、他個体の運動の探索だと考えることが出来、そうならば Fig.1B は、ミナミコメツキガニの群れの相互運動予期の様相を表している。

Fig. 1. The schematic diagram of analysis procedure.

さて、fig.1B において遷移の終点が密集している場所(黒丸で囲まれた場所)のことを、人気地と呼ぼう。この時 fig.1B は、個体、人気地をノードとし、個体から人気地への有向なエッジを持つ、有向二部ネットワークと考えることが出来る。またこのように構成されるネットワークは、上述したように、相互に運動を予期し合う集団である。Fig.2 は実際の群れ 09271453 における $P=5$ におけるネットワークであるが、個体間距離をもとのまま維持している。

Fig.2. Swarm network with no change of inter-individual distance.

2.3 群れのネットワーク解析

この二部ネットワークは、個体ノードの次数は与えられた P に等しいが、人気地ノードの次数は一定ではない。Fig.3 に $P=5$ における群れ 09271453 からなるネットワークの次数分布を表す。

Fig.3. The degree distribution of nodes of popular sites.

人気値ノードの次数分布は次数が少ないノードほど多く、次数が多いノードほど少ないことがわかる。また次数が大きいあたりでは、ベキ乗則に近い形が見られる。ランダムネットワークは、特徴的な次数を持つことから、この次数分布は何

らかの構造を持つことが示唆される。

次に、群れのなかで構成される最大ネットワークに関してみてゆく。

Fig.4. Size of max network is plotted against P .

Fig.4 では、群れ 09271453 にたいする、 P に対する最大ネットワークの大きさ（個体数）の全体に対する比（MNS）が記されている。 $P=5$ を超えたあたりで、大幅に MNS が上がっていることがわかる。 P が 4 以下の時は、ネットワークを構成するエッジの数が少なく、大きなネットワークは出来にくい。5 を超えると一気に結合して大きなネットワークをつくる。また、他の群れでも同様の結果が得られた。

コメツキガニの群れが作るネットワークは、エッジ (P) の数が大きくなれば群れ全体の 8 割程度の大きさに及ぶことがわかった。しかし、大きなネットワークをつくりながら、内部でエッジを激しく入れ替えている。これを調べるために、

$NR(t)$: 時刻 t に同じターゲットを持つ個体の組の集合

を導入する。

Fig.5. How many inter-individual connections are took over from swarm at t to swarm at $t+1$?

例えば、Fig.5 において $NR(t) = \{(p,q), (q,r)\}$ かつ $NR(t+1) = \{(p,r), (q,r)\}$ である。この場合、引き継がれる割合 $DC = |NR(t) \cap NR(t+1)| / |NR(t)| = |\{(q,r)\}| / |\{(p,q), (q,r)\}| = 1/2$ となり、個体間結合は半分入れ替わり、半分維持されていることがわかる。DC は全ての関係が引き継がれれば 1 となり、全て入れ替われば 0

である。

Fig.6. DC (degree of resemblance) is plotted against P (number of historical moves).

Fig.6 では、群れ 09271453 において、 P に対する DC が示されている。どの P をみても、0.5 をしたまわっていることがわかる。これは、群れからなるネットワークは、ある瞬間の結合相手を次の瞬間には半分以上入れ替えていることを表している。さらに Fig.4 と合わせて考えると、群れは、常に大規模なネットワークを構成しながら、絶えずその内部構造を作り替える動的なネットワークとみることができる。

Fig.7. Degree of resemblance between swarms at t and swarm at $t+n$.

最後に、時刻 t の時の個体間結合が時刻 $t+n$ にどれくらい引き継がれているかを調べた。ここで、Fig.7 の縦軸は、引き継がれる割合 $DCT(t') = |NR(t) \cap NR(t+n)| / |NR(t)|$ を表している。個体間結合は時間が経つほど入れ替わっていることがわかり、これは文献[5]で見られる群れの内部の拡散の、ネットワーク的表現と見ることが出来る。

3. 結言

ミナミコメツキガニの群れは、群れの形を維持しながら、内部に激しいゆらぎを持つ。このような群れの内部ゆらぎは、

他の方法でムクドリによっても確認され[5]、群れ一般に通じるものであると考えられる。本稿では、各個体の運動履歴としての内部ゆらぎを、むしろそれに基づいて、相互に予期し合う個体間のネットワーク構造として見だし、ネットワークにおけるエッジ（内的ゆらぎに対応する）が張り替え続けられるにもかかわらず、群れのほとんどの個体が所属するおきなネットワークが維持されつづけることを示した。このような動的な構造は、よって、壊しながら作り続ける群れの新たな様相を示唆している。

引用文献

- [1] Reynolds CW: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics*. 21. 25/34 (1987).
- [2] Vicsek Y, Czirok A, Ben-Jacob E, Shochet O: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Phys. Rev. Lett.* 75. 1226/1229 (1995).
- [3] Buhl J, Sumpter DJT, Couzin ID, Hale JJ, Despland E, Miller ER, Simpson SJ: From Disorder to Order in Marching Locusts. *Science*. 312. 1402/1406 (2006)
- [4] Cavagnaa A, Cimorellib A, Giardinaa I, Parisib G, Santagatib R, et al.: Scale-free correlations in starling flocks. *PNAS*. 107. 11865/11870 (2010).
- [5] Cavagna A, Duarte SM, Giardina I, Stefanini F, Viale M: Diffusion in starling flocks. *ArXiv :1206.4434v1*.
- [6] 村上 久,西山 雄大,新里 高行,榎本 洸一郎,戸田 真志,森山 徹,飯塚 浩二郎,郡司 ペギオ幸夫, "群れの維持・形成に寄与する内的ゆらき",計測自動制御学会論文集 SI 特集号,41,1
- [7] Noam YM and Robert G: Oscillations in shoal cohesion in zebrafish (*Danio rerio*). *Behav Brain Res*. 193(1). 148/151. (2008)