

メダカの集団行動の非対称遷移現象モデル

Asymmetric transition phenomenon model of group behavior of a killifish

同志社大学 生命医科学部 松島 正知
同志社大学大学院 生命医科学研究科 中村拓人
同志社大学 生命医科学部 阿部麻莉絵

Masatomo Matsushima, Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University
Takuto Nakamura, Graduate School of Life and Medical Sciences, Doshisha University
Marie Abe, Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

概要

メダカが作る群れの時間経過による遷移の特徴を観察し、その遷移現象のモデル化を試みた。

観察には、3つの区画がY字に集まっている外的要因による水の流れのない閉鎖水路を用いた。また、観察データとして、一定時間ごとに3つの区画にいるメダカの数それぞれ数えることを行なった。今回、観察データより、時間経過による存在数の変化から、ある区画にいるメダカの数遷移確率を求めた。その結果、時間反転に対して、対象な遷移と非対称な遷移があり、非対称な遷移は、実験的に有意な遷移であることを突き止めた。

非対称な遷移について、ある時間幅でreturn mapを作成すると、ある区画にいるメダカの数少ないときは、徐々に数が増加していくが、ある程度、数が多くなる急激に数を減らすという、状態遷移の循環流の存在が見てとれ、時間窓による解析では、1-3秒の時間窓では、非対称な遷移の確率が徐々に増大し、4秒で安定し、6秒で急激に減少し、その後、また徐々に確率が増加するという結果が得られた。このような、“詳細つり合い破れ”の定量的な解析を元に、非対称な遷移現象のモデルの作成を試みた。

1. はじめに

自然界の多くの動物たちは、群れを形成して行動をしている。しかし、形成された群れは、しばしば崩れることがある。本研究では、この群れの形成と崩れの過程について着目をした。例として、メダカを用いて、ある実験水路の中でのメダカの動きの観察を行った。このメダカの動き（群れの形成）より、興味深い結果が得られたので、その報告を行う。

2. 実験水路

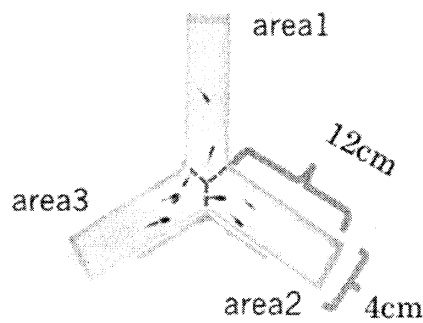


図 1: 実験水路

メダカの観察には、図 1 で示す実験水路を用いた。

図で示すように実験水路は、3つの区間に分かれており、それぞれの領域を area1, area2, area3 とする。1つの区間の水路の大きさは、長さ 12cm, 幅 4cm である。また、水深は、極力浅くし、メダカ一匹のみが泳げるくらいの深さにしている。これは、深さによる、メダカのすれ違いを無くすためである。また、水路は、外的要因による水流がない閉鎖水路にしてある。

観察は、実験水路真上からデジタルビデオカメラにて、動画撮影を行う。このとき、群れの定義として、1つの領域内を1つの群れとする。実験水路（図 1）より、3つの群れを考え、それぞれの群れのメダカの匹数の変化の観察を行う。

3. 実験方法・結果

実験水路に入れるメダカの総匹数を変化させて、メダカの数（密度）による群れの中のメダカの数の変化の観察を行った。メダカの総匹数は、3匹、5匹、10匹とし、メダカの総匹数を実験水路に投入直後から、動画の撮影を行った。撮影時間は 180 秒で、5 秒ごと（36 回）にそれぞれの領域でのメダカの匹数を数え、領域ごとのメダカの匹数の変化をグラフ図 2 に示す。

(a) は、メダカの総匹数が 3, (b) は、メダカの総匹数が 5, (c) はメダカの総匹数が 10 のグラフである。(a) では、メダカが激しく動き回っているのが見て取れる。(b) では、メダカが群れて動いている様子が見て取れる。また、領域ごとに違いはないはずなのに、area3 には、ほとんどメダカが移動していない。(c) では、領域ごとの万遍なく、メダカが動いているが、総匹数 (10 匹) で、群れを形成することは無かった。

この結果は、何度か実験を行っても、同様の結果が得られている。この事から、群れの形成の大きさには、最適な大きさがあるのではと考えられる。本研究では、この最適数を仮に 5 として、実験について解析を行う。群れの形成の最適数についての議論については、別の機会に譲ることにする。

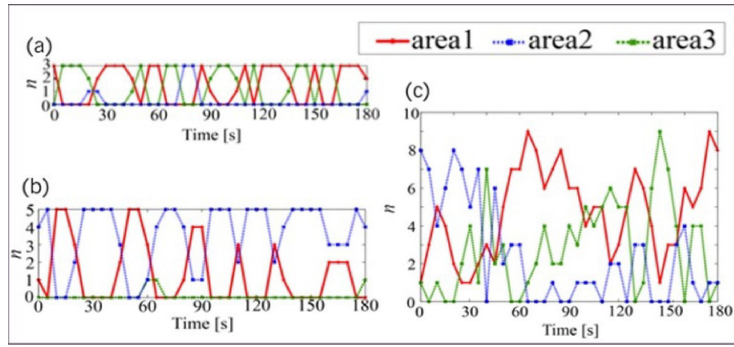


図 2: 各領域中のメダカの数の変化

4. 結果解析

メダカの総匹数が5の時のデータに着目し、1つの領域にいるメダカの匹数の変化の回数をリターンマップで表した。図3は、1秒ごと ($\Delta t = 1$) の時のリターンマップである。

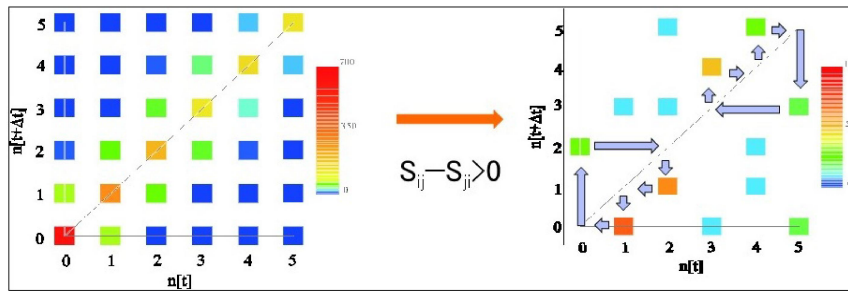


図 3: リターンマップ ($\Delta t = 1$)

図3の左図は、1秒ごとのメダカの変化数を表しており、右図は、左図から、非対称な変化数のみを抜き出したものである。このとき、 $n(t)$ は、ひとつの領域内のメダカの匹数を表しており、 S_{ij} はひとつの領域内で i 匹から j 匹への変化数を表している。ちなみに、データ数は、3つの領域を180秒間(1秒ごと)、4回実験を行ったので、2160個である。

右図内の矢印は、横軸 $n(t)$ それぞれにおける、最も変化数の大きい箇所に着目し、そのときの匹数の変化を表したものである。これより、めだかの匹数の変化に特徴が見れる。匹数の少ない群れと大きな群れで対象的な動きをしているのが見て取れる。さらに、群れの匹数が多いところに注目すると、群れの匹数の増加と減少の仕方に、違いがあることがうかがえる。

次に、Time-window に着目し、メダカの全変化数における非対称な変化数の割合の変化を図4に示す。

縦軸 $P_{asym}(\Delta t)$ は、Time-window Δt の全変化数における非対称な変化数の割合を表しており、

$$P_{asym}(\Delta t) = \frac{I_{asym}}{I - I_0} \quad (1)$$

により求めた。このとき、 I_{asym} は

$$I_{asym} = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 S'_{ij} \quad (2)$$

であり、メダカの非対称変化数を表している。 S'_{ij} は S_{ij} のうち非対称な変化数である。また、 I 、 I_0 は、それぞれ

$$I = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 S_{ij}, \quad I_0 = \sum_{k=0}^5 S_{kk} \quad (3)$$

で、メダカの全移動数とメダカの停滞数をそれぞれ表している。

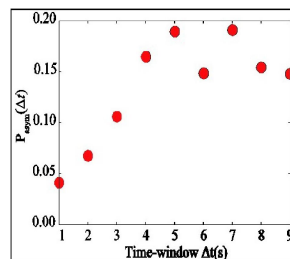


図 4: 非対称な変化数の割合 (1)

図 4 より、非対称な変化の割合が、時間の区切り方により、変化していることが判る。しかし、どのような変化の仕方をしているかは判明していない。

ここで、メダカのデータの取り方を再考する。メダカのデータは総匹数を実験水路に投入した直後から取っていたが、投入直後のメダカは、盛んに移動する傾向が強い。そのため、群れとしての動きではなく、個別に動いてるよう考えられる。したがって、群れとしての動きを観察するには、少し時間をおく必要があると考えられる。そこで、再実験として、投入後、1 分間時間を空けてから、データ計測を行うことにした。

新たにデータを取り、それより作成した非対称変化のリターンマップを図 5 に示す。

図 5 の左図は、 $\Delta t = 1$ の時の非対称変化リターンマップである。図 3 と違い、匹数の小さな群れも大きな群れも、群れの増加は少しずつであるのに対して、減少は一気に起こることが見てとれる。しかし、群れの増加と減少が非対称な変化であることは、先ほどと同様である。

図 5 の右図は、 $\Delta t = 5$ の時の非対称変化リターンマップである。左図ほど、綺麗な増減変化は見られないが、増加と減少の非対称性は見て取れる。

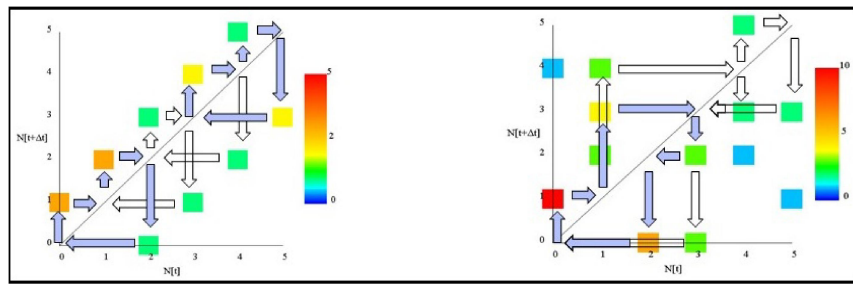


図 5: リターンマップ [新データ 180 秒間] (左: $\Delta t = 1$, 右: $\Delta t = 5$)

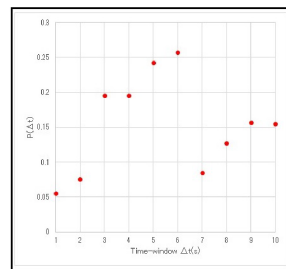


図 6: 非対称な変化数の割合 (2)

次に Time-window による非対称な変化数の割合を見てみる。その様子を図 6 に示す。

図 4 では、よく判らなかつた非対称な変化数の割合の変化の仕方が、図 6 では、振動してるように見える。

このように、群れの変化を離散的に見てきたが、その変化に振動現象が見られることから、数理モデルの提案を行う。

5. 数理モデル

振動現象を表す数理モデルとしてリミットサイクルがある。このリミットサイクルをモデルにした数理モデル

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2}n(t) - \left(1 - 0.3\left(\frac{d}{dt}n(t)\right)^2\right)\frac{d}{dt}n(t) + n(t) - 2.5 = 0 \\ \frac{d}{dt}n(t) = N(t) - 2.5 \end{cases} \quad (4)$$

を提案する。このモデルのプロットを図 7 に示す。このモデルはまだ不完全なものである。しかし、このモデルの提案は、本研究で扱った離散的なデータの振る舞いを連続関数を用いて、記述することに意味をもつと考えている。

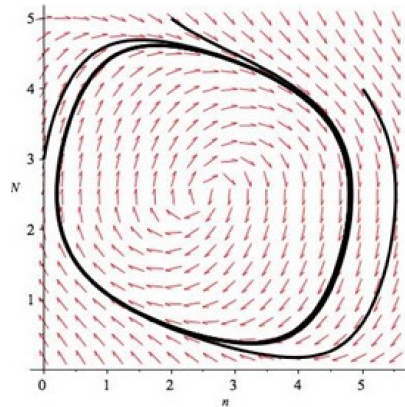


図7: リミットサイクルモデル

6. まとめ

本報告は、群れの形成の変化について、メダカを用いて、解析したものである。大きさの限られている水路を用いることで、群れの大きさには最適な大きさがある可能性を示唆した。また、最適な大きさと思われる群れに対して、群れの大きさの変化についてリターンマップを用いることで、増え方と減り方が非対称な変化であることを突き止めた。さらに、Time-windowを用いることで、非対称な変化の割合は増加し続けるのではなく、必ず減少が起きることを明らかにし、その変化は振動現象になっている可能性を示唆した。

最後に、離散的な変化の解析結果から、連続現象であるリミットサイクルを用いる数理モデル化を提案した。

この群れの形成における研究は、様々な外的要因が考えられ、まだ、試行錯誤の段階であるが、群れの形成の非対称変化という一つの現象を発見したので、ここに報告を行った。