

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H06076・19K21199

研究課題名（和文）生物の同期現象において外れ値が系にもたらす効果の検証

研究課題名（英文）The effect of outliers in biological synchronization phenomena

研究代表者

林 達也（Hayashi, Tatsuya）

北海道大学・情報科学研究院・博士研究員

研究者番号：80824755

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：生物の振動・同期現象において、例外的な挙動を示す“外れ値”が普遍的に観測される。しかし、そのような例外は議論の対象から外され、その存在意義について十分に議論されていなかった。本研究では、シオミズツボウムシの個体群動態について数理解析を行い、集団に大きな攪乱を与えられた際の外れ値が系に与える効果について検証した。ウムシの栄養状態やストレスを考慮した個体群動態を記述する離散力学系モデルを構築し、シミュレーションの結果、絶食下において自身の生存をあきらめて産卵する“外れ値”個体が出現することによって、個体群の存命期間が延長されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、シオミズツボウムシの個体群変動をテーマに外れ値が系に与える影響について調べた。結果として、絶食下において自身の生存をあきらめて産卵する“外れ値”個体が出現することによって、個体群の存命期間が延長されることが示された。仮に、大多数が絶食下で産卵を選択した場合、孵化率が低いため個体群の絶滅が早まるものと推測される。このように本研究では、自然界に出現する外れ値が個体群の維持に寄与する例を見出した。

研究成果の概要（英文）："Outliers" that exhibit exceptional behavior are universally observed in biological synchronization phenomena. However, such exceptions were excluded from the discussion, and the significance of their existence was not fully discussed. In this work, we constructed a mathematical model for the population dynamics of rotifers and investigated the effect of outliers when the population was disturbed. We constructed a discrete model that describes population dynamics including the nutritional status and the stress. Numerical results showed that the life span of the population is extended by the appearance of "outliers" that give up on their survival and lay eggs under the fasting condition.

研究分野：数理生物学

キーワード：振動現象 シオミズツボウムシ 個体群動態 外れ値 数理モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

生物には様々な振動・同期現象がみられる。例えば、心臓の周期的な拍動は個々の心筋細胞の拍動が同期することによって実現する。生物における振動・同期現象は数理モデルによって次々に解き明かされつつあるが、多くの場合は実験で観測された値が数理モデルによって完全に再現されない。実際の系では、モデルによって記述された振動・同期現象から独立したような挙動を示す“例外”が観測されるからである。そのような例外は外れ値として議論の対象から除かれる。そのため、外れ値の検出や判定に関する統計学的手法が発展する一方で、外れ値が生まれる原因や系に与える影響が十分に議論されないままとなっている。

申請者はこれまでの研究において、心筋細胞の拍動同期現象を記述する数理モデルを構築し、実験で得られた値の再現に至った [Hayashi *et al.*, 2017]。その過程で、実験結果のなかには数理モデルで説明されない挙動を示す外れ値がみられ、単純に同期を阻害する存在のように見受けられたが、系に適度な揺らぎを与えるという可能性も考えられた。実験手法によらず様々な系で外れ値が普遍的に観測され、また実際の系は外れ値を抱えながら安定に機能していることから、外れ値を実験エラーとして処理するのではなく、その存在意義を議論する必要性が示唆される。

## 2. 研究の目的

本研究では、生物の振動・同期現象における外れ値の必然性を明らかにすることを目的として、外れ値の存在比率と攪乱を与えた際の系の維持や安定性の関係を調べる。すなわち、同期している集団に大きな攪乱を与えられたときの外れ値による緩衝作用を検証する。

一般的に、外れ値によって真の傾向や特徴がマスクされてしまうことが懸念され、外れ値はデータ解析の敵として見なされることが多い。そのため、外れ値の検出や判定に関する統計学的手法が発展し、外れ値による悪影響を最小限にとどめるような推定法も考案された。本研究は「自然界ではなぜ外れ値が出現するのか？」という問いに対する 1 つの解を提示する。

## 3. 研究の方法

本研究では、シオミズツボウムシ *Brachionus plicatilis*（以下 *B. plicatilis*）の石川株を用いる。石川株は単為生殖のみを行う系統であることから、クローナルな集団を調製できる。以下の 3 点を通じてクローン集団における *B. plicatilis* の個体群動態について数理解析を行い、集団に大きな攪乱を与えられた際の外れ値が系に与える効果を明らかにする。

（1）*B. plicatilis* の生活史を記述する数理モデルを構築する。

（2）給餌条件が異なる環境下で *B. plicatilis* を培養し、生涯産仔数および寿命を記録する。得られた実測値の中から“外れ値”的な振る舞いを示す個体を抽出する。

（3）個体数変動のシミュレーションによる外れ値の効果について検証する。1) で構築した数理モデルを基に、系に大きな攪乱を与えた場合の個体群変動についてシミュレーションを行い、外れ値個体が系にもたらす効果について調べる。

## 4. 研究成果

（1）単為生殖のみを行う *B. plicatilis* を対象に、ワムシの栄養状態やストレスを考慮した個体群動態を記述する離散力学モデルを構築した。個体の年齢分布をモデルに取り入れることで、年齢に依存した死亡率や産卵率、栄養状態の遷移率を設定した。数理モデルにおけるパラメータは、既往研究で得られている寿命や産仔数の実測値から決定した。図 1 に示すように、本モデルのシミュレーション結果は既報の個体群変動をよく再現しており、モデルの妥当性が確認された。

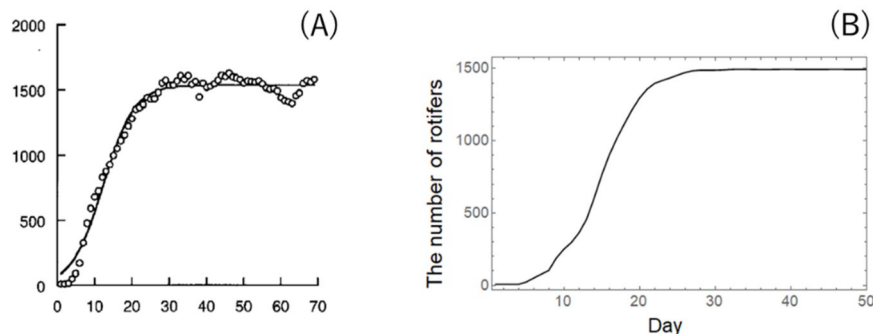


図1 ワムシの個体群動態モデルによるシミュレーション結果：(A)実測値，(B)シミュレーション結果

(2) 種々の給餌条件下で培養した結果、給餌条件によって中央値は異なるが個体の寿命は正規分布にあった。絶食下での寿命も正規分布にあったが、稀に産卵する個体が出現した。また、それらの個体は産卵後すぐに死に至った。多くの生物において、産卵や産仔は体力を著しく消耗するため、寿命とトレードオフの関係にあることが示されている。絶食環境下においては、産卵よりも自身の生存を優先して餌の獲得を待つほうが低リスクであることから、多くの個体は産卵することなく延命を図る。すなわち、実測結果の中から極限状態下において自身の生存より産卵を選択した個体が“外れ値”として抽出された。

(3) 上述の数理モデルでは、産卵率が給餌量に依存する。したがって、絶食下では産卵率 0 となるが、産卵率を  $\varepsilon (> 0)$  をもつ外れ値個体を与えた。以下のシミュレーションを行い、外れ値が系に与える効果について検証した。

- (i) 外れ値がない場合に、最初の  $t$  日間は飽食条件で給餌し、 $t+1$  日目から絶食にする
- (ii) 外れ値がある場合に、最初の  $t$  日間は飽食条件で給餌し、 $t+1$  日目から絶食にする
- (iii) (ii) の条件下で、絶食後、再び給餌を行う

(i) の結果：

図 2 は、外れ値個体が存在しないとき、最初の 10 日間は給餌し、11 日目から絶食にした場合のシミュレーション結果である。初期段階では、十分な給餌があるため、個体数は指数関数的に増加し、その後プラトーになる。しかし、絶食にすると、翌日にはすべての個体が死亡した。絶食により産卵が行われず、成熟個体が寿命により死亡し、個体群は存続できない。

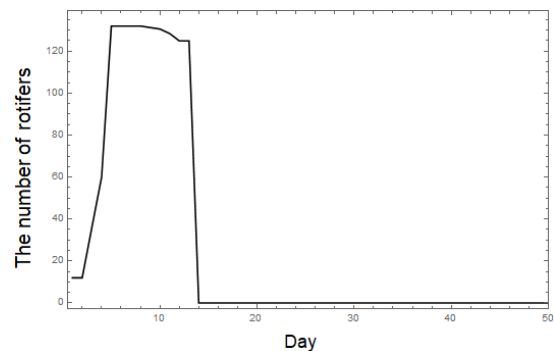


図 2 外れ値個体なしで、絶食した場合のシミュレーション結果

(ii) の結果：

図 3 は、外れ値個体が存在するとき、最初の 10 日間は給餌し、11 日目から絶食にした場合のシミュレーション結果である。絶食直後、急激に個体数は減少するが、その後は緩やかに減少し、個体群が全滅することはない。絶食状態でも少数の産卵が起こるために、個体群の崩壊は起こらず、存続する。

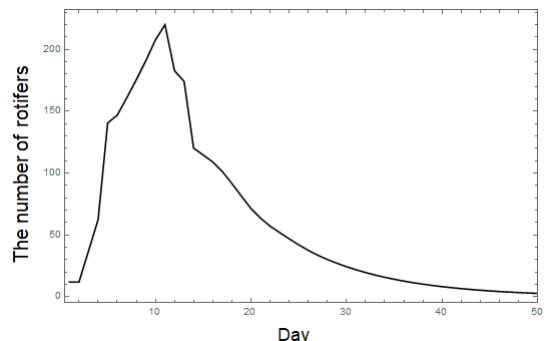


図 3 外れ値ありで、絶食した場合のシミュレーション結果

(iii) の結果：

図 4 は、(ii) の条件に加えて、絶食後に再び給餌を行った場合のシミュレーション結果である。個体群が全滅後には、いくら給餌を行っても個体数が増加しない。しかし、少数でも個体が生存していれば、再び個体群を増やすことができる。

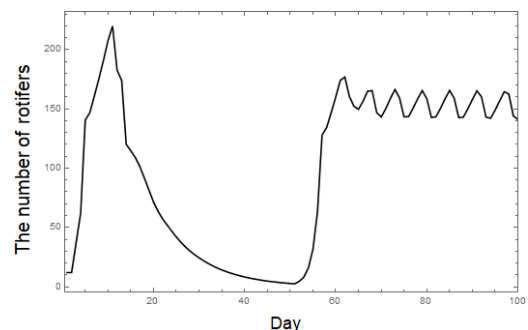


図 4 絶食後、再び給餌した場合

以上のシミュレーション結果から、絶食下において自身の生存を諦めて産卵する“外れ値”個体が出現することによって、群の存命期間が延長されることが示された。仮に、大多数が絶食下で産卵を選択した場合、孵化率が低いため個体群の絶滅が早まるものと推測される。このように本研究では、自然界に出現する外れ値が個体群の維持に寄与する例を見出した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----