HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	バイオロギング手法を用いた太平洋ニシンの集団産卵に関する研究
Author(s)	関, 恭佑
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(環境科学)
Dissertation Number	甲第16731号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16731
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99576
Type	doctoral thesis
File Information	SEKI_Kyosuke_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨/Dissertation Abstract

博士（環境科学）　　氏　名/Applicant　関 恭佑

学 位 論 文 題 名/Title of Dissertation

バイオロギング手法を用いた太平洋ニシンの集団産卵に関する研究
(A study on group spawning behavior of Pacific herring *Clupea pallasii* using bio-logging methods)

集団産卵とは、複数の個体が集合して放精・放卵を繰り返す産卵様式である。多くの魚種で見られる一方、イベントの発生が偶発的で、かつ多数の個体が密集するため目視観察が難しい。特に産卵イベントの開始から収束まで、個体レベルでの行動変化を連続的に計測することは困難である。しかし、集団内では個々が自身の繁殖成功を最大化させるために行動していることが想定され、集団産卵のメカニズムを理解するためには個体レベルで行動を計測することが求められる。

太平洋ニシン*Clupea pallasii*は大規模な集団産卵を行い、雌雄がペアを作らず個別に放精・放卵する。こうした状況で受精率を高めるために、複数個体が同調して放精・放卵する可能性が考えられている。しかし個々の行動の時系列変化や放精・放卵のタイミングは調べられておらず、産卵メカニズムは明らかにできていない。この課題に対して魚体に記録計（ロガー）を装着するバイオロギング手法が有効である。近年はロガーの小型化・廉価化が進み、ニシンのような小型魚類・複数個体への応用が可能となった。そこで本研究では複数個体のニシンにロガーを装着し、水槽内で集団産卵を再現することで、行動の時系列変化や個体の行動特性を明らかにすることを目的とした。

序論を第一章とし続く第二章では、集団内の行動の時系列変化を調べるために大型実験水槽で集団産卵を再現した。北海道標津町で漁獲されたニシン911尾のうち57尾（オス17尾、メス40尾）に3軸加速度データロガーを装着して水槽内に投入し産卵を誘発させた。2023年4月21日の夜間から翌日の早朝にかけて大規模な集団産卵が生じた。ロガーデータには、産卵行動に伴う尾びれの動きや姿勢変化が反映された。行動変化の指標として、4月21日19時を解析開始とし5分ごとに加速度の標準偏差（SD）を算出した。その結果、開始から約1時間20分後の20時20分ごろから、複数の個体において徐々にSDが大きくなり始め、その後約30－40分間で多くの個体のSDが同調的に増加した。その後SDは減少し、さらに増減を繰り返しながら徐々に収束していった。既往研究では、放精の際に放出されるフェロモンが他個体の放精・放卵行動を誘発すること、また個体は時間の経過とともにフェロモンへの応答が弱まり、再度の応答には高濃度のフェロモン暴露または一定の時間経過が必要であることが報告されている。本実験では30－40分間でフェロモンが他個体に作用し、同調的に行動が変化したと考えられた。その後はフェロモンへの感受性の低下と、再び同様の行動の誘発が生じたことで、周期性を伴いながら徐々に産卵が収束したと考えられた。このように本種はフェロモンによって複数個体の行動が同調することで受精率を高めることができると考えられた。一方

でフェロモンの感受性の低下によって行動が時間的に分散されることで、産卵場所が固定されず、卵の過密などのリスクを回避することができ、子孫の生存率を高めていることが考えられた。

こうした加速度変化からは産卵行動に付随する行動変化が分かるが、配偶子放出のタイミングを調べることは出来ない。そこで第三章では配偶子放出の検出方法を確立することを目的として、加速度の変化から行動を分類する機械学習モデルを構築した。小型実験水槽にロガーを装着したニシンを投入し、集団産卵イベントを誘発させた。実験中の映像記録と、加速度データと行動を対応付けた。2回の実験から合計14.5時間の動画データを観察し、合計9尾（オス6尾、メス3尾）から1190回の配偶子の放出を記録した（放精625回、放卵565回）。これらを教師データとしてランダムフォレストモデルを作成し、モデルの精度を検証した結果、適合率0.90、再現率0.96、F_1スコア0.93と高い精度を示した。これらの値は既往の魚類の行動分類モデルと比較しても十分に高精度であった。

第四章では、個体ごとの産卵時の行動特性を明らかにするために、第三章で構築した行動分類のモデルを第二章で得られた加速度データに適用し、抽出された配偶子の放出タイミングと雌雄・体長（FL）との関係を調べた。解析対象とした50尾から、1－328回の放精・放卵行動が抽出された。各個体で放精・放卵回数、集中時間（行動発生時刻の四分位範囲）、開始時間（最初に行動が抽出された時刻）の3つの指標を算出した。各指標は独立した応答変数とし、それぞれに対して一般化線形モデルを作成した。説明変数としては雌雄、FLおよびその両方を含む複数のモデルを作成し、最も当てはまりの良いモデルを選択した。放精・放卵回数と集中時間については、どちらも雌雄のみを説明変数とするモデルが最適であった。オスはメスよりも配偶子放出の回数が少なく、短時間で集中的に放精していたのに対し、メスは短時間で放卵する個体と、長時間かけて放卵を続ける個体が存在した。メスは時間的に放卵を分散させることで、子孫の生存率を高めていると考えられ、二章の結果を支持した。開始時間についてはFLと雌雄を含むモデルが最適であり、FLが小さい個体は放精・放卵を開始した時刻が早かったのに対し、FLが大きい個体では、早くに放精・放卵を始める個体と、遅れて反応する個体の双方が確認された。本実験で使用したニシンのFLは24.0－31.5 cmであり、3－8歳魚に相当すると考えられる。既往研究より、ニシンは若齢個体が高齢個体の産卵回遊を学習していくことが示唆されている。このことから高齢個体の放精・放卵のタイミングには過去の経験が影響している可能性があり、高齢個体ほど産卵パターンが多様化すると考えられた。

本研究では、集団産卵における個体の行動を詳細に計測した。ニシンは自身の繁殖成功を高めるために、集団産卵の中でも適切なタイミングで放精・放卵をしていると考えられた。オスは短時間で集中的に放精することで、フェロモンによって複数の個体が同調するトリガーともなり、結果として受精率を高めることができると考えられた。一方で、メスにおいては、卵が高密度になると死亡率が高まるため、時間的に分散して放卵していると考えられた。こうした雌雄による産卵特性の違いは、産卵期に参加する産卵イベントの数や滞在期間等、沿岸域に来遊する前後の産卵回遊パターンに影響すると考えられる。さらに、本種の同一個体を数年単位で連続的に記録することによって、年級群や経験による産卵パターンの違いを詳細に明らかすることができると考えられる。また本種で見られたような、行動の同調による受精率の向上や、卵の過密によるコストを回避するメカニズムは、他の集団産卵を行う魚種でも生じている可能性がある。今回提案したバイオロギング手法で個体の行動を取得し群れの動態を調べる方法は、こうしたメカニズムの解明に有効であり、将来的には多様な魚種における集団産卵の理解を深める上で重要なアプローチになると考えられる。