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_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士（環境科学）　　氏 名 関 恭佑

審査委員　主査　教授　宮下　和士
副査　教授　仲岡　雅裕
副査　准教授　南　憲吏
副査　准教授　萩原　聖士
副査　特任教授　志田　修
（北方生物圏フィールド科学センター）

学 位 論 文 題 名

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、複数個体が集合して放精・放卵を行う産卵様式であり、多くの魚種で見られる。一方で、発生が偶発的かつ高密度で起こるため、目視による観察は困難であり、産卵開始から収束までを個体レベルで連続的に計測することは難しい。しかし、集団内では各個体が自身の繁殖成功を最大化するよう行動していると考えられ、集団産卵の理解には個体レベルの行動計測が不可欠である。太平洋ニシン Clupea pallasii は大規模な集団産卵を行い、雌雄がペアを形成せず個別に放精・放卵する。受精率を高めるために複数個体が同調して配偶子を放出する可能性が示唆されているが、行動の時系列変化や放精・放卵のタイミングは未解明である。近年、データロガーの小型化・廉価化が進み、小型魚類や複数個体へのバイオロギングが可能となった。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、個体行動の時系列変化と行動特性を明らかにすることを目的とした。

第二章では、集団内の行動の時系列変化を調べるため、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、水槽内に投入して産卵を誘発した。2023年4月21日夜から翌早朝にかけて大規模な集団産卵が確認され、加速度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ていた。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）を算出したところ、約20時20分頃から複数個体でSDが増加し始め、その後約30～40分間にわたり多くの個体で同調的な増加が認められた。その後SDは減少し、増減を繰り返しながら徐々に収束した。既往研究で示されているフェロモンによる行動誘発と感受性低下を踏まえると、本実験においてもフェロモンを介した行動同調とその低下により周期性を伴いながら産卵が収束することで、受精率の向上と卵の過密回避の両立に寄与している可能性が考えられた。

第三章では、配偶子放出の検出方法を確立するため、加速度データに基づく行動分類の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、集団産卵を誘発した。実験中の映像記録と加速度データを対応付け、2回の実験から14.5時間分の動画を解析した結果、9尾（オス6尾、メス3尾）から1190回の配偶子放出（放精625回、放卵565回）を記録

した。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たところ、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。

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、行動分類モデルから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指標を算出し、各指標を応答変数とした一般化線形モデルを作成した。説明変数として雌雄、FLおよびその両方を含むモデルを比較し、最も当てはまりの良いモデルを選択した。放精・放卵回数および集中時間については、いずれ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、メスでは短時間で放卵する個体と長時間にわたり放卵を続ける個体が確認された。メスは放卵を時間的に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、第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の小さい個体は放精・放卵開始時刻が早かった。一方、FLの大きい個体では、早期に開始する個体と遅れて反応する個体の双方が確認された。本実験で用いたニシンのFLは24.0－31.5 cmで、3－8歳魚に相当すると考えられる。既往研究では、ニシンは若齢個体が高齢個体の産卵回遊を学習することが示唆されており、高齢個体ほど過去の経験の影響を受け、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。

以上のとおり、申請者は、太平洋ニシンの集団産卵を対象として、バイオロギング手法および機械学習を組み合わせることにより、これまで困難であった集団産卵における個体レベルの行動変化および配偶子放出の時系列特性を明らかにした。本研究は、フェロモンを介した行動同調や、雌雄による産卵戦略の違いを定量的に示すことで、集団産卵のメカニズム理解を大きく前進させたものであり、水産資源の持続的利用や繁殖生態の解明に対して重要な学術的貢献をなすものである。

審査員一同は、これらの研究成果を高く評価するとともに、申請者が研究者として誠実かつ主体的に研究を遂行し、高度な分析能力と十分な学識を備えていることを認めた。以上の理由から、関　恭佑氏は博士（環境科学）の学位を授与するにふさわしいとの結論に達した。