

学位論文題名

自然海域におけるヒラメ成魚の遊泳行動に関する研究

学位論文内容の要旨

【研究の背景と目的】経済水域内における漁業資源管理を各国の責任においてしなければならない今日、水産生物の資源動向を把握するためには、漁獲対象魚種の回遊・移動経路ならびに行動情報を高精度で、長期間にわたり計測することは大変重要である。ヒラメは種苗放流技術が確立され、栽培漁業や資源管理型漁業の重要対象種となっている。このため種苗技術の確立のための初期生活史に関する研究は進んでおり、特に初期生態に関する知見はきわめて多く、資料も整備されている。しかし、ヒラメ成魚の移動を含む自然海域での行動に関する知見は非常に少なく、産卵期と摂餌期で深淺移動を行うなどの断片的なことしか知られていない。

ヒラメ成魚は魚体形状が扁平で鰾を持たず、負の浮力を有するという形態的な理由から海底生活に適応したと考えられる。この形態的特性は、遊泳という点からは極めて不利であり、異体類は定着性で積極的な移動をしないと考えられてきた。しかし、標識放流調査から本種は長距離移動することが知られるようになり、形態的な適応と相反する長距離移動を可能にする本種に特化した行動的適応（前適応）を遂げていることが推論される。ヒラメは、上昇と下降を繰り返しながら鉛直遊泳行動することが知られている。ヒラメを含む異体類さらにはマグロやサメのように負の浮力を有する魚種では、ある2点間を移動するのに遊泳と惰性遊泳を繰り返し、エネルギー消費量の高い遊泳時間を減らすことで水平的に持続遊泳するよりは移動コストの削減になると、理論的に証明されている。しかしこの仮説を支持する自然環境下における魚類の遊泳行動の観測例は得られていない。

本研究では、第一にヒラメの行動を野外で詳細に連続観察するために加速度センサ搭載型のデータロガーを使った行動の自動・連続測定方法の確立を目指した。さらに、津軽海峡沿岸域に生息するヒラメ成魚を対象に、活動の日周性と離底行動の機能を明らかにすることを目的として、長期間にわたる行動測定を行った。最後に、鉛直遊泳行動が、エネルギーコスト軽減にどのような役割を果たしているかを実験的に解明することを目的に、以下の2つの仮説を自然海域で個体の行動（深度・遊泳速度・加速度(遊泳時の体の振動数・遊泳姿勢)）を記録することで検証した。

- 1) ヒラメ成魚は移動する距離の長短によって、移動様式を変えている。
- 2) 鉛直遊泳は水平遊泳に比較して移動時の消費エネルギー削減に貢献する。

【行動測定手法の確立】ヒラメの遊泳運動と行動は、水産工学研究所の魚群行動実験水槽で、加速度センサ搭載型のデータロガーを用いて測定した。また、ビデオカメラによって、連続的にヒラメの行動を記録した。

加速度センサを用いて遊泳運動時における加速度を直接記録することができ、自由遊泳するヒラメから遊泳運動時の体軸の振動周期と完全に同期する加速度記録が測定できた。そして、記録された加速度と深度、速度データから本種の行動を3パターン（定位・潜砂・離底行動）に分離でき、それらの行動を定量的に記録できることが示された。加速度ロガーは魚類の行動情報を得る上で有効かつ信頼性の高い計測システムであることを証明された。

【ヒラメ成魚の離底行動の長期間にわたる測定】2000年10月～11月にヒラメ成魚11個体に、深度および水温を記録するデータロガーを装着して、北海道知内町沖合に放流した。回収され、データを取得できた4個体について解析を行った。また、日本海新潟沖でデータロガーを用いて過去に取得された1個体の行動データも解析に供した。

5個体の放流魚から114.5～589.5時間（4.8～24.6日間）の連続的な深度・水温・加速度（新潟での実験個体のみ）のデータを得た。海底からの離底の高さは、3個体で夜間の方が有意に高く、離底持続時間は2個体で夜間の方が有意に長かった。また、上昇率は2個体で夜間の方が有意に高かった。2000年10月28日～11月4日までの4個体中の3個体について、1時間あたりの離底時間の百分率（離底率）を求め、日周性との対応を検討したところ、離底率は夜間に高いことが認められた。

ヒラメは海底面で餌生物を「待ち伏せ」する視覚的捕食者であることが知られている。つまり、昼間の高さが低く時間の短い離底行動は主に捕食行動に関与すると考えられ、視覚的捕食者であるヒラメが、夜間に捕食に伴う離底行動を行っているとは考えにくい。また、夜間には離底行動を繰り返すたびに海底滞在深度は数mも変化した。放流海域の水深10m以深の海底勾配は2/1000～5/1000ほどであるから、数mの滞在深度の変化は1000m以上の移動を行っていたことになる。以上から、昼夜の離底行動の違いは、夜が移動、昼が捕食に伴うものであると推察された。

【加速度ロガーによるヒラメ成魚の移動様式の測定】2000年10～11月、10個体に加速度ロガーを装着し、上記と同じ場所で放流した。上記の2つの仮説を自然海域で深度・遊泳速度・加速度（遊泳時の体の振動数・遊泳姿勢）を指標に行動測定して検証した。

2個体の回収に成功し、33.9, 124.2時間の連続行動データを得た。記録された加速度波形の明瞭な違いから、ヒラメの移動様式には次の2つのパターンがあることが明らかになった。

- (1) **only-beat** 方式：離底開始から終了まで、遊泳に伴う加速度波形が連続的に記録される移動パターン。このパターンでは離底の高さは1mを超えること

はまれであり、また、離底持続時間は3分間を超えることはなかった。

- (2) **beat-glide** 方式：離底開始から終了までの間、体の振動を断続させる移動パターン。このパターンでは上昇と下降を連続的に繰り返し、上昇時にのみ体を振動させて、離底の高さは**1m**以下になることはまれであった。また離底持続時間は最長で約**24**分間に及んだ。

2つの移動様式の間で解析した各パラメータを比較したところ、遊泳持続時間には2つのパターン間に有意差は認められなかった。また水平移動距離は**beat-glide**方式の方が有意に距離が長く、ヒラメは移動距離の長短に応じて、移動方式を変えていることが示唆された。さらに、水平移動距離と魚体振動数との間には、両パターンともに有意な正の相関関係が認められ、同距離を移動する場合には**beat-glide**方式では**only-beat**方式に比べると振動回数を約**22.3%**節約でき、さらに酸素消費率で両者を比較すると、**62.0%**の移動コスト削減に繋がると試算され、鉛直遊泳（**beat-glide**方式）は、遊泳に際して生理的・形態的制限が数多く存在する本種が、移動距離に応じて選択的に利用する価値のある移動方式であることが証明され、ヒラメの移動コスト軽減に貢献するという仮説は支持された。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 梨 本 勝 昭
副 査 教 授 山 本 勝 太 郎
副 査 助 教 授 平 石 智 徳
副 査 助 教 授 山 下 成 治

学 位 論 文 題 名

自然海域におけるヒラメ成魚の遊泳行動に関する研究

海洋生物資源を合理的に利用するためには水産資源の動態を正確に把握することが必要である。このためには漁獲対象魚種の回遊・移動経路などに関する行動の情報を精度良く、長期間にわたって得ることがなによりも重要である。自由遊泳中の魚類の活動量（遊泳速度や代謝量）を見積もることは生態に関する情報を得ること、また資源量を予測するためにはなによりも必要である。魚類の活動量を見積もるためには自由遊泳運動中におけるエネルギー消費量を詳細に見積もることが求められている。今まで自然環境下における魚類の遊泳行動については多くの研究が取り組まれてきている。標識放流によって回遊経路の推定や超音波発信器を用いたバイオテレメトリー法によって魚の位置情報、遊泳水深、水温、体温、心拍数、筋電図の情報を遠隔測定することによって、移動量、代謝量、活動の様子が解明されてきている。しかし、テレメトリーによる測定では魚の移動率の算定においては数分間隔の2点間の位置情報しか得られず、また連続的に行動追跡を行わなければならない、測定期間は数日が限度で、労力を多大に要し、気象や海況に左右され測定が大きく制約を受けるなど計測技術に困難な点が多く断片的な情報しか得られていないのが現状である。近年のエレクトロニクスの技術の進歩によって小型で大容量のメモリを内蔵したデジタル方式のデータロガーが開発され、記憶装置の小型化と大容量化によって実用的段階に入り、非常に注目されてきている。データロガーは主に、水温と圧力センサーと記憶装置メモリーが搭載され、水温と深度を1秒～数分間隔で最大で1年間程度連続的に測定でき、テレメトリーより長期にわたり、連続的に労力を少なく計測できる利点がある。すでに高度回遊性の魚種（シロサケ、クロマグロなど）で使用し計測され、魚類の遊泳行動を連続的に記録することによって、これまで取得することが不可能であった遊泳行動の生態に関する知見が得られるようになってきた。しかし、データロガーは装着し、放流した魚の再捕獲が必要になるため、実験対象魚は高い回収率が期待されるサケ科などに限られている。我が国において1960年代後半

にヒラメの種苗生産、放流技術が確立され、栽培漁業や資源管理型の重要な対象種となっている。種苗生産、資源培養技術の開発のため初期生活史に関する知見は多いが、産卵親魚を含む成魚の移動に関する自然海域での行動生態についての知見は非常に乏しい。ヒラメの資源動向を把握するためには回遊・移動経路ならびに行動の情報を高精度で、長期にわたって知ることが大変重要である。

本論文ではヒラメの遊泳行動を野外で詳細に連続的に観察するために、深度、体軸方向の遊泳速度、体軸方向とこれに垂直な上下方向の加速度を同時に連続的に計測できる加速度センサー搭載型データロガーを使ってヒラメを対象として遊泳行動の自然海域において測定する方法を確立した。そして、北海道津軽沿岸に生息するヒラメ成魚を対象に加速度センサー搭載型のデータロガーを装着して実海域において放流、再捕した資料を使って自然海域におけるヒラメ成魚の遊泳運動、活動の日周性、離底行動などについて明らかにしたものである。ヒラメの移動様式としてonly-beat方式（海底近くを体軸を連続的に振動させ水平的に移動）とbeat-glide方式（上昇と下降を連続的に繰り返して、上昇時には体軸を振動させ、下降時には滑空する）の2つの運動パターンがあることなどを解明した。

特に審査員一同が高く評価した点は以下の通りである。

- 1) ヒラメ成魚に加速度センサー搭載型データロガーを装着して、加速度と深度、速度の記録資料から行動を3つのパターン（定位、潜砂、離底）に分類できることを示した点。
- 2) 海底からの離底率（離底時間の百分率）は夜間に大きく、離底の高さは夜間で大きいことを定量的に示した点。
- 3) ヒラメの移動様式についてonly-beat方式（海底近くを体軸を連続的に振動させて水平的に遊泳移動）とbeat-glide方式（上昇と下降を連続的に繰り返して、上昇時には体軸を振動させ、下降時には滑空をする）の2つの運動パターンがあることを見出した点。
- 4) ヒラメがonly-beat方式で遊泳する時の姿勢（体軸の傾き）は約4~9°、beat-glide方式では上昇時の遊泳姿勢は約13°、滑空時では約-6°であることを明らかにした点。
- 5) 水平移動距離はbeat-glide方式とonly-beat方式とでは遊泳行動時間には差は認められないが、滑空を含む前者の水平移動距離の方が大きく、ヒラメは移動距離の長短によって移動方式を選択していることを指摘した点。
- 6) ヒラメが同じ距離を移動する場合には、only-beat方式に比べてbeat-glide方式の方が酸素消費量から試算し、62%エネルギーの節約になることを指摘した点。

以上の成果はヒラメの栽培漁業および漁業管理の基礎的知見を得たものとして高く評価できる。よって審査員一同は本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。