

学 位 論 文 題 名

音響によるスケトウダラの行動制御に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

【目的】

沿岸漁場を有効的に活用して安定した計画的な漁業生産をすることが強く要望されている。日本を始め、各国では、必要な魚類蛋白質を自給自足するために、作り、育てて、捕る栽培漁業が推進されつつある。栽培漁業の一形態である海洋牧場において、魚の行動を制御する手段として、水中音による音響馴致などが注目されている。そのため、魚類の発音の有無と行動との関係、発音機構、聴覚特性あるいは水中音に対する行動などを十分把握する必要がある。

近年、北海道周辺海域におけるタラ科魚類の水揚げが減少し、しかも大変不安定な状態にある。しかしながら、タラ科魚類は亜寒帯海域における主要な魚類蛋白質資源であり、その計画的な資源管理と安定生産が強く望まれている。従ってタラ科魚類は将来、沿岸海域における栽培漁業の対象種として非常に有望である。これまで、大西洋産のタラ科魚類の鳴音と聴覚特性については、数多くの研究が報告されているが、太平洋産のタラ類については全く不明であった。そこで、北海道周辺海域に棲息する代表的なタラ科魚類であり、入手が容易なスケトウダラを研究対象種として選定した。

本研究では、海洋牧場において音響を用いた魚群行動制御に関する基礎資料を得るため、スケトウダラの鳴音の機能と発音のメカニズム、発音筋重量の性・成熟・季節的变化、聴覚閾値と鳴音の特性、聴覚におけるマスキング効果等を明らかにし、感度の良好な周波数の純音と餌の組み合わせで魚を学習させ、音響馴致の可能性を検討した。

【方法】

1. 繁殖行動に伴う鳴音

成熟卵を持つ、尾叉長が386～509 mmの雌5尾と、尾叉長が376～532

mmの雄7尾を実験水槽に入れて観察した。繁殖行動に伴う鳴音はビデオカメラと水槽内に入れたハイドロフォンを用いて録画・録音した。

2. 発音機構

スケトウダラを生かしたまま腹部を切開し、発音筋と鰾が観察できるように食道と内臓を切り除いた。その後、供試魚の頭部・鰾の前部・鰾の後部・尾部の4部位に電気刺激を与えて、音の発生の有無を観察した。

3. 発音筋重量の季節的变化

北海道太平洋側において1月・4月・9月に採集されたスケトウダラの鰾に付着している一对の発音筋を摘出して、その湿重量を測定した。発音筋の発達の度合いを定量的に見るため、柄重量に対する発音筋重量の千分率を発音筋重量指数(DMI)と定義し、雌雄・成熟度・季節別に発達の比較に用いた。

4. 聴覚閾値

魚は60～1000 Hzの8種類の純音の水中音とDC 12Vの電気ショックの組み合わせで条件付けを行った。水槽を挟んで対向させた空中スピーカーから音圧レベルを変化させながら放音し、供試魚の心拍間隔の変化から聴覚閾値を求めた。

5. マスキング効果

周波数60～500 Hzの純音と電気刺激の組み合わせで、魚に条件付けを行った。背景雑音として与えたホワイトノイズの音圧レベルを一定にしておいて、刺激音の音圧レベルを変化させ、魚の心拍間隔の変化から聴覚閾値を求め、その聴覚閾値と雑音レベルの比から臨界比を算出した。

6. 音と餌による学習付け

尾叉長が385～459 mmの雄8尾、雌5尾を実験水槽に収容して、水槽内に設置した水中スピーカーで聴覚感度が良好な200 Hzの純音の放音と遠隔給餌装置からの給餌の組み合わせによって学習付けを行い、ビデオ映像から魚の行動を解析し、学習の経過ごとに、放音のみの場合について、餌場への出現頻度を放音前・放音中・放音後に分けて解析した。

【結果】

1. 行動と鳴音のパターン

一つの鳴音は複数のグラント音で構成され、その周波数成分は行動ご

とに異なっていた。すなわち、雄の優位魚が他の雄に向かって発する単発のグラント音(威嚇音)や他の個体を接触攻撃する際に発する2～5個の連続したグラント音(攻撃音)の周波数成分は1000 Hz以下であり、群れから離脱する個体に対して発する求愛音や産卵前の雌を追尾しながら発する産卵音は数秒間の連続したグラント音で、その周波数成分は500 Hz以下であった。

2. 発音のメカニズム

電気刺激によって人為的に発音させることができることから、発音筋の瞬間的な収縮弛緩作用が鰾壁を振動させ、これに鰾が共鳴することによって音を発していることがわかった。

3. 発音筋重量の変化

発音筋は雄が雌より発達しており、雄の場合は未成魚より成魚が、また1年の内では、繁殖期が最も発達した。繁殖期に雄成魚の発音器官が発達することは、雄が繁殖行動時に頻繁に鳴音を発することと一致する。

4. 聴覚閾値と可聴周波数範囲

供試魚は60～1000 Hzの音に反応し、120 Hzと200 Hzの純音に最も敏感で、その平均聴覚閾値は97.7～100.3 dB(re 1 μ Pa)であった。また、400 Hz以上では感度が徐々に低下し、可聴周波数の上限はほぼ1 kHzと推定された。

5. マスキング現象と臨界比

実験に用いた60～500Hzの全周波数でマスキング現象が認められた。その臨界比は周波数が120Hz以上になると急激に増加するが、120Hz以下では減少した。

6. 学習付けの進行状況と出現頻度

学習開始日から8日目に反応を示し、学習が進むに連れて放音後に音源付近に蟄集する率が高くなり、音のみによる出現頻度は10～28%であった。

【考察】

スケトウダラの産卵は薄暮時に、雄の盛んな鳴音とともに行われたので、視界が制限されている夜間の海中では、個体の識別や産卵行動に鳴音が重要な役割を演じていると考えられる。

鳴音の周波数成分は1000 Hz 以下にあり、最大エネルギーは150 ～ 300 Hzにある。聴覚感度は刺激音が400 Hz 以上では周波数とともに低下し、鳴音の主成分は聴覚感度の良好な周波数帯と一致している。

スケトウダラを音で制御しようとする場合には低周波数の音が好ましいが、海中の背景雑音を考慮すると、効率的に魚群を制御するために放音する音としては、150 ～ 300 Hz の音が望ましい。臨界帯域幅と魚の聴覚感度を考慮し、200 Hz と 300 Hz の純音を使用することを想定すれば、背景雑音よりも各々44.4 dB 以上、59.6 dB 以上高い音圧が必要である。しかし、音圧が高すぎると威嚇音となるので、魚を誘集するために放音する音圧を130 dB 以下に抑える必要がある。背景雑音を考慮した本実験では、魚は学習付けの音を放音すると同時に餌場へ速やかに移動して索餌した後、音源の周辺で索餌行動を見せたので、音響学習による後天的条件反射を誘発させる可能性が十分考えられた。

これらの知見から、将来、太平洋産タラ科魚類の飼育付け漁場を造成して資源を管理し、合理的な計画生産をすることが可能と考えられる。また、定置網にスケトウダラの稚仔魚が多量に混獲されるが、これを防止するために音で逃避行動を誘発させて、稚仔魚の初期減耗を抑える資源管理の試みにも利用できる。

今後、海洋牧場において、有望視されているマダラについて水中音を用いて制御するためには、音源探知能力や学習音の記憶能力についても解明する必要がある。さらに、沿岸漁場における背景雑音のスペクトラムレベルと聴覚特性との関係を予め調べておく必要がある。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 梨 本 勝 昭

副 査 教 授 高 橋 豊 美

副 査 助 教 授 飯 田 浩 二

学 位 論 文 題 名

音響によるスケトウダラの行動制御に関する基礎的研究

近年、特に海洋環境と生態系を破壊することなく、海洋生物資源を合理的に管理しながら、有効的に生産することが強く求められている。200 カイリ体制以後、沿岸における魚介類の海洋生物資源が大いに注目されてきている。しかし、これらの海洋生物資源の中には、すでに資源量水準が著しく悪化したものが多く、十分利用可能な資源量にするためには禁漁期、禁漁区の設定だけでは不十分で、人為的に魚介類の種苗を大量に生産し、これを適正な漁場に放流して、その後に保護を加えつつも自然の海で成長をせさ、一定の大きさになった後に漁獲する資源培養型の栽培漁業を積極的に進めることが必要である。そして、これらの資源を合理的な管理のもとで有効的に活用することが強く要望されている。サケ・マスのような特定の魚種について近年目覚ましく大きな成果が得られているものもある。初期餌料の大量培養技術の開発と大型水槽による育成管理技術の開発によってクルマエビ、マダイ、ガザミ、ヒラメ、カレイ類、クロソイ、アワビ、ウニなどについては種苗の大量生産が可能になってきた。そして放流事業も積極的に行われてきている。しかし、これら、栽培漁業の対象となる多くの魚種では十分な成果が得られていない。その原因の一つは人為的に生産した種苗を自然の海にそのまま放流しても環境に十分順応できずに初期に大量に死亡するものが多く、また放流魚が広く逸散してしまい、放流魚の再捕が十分期待できないことである。このような栽培漁業においては初期減耗をいかに少なくして、さらに逸脱を防止し、再捕率を高くすることが最大の課題となっている。このため音や光によって魚群を遮断、威嚇、駆集、誘導、誘引する行動制御技術の開発が大いに求められている。

水中においては光や電波に比べて音は減衰が少なく広範囲にわたって到達するので魚の刺激として音は大いに有効的な手段と考えられる。魚自身も水中音を発生し、外敵を威嚇したり、同種の魚が相互に認識し合ったり、仲間同士で危険信号を送ったりすることが知られている。また、古くから十分な科学的な解明はされていないが、漁民の経験によって種々工夫をしていろいろな音を発生し、魚を誘致したり、威嚇したりして行動を制御して漁獲をしている。最近では大分県や長崎県でマダイを音と餌で学習する音響馴致を行って、放流後に大きく育ったマダイの再捕率を向上させる事業が大規模に取り組まれている。

世界的には30種位の魚の聴覚特性については測定されているが、日本の沿岸におけ

る有用な栽培漁業対象魚種についての資料は少ない。一般に魚類の可聴周波数範囲は 10~5000 Hz で、100~1000 Hz の周波数帯の音に敏感であることが知られている。音刺激によって魚群を制御するためには、まず魚の音響生態と魚が感受できる周波数範囲や聴覚閾値を知る必要がある。また、魚の最も敏感に感ずる周波数、背景雑音と刺激音の弁別能力、音源探知能力なども把握する必要がある。特に海洋牧場では水中音を利用するためには魚の学習音の記憶力の持続性について十分明らかにすることが重要である。

現在、北海道周辺のスケトウダラは重要な漁業対象種であり、道東および道南の日本海、噴火湾周辺海域では産卵期を中心として、釣り、刺し網漁業が行われている。しかし、近年、この海域での漁獲量は著しく減少し、しかも大変不安定な状態になっている。亜寒帯海域における栽培漁業の有望な対象魚種としてはヒラメ、クロソイ、マツカワ、その他のカレイ類などが注目されている。特に将来、スケトウダラについても栽培漁業の対象種として考えられ、十分な資源管理のもとで安定的な生産をすることが大いに期待されている。

申請者はこのような視点よりスケトウダラを研究対象として、音響による魚群制御をするために必要な基礎資料を得るために、スケトウダラを解剖学的に調べ、発音筋が存在することを確認し、飼育実験によって威嚇音、攻撃音、産卵音の鳴音を発することを調べた。そして、魚に電気刺激を与えて発音筋を振動させ、鳴音の発生する仕組みについて解明した。また、発音筋重量変化について雌雄別、季節別に調べ、産卵時期の鳴音発生との関連性について検討した。さらに、純音と電気刺激との組み合わせによる条件付けを行って心電図を導出し、心拍間隔の変化から聴覚閾値を求めるとともに臨界比を算出し、マスキング効果について考察した。さらに、鈍音と餌による学習付を行い、音による魚群制御、音響馴致の可能性について検討している。

特に審査員一同が評価した点は以下の通りである。

1. スケトウダラには発音筋が存在することを確認し、飼育実験によって威嚇音、攻撃音、産卵音の鳴音を発生することを見つけた点。
2. 発音筋に電気刺激を与え、人為的に振動させて、鳴音を発生する仕組みについて明らかにした点。
3. スケトウダラの鳴音は数個のパルスからなるグラント音で構成され、周波数の主成分は 150~300 Hz に存在することを指摘した点。
4. スケトウダラの聴覚閾値曲線を求め、周波数 200 Hz が最も閾値が小さく音圧約 98 dB(dB re $1\mu\text{Pa}$)となること、またこの周波数帯の音を識別するために臨界比を算出し、環境雑音より 45dB 以上高い音圧で放声する必要があることを指摘した点。
5. スケトウダラを音と餌による条件付けを行い、約 8 日程度で学習付けができ、音響による馴致の可能性について検討した点。

以上の諸点はスケトウダラなどを対象にして、音響による魚群行動を制御するために重要な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（水産学）の学位論文として価値あるものと認定した。