学位論文題名

マコガレイの聴覚特性に関する研究

学位論文内容の要旨

【目的】 近年、世界の多くの国々において沿岸の大陸棚水域における有用な漁業資源の水準が著しく低下してきている。したがって、資源を適切に管理するとともに、種苗を生産育成し、放流などを積極的に行うつくり育てる栽培漁業をいっそう推進することが強く要望されている。沿岸海域における栽培漁業を大きく推進して、効果的な漁業生産を上げるための技術として注目されているのが音響を利用した魚の行動制御技術である。網なし生け簀や飼付け型漁業にこの技術を応用することによって、種苗放流して成長した魚群を音で集魚し漁獲することが期待されている。今までに、音と餌を同時に与えて種苗を学習させ、中間育成や放流後も効率的な給餌を行う音響馴致による海洋牧場の試みがマダイ、ヒラメ、クロソイなどを対象に行われてきている。これらの音響馴致では滞留効果は認められているが、学習の存続期間、経過年数に伴う再捕率についてはほとんど明らかにされていない。また、近年日本では栽培漁業の有用な対象魚種の一部について聴覚閾値などが少しずつ調べられているが、聴覚特性に関する基礎的な知見が不足している。特に、聴覚に及ぼす雑音の影響、音源方向の識別能力、周波数弁別能力、学習の存続期間などの測定例は少なく、音による魚群行動制御に関する基礎的な知見の蓄積が強く望まれる。

マコガレイは北海道中部以南から大分県付近までの日本沿岸、朝鮮半島南部および中国の渤海、黄海沿岸水域に広く分布している。本種はカレイ類の中では市場価格が高く、しかも成長が速いので、近年栽培漁業の対象魚種として注目され、将来、マコガレイを対象とした海底牧場の開発を行うことが強く期待されている。

本研究ではマコガレイの聴覚特性に関する基礎的な知見を得ることを目的として、音と電気刺激による古典的条件付け手法を用い、心電図を導出して、マコガレイの聴覚閾値、雑音によるマスキングおよび周波数弁別能力などの聴覚特性を調べた。

【材料・方法】 全長 22～33 cm のマコガレイ 10 尾を用いて静穏時の聴覚閾値を測定した。供試魚は実験前に麻酔して心電図導出の電極を囲心腔付近に取り付け、周波数 60

～1000 Hz の 9 周波数の純音と電気刺激との組み合わせで条件付けを行った。閾値測定は条件付けした周波数の純音を 1 秒間放声した時の心拍間隔の変化から反応の有無を判定し、音圧レベルを変化させてマコガレイが反応を示した最小音圧を聴覚閾値とした。

次に、全長約 25 cm のマコガレイ 16 尾を用いて雑音によるマスキングについて実験を行った。実験では静穏な状態から始め、周波数特性が平坦な雑音を人為的に一定レベルで連続的に発生させた状態で同一個体について聴覚閾値を測定した。刺激音には周波数 60～700 Hz、放声時間 1 秒の純音信号を使用した。雑音レベルは 70～90 dB の間で 5 段階に設定した。それぞれの雑音環境下で測定した聴覚閾値と雑音レベルの関係から臨界比を求め、マスキングが生ずる雑音のレベルについて検討した。

さらに、全長 22～34 cm のマコガレイ 25 尾を用いて、周波数の異なる 2 つの純音信号を組み合わせで条件付けし、周波数弁別能力について調べた。刺激音には放声時間が 1 秒間で基本周波数 F1 の音と変換周波数 F2 の音との 2 つの純音信号を 0.2 秒間隔で組み合わせで使用した。放声音圧は各測定周波数で聴覚閾値より 20 dB 大きく設定した。条件付けは、F2 が F1 に等しい刺激音を 7.8 秒間隔で連続 5 回放声してから 7.8 秒後に、F2 が F1 の 2 倍（あるいは 0.5 倍）となる周波数の音を刺激音として 1 回放声し、その直後に直流 12 V の電気刺激を 0.1 秒間与えた。この試行を数回繰り返してマコガレイの心拍が抑制されるように条件付けをした。測定は $(F2-F1)/F1$ を 0.00 から 1.00 まで（あるいは -0.50 から 0.00 まで）上げていく上昇系列と、1.00 から 0.00 まで（あるいは 0.00 から -0.50 まで）下げていく下降系列を交互に配置して行った。上昇、下降両系列ともに反応が連続して現れた最小周波数差の絶対値 ΔF と F1 の比からマコガレイの周波数弁別閾 $((\Delta F/F1) \times 100)$ を求めた。

【結果・考察】 実験時間帯に測定した水槽内の背景雑音のスペクトルレベルは周波数 31.5～1250 Hz において 70 dB 以下となり、特に高周波数帯側では 50 dB よりも低いスペクトルレベルとなった。この静穏な雑音環境で実験を行い、測定した 60～1000 Hz の各周波数帯において全ての供試魚に反応が認められた。マコガレイは周波数 60～1000 Hz の聴覚閾値曲線が下に凸の形状を示し、100 Hz の純音に対し感度が最も良く、その閾値は最小 92.5 dB となった。聴覚感度は 300 Hz より周波数が高くなるにつれて急激に悪くなり、400～500 Hz の周波数帯ではそれほど変化しないことが判明した。この結果は同じ底生無鰾魚のヒラメやカレイ類の *Limanda limanda* とほぼ一致し、同じ生息環境のカレイやヒラメは共通な聴覚特性を有することが示唆された。しかし、有鰾魚に比

べると、マコガレイは聴覚閾値が高く、音に敏感である周波数範囲が狭い。これはマコガレイは鰾を持っていないことが原因の一つと考えられる。

背景雑音の平均音圧を 70, 75, 80, 85, 90 dB のスペクトルレベルで発生させた時に測定した聴覚閾値は雑音レベルが高くなるに伴って大きくなり、明らかにマスキング効果が認められた。マスクされた聴覚閾値と雑音レベルから算出した臨界比は周波数 100 Hz 以下においてほぼ同程度であるが、100~700 Hz においては周波数の増加に伴って 27 dB から 58 dB までほぼ一様に大きくなる。マコガレイの聴覚閾値と雑音レベルの関係からマスキングの発生し始める雑音レベルを試算すると、周波数 60~700 Hz で 62~70 dB 程度となった。雑音レベルが約 70 dB 以上の環境ではマコガレイの聴覚はマスクされるため、実海域において水中音響を利用して魚群の行動を制御する場合には背景雑音の特性を把握し、放音時の音圧レベルを十分配慮する必要がある。

基本周波数 F1 をそれぞれ 100, 200, 300, 400 Hz とし、変換周波数 F2 を F1 より大きく（あるいは小さく）して周波数弁別能力の測定を行った。その結果、マコガレイの ΔF は 100~300 Hz では基本周波数の増加に伴って大きくなる傾向がみられた。周波数弁別閾 ($(\Delta F/F1) \times 100$) の平均値は基本周波数 100 Hz では約 31%, 200 Hz では約 27~34%, 300 Hz では約 35% となり、周波数 100~200 Hz においてほぼ同程度であった。この結果から無鰾魚であるマコガレイには周波数弁別能力はあるが、キンギョなどの骨鰾類の魚に比べ劣ることが明らかになった。また、周波数 400 Hz 以上の音に対して明らかな反応は認められなかったことから、マコガレイが弁別できる周波数域は 400 Hz までであり、それ以上の高周波数帯の音は可聴できても周波数の弁別は不能であることが示唆された。

海洋牧場において音を利用してより効率的に魚群の行動を制御するためには対象魚種に適応した最適な周波数を選択する必要がある。マコガレイを対象とした場合、聴覚特性と沿岸浅水域の雑音特性を考慮すると、実海域における制御音の周波数は 200 Hz が最適と判断される。また、円筒拡散と球面拡散による水中音の伝搬損失を基にして放声音の伝搬距離と聴覚閾値および威嚇レベルの関係から有効範囲をそれぞれ概算した結果、制御音（周波数 200 Hz）の放声音圧は 160 dB に設定するのが適切と考えられる。さらに、マコガレイが鰾を持っていないことと水中音の実海域での伝搬損失を考慮すると、広範囲にわたって放流種苗を行動制御するためには複数の音源を配置するなどの工夫が必要である。

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 教授 飯田浩二
副査 助教授 平石智徳

学位論文題名

マコガレイの聴覚特性に関する研究

21世紀を目前にして世界の食糧生産は穀物類が約20億トン、食肉が約1.8億トン、魚介類が約1億トンを生産している。世界の人口は20世紀の中頃から急速に増大し続け、2025年には85億人に達し、食糧不足が生ずることが予測されている。世界の穀物生産の主要国の一部では耕地の劣化現象が著しく進み、また同時に耕作面積も減少して、今後の拡大は望めず、生産は頭打ちの状況にある。一方、世界の漁業生産は約1億トンを越えた1989年以降から横這い状況にあるが、今後食糧として海洋生物資源はなお一層重要視されている。このためには地球環境を保全しつつ、生態系を維持して海洋の生産力を最大限に有効的に活用しながら、海洋生物資源を永続的に、かつ計画的に生産し、人類の食糧として供給することが必要である。

近年、我が国を始め、多くの国々における沿岸海域では乱獲などによって漁業生物資源の水準が著しく低下したものもある。それぞれの国における周辺海域の空間を高度に活用し、日本において沿岸海域で取り組まれている作り育てる漁業、資源管理型の漁業をなお一層発展させることによって有用な生物資源を増大させ、安定した生産を図ることが最も重要な課題となっている。

全国各地の沿岸海域において、今まで有用な魚類や甲殻類の種苗を生産し、放流する事業が積極的に取り組まれているが、種苗の逸散や減耗が大きく、期待したような成果が上がっていないのが現状である。沿岸海域において栽培漁業を大きく推進して効果的な生産を上げる技術として注目されているのが、音響を利用した魚の行動制御技術である。この技術を活用して、音響馴致や網なし生簀、餌付け型漁業などを積極的に進め、放流して成長した魚群を音で誘致し、漁獲回収する応用技術の開発が強く要望されている。今まで音と餌を同時に与えて種苗を学習させ、中間育成や放流後も効率的な給餌を行なう音響馴致による海洋牧場の試みがマダイ、ヒラメ、クロソイなどを対象に行なわれている。これらの音響馴致では滞流の効果は認められるものの学習の存続期間、経過年数に伴う再捕率についてはほとんど明らかにされていない。近年、我が国においても

栽培漁業の有用な対象魚種の一部については聴覚特性として、聴覚閾値などが少しずつ調べられているが、聴覚特性に関する重要な基礎的知見が不足している。特に、聴覚に及ぼす雑音の影響、音源方向の探知能力、周波数弁別能力、学習の存続期間などの測定例は少なく、音を利用した魚群行動制御技術に関する重要な知見の蓄積が強く望まれている。

マコガレイは北海道中部以南より大分県付近の日本沿岸、朝鮮半島南部および中国の渤海、黄海沿岸水域に広く分布し、成長も良く、カレイ類の中では市場価格も高く、栽培漁業の対象種として大変有望である。これらの視点から、申請者は音響馴致の研究対象魚としてマコガレイに注目した。そして、音響馴致に必要な聴覚特性について説明を試みた。

本論文ではマコガレイを対象として魚体に予め電極を取り付け、心電図を導出して置き、音と電気刺激を用いた物理的条件付けを行い、心拍変化から刺激音に対する感受反応を判断する方法を用いて、聴覚閾値を測定し、オーディオグラムを求めた。また、周波数特性が平坦な雑音の音圧レベルを数段階変化させて聴覚閾値を調べ、周囲雑音が聴覚に及ぼすマスキングについて明らかにした。さらに特定の周波数の音に条件付けした魚に周波数の異なる二つの音を組み合わせ提示して、周波数の弁別能力について調べ、音響馴致による海底牧場などを設計するために必要なマコガレイの聴覚特性に関する基礎的資料を得たものである。

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) マコガレイの聴覚閾値を周波数別に測定し、オーディオグラムを求め、聴覚感度の良い周波数は100Hzにあることを指摘した点。
- 2) マスキングが発生する雑音レベルは周波数60~700Hzでは62~70dB程度になること、また臨界比は100Hz以下ではほぼ一定であるが、100~700Hzにおいては周波数の増加に伴って27dBから58dBまで一様に大きくなることを明らかにした点。
- 3) 周波数弁別閾は周波数100Hzではその31%、200Hzでは27~34%、300Hzでは35%となり、マコガレイが弁別できる周波数域は約400Hzまでであり、それ以上の高周波数帯の音は可聴できても周波数の弁別は不能であることを示唆した点。
- 4) マコガレイの音響馴致には周波数200Hz、音圧160dBの音を用いることが適正であることを指摘した点。

以上の諸点は沿岸海域においてマコガレイを対象に音響馴致などの音による魚群行動制御技術を利用し、栽培漁業を行うために重要な基礎的知見を得たものと高く評価できる。よって審査員一同は本研究の申請者が博士(水産学)の学位を授与される十分な資格を有すると判定した。