

学位論文題名

クロソイ，ホッケ，マコガレイの視精度と
分光感度に関する研究

学位論文内容の要旨

【研究の背景と目的】水産資源を持続的に利用するために資源管理型漁業が必要とされており、水産資源の適切な育成管理を行う方法として広い海洋の生産力を局所的に増大させる養殖技術を包括した海洋牧場などの試みがなされ、そのための行動制御の技術が必要となっている。

本研究では北海道において重要な水産資源であるクロソイ *Sebastes schlegeli* とマコガレイ *Pleuronectes yokohamae* およびホッケ *Pleurogrammus azonus* の3種を資源管理型漁業における行動制御技術確立の対象魚とした。クロソイとマコガレイについてはこれまでに音響馴致による行動制御が行われており、反応行動に重要な影響や役割を果たすと考えられる視覚刺激を用いた行動制御および他の刺激との複合刺激を用いた行動制御が試みられている。

視覚刺激を用いた漁業および行動制御を合理的に行っていくためには対象魚の視覚能力および特性を解明することが必要であり、本研究では視覚特性の明らかにされていないクロソイ、ホッケおよびマコガレイについて多くの魚類で研究されている視精度、遠近調節能力、分光感度を求めた。

【視精度を求める実験】硬骨魚類の眼球の構造は高等動物と原則的には変わりがなく、対象物の視認時に光は角膜、硝子体を通り水晶体をレンズとして対象物が網膜に結像される。そのため、対象物をどの程度細かく視認できるかは角膜、水晶体および網膜の分解力のそれぞれが影響し、この中で最も分解力の低い網膜の分解力によって視精度が決定される。網膜の分解力は桿体と錐体の2種の視細胞うち細かい物を視認するのに用いられる錐体細胞の最小分離角として求められ、2点を2点として分解できる最小の角度を示し、これを分の単位で表したものが視精度、この逆数をとったものが視力（人と同様）にあたる。

方法：網膜の最小分離角はレンズの焦点距離と錐体の間隔からレンズと隣り合う錐体のなす角度の2倍として求められる。

ブアン氏液により固定した供試魚の眼球を25部位に切り分け、常法に従いHE染色を施した厚さ6 μ mの網膜切片(tangential section)の光学顕微鏡用のプレパラート標本作製し、これから1辺が0.1mmの正方形内の錐体密度を計数し、網膜

の最小分離角を田村の式により算出した。

$$\alpha = \frac{1}{F} \left\{ \frac{0.1 \times (1 + 0.25)}{\sqrt{n}} \times 2 \right\}$$

ここで α は最小分離角 (rad)、 F は水晶体の焦点距離(mm)、 n は 0.01mm^2 あたりの錐体数を示し、固定包埋による収縮率は 0.25 とした。また、水晶体の焦点距離 F は水晶体の焦点の係数より水晶体半径の 2.55 倍 (Mattiesson's ratio) として求めた。さらに、最小分離角を分に換算して逆数を取り視力を求めた。

結果：3種の供試魚の錐体は双錐体に囲まれた部分にのみ単錐体 (central single cone) が存在する四方形の配列をなしていた。この双錐体と単錐体の数を合計して 0.01mm^2 あたりの錐体密度を求め視力を算出すると、錐体密度の最大値から視力の平均値は全長 $17.6\sim 24.5\text{cm}$ の5個体のクロソイが 0.098 、全長 $33.0\sim 34.5\text{cm}$ の3個体のホッケが 0.100 、全長 $27.7\sim 31.0\text{cm}$ の3個体のマコガレイが 0.140 となった。これは 1cm の間隔の2点を識別できる距離がクロソイとホッケで約 3.4m 、マコガレイで約 4.8m となることを示す。さらに、この視力が有効に発揮される視軸の方向は網膜の錐体密度の最高密度部位から水晶体を通してみる方向として、クロソイは前方からやや上方、ホッケは前方からやや下方にかけて、マコガレイは前方の下方の狭い範囲であった。

【遠近調節能力を求める実験】魚類の眼球においては人の場合とは異なり網膜への結像は水晶体がほとんどを担っている。さらに、水晶体の屈折率を毛様体により変化させ焦点の調節を行う人の眼球と異なり、多くの魚類においては水晶体を前後に移動させて網膜との距離を変化させることにより焦点距離を調節する。

方法：網膜の分解力から求めた視精度が実際に発揮されるためには、焦点をあわせるための遠近調節が十分に行われなければならない。そこで、電気刺激により水晶体筋を収縮させて水晶体の移動距離を計測し、レンズの公式を用いて遠近調節能力を求めた。ただし、これらの魚類は正視であり、最大で無限遠方に焦点が合うものとして焦点の合う範囲を求めた。

結果：クロソイは5個体、ホッケは3個体、マコガレイは3個体について遠近調節能力を測定した結果、測定した水晶体の移動距離から算出した焦点の合う最短距離の平均値はクロソイ、ホッケ、マコガレイでそれぞれ 11.80cm 、 44.16cm 、 11.0cm となった。従って、この最短距離から水晶体を後方へ引くことにより無限遠方まで焦点を合わせることができると考えられる。また、水晶体の移動方向は視軸の方向と一致しており、網膜の分解力から求めた視力が有効に発揮されることになる。

【分光感度を求める実験】硬骨魚類の眼球における光の受容は網膜において光感度をもつ錐体と桿体の2種の視細胞により行われる。本実験で応答を導出した水平細胞は細胞自体が大きく電極を挿入するのに適しており、幾つかの視細胞とシナプス結合している。この水平細胞の応答は照射光の強度に応じて応答振幅の変化する緩電位であり S 電位と呼ばれている。本研究ではこの S 電位を測定することにより分光感度を求めた。

方法：供試魚を軽く暗順応させた後、眼球を摘出して鞏膜、脈絡膜、色素上皮層を切除して網膜を露出させた。この標本の角膜側を下にして生理食塩水を含ませた脱脂綿にのせ、塩化カリウム 3mol/l を充填した電気抵抗 20~50M Ω のガラス微小電極を上部の眼底側から露出させた網膜にマニピュレーターを用いて挿入し、水平細胞まで到達させた。この露出させた網膜に 12V100W のハロゲンランプを光源とし、干渉フィルターと減光フィルターを介して強度の等しい 10 種類の波長（403~666nm）の可視光と 2 種類の波長（337,368nm）の紫外線の単波長光を照射した。この刺激光を網膜に照射した時の水平細胞の応答を微小電極用増幅器で増幅してオシロスコープで観察しながら AD 変換してコンピュータに取り込み記録した。

結果：3 魚種ともに応答の頻度が最も高かったすべての波長に対して負の応答を示す明暗感覚に関与する L 型の応答はクロソイとホッケが 522nm、マコガレイが 555nm の波長の刺激光（緑）に対して応答強度が最大となった。

クロソイについては記録された応答は L 型の 1 種類のみであったが、ホッケとマコガレイからは照射光の波長に応じて負もしくは正の応答を示す色彩感覚に関与する C 型と呼ばれる応答が記録された。ホッケでは照射光の波長 491~576nm の短波長側で正の応答、639~666nm の長波長側で負の応答を示す 2 相性の C3 型、マコガレイでは 491~639nm で正、403~458nm および 666nm で負の応答を示す 3 相性の C2 型と呼ばれる応答であった。

ホッケとマコガレイは C 型の S 電位応答が記録されたことから色彩感覚を有することが確認され、クロソイは C 型の応答が本実験では確認できず色彩感覚を持たないか、非常に乏しいものと考えられる。

【行動制御への応用】ホッケから導出された C 型の S 電位は脱分極と過分極の最大応答を示す波長が緑色と赤色にあり、ホッケにとっては海水中の背景色となる緑色に対して赤色が最もコントラストが大きく海水中では赤色が最も視認しやすい色と考えられる。一方、マコガレイから導出された C 型の S 電位は緑色が脱分極、赤色と紫色が過分極の最大応答を示し、マコガレイにとっては海水中で赤と紫が視認されやすい色と考えられる。また、クロソイは活潑に行動する夜間の光刺激を考えると、明暗がコントラストと同等になり海水の光の透過率と分光感度がともに最大になる波長 522nm（緑）の光が最も視認されやすく行動制御に有効な色と考えられる。

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 助 教 授 平 石 智 徳
副 査 助 教 授 山 下 成 治

学 位 論 文 題 名

クロソイ、ホッケ、マコガレイの視精度と 分光感度に関する研究

沿岸海域における海洋生物資源の水準が著しく低下している現在、海洋生物資源を増加させることと、持続的に生産し有効的に利用することが重要な課題となっている。沿岸海域においては自然と調和しながら、持続的に海洋生物資源を生産するためには適切な育成管理を行う資源管理型漁業がなによりも必要である。漁業生産を安定的に増大させるためには海洋の生産力を極所的に増大させる養殖事業と種苗を積極的に生産して放流し、自然の生産力を十分活用する養殖事業が進められており、特に養殖技術の一つとして音響馴致による海洋収場などが試みられ、大変注目されている。このためには魚群の行動制御技術が必要である。放流した稚魚を特定の成育場に滞留させ、成長後に漁獲するために聴覚、視覚などの感覚刺激を利用した行動制御技術の開発望まれている。魚類において眼は形態、運動、色彩、明暗などの識別が可能であり、また魚の生活と視覚では摂餌、異性認識、成群、向流性などに重要な機能をしていることが知られている。北海道、東北における栽培漁業の対象種としてクロソイ、マコガレイ、ホッケが大いに注目されている。これらの魚を対象に馴致による栽培漁業の取り組みが期待されており、音刺激による聴覚特性について取り組まれ解明されつつあるが、視覚については全く手がつけられていない。視覚による魚群行動制御を行うためには視覚の特性を十分明らかにする必要がある。しかし、これらの魚種についてはほとんど解明されていない。

本研究ではクロソイ、ホッケ、マコガレイを研究対象として視認できる対象物の大きさと距離の関係を明らかにするために視精度を組織学的に網膜の分解力として想定し、網膜切片を作成し、0.1mmの正方形内の錐体細胞数を計数し、最小分離角を求めて算出した。また網膜上における錐体密度の分布状況を調べ、視軸の方向を推定した。さらに電気刺激により水晶体筋を収縮させて水晶体の移動距離を計測し、遠近調節態

力を求めた。また水晶体の移動方向と視軸の方向が一致することを確かめた。次に供試魚を軽く暗順応させた後、眼球を摘出して鞏膜、脈絡膜、色素上皮層を切除して網膜を露出させ、角膜側を下にして生理食塩水を含ませた脱脂綿上のにせ塩化カリウム 3mol/l を充填したガラス微小電極を上部の眼底側から網膜の水平細胞層まで挿入した。そして露出させた網膜にハロゲンランプを光源として干渉フィルターと減光フィルターを介して強度の等しい10種類の波長 (403~666nm) の可視光と2種類の波長 (337、368nm) の紫外線の単波長光を照射し S 電位を導出した。そして分光感度を求め有効な刺激光となる光の波長および視認可能な波長を明らかにし、色彩の弁別能力について検討し、視覚刺激による行動制御をするための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) 網膜の錐体細胞密度の最大値から視力を算出し、クロソイでは0.10、ホッケでは0.10、マコガレイでは0.14であることを求めた点。
- 2) 視軸の方向はクロソイでは前方よりやや上方向に、ホッケでは前方よりやや下方向に、マコガレイでは前方の下方向の狭い範囲にあることを指摘した点。
- 3) 水晶体の移動距離から焦点の合う最短距離を求め、クロソイでは11.8cm、ホッケでは44.2cm、マコガレイでは11.0cmになることを見出した点。
- 4) 波長の異なる同一強度の光刺激を与えて網膜の水平細胞から活動電位である S 電位の導出に成功した点。
- 5) S 電位の L 型の応答強度はクロソイとホッケでは522nm、マコガレイでは555nmの波長に対して最大となることを見出した点。
- 6) S 電位の応答はクロソイでは L 型だけ、ホッケとマコガレイでは L 型と色彩感覚に關与する C 型を見つけた点。

以上の成果はクロソイ、ホッケ、マコガレイの視覚特性について重要な基礎的知見を得たものであり、視覚による行動制御に大いに寄与することができ、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。