

学位論文題名

光刺激を用いた魚類の行動制御に関する研究

学位論文内容の要旨

【研究の目的】

本研究の対象魚種は、サクラマス *Oncorhynchus masou masou* と、ブルーギル *Lepomis microchirus* の2種類である。サクラマスは、河川生活期が長い間人間活動の影響を受けやすく、近年資源量が減少した。この資源の減少を引き起こす原因のひとつとして、農業用取水口への迷入が報告されており、この迷入防止策として集魚灯に対する負の走光性を利用する試みや、逆にダム湖において集魚灯による魚道への誘導が試みられているが効果的な方法が見つかっていない。

一方、ブルーギルは、有害外来種として注目を集め、特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律において特定外来生物として指定された。このため全国でブルーギルの調査や駆除が行われているが、効果的な駆除の方策は見つかっていない。

本研究では、視覚的捕食者であるサクラマスとブルーギルに対して、小さな動く物体を餌生物に見せ誘引刺激とすることに注目し、レーザーポインタで照射した動く光点を考えた。小さな動く光点を刺激とした行動制御を行うためには、その刺激によって対象魚の誘引反応を解発できることを確認する必要があることとその光点刺激が対象種にとって最適であることが求められる。そのためには、光点刺激を受容する眼球の視覚特性を把握する必要があり、その上で光点刺激装置を作製し実際に誘引行動を調べる必要がある。

【視覚研究】

光りながら動く小さな物体を光刺激として考える場合、その物体の色彩と大きさを対象生物に最適なものにしなければならない。そこで、本研究ではサクラマス残留個体（ヤマメ）の網膜の水平細胞の応答電位であるS電位応答を導出し、分光感度と色彩感覚を求めた。その結果、サクラマス残留個体は色彩感覚と紫外線に対する感度を有し、その分光感度特性は緑色（ λ_{max} : 522nm）に最大感度を示した。このため、サクラマスは、紫外線域から可視光域の広い範囲の波長の光を受容でき、その中でも緑色を効率よく受容できることから、行動制御には緑色の刺激が良いと判断された。

魚類が餌や外敵を見るときと同様に小さな動く光を見るときに形態視は、十分な遠近調節能力があり網膜上に像の焦点を合わせることができると、十分な網膜の分解能があることが必要である。魚類の遠近調節は、水晶体を支える水晶体筋の収縮によって行われるため、適出眼に電気刺激を与えて水晶体筋を刺激し、水晶体の移動方向と移動距離を測定した。その結果、サクラマス 0^+ （標準体長 SL : 27~45.64mm）で $1.13SL$ 、 1^+ （99~142.5mm）で $0.79SL$ 、 2^+ （278~318mm）で $0.86SL$ 、親魚（409~464mm）で $0.76SL$ と求めた。 0^+ は、まだ遠近調節が未発達段階であるが、 1^+ になると十分な遠近調節能力を有することがわかった。水晶体の移動方向から視軸を求めたところ、 0^+ の 40.8 度から親魚の 27.6 度まで成長に伴い前方上向きから前方やや上向きに変化することがわかった。このため、スマルト（ 1^+ ）は小さな光点を前方上向きに示したときに効率よく知覚できるといえる。

網膜の分解能は視力として表され、本研究では錐体細胞密度から視力を求めた。サクラマスの錐

体細胞は、複錐体、単錐体、付加単錐体の3種類であった。紫外線に感度がある付加単錐体は、すべての年齢において複錐体や単錐体と比べ網膜下部で付加錐体の密度が低く網膜後部で付加錐体の密度は高いことが確かめられ、正面の物体に対して可視光域から紫外線域までの波長を利用しコントラストを高めていると考えられた。サクラマス成長に伴う視力は、0.051 (SL:46.3mm) から0.102 (SL:432mm) と求まり、1m先の2点の距離をそれぞれ5.7mm, 2.9mm以上離すと2点と知覚できることがわかった。この値から、光点の大きさと光点に対する反応距離の推定ができた。

【行動研究】

視覚研究で得られた視力・遠近調節能力と分光感度特性が行動学的にどれくらい発揮されているのかを、飼育に使用される餌(ペレット)を用いて、条件付けを伴う行動実験を行ない、魚が餌を発見し追従し捕食する時の餌と魚との距離 Reactive distance を測定した。餌の大きさと Reactive distance からサクラマスの最小視認閾の視力は、2尾の平均で0.058 (SL: 98.5, 98.1mm) と求まった。また、実験個体の最小分離閾の視力は0.067と算出され、餌に対する反応距離から求めた最小視認閾の視力の1.16倍と求まった。

光点刺激装置として赤色レーザーポインタを組み込んだ装置を自作し、光点を自在に動く装置とした。1) レーザーポインタを移動させない(消灯)(対照)、2) 固定光点、3) 移動光点、4) 移動のみ(消灯)の4光点条件でレーザーポインタの光量を0.98~26.71 μ Wに10段階に変化させて、サクラマスの光点に対する誘引反応行動を昼夜にわたって観察した。サクラマスは昼夜に関わらず、光点到食いつく行動を示し、昼に水槽底面に照射された動く光点に追従する行動が観察された。このため人工刺激である動く小さな光点は、サクラマスの誘引反応行動を解発することができ、サクラマスの行動制御の手段になり得る可能性を示した。

次に野生魚の行動制御の技術開発には、野生魚を用いて自然環境条件で行った実験から得られた知見が欠かせない。本章ではこの条件を満たす魚として野生繁殖したブルーギルを対象に行動実験を北海道函館市五稜郭公園内堀池で行った。基本的に刺激光量(3.91~579.42 μ W)を強くした以外は、サクラマスの光点実験と同じである。野外において野生のブルーギルは、動く光点に対して攻撃反応を示し、さらに画面内に出現した総個体数と光点に攻撃行動を示した個体の比である攻撃反応割合はその刺激光量に正比例し、最大で80%の個体が攻撃反応を示した。本光点刺激装置は一度に多数のブルーギルの攻撃行動を引き起こしブルーギルを装置の近傍に一時的にとどまらせることから、本刺激装置をある小さな範囲に集まった魚を採るような漁具、たとえば、かご網や敷網などと組み合わせ使用すれば効果的なブルーギルの駆除漁具として使用できる。

【視覚研究と行動研究のつながり】

餌に対する反応距離から求めた最小視認閾の視力は、組織学的に求めた最小分離閾の視力と近い値であった。これは、視覚研究の結果からサクラマスの視軸の向きに餌を入れたため、サクラマスが視認しやすかったことと、遠近調節の範囲を測定したため、魚が十分に焦点を合わせられる位置に餌を投入したためであると考えられる。このように視覚研究で得た情報からサクラマスの行動実験を最適にできた。なお、行動実験に用いた水槽は、灰色で餌は黄土色であり、餌のコントラストが低いこと魚にとって見えにくいことがサクラマスの色彩感覚から推測されたが、それでも最小分離閾の視力と最小視認閾の視力は大差なかった。このことから、サクラマスは優れたコントラスト閾値を持っていることが推察された。また、サクラマスは、夜間に赤色の光点刺激に対して食いつき反応を示した。このときサクラマスの網膜は暗順応を示し、錐体細胞と桿体細胞のどちらでも光を受容できる状態にあったため、色彩感覚を有するサクラマスは赤色の光点を錐体細胞で受容していたと考えられた。このように視覚研究と行動研究の情報を関連させることによって魚類の効果的な行動制御が可能となる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 本 勝太郎
副 査 教 授 三 浦 汀 介
副 査 教 授 川 村 軍 蔵 (鹿児島大学)
副 査 助 教 授 平 石 智 徳

学位論文題名

光刺激を用いた魚類の行動制御に関する研究

本研究は、農業用取水口への迷入が報告されているサクラマスと有害外来種として注目を集めているブルーギルを対象に、レーザーポインタで照射された動く光点を誘因刺激とする魚類の行動制御の可能性について、サクラマスについてはその視覚特性に重点をおいて、視覚特性が既知であるブルーギルについては光刺激を用いた行動制御に重点をおいて実験を行ったものであり、審査員一同が高く評価した点は以下の通りである。

1) 光りながら動く小さな物体を光刺激として考える場合、その物体の色彩と大きさを対象生物に最適なものにしなければならない。そこで、本研究ではサクラマス残留個体(ヤマメ)の網膜の水平細胞の応答電位であるS電位応答を導出し、分光感度と色彩感覚を求めている。その結果、サクラマス残留個体(ヤマメ)は緑色と赤色の区別ができる色彩感覚を有し、その分光感度特性は緑色(λ_{\max} : 522nm)に最大感度を示し、紫外線域から可視光域の広い範囲の波長の光を受容できること、その中でも緑色を効率よく受容できることを明らかにしている。また、小さな動く光を見るときに形態視には、十分な焦点調節能力があり網膜上に像の焦点を合わせることができることと、十分な網膜の分解能(視力)があることが必要である。このため、サクラマスの適出眼に電気刺激を与えて水晶体筋を刺激し、水晶体の移動方向と移動距離を測定している。その結果、焦点を合わせることの出来る最小距離はサクラマス 0^+ (標準体長SL: 27~45.64mm)で1.13SL, 1^+ (99~142.5mm)で0.79SL, 2^+ (278~318mm)で0.86SL, 親魚(409~464mm)で0.76SLとなること、水晶体の移動方向は、 0^+ で40.8度、親魚で27.6度となることから成長に伴い前方上向きから前方やや上向きに変化することを明らかにしている。さらに、錐体細胞密度から最小分離閾の視力を求めており、サクラマスの成長に伴う視力VAは、 $VA=0.0177SL^{0.289}$ ($46.3\text{mm}\leq SL\leq 441\text{mm}$)で表せることを求めている。これらの知見はサクラマスを光刺激で行動制御するための基礎的知見として高く評価できる。

2) 飼育に使用される餌(ペレット)を用いて条件付けを伴う行動実験を行ない、魚が餌を発見し捕食する時の餌と魚との距離RDを測定し、餌の大きさとRDからサクラマスの最小視認閾の視力を求めている。その結果、実験個体2尾の最小視認閾の視力は0.058(SL: 98.5, 98.1mm)と求まり、また実験個体の最小分離閾の視力は先の式

から 0.067 と算出されることから、行動実験から求めた最小視認閾の視力は網膜の錐体密度から求めた最小分離閾の視力に近い値となっている。これは、視覚研究の結果から前方上向きの焦点を合わせることでできる距離に餌を投入したためであり、行動学実験が適切に行われたことを示すものであり、視覚研究の知見を行動学実験に反映させたものと高く評価できる。

3) 赤色レーザーポインタを組込んだ光点刺激装置を自作し、①レーザーポインタを消灯移動させない(対照)、②固定光点、③移動光点、④消灯移動のみの4つの条件でレーザーポインタの光量を $0.98\sim 26.71\mu\text{W}$ に10段階に変化させて、サクラマスの光点に対する誘引反応行動実験を行っている。その結果、サクラマスは昼夜を問わず光点に食いつく行動を示し、昼間には水槽底面に照射された動く光点に追従する行動を観察している。この観察結果は人工刺激である動く小さな光点は、サクラマスの誘引反応行動を解発することができ、サクラマスの行動制御の手段になり得る可能性を示したものと高く評価できる。

4) 同じ光点刺激装置を用いてブルーギルの光刺激に対する反応行動実験を北海道函館市五稜郭公園内堀池で行った結果、ブルーギルは、動く光点に対して攻撃反応を示し、さらに装置近傍に出現した総個体数に対する光点に攻撃行動(摂餌行動)を示した個体の割合はその刺激光量に正比例し、最大で80%の個体が攻撃反応を示すことを明らかにしている。この結果は本光点刺激装置が有害外来種であるブルーギルを装置の近傍に一時的に止まらせることから、本刺激装置をある小さな範囲に集まった魚を採るような漁具、たとえば、敷網などと組み合わせ使用すれば効果的なブルーギルの駆除装置として有効であることを示しており高く評価できる。

以上の成果は、視覚研究と行動研究の情報を関連させることによって魚類の効果的な行動制御が可能であることを示し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。