# ヒラメ生産工場　ー 陸上養殖に向けての一提案 ー

浦和実業学園中学校・高等学校
橋本　悟

## １．背景および目的

研究のきっかけは、部活動で養殖魚を食べられるサイズにまで育ててみたいといった取り組みを開始したことに始まる。マダイ *Pagrus major*、カンパチ *Seriola dumerili* その他色々な魚種の飼育を試みたが、初期段階の養殖魚の管理は、一般的な観賞魚の飼育方法をベースとしており、軌道に乗せるまでには至らなかった。そのような中で、NPO 日本養殖振興会の斉藤浩一氏より、濾過装置の自作方法などの指導を受ける機会があった。また、斉藤氏は、近畿大学水産養殖種苗センターと教育機関への養殖教育導入を目的とした協力関係を結んでいたため、養殖魚の稚魚を入手するルートを確保することができた。あわせて、近畿大学水産研究所の家戸啓太郎先生をはじめとする各先生方から指導助言をいただくチャンスも得ることができた。斉藤氏からは、その後も定期的な指導を受けることで、ヒラメ *Paralichthys olivaceus* やクエ *Epinephelus bruneus* を試食できるまでに成長させる飼育技術を得た。

そして次のステップとして、より経済的で効率的な飼育方法はないものかと模索していたところ、北里大学海洋生命科学部の高橋明義教授らが緑色光照射により低温下でのマツカワ *Verasper moseri* の成長促進を確認していたことを知った[1)]。早速研究室を訪問し指導の依頼を申し出たところ、本校でのコンパクトな装置で養殖魚を育てる技術が評価されるとともに共同研究が許可された。高橋教授によると、光の効果がどのような魚種にどのような効果をもたらすのかが不明であるため、様々な魚種で試験を試みて欲しいとのことであった。そこで、マツカワと比較的近縁種のヒラメをはじめ数種の魚種において光の照射や光環境について調べた。

照明器具には、Mars Aqua製のAquarium Light LG-G03A55LED の緑色光単一色の特注品を使用した。照射した緑色光の波長は500 nm、光量子束密度は220umol/m^2/s、光源から45cmの距離で約30000lxである。

現在のところ、低温下（飼育適温より５℃低下させた温度）における緑色光照射でヒラメの成長促進効果の他、図１に示したような青色環境でのマダイの体色の赤色化と赤色環境でのマダイの黒色化、図２に示したような青色光の照射によるイワナ *Salvelinus leucomaenis* の生存率の向上などが確認できている。

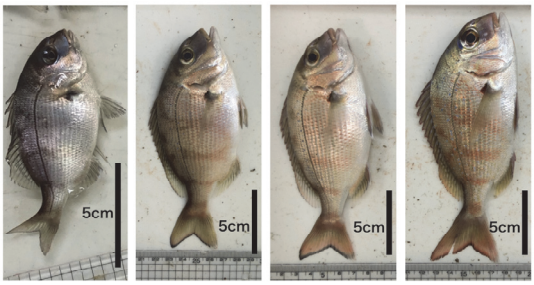



**図１　青色環境でのマダイの体色の赤色化と赤色環境でのマダイ黒色化**
**左から実験開始時、赤色環境下、青色環境下、天然個体**

得られた成果は、平成29年度日本水産学会春季大会高校生ポスター発表で生物部員に発表させた[2)]。それがきっかけで、東京

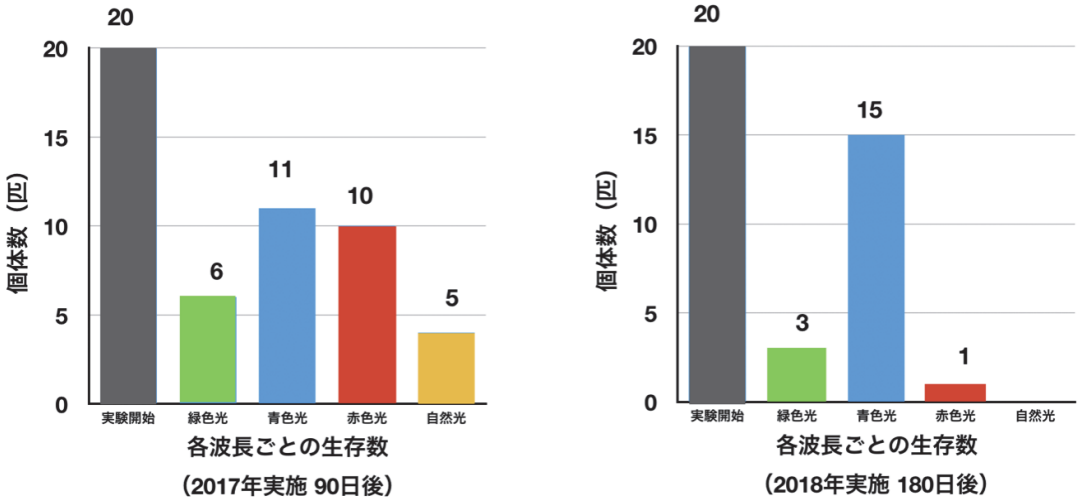



**図２　異なる光条件下で飼育したイワナの生存率**

海洋大学の延東真先生と共同研究を進める。株式会社プレスカの佐藤順幸氏と出会い、後に脱窒素の技術獲得にも成功した。

我が国の漁業は、海面漁業と養殖漁業とから成り立っており、庶民の食生活を支えいる。海産魚類の養殖漁業は、現在のところ、海沿いの地域を中心に盛んに行われており、十分な水揚げ量に達している。しかし、近い将来は人口増加に伴い水産資源の枯渇が懸念されており、今後の水産業のあるべき姿の転換が迫られている。そして、その問題解決に向けて、各方面の研究機関での様々な努力がなされている。一例として、近畿大学の家戸教授らによりゲノム編集で得られた筋肉増強マダイ（肉質が従来の20%増）の作出は、将来の養殖漁業のあり方を見据えた成果である[3)]。いずれヒラメやクエなどにも応用されるであろう。一方で、養殖技術の工業化を目指し、陸上養殖の新たな発展に力を注いでいくことも大切である。内陸部での海産魚類の養殖業の活性化や各方面からの雇用の拡大を図ることで、近未来型の魅力的な養殖漁業を展開し、より多くの従事者を育成するなど、広い視点から水産資源を確保し、世界に誇る日本の食文化を守っていくことを重要視すべきである。

陸上養殖は、閉鎖型の水槽内で魚類を管理するため、人工海水にかかる費用、水質管理にかかる光熱費など従来の養殖形態と比較してコスト面で不利である。そのため、注目を集めながらも伸展性に欠けている。しかし、陸上養殖では、水揚げ量が安定的で衛生的であるなどのメリットも多い。さらに、今後技術を向上させることで、人件費の削減も十分に可能である。そこで、本校では、これまでの養殖漁業をより経済的かつ効率的で、さらには付加価値を高めていくことを目標として、これまで得てきた基礎研究の成果を集結させたいと考えた。

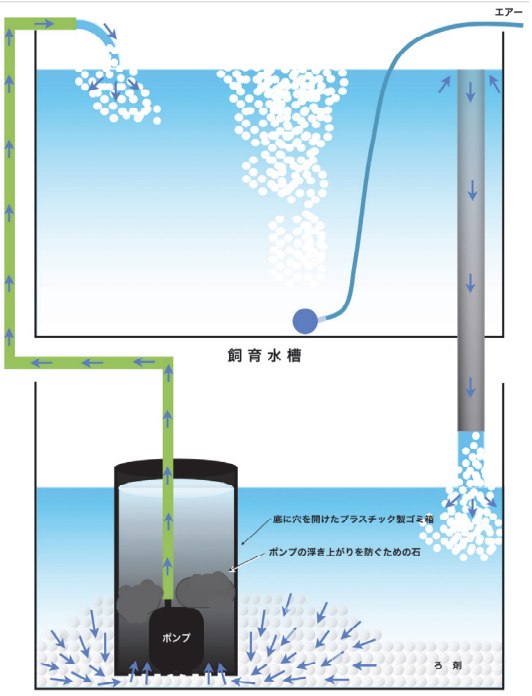
飼育装置のベースは、図３に示したような、初期投資の節約を考慮しながらも本格的な魚類の管理を可能とする独自のオーバーフロー水槽である。この水槽の最大の特徴は、図４に作成方法を示したような自作濾過装置の導入である。自作濾過装置は、

シンプルな構造ではあるが、経済的で高性能である。また、水質管理については、東京海洋大学と株式会社プレスカが共同開発した好気性脱窒素装置を用いた。これにより水質が安定し、水替えの頻度が軽減され、使用する人工海水の節約が可能となった。また、図５に示したように飼育適温よりも５℃ほど水温を低下させた条件においてヒラメに緑色光を照射し、成長を促進させる成果は、陸上養殖の効率化に大きく貢献できる可能性を秘めている。

また、緑色光の照射時間は、実験開始当初１日８時間としていたが、その後の実験で図６に示したように照明装置の点灯からわずか10分程度でヒラメの食欲を十分に高めることで十分な成長促進効果が得られることが判明した。

続いて実施した実験は、水深12cmの浅い飼育装置内で飼育するヒラメに、緑色光を照射するものであった。ヒラメは、通常水底に潜んでいるため、水深を浅くして飼育することが可能であれば、人工海水の消費を軽減できると考えた。しかし、近畿大学による試験結果では、浅い水深でヒラメを管理すると成長が緩慢になるとのことであった。そこで、低温下でヒラメの成長促進の効果が得られたように、水深の浅い環境でも同様の効果が得られるのではないかと予想した。結果は、図７に示したように緑色光を照射した個体群では、飼育開始から6.6倍の成長率を示し、対照実験の個体群の3.7倍もの成長ぶりであった。この驚くべき結果を得た理由としては、水深を浅くしたことで、ヒラメが受ける緑色光の照度が高まったためではないかと推測している。

こうした基礎実験を踏まえて、ヒラメの飼育装置を段上に重ねることが可能となり、空間を有効活用しながら植物工場のように養殖漁業の工業化が実現できるのではないかといった発想から、今回のヒラメ生産工場の開発に至っている。



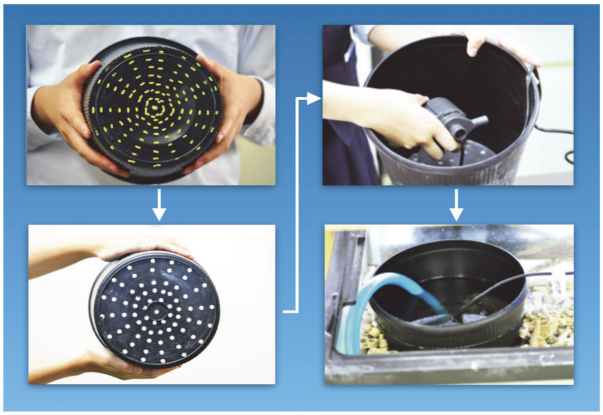

左図の上段は、水棲生物を管理する水槽で、オーバーフロー管が設置されており、供給された際の過剰な水が老廃物と同時にろ過層に送られる構造となっている。一方、左図の下段には、ろ過槽が設置されており、物理的ろ過および生物的ろ過がなされた後、ポンプによって浄化された水がくみ上げられ、上部水槽に戻される仕組みとなっている。以上のように、オーバーフロー水槽の高い浄化能力は、水棲生物管理において様々なバリエーションを加える際に大変有効な装置といえる。しかし、装置が高価であることが欠点である。本校では、その欠点を補うために、ろ過装置を自作している。

**図３　オーバーフロー水槽**

ヒラメ生産工場導入のメリットについて以下に示す。

①限られたスペースの有効活用

水槽を積み重ねての工業化は、都心のビル内や地方で廃校となった校舎、さらには最近問題となっている空き家などの有効活用につながる。また、コンテナに収まるサ



濾過槽の構造は、いたってシンプルである。また、材料も安価で入手できるため経済的でもある。まず、円柱状のプラスチック製ゴミ箱の底に、放射状に穴を多数開ける。それをろ過材中に埋め込んだ後、ポンプを設置して培養セットに水を供給する。ポンプの上には、拳大の石を数個入れ、ろ過装置の浮き上がりを防止する。

図４　濾過装置の自作

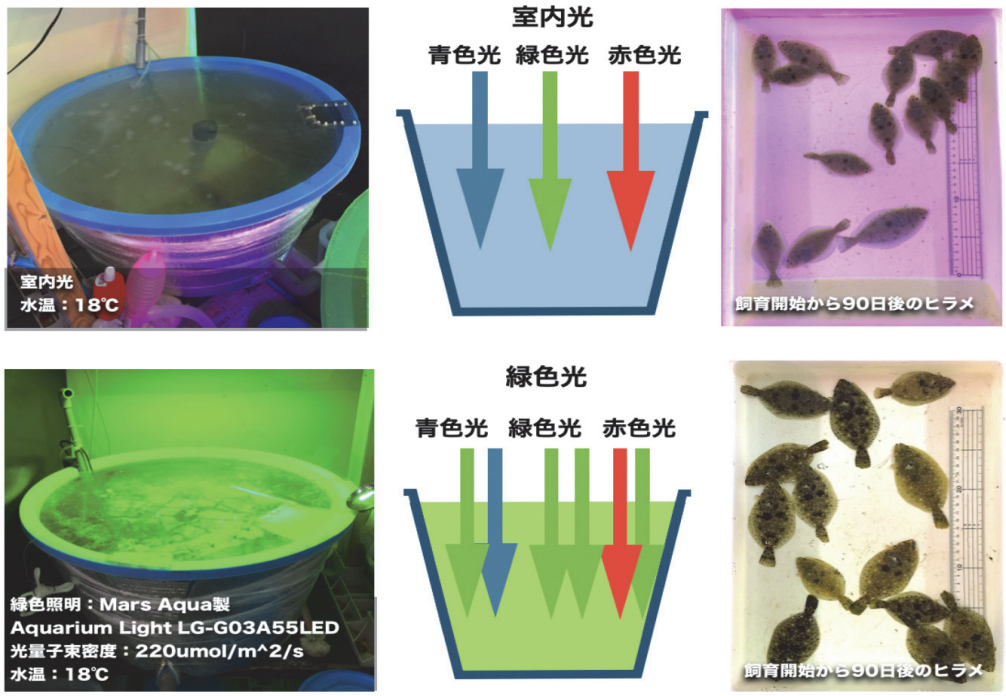



図５　低温下でヒラメに緑色光を照射した実験

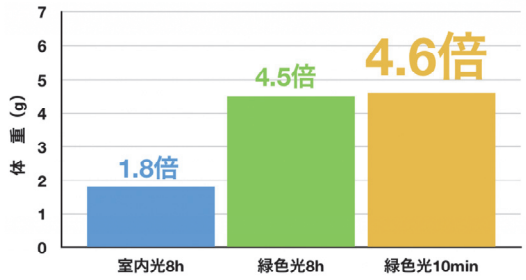



図６　飼育開始から90日後の緑色光照射時間ごとのヒラメの体重変化

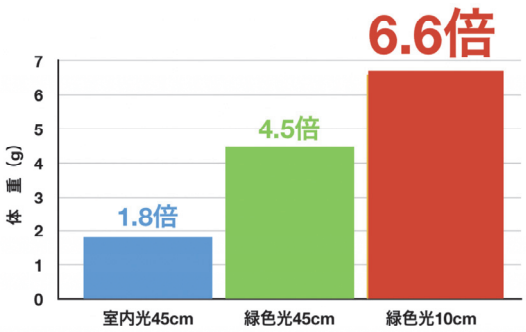



図７　飼育開始から90日後の水深ごとのヒラメの体重変化

イズに設定することで、様々な場所までの移動及び設置が容易となると考えている。さらに、水耕栽培と水産養殖を掛け合わせた循環型の有機農業であるアクアポニックスの導入[4]についても検討課題としたい。

②生鮮食品コーナーへの導入

本校が提案した装置を生鮮食品コーナーで導入すれば、消費者のニーズに応えて鮮度の高い商品を手軽に入手するチャンスとなる。また、生鮮食品コーナーに限らず、飲食店に導入するのも良いかもしれない。成長を目的とした水槽管理であるため、新鮮かつ魚の旨み維持が予想される。さらに、閉鎖型の水槽を用いることで、寄生虫の心配もなく、商品としての付加価値を印象付けていく点においても有効な手段である。そして、化学的刺激に頼らない物理的刺激による生産効率向上であり、食の安全確保の点においても有効であることが消費者にも伝わりやすい。

③定年退職者、身体障害者への雇用拡大

養殖業のオートメーション化により労力を削減でき、定年退職者の再雇用や身体に障害を抱えている方々にも就労の機会を提示できるのではないかと考えている。

④教育機関での活用による育てる漁業従事者の育成

本校生物部では、写真１に示すように毎年小学校を訪問し、海産養殖魚の飼育指導を実践している。これは、NPO 日本養殖振興会が中心となって企画するプロジェクトの一環として企画されたものである。対象とする小学生の学齢は５年生であるが、魚類の養殖に対して大変意欲的で興味を抱きながら、生物部員の説明に耳を傾けている。このように教育機関での導入は、子供たちに魚を育てる喜びを身近に伝える絶好の機会となり、将来内陸部からの漁業従事者の育成につながるのではないかと考えている。また、各教科での指導への導入や食育の発展につなげることもできるのではないだろうか。

⑤福祉施設でのアニマルテラピーの実践

以前、恵泉女学園大学澤田みどり先生より園芸療法についてご指導をいただく機会があった。園芸療法とは、植物を育てることで身体を動かし、生長を見守る中で役割、達成感、満足感、喜びなどを得ていく。このような植物や園芸作業がひとに与える効果をリハビリテーションに活用する手法である。2017年８月、実際に恵泉土曜園芸クラブに参加し、ご老人や障害者の方々と園芸療法を体験した。実際会場にやってきた際には、全く会話しなかったご老人が野菜の収穫を通して周囲の人と会話を交わしたり、硬い表情をしていた方の表情が和らいでいく様子を間近で確認し、植物が持つ癒

**写真１　2017年11月小学校におけるヒラメ飼育のアドバイス（東京都）**

しの効果の有効性を確認した経験がある。癒しの効果については、植物に限らず犬や猫などのペットによるアニマルセラピーも知られている。これらのような事例を参考に、魚類飼育での癒し効果も十分に得られるのではないかと考えている。

## ２．研究計画

ヒラメ生産の装置作成にあたり、数種類を考案したが、最終的に次の２つのタイプを採用することとした。

Ⅰ　階段型水槽

図８、写真２に示した階段型水槽は、水槽を階段状に配置している。そのため、コンパクトな構造に加えて、消費者にとって水槽内のヒラメの見易さが重視されている。また、水替えや掃除などの日常的な管理が容易である。使用目的には、ヒラメの商用、教育、福祉に重きを置いている。水槽は、飼育水槽を斜めに３段重ねてオーバーフロー水槽とした。また、濾過槽の位置を最上部の飼育水槽の下の空間に配することで全体の高さを抑えた。しかし、そのために最下部の飼育水槽から濾過層に向けて水の流れを作るために設置するオーバーフロー管の角度調整が必要であった。

枠組みは、軽量かつ錆に強いアルミニウム製の角柱を使用した。照明器具は、特注の Mars Aqua 製の Aquarium Light LG-G03A55LED を使用した。また、照明器具のしなやかなスライドを実現するために THK 社製 LM ガイドを採用した。LM ガイドは、錆を避けるために特殊な塗料で塗装した製品とした。さらに駆動にはオリムベクスタ社のスッテッピングモーター PKP245D08A2 を用いた。そして、照明器具の移動や点滅の制御に関するプログラム作成については、ラズベリーパイを使用した。濾過装置は、図３に示したものをベースとして自作した。また、濾過槽内は、L サイズのサンゴ砂で敷き詰めた。さらに、濾過装置から飼育水槽に飼育水を循環させるポンプは、カミハタ製 Rio+3100（52L/min）を採用した。

ヒラメの日常管理に関する工夫については、これまでの基礎研究をもとに行った。中段と下段には蓋を用意せず、水槽の縁に返しを設置した。これは、蓋をしないことでヒラメをすくい取る際の作業効率を向上させることを可能とすると同時に、ヒラメの水槽外への飛び出しによる事故を防ぐのが目的である。ただし飼育水槽の最上段だけは、厚さ３㎜の透明アクリル製の蓋をかけることで、付近のモーターや制御装置を海水の跳ね返りによる被害防止を念頭においた。

給餌については、各段を３時間おきに移動させながら各水槽内の個体群に照射し、移動後30分でニッソー製の観賞魚用自動給餌器フードタイマーグレーによる給餌を行う。この製品は、シンプルな構造であるが、最も小刻みな給餌が可能であることから採用を決めた。給餌器は、緑色光照明器に取り付け、一定時間ごとに移動した際に給餌を行う予定である。給餌については、図９に示したように、緑色光照射直後において

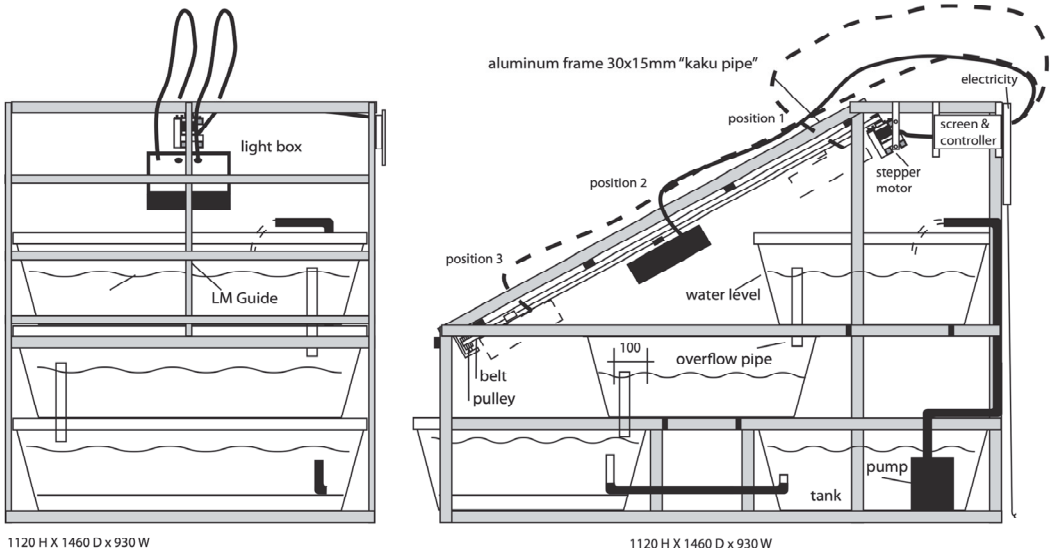



図８　階段型水槽の設計図

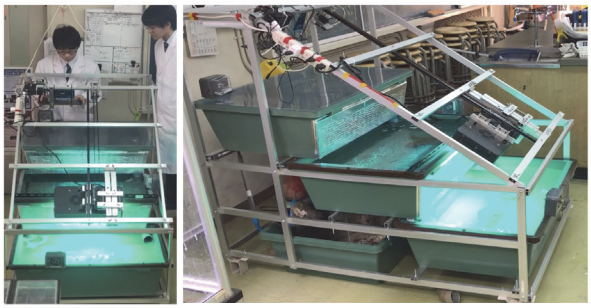
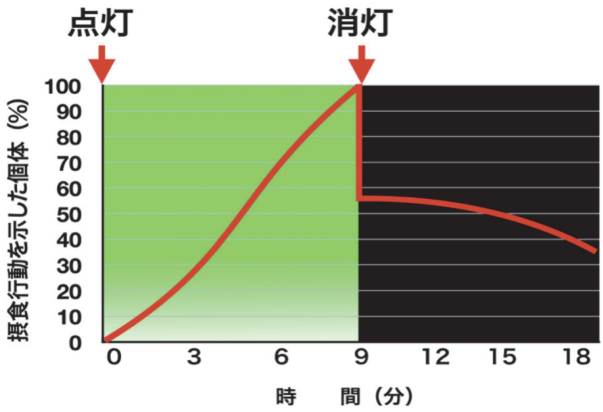


写真２　完成した階段型水槽




緑色光の照射時間については．日常の太陽光照射時間を基準に設定していた．緑色光を照射していないヒラメは，低温条件で管理されているため，活動は不活発である．しかし，緑色光照射後比較的短時間でも，ヒラメの行動が活発化する様子をこれまで度々確認してきた．そこで，照明点灯から時間の経過とともにヒラメの摂食行動を調べた． 点灯直後のヒラメは，餌に反応しなかった．３分経過した頃，一部の個体が反応し始め， 10分を経過するころには，活発な反応を示した．

図９　給餌前後に緑色光を照射した際のヒラメの摂食行動

のヒラメの摂食行動は緩慢であるため、行動が活発化する緑色光照射から10分後に行う。また、給餌後直ちに緑色光を消灯すると瞬時に個体群の50％以上が摂食行動を停止させてしまうため、摂食行動中の約10分間も緑色光を照射する。よって、照射する緑色光照射時間は水槽一台当たり最低20分となる。しかし、ヒラメの消化速度の問題や閉鎖型の環境において給餌回数を増した際の水質の悪化を考慮して今後適切な給餌のタイミングを設定していきたい。

今回完成させた装置は校内で稼働させ、ヒラメ飼育に関する新たなデータの蓄積を試みるとともに、可能であれば育てたヒラメを実際に提供しながら消費者の意見に耳を傾け、実用化に向けた改良を重ねたい。また、ヒラメ生産の工業化を想定した飼育装置の作成にあたっての、基礎データとしたい。

Ⅱ 縦型水槽

図10に示した縦型水槽は、ヒラメ生産の工業化を目指し、都心のビルの一室やコンテナ内など限られたスペースの有効活用を可能としている。装置は、ポリプロピレン製のトロ箱を飼育水槽のベースとして上部３段が飼育水槽、最下部が濾過槽とする全４段のオーバーフロー水槽とする。

枠組みは、軽量かつ錆に強いアルミニウム製の角柱を使用する。照明器具は、特注の Mars Aqua 製の Aquarium Light LG-G03A55LED を使用し、各水槽間を THK 社製 LM ガイドにおいて移動させる予定であったが、総重量150kgの軽量化や装置のコンパクト化および安定化を優先させることとし、LED ライトテープの採用を再検討している。照明器具の点滅の制御に関するプログラム作成については、これまでと同様にラズベリーパイを使用する予定である。

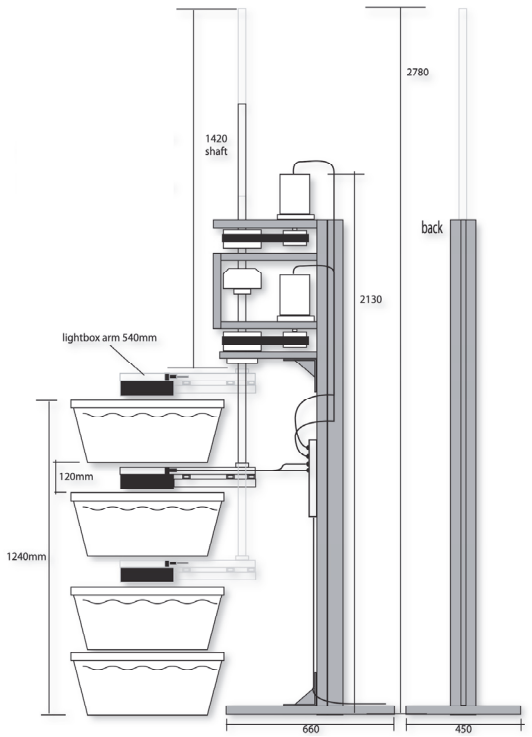



**図10　縦型水槽の設計図**

## ３．今後の課題

### （１）照明器具の移動について

階段型水槽に搭載した照明器具の重量は、約５kgであったため、選定したステッピングモーターの有するトルクで斜面を引き上げについては、試行錯誤となった。幸いにして完成後の照明器具の移動には、特別な問題は見当たらない。しかし、中間の２段目と最上部の飼育水槽の位置で照明器具を停止すると、モーターと接続しているタイミングベルト（株式会社ミスミ製 TBCNL3-15）がその重みに耐えることができず徐々に下部にずれ落ちてしまう。そこで現在は、中間の２段目と最上部の飼育水槽の位置で照明器具を止まらせる際、モーターを小刻みに上下移動させることで調節している。今後は、より軽量で現在使用している製品と同等の性能を有するものを採用するか、LED

ライトテープを用いて照明器具の自作を検討したい。

**（2）飼育水濃度の調節**

陸上養殖においては、人工海水の使用頻度をいかに節約できるかが今後の鍵となる。そのため、老廃物を効率よく除去する技術の開発が今後も不可欠である。しかし、使用している飼育水の劣化は避けられない。よって、飼育水の塩分濃度を従来よりも低濃度として飼育することを改善案の一つとしたいと考えている。東京大学金子豊治教授よりアドバイスをいただいたところ、ヒラメは塩分濃度が50％程度の飼育水でも飼育が可能なのではないかとのことであった。しかし一方で、低濃度条件下におけるヒラメの摂食行動は、低下する傾向にあるとの懸念の報告もある[5)]。そこで、緑色光照射を併用することで低濃度飼育水でのヒラメの成速度を観察することとした。これは、人件費の削減をはじめとする経済性を高めていく上で、不可欠なデータとなると考えており、装置の本格的な稼動前に、基礎実験を終えておきたいところである。そこで、体長５cm程度のヒラメを各水槽に30匹放流し、毎日10Lずつ真水と入れ替えていった。しかし、80％程度の濃度に達した段階で死亡する個体が見受けられ、70％程度の濃度に達した段階で全ての個体が死亡した。この結果は、50％の濃度からは程遠いものであり、予想できない結果であった。NPO 日本養殖振興会の斉藤浩一代表によると、ヒラメは、成魚に成長すると水質の変化に強くなるが、稚魚は水質の変化に敏感であり、管理上細心の注意が必要であるとのことであった。現在、８cm程度のヒラメを入手したが、慎重な濃度調整をしながら、実験を継続させたいと考えている。

**（3）その他の課題**

ヒラメの成長速度の測定については、体長と体重を個体ごとに測定しているが、魚へのストレスを考慮して実験前と実験後の二度にとどめて実施したいと考えている。飼育を開始する際のヒラメは、全長が平均で５cm、体重が平均で1.6gであるが商品として扱うことが可能なサイズまで育て上げるまでの期間を把握すること(緑色光を照射したヒラメでは、３ヶ月で全長の平均が８cm、体重の平均が6.7gに成長)、また、その際の食感や味の確認をしたいと考えている。さらに十分に育てたヒラメは、一般にも販売し消費者の要望などを踏まえた上で研究活動に反映させたい。

次に大規模の地震発生に備えて、耐震性を考慮した装置でなければならない。そこで、将来的には THK 株式会社の技術を導入したいと考えている。

最後に、浅瀬で生息するシロギス *Sillago japonica* の完全養殖やヒラメと同様に水底に潜むマゴチ *Platycephalus sp.* への緑色光に対する反応の有無などの試験や飼育を実施し、本装置で管理可能な魚種の拡大を目指し、より現実的な陸上養殖のシステム構築に努めたい。

**謝辞**

研究において、実験用魚類の提供と稚魚飼育用プランクトンの培養技術についてご指導くださった近畿大学農学部家戸啓太郎先生と水産養殖種苗センター那須敏朗氏、魚類への緑色光照射をご指導くださった北里大学海洋生命科学部高橋明義先生と水澤寛太先生、脱窒素装置作成及び運用に関してご協力くださった東京海洋大学海洋科学部延東真先生と株式会社プレスカ佐藤順幸氏そして太田威氏、研究の初期段階から濾過装置作成及び魚類飼育全般についてご協力くださったNPO日本養殖振興会斉藤浩一氏、飼育装置の作成にあたりアドバイスを

くださった THK 株式会社大関隆之介氏、飼育装置の設計から作成にあたってご協力くださった本校の元教職員 Joseph Cali 氏、魚類の浸透圧についてご指導をくださった、東京大学大学院農学生命科学研究科金子豊二先生、園芸療法についてご指導くださった恵泉女学園大学人間社会学部澤田みどり先生に深く感謝申し上げます。また本研究を遂行するにあたり、研究助成をいただいた公益財団法人下中記念財団に深く感謝の意を表します。

橋本　　悟先生
（はしもと　さとる）

**＜略歴＞**

1963年４月　東京都生まれ
1986年３月　玉川大学農学部卒業
同年　４月　山村第二女子高等学校勤務
2001年４月　浦和実業学園高等学校勤務
2006年４月　浦和実業学園中学校所属替え
2007年４月　NPO 日本養殖振興会理事
2018年４月　埼玉県私立中学高等学校協会理科教育研究会代表幹事

**＜研究歴＞**

2004年
・ボルボックスとブレファリスマの培養方法について（理科教室 No.590）
2005年
・本校に導入可能な実験・観察の検証と課題（埼玉県私立中学高等学校協会会誌 第32-33号）
2007年
・発酵食品の観察（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第38号）
2008年
・SPP指定を受けての理科教育活動（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第39号）
2009年
・南伊豆町青野川河口に生育する藻類の観

**【参考文献】**

１）山野目健、高橋良明「光環境と魚類生理マツカワの無眼側黒化から成長促進へ」（『比較内分泌学』vol.35,no.133）P93-98 2009年
２）「平成29年度日本水産学会春季大会講演要旨集」p194（『公益社団法人日本水産学会』） 2017年
３）家戸啓太郎「ゲノム編集による養殖魚の品種改良-筋肉増強マダイの作出-」（『生物工学』第97巻 第1号）P42-45 2019年
４）アクアポニックスとは ［https://aquaponics.co.jp/about-aquaponics/］（最終検索日：2019年10月２日）
５）熊井英永「新装版 海産魚の養殖」（文昇堂）p114 2000年

察（生物教育 vol.49）
・絶滅危惧植物インドオオイシソウの生育調査と培養の試み（平成21年度科学研究費 独立行政法人日本学術振興会）

2012年
・JST中高生の科学部活動振興事業の指定を受けての理科教育（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第43号）

2013年
・自作装置を用いて自然環境を再現しながらの生物飼育指導（2013年度研究助成 公益財団法人武田科学振興財団）
・JST 中高生の科学部活動振興事業の指定を受けての理科教育２（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第44号）

2014年
・飼育装置の自作と工夫 （浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第45号）

2016年
・紅藻類オオイシソウ *Composopogon coeruleus*(Balbis)Montagneの新産地（埼玉県立自然の博物館研究報告 第10号）

2017年
・低温下での緑色光または青色光の照射と魚類の成長速度の変化（2017年度科学教育振興[個別]助成 公益財団法人中谷医工計測技術振興財団）
・静岡県南伊豆町と群馬県片品村における歩行虫調査（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第48号）

2018年
・自作装置を用いて自然環境を再現しながらの生物飼育指導２（2018年度研究助成 公益財団法人武田科学振興財団）
・透明骨格標本を用いたカエル２種の大腿骨形成過程の比較（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第49号）

2019年
・外来種のカラドジョウは、在来種のドジョウを絶滅に追いやるのか？（浦和実業学園中学校・高等学校教員研修録 第50号）

**＜勤務校＞**
浦和実業学園中学校・高等学校
〒336-0025 埼玉県さいたま市南区文蔵3-9-1
電話　048-861-6131