

## 福山大学ブランド研究プロジェクト

# 次世代養殖システムプロジェクト完了報告

研究期間：2017 年 4 月～2022 年 3 月

建築学科 伊澤 康一

情報工学科 池岡 宏

※アドバイザー（以下）

スマートシステム学科 仲嶋 一

機械システム工学科 内田 博志

## 目次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 1. プロジェクト総括 .....                  | 2  |
| 2. AI を用いた自発給餌システムの開発 .....        | 4  |
| 3. 養殖水槽におけるシロギス成長と光・熱環境の関係解明 ..... | 11 |

## 1. プロジェクト総括

人が手入れすることによって自然環境をより豊かにできる「里山・里海」の考え方・取組みの重要性が再認識されており、養殖は「里海」の取組みの1つとして位置付けられている。

対象魚であるシロギスは、25cm以上になると「テッポウギス」と呼ばれ、価値が上がり高値で取引される。産業支援を目的として「テッポウギス」の安定養殖が求められている。その課題を「AIを用いた自発給餌システム」によって解決することに着目した。

「自発給餌システムの開発」がメインテーマとなるが、人工知能学習で使用する教師データを入手、ならびに、モデルベース開発思想に基づいて水槽環境シミュレーションモデルを構築するために、実測調査を行った。

図1に、研究体制（ワークフロー）を示す。海洋生物科学科「有瀧研究室」で研究開発している「完全養殖システム」を工学的に支援

するために、建築学科「伊澤研究室」による「環境制御システムと、情報工学科「池岡研究室」による「自発給餌システム」の開発を目指した。

2017年～2021年の研究期間内では、上記の最終目標に達するには至らなかったが、上記の最終目標に近づくための成果は着実に得られたと考える。

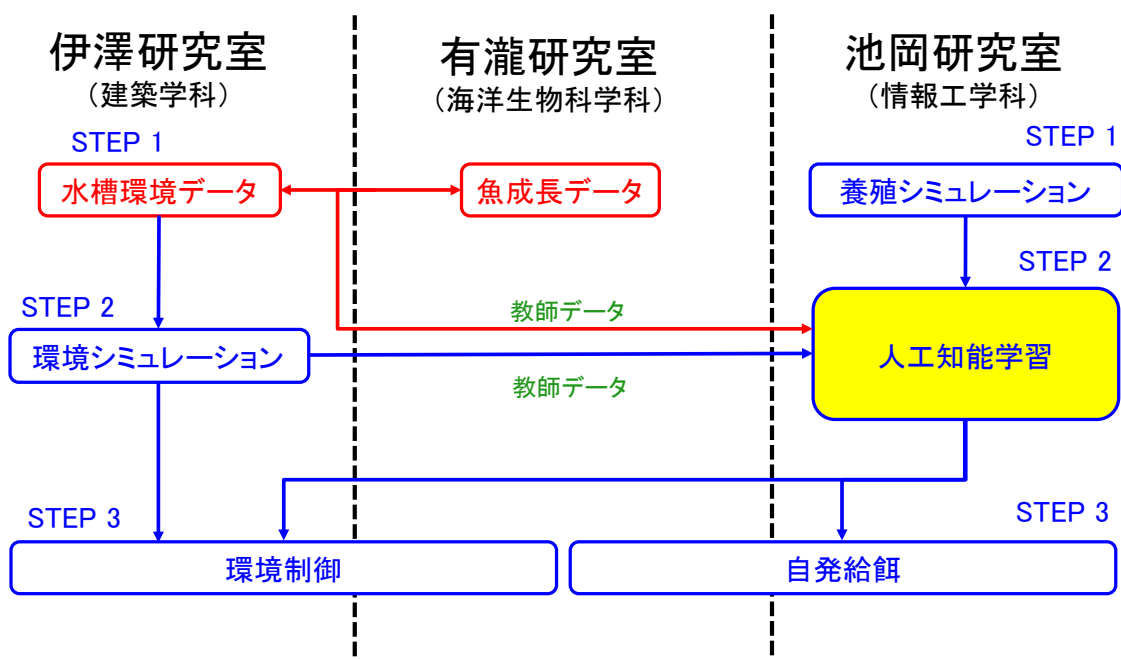
研究では、情報工学科「池岡研究室」による「自発給餌システムの開発」をサブタスクAとし、建築学科「伊澤研究室」による「環境シミュレーションモデル構築」・「水槽環境と魚成長の関係解明」をサブタスクBとして取り組んだ。

「シミュレーションモデル開発」+「水槽環境とシロギス成長の関係メカニズム解明」をサブタスクBとして研究を行なった。各年度の取り組み概要を以下に述べる。

<サブタスクA>

池岡研究室が参画したのは2018年度からであり、2017年度は、未参加であった。

2018年度は、システム構成に関する検討



および AI の学習方法に関する検討を行い、その考察をもとに養殖シミュレータの開発を決定し、それに着手した。

2019 年度は、養殖シミュレータの開発を進めつつ、シミュレータ上で学習を行う給餌制御部の AI 学習について検討を進めた、

2020 年度は、給餌器作動部に利用するハードウェアの調査・検討に加えて、画像認識部の AI の開発に着手するため、利用するアルゴリズムの選定を行い、それを決定した。

2021 年度は、画像認識部の方向認識機能等の追加や利用する給餌器の性能調査を実施した。また、給餌制御部と給餌器作動部の統合を進めた。

成果としては、システムの核となる二つの AI の開発について道筋をつけた。また、給餌器作動部におけるハードウェアの選定を含めたシステム開発、給餌制御部と給餌器作動部間の無線通信による統合も実施した。

今後の課題としては、画像認識部と給餌制御部の統合、さらに未着手の画像入力部の開発を進め、最終的には全 4 プロセスで統合テストおよび調整作業を行う必要がある。その他にも、水槽周囲に設置予定のハードウェアの水濡れ対策等、実用に向けた細部についても検討が必要である。

#### <サブタスク B>

2017 年度は、AI 連携で用いる「水槽環境システムの水温・照度シミュレーションモデル」の構築を目的として、気象データ（日射量・外気温）を用いることで水槽水温（熱環境）と水槽水上面照度（光環境）を計算予測できる簡易シミュレーションモデルを構築した。

2018 年度は、ディープラーニングの「教師

データ」として魚の画像データ（動画・静止画）が必要であり、撮影のための実験系を構築した。水中用 CCD カメラおよび水面用デジタルビデオによる映像撮影を実施した。撮影したシロギスの画像データを使って、サブタスク A で人工知能学習（ディープラーニング）を開始した。

2019 年度は、魚の成長に合わせて、餌の粒径を小さいものから大きなものへ変更しながら与える「グラデーション給餌」のアイデアを試行するための準備として、餌の粒径ごとの重力沈降速度や拡散性状を、数値解析によって明らかにした。

2020 年度は、人工知能学習のための教師データとして、水槽熱環境と養殖魚成長の関係についての基礎データを得ることを目的とし、シロギス成長状況に着目して整理した。

2021 年度は、2020 年度に引き続き、内海研養殖水槽の光環境（照度）・熱環境（温度）の計測を継続し、2020 年度と 2021 年度のデータを比較した。

成果としては、モデルベース開発のための水槽環境シミュレーションモデルを構築するとともに、成長速度への影響（寄与）が大きい順番が水温・光周期・日照時間であることなどを定量的に明らかにした。

今後の課題としては、水温制御システムを、シミュレーションと実験により検討する。シロギス生体リズム等の考慮は、海洋生物科学科との意見交換・連携を強化して検討していく必要がある。

今後は、AI 自発給餌システム完成後、内海研養殖水槽に実装し、実験とシミュレーションによる検討で開発を進めていく。

## 2. AI を用いた自発給餌システムの開発

池岡 宏

### 1. 研究背景と目的

シロギスは東南アジア生息する魚種であり、日本では主に天ぷらや姿焼きとして食されている。一般的なサイズは全長 15cm から 20cm ほどで価格は約 1000 円/kg である。しかし、サイズ 25cm を超えると寿司や刺身として利用されるようになり価格が約 3000 円/kg の高級魚として取引される。したがって、25cm を超えるサイズの個体を安定して飼育できるようになれば、シロギス養殖産業の活性化が期待できる。

しかし現在、シロギス養殖における水質管理及び給餌は経験をもとに人の手によって行われており、単純な既存のデバイスを用いた自動化には限界がある。実際、コストが高い人件費に代えて、従来のタイマー式制御による自動給餌器では安定して 25cm 以上の個体を飼育することは難しい。具体的にはシロギス養殖における給餌量は照度と水温に左右されるほか、出荷期間の短縮化と水槽内の環境維持のためには、バランスの良い給餌が求められる。

一方、近年の人手不足が深刻な問題となっている農業や水産業といった第一次産業で人工知能（以後、AI と呼ぶ）の利用に期待が寄せられており、AI を利用することによる事業の高効率化および低コスト化が注目されている。そこで、これらの問題を解決するために、我々も AI を使用したシロギスのための養殖

システムの構築を目指している。システムの要求として「早期出荷（全長 25cm 以上）」、「給餌必要量の最小化」を挙げている。これらの要求を実現するため、「環境制御システム」と「自発給餌システム」の二つのシステムで構成することにした。環境制御システムは、水槽内を照度、水温、水質などをシロギス養殖に適した環境に保つシステムである。自発給餌システムは、AI を使用することでシロギスをばらつきなく全長 25cm 以上の個体を早期に飼育するため、最適な給餌を行うシステムである。

特にここでは、後者の「自発給餌システム」の開発について述べる。

### 2. システム概要

#### 2. 1 システム構成

自発給餌システムは、画像入力部、画像認識部、給餌制御部、給餌器作動部の 4 つのプロセスに分かれている（図 1）。画像入力部と給餌器作動部は水槽側に設置し、画像認識部と給餌制御部は水槽設置場所とは異なる場所に設置された PC 上に搭載する。なお、シロギス養殖用の水槽と AI を搭載した PC はそれぞれ離れた場所に配置されることを考慮したシステム設計となっており、水槽側のデバイスと AI 用 PC は無線通信により接続する構成とする。これは、養殖環境が、電子機器の苦手な水を扱う場所であるため AI を搭載した PC を水槽より離れた場所に設置すること（設置性）が求められ、また、様々なサイズの水槽に複数の給餌器を設置するため、容易に給餌能力を拡張できる仕組み（拡張性）を実現するためである。

#### 2. 2 画像入力部

画像入力部は、水槽内の魚の分布の様子を撮影するために養殖場の水槽上部に設置されたカメラ、画像認識部および給餌制御部を実装した PC に搭載するキャプチャーボードから構成されており、画像データを取得するプロセスになる。なお、水槽の水深は 1m ほどあり、シロギスの三次元位置情報を高精度に取得するためにアオリ光学系を利用することを検討している。また、画像データについては Wireless HDMI を使いカメラで得られたライブビューデータを PC 側に送信する。

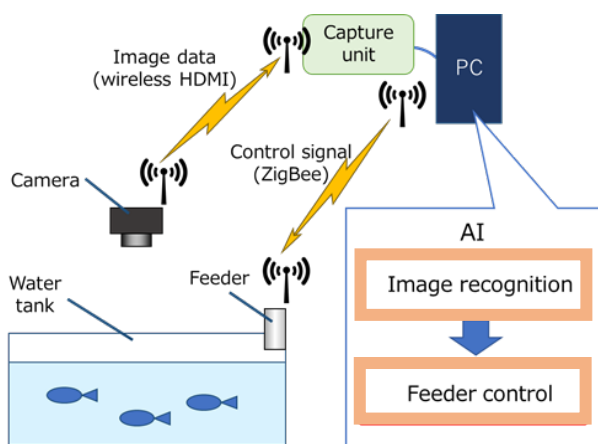


図 1 システム概要図

## 2. 3 画像認識部

画像認識部は PC 上に実装した AI を主体とする。画像認識部では画像入力部から受け取った画像データをもとにシロギスの位置、サイズ、方向及び食欲を検出する。なお、現在実装済みの位置、サイズ、方向の検出には、教師あり学習 YOLOv3 により開発した AI を使用する。YOLOv3 は、処理速度が非常に速くリアルタイムオブジェクト検出が可能である。本アルゴリズムは、検出対象となるオブジェクトを矩形で囲む左上および右下の座標値を返すことで、検出物体の位置を提供する。なお、シロギスの食欲を推定する手段として、光を用いた給餌合図を普通の給餌のたびにに行い、シロギスの反応から判断する方法を検討している。検出した位置、サイズ、方向、食欲のデータを次段の給餌制御部に送信する。

## 2. 4 給餌制御部

給餌制御部は画像認識部と同様の PC 上に実装された AI より成る。本 AI は教師データの提供が難しいことから、専用に開発した養殖シミュレータ(図2)において報酬設計に基づく学習(深層強化学習)の PPO (proximal policy optimization)アルゴリズムを使うことで開発を進める。この給餌制御部では画像認識部から受け取ったシロギスの情報(位置、サイズ、方向及び食欲)をもとに適切な給餌位置、タイミングを判断し、給餌作動部に給餌信号を出力することを役割とする。なお、給餌位置の制御は、水槽上に複数の給餌器が配置されていることを前提とし、その給餌器を選択することで、給餌位置の制御を実現する。

## 2. 5 給餌器作動部

給餌器作動部はマイコン及び給餌器を中心に構成する。マイコンは一つの水槽につき1個、給餌器は水槽サイズに応じて複数台が配置される。また、マイコンには無線通信(受信)用のデバイスおよびアンテナを接続している。

給餌器作動部では、前プロセスより無線により送られてきた給餌制御信号に応じて、給餌器を操作する。なお給餌信号は作動対象となる給餌器のオン/オフに関する情報である。

## 3. システム開発状況

本システム開発にあたって以下の四つの作業について実施した。

### 3. 1 給餌制御 AI の開発

本研究では、まずシステムの核となる給餌器制御部の開発を進めるため、シロギス養殖シミュレータを開発し、その上で深層強化学習を行うことで給餌制

御 AI の基礎学習を実施することにした[1][2]。その際、給餌器の設置台数及び水槽内のシロギスの数を変更し給餌制御 AI の学習様子を観察しつつ、最適な給餌器台数を算出する実験を行った。なお、学習効果を示す平均累積報酬において、本システムの給餌制御 AI を利用した場合とタイマー制御の単純な自動給餌とを比較して、約 2.4 倍出荷期間の短縮が可能であることがわかった。これは、平均累積報酬が水槽内のシロギスのサイズにばらつきが小さく、平均サイズが大きくなるように報酬設計を行うことで得られた結果であり、給餌器制御 AI の学習に成功したことを確認できたと言える。なお、本システムの核となるシロギス養殖シミュレータでのシロギスの行動パターンについて以下にまとめる。

- ・最も近い位置にある餌を見つけ、そこに向かう。
- ・満腹時は餌に向かわず、消化後に再び餌に向かう。
- ・餌を食べた魚はサイズが大きくなる。
- ・サイズが限界値に到達すると成長しなくなる。
- ・泳ぐ速さはサイズに依存する。
- ・自分より大きい個体を避けるようになる。
- ・サイズ差が設定値より大きい場合共食いをする。

この養殖シミュレータは、Unity ML-Agents を使用しており、AI 学習結果を仮想飼育環境で確認することができるだけでなく、水槽内のシロギスの数や状態に応じた最適な給餌器の設置数についても検討ができるようになった(図3)。

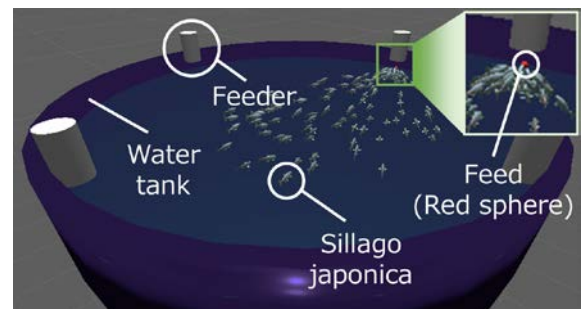


図2 養殖シミュレータ

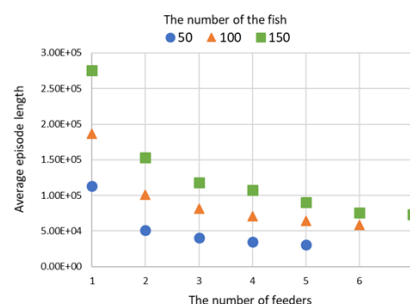


図3 給餌器数とシロギス飼育期間の関係

### 3. 2 魚分布の認識

画像認識部における AI 学習に必要な教師データを構築する際、実際の養殖用水槽で撮影された映像データを使用した。今回は、ソフトウェア「ffmpeg」を使用し、映像データ（MP4）を画像データ（JPG）に変換を行う際、魚の遊泳速度を考慮し、より効果的な教師データとするために映像データを 1 秒当たり 4 フレームの静止画として画像データを抽出し、これらの画像データに手作業でアノテーションを付加した。アノテーション作業とは、画像データ中の領域に対してタグ付け（クラス指定）を行うことである。アノテーションデータは、学習用、検証用に分けて作成した。加えて、テスト用の画像も必要なので、アノテーションを施さないデータを別途確保した。

なお、これらの画像データだけでは、シロギス認識の学習データとして十分でないと判断し、データ拡張を実施した。ソフトウェア「Augmenter」を利用して元画像に、回転、反転、歪曲処理を施すことで、150 倍の画像を用意するデータの拡張を行った（図 4）。なお、アノテーション付きのデータが 100 個であり、これをデータ拡張によって 1500 個とし、このデータを使って学習を行った。AI で、映像を用いた場合のテスト結果、多くの場面で画像データ、映像データ共に 90%以上のシロギスを検出することができた。

さらに、方向認識についても実装した（図 5）[3]。各シロギスの位置に加えてシロギスの頭の画素領域に 3,679 箇所のアノテーションを付加し、各シロギスの中心点とその個体に対応する頭の中心点を結ぶ方向が、そのシロギスの方向であるとし、算出することを試みた。その際、シロギスの方向認識成功率は 53.2%と半分の個体に対してのみ対応できた。この理由として、シロギスの頭の画素領域に割り当てられている画素数が十分でないことが挙げられる。

### 3. 3 給餌器特性の確認

給餌量及び給餌タイミングが実給餌器に依存するため、AI による正確な給餌量および給餌タイミングの制御を行うには、実給餌器における給餌性能に関するデータを収集し、これらのデータをソフトウェアに反映する必要がある。本実験で使用した給餌器は、株式会社中部海洋開発社製の SF-100(S)である。この給餌器には全四つの給餌投下口があり、それぞれサイズが異なる。このことも踏まえて、安定したきめ細やかな給餌制御を可能にするために既定の粒径 1mm のみならず追加で粒径が 2, 6, 8mm のそれぞれの場合における給餌量について調べた。また、この検証時に生じたトラブルについて情報収集も行った。例えば、餌が数粒給餌器の穴に付着し投下されない、

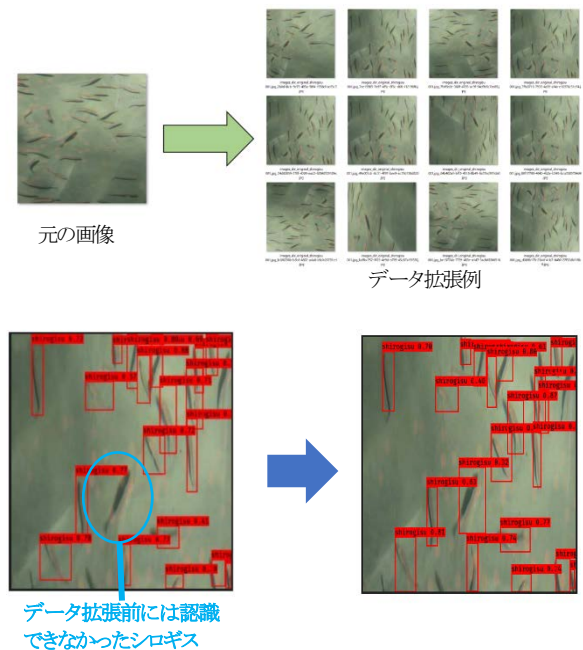


図 4 データ拡張とその効果

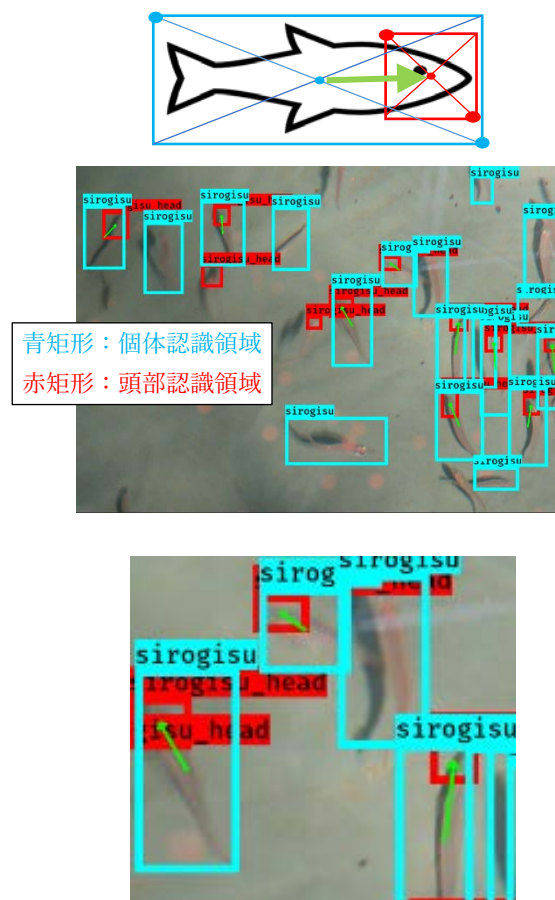


図 5 シロギスの位置及び方向認識

給餌器の投下口に餌が詰まるといった情報である(図6)。

シミュレータ上で動作する給餌制御部は、実給餌器で給餌可能な給餌量及び給餌間隔が反映されていない。調査した実給餌器の性能を、シミュレータ上の給餌制御部に反映する作業を行った[4]。この給餌器の主な特徴は下記の通りである。

- ・制御可能な操作は電源のオンとオフのみ
- ・餌の投下口は、サイズが異なる四つの穴で構成
- ・回転動作により1回の給餌につき12.5秒かかる

なお、単にAC100V電源のON/OFFにより給餌動作開始と停止を操作するため、マイコンArduinoからはSSR(ソリッド・ステート・リレー)を介して制御することにした。さらに、上の測定値に基づき給餌制御部のプログラムにも修正を加えた。なお給餌器数を増やした場合、PC側の給餌制御AIについては給餌器に応じた再学習を行い、マイコン側では給餌器数に応じたSSRを用意することで対応可能であることから、容易に拡張することが可能な構造になっている。

#### 3. 4 無線通信による給餌器制御

給餌制御部と給餌器作動部を無線通信により統合し、実給餌器の設置個数や設置箇所に依存しない設置性及び拡張性を確認可能なプロトタイプを構築した[4]。無線通信の構築にはZigbee規格の通信端末XBeeを使用した(図7)。XBeeは非常に安価であり、また低消費電力で動作する特徴を持つ。最終的にはシミュレータ上の魚分布に応じて給餌制御AIからの指示をXBee端末で送受信し、ArduinoマイコンからSSRを通して給餌器が動作することを確認した(図8)。

#### 4. 結論と今後の課題

これまでに、本システムの核となる二つのAIの開発について道筋をつけることができた。また、給餌器作動部におけるハードウェアの選定を含めたシステム開発、給餌制御部と給餌器作動部間の無線通信による統合も実施した。

今後は、画像認識部と給餌制御部の統合、さらに未着手の画像入力部の開発を進め、最終的には全4プロセスで統合テストおよび調整作業を行う必要がある。その他にも、水槽周囲に設置予定のハードウェアの水濡れ対策等、実用に向けた細部についても検討が必要であろう。

#### 参考文献

- [1] 黒木春樹, 池岡宏: “人工知能を活用した自発給餌システムによるシロギス養殖の高効率化および低コスト化に関する検討,” 情報科学技術フォーラム(FIT), 2019.
- [2] H.Kuroki, H.Ikeoka and K.Isawa: “Development of simulator for efficient aquaculture of *Sillago japonica* using reinforcement learning,” International Conference on Image Processing and Robotics(ICIPRob), 2020
- [3] T.Sato, H.Kuroki, H.Ikeoka and K.Isawa: “DEVELOPMENT OF REAL-TIME FISH POSITION RECOGNITION SYSTEM FOR AUTOMATIC FEEDING AQUACULTURE,” IEEEJ International workshop on Image Electronics and Visual Computing(IEVC), 2021
- [4] Y.Saragai, T.Sato, H.Kuroki, H.Ikeoka and K.Isawa: “Study on Adaptation of Auto Feeding System for *Sillago Japonica* to Actual Aquaculture Environment,” International Conference on Image Processing and Robotics(ICIPRob), 2022.

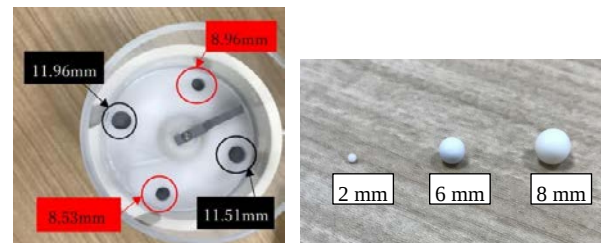


図6 粒径と給餌性能の調査

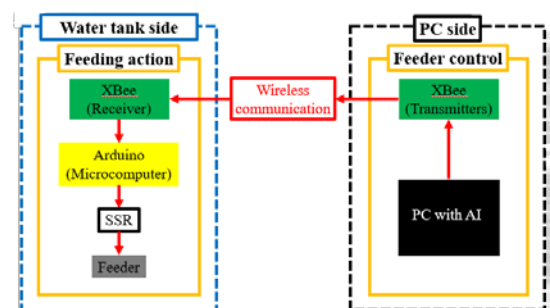


図7 無線通信による給餌器制御

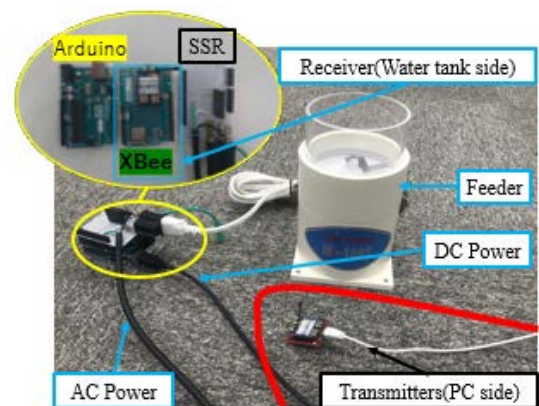


図8 給餌器作動部を構成するデバイス

# 3. 養殖水槽におけるシロギス成長と光・熱環境の関係

伊澤 康一

## 1. はじめに

サブタスクBでは、「環境シミュレーションモデル構築」と「水槽環境と魚成長の関係解明」に取り組んだが、「環境シミュレーションモデル構築」については文部科学省選定私立大学研究ブランディング事業（2017年度～2019年度）事業成果報告書（pp. 40-43）にて報告済みであるので、ここでは、2020年度～2021年度に取り組んだ「水槽環境と魚成長の関係解明」について報告する。

## 2. 背景・目的・方法

人が手入れすることによって自然環境をより豊かにできる「里山・里海」の考え方・取組みの重要性が再認識されており、養殖は「里海」の取組みの1つとして位置付けている。

対象魚であるシロギスは、25cm以上になると「テッポウギス」と呼ばれ、価値が上がり高値で取引される。通常サイズのシロギスの単価は「1500円/kg」であるのに対し、大型サイズのシロギスの単価は「3000円/kg」と高価である。2万尾の生産により「900万円」の水揚げとなる。その5倍の末端価格である「4500万円」の経済効果が可能となる<sup>2)</sup>。

そのような産業支援を目的として「テッポウギス」の安定養殖が求められている。大型である体長25cm、150gの「テッポウギス」を1年半で2万尾生産する技術確立することが目標である。その課題を「AIを用いた自発給餌システム」によって解決することに着目した。

本研究では、養殖水槽の熱・光環境と養殖魚成長の関係性を明らかにするとともに、人工知能学習のための教師データとしての基礎データを得ることを目的とした。

本研究では特に、2020年度と2021年度のデータを比較する。水槽水温データを実測するとともに、屋外の熱・光環境データとして気象データを用いた。



写真-1 水槽

## 3. 適水温と産卵期

シロギスは、砂地を好んでおり、春～夏には水深1m～15m程の浅瀬、秋～冬では水深30m～50mまでの深い場所に生息している<sup>3)</sup>。

図-1に、適水温と産卵水温を示す。シロギスの適水温はおよそ15℃～25℃であり、特に20℃～25℃の温度時は活発に活動する。一方、水温が15℃以下の時、水温の安定した深場に移動し、活動も少なくなり、食事もほとんど行わなくなる<sup>4)</sup>。

産卵期は7～9月頃であり、産卵は1回だけではなく期間中に何度も行なう。産卵は水深が1m～15m程度の藻場などで行われる。7～9月頃の産卵期では、成長が鈍ると言われている。産卵期では、水温は20～28℃、日長は12～15時間になる<sup>5)</sup>。

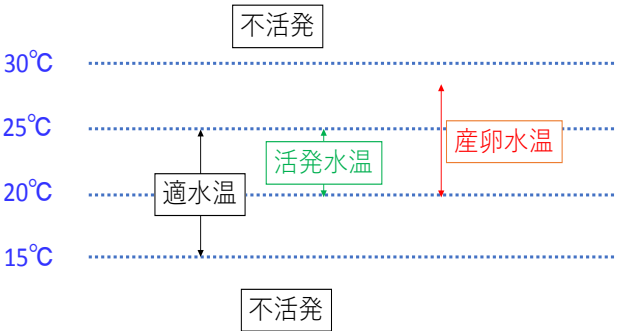


図-1 適水温と産卵水温

## 4. 調査方法

表1に、入手したの引用元を示す。水槽水温は実測した。それ以外のデータは、気象庁<sup>7)</sup>と国立天文台<sup>8)</sup>のサイトから引用した。なお、引用の際、水槽が設置されている因島にできるだけ近い地域のデータを用いることとした。

表-1 データ引用元

|    |        | 測定場所          | 測定間隔  | 引用元   |
|----|--------|---------------|-------|-------|
| 温度 | 外気温    | 生口島           | 時別値   | 気象庁   |
|    | 水槽水温   | 因島            | 10分間隔 | 実測値   |
| 照度 | 屋外照度   | 広島（※日射量から推定）  | 時別値   | 気象庁   |
|    | 水槽水中照度 | 広島（※屋外照度から推定） | 時別値   | 気象庁   |
| 日長 | 光周期    | 因島            | 日別値   | 国立天文台 |
|    | 日照時間   | 生口島           | 日別値   | 気象庁   |

福山大学内海生物資源研究所（因島キャンパス）にある水槽A（山側）と水槽B（海側）の2つについて、水槽水温の計測を行なった。計測期間は、2020年8月～継続測定中（2022年5月現在）である。

外気温は、気象データを用いた。屋外照度は、広島県の気象データの日照量  $[W/m^2]$  に天空日射の発光効率115  $[lm/W]$  を乗じて推算した。1日の明暗サイクルである光周期は、因島の日の出と日の入りの時刻から算出した。日照時間は、気象データを用いた。なお、日照は、直達日照量が  $120W/m^2$  以上と定義されている<sup>7)</sup>。

#### 4.調査結果

図-2に、外気温・水槽水温を示す。水槽水温は、秋季・冬季では外気温より高い傾向にあり、春季・夏季では外気温より低い傾向にある。これは、水の熱容量の影響と完がられる。

平均水温を見ると、11月～4月では  $15^{\circ}C$  以下であり、魚の活動は不活発であったと推測される。5月～10月では  $15^{\circ}C$  以上であり「適水温」に該当する。特に、6月～7月は  $20^{\circ}C \sim 25^{\circ}C$  であり、「活発水温」に該当する。また、8月～9月は  $25^{\circ}C$  以上であり、「産卵水温」に該当する。

図-3に、屋外照度・水槽水中照度を示す。なお、夜間など照度がゼロ値となるデータは除外して平均や分布を求めた。2021年の実測結果を参考にして、水槽水中照度は屋外照度  $1/2000$  として推算した。シロギスは、基本的に浅い海の砂底を好む魚であり、摂餌のために砂に潜る性質がある。この性質は、サイズが大きくなるにつれ強くなる。そのため、砂に潜っているときの状況を作るため、水槽建屋の照度を低くしていると考えられる。

図-4に、光周期・日照時間を示す。光周期に比べて日照時間は短い。光周期は平均12時間であり、最高値となる5月～7月では14時間程度となっている。日照時間は平均6時間程度時間であり、最高値となる6月では平均14時間以上となっている。それに対し、梅雨期となる6月～7月の日照時間は平均5.8時間ぐらいである。

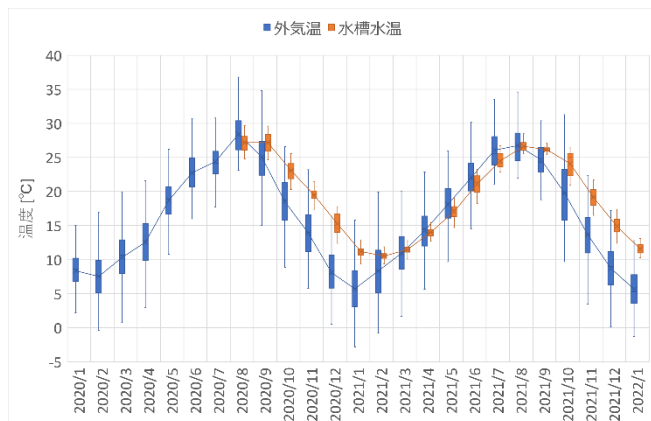


図-2 外気温・水槽水温

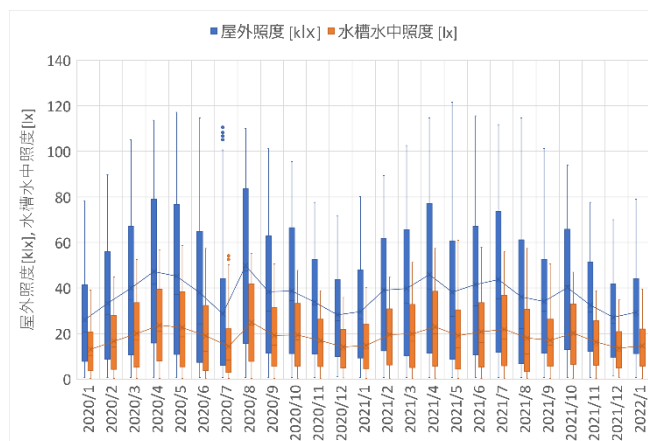


図-3 屋外照度・水槽水中照度

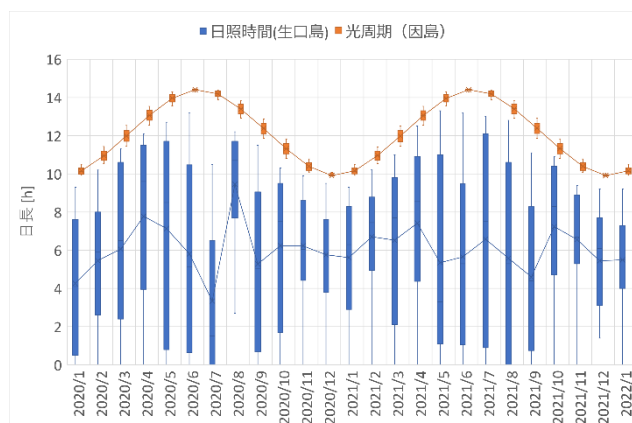


図-4 光周期・日照時間

#### 6. シロギスの成長

養殖魚は、生まれた直後は稚魚用1t水槽で2ヶ月弱の間生活した後、成魚用10t水槽に移される。水槽A（山側）にはR1年（2019年）6・8月生まれのシロギスが、水槽BにはR2年（2020年）5・6・7月生まれのシロギスが、それぞれ約1000匹ずつ入っている。本研究では、生まれ月の平均をとって、R1年生まれは7月を、R2年生まれは6月を誕生月として近似することにした。

表-2に、近似したシロギスの生年月を示す。表-3に、日付とシロギスの年齢を示す。なお、表-3は、近似した生年月（表-2）に基づいて作成した。

成長データの計測は1ヶ月に1回で実施された。魚を頻りに水槽から取り出すとストレスがかかり、成長スピードや健康に影響を及ぼす可能性があるからである。成長データ計測は、1000匹の中からランダムに25匹を取り出して行われた。

測定項目は体重・全長・体長・頭長である。体長は尾ひれを除いた頭長から尾柄までの長さであり、全長は頭長から尾ひれまでの長さである。この中でも特に重要は体長部分である。

表-2 生年月の近似

|                   | 実際 |       | 近似     |
|-------------------|----|-------|--------|
| 水槽A<br>(山側; 10-2) | R1 | 6月生まれ | →7月生まれ |
|                   |    | 8月生まれ |        |
| 水槽B<br>(海側; 10-1) | R2 | 5月生まれ | →6月生まれ |
|                   |    | 6月生まれ |        |
|                   |    | 7月生まれ |        |

表-3 日付と年齢の関係

|         | 水槽A (山側; 10-2) | 水槽B (海側; 10-1) |
|---------|----------------|----------------|
|         | R1生            | R2生            |
| 2019/7  | 0歳0カ月          |                |
| 2019/8  | 0歳1カ月          |                |
| 2019/9  | 0歳2カ月          |                |
| 2019/10 | 0歳3カ月          |                |
| 2019/11 | 0歳4カ月          |                |
| 2019/12 | 0歳5カ月          |                |
| 2020/1  | 0歳6カ月          |                |
| 2020/2  | 0歳7カ月          |                |
| 2020/3  | 0歳8カ月          |                |
| 2020/4  | 0歳9カ月          |                |
| 2020/5  | 0歳10カ月         |                |
| 2020/6  | 0歳11カ月         | 0歳0カ月          |
| 2020/7  | 1歳0カ月          | 0歳1カ月          |
| 2020/8  | 1歳1カ月          | 0歳2カ月          |
| 2020/9  | 1歳2カ月          | 0歳3カ月          |
| 2020/10 | 1歳3カ月          | 0歳4カ月          |
| 2020/11 | 1歳4カ月          | 0歳5カ月          |
| 2020/12 | 1歳5カ月          | 0歳6カ月          |
| 2021/1  | 1歳6カ月          | 0歳7カ月          |
| 2021/2  | 1歳7カ月          | 0歳8カ月          |
| 2021/3  | 1歳8カ月          | 0歳9カ月          |
| 2021/4  | 1歳9カ月          | 0歳10カ月         |
| 2021/5  | 1歳10カ月         | 0歳11カ月         |
| 2021/6  | 1歳11カ月         | 1歳0カ月          |
| 2021/7  | 2歳0カ月          | 1歳1カ月          |
| 2021/8  | 2歳1カ月          | 1歳2カ月          |
| 2021/9  | 2歳2カ月          | 1歳3カ月          |
| 2021/10 | 2歳3カ月          | 1歳4カ月          |
| 2021/11 | 2歳4カ月          | 1歳5カ月          |
| 2021/12 | 2歳5カ月          | 1歳6カ月          |

### 6.1 体長の経日変化

図-5に、体長の経日変化を示す。

2020年4月～6月の春季を見ると、「R1生まれ」の成長速度が比較的早い。これは成長期と考えられる。

2020年7月～8月の夏季を見ると、「R1生まれ」の成長速度が鈍っている。これは産卵期と考えられる。

2021年1月～3月の冬季を見ると、「R1生まれ」・「R2生まれ」ともに、体長・体重が若干小さくなっている。これは、水温が15℃以下のため不活発となり、餌をほとんど食べなくなったからだと考えられる。

2021年4月～7月の春季・夏季を見ると、「R1生まれ」・「R2生まれ」ともに、体長・体重が大きくなって

いる。

2021年8月～10月の夏季・秋季を見ると、「R1生まれ」は成長が停滞しているのに対して、「R2生まれ」は成長し続けている。これは、両者の成長時期（年齢）の違いが影響している可能性が考えられる。

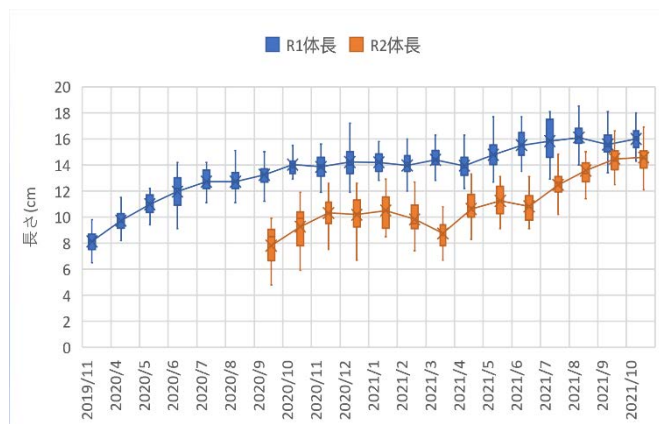


図-5 体長の経日変化

### 6.2 体長の年齢変化

図-6は、体長の年齢変化であり、図-5の横軸を年齢として作成し直したものである。

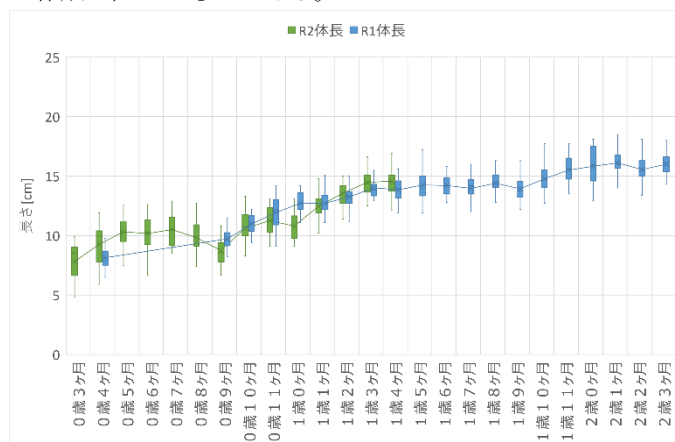


図-6 体長の年齢変化

0歳4ヶ月を見ると、「R2生まれ」の方が「R1生まれ」よりも成長している。これは、6月生まれの「R2生まれ」は、成長期において、7月生まれの「R1生まれ」よりも夏の時期を1ヵ月長く経験しているためと推測する。

0歳9ヶ月を見ると、「R1生まれ」の方が「R2生まれ」よりも成長している。これは、同じ年齢時において、「R1生まれ」は4月であったのに対して、「R2生まれ」は3月であったため、「R1生まれ」の方が高い水温であったことが影響していると推測する。

1歳0ヶ月～1歳4ヶ月を見ると、「R2生まれ」の方が「R1生まれ」よりも成長速度（グラフの傾き）が大きい。これは、この年齢時期において、「R2生まれ」は6月～9月（春季・夏季）を経験し、「R1生まれ」は7月～10月（夏季・秋季）を経験したことの違いが影響していると考えられる。6月は、平均水温20℃以上の「活発水温」であり、かつ、

梅雨期のため照度が低い。この好条件の6月を経験したことの影響が大きい可能性もある。また、2020年8月の日照時間に比べて、2021年8月の日照時間は少ない（図-4）。したがって、2020年8月の水中照度に比べて、2021年8月の水中照度は低い（図-3）。それに加えて、建屋内の設置位置の影響で、水槽A（R1生まれ）に比べて水槽B（R2生まれ）の水中照度は約半分程度であった<sup>6)</sup>。以上のような、「活発水温」と「低照度環境」が、「R2生まれ」の成長速度を早くした要因ではないかと推測する。

## 7. 成長速度と環境物理量の関係

図-7・図-8・図-9に、成長速度と水温・光周期・日照時間の関係をそれぞれ示す。各月平均値で関係を調べた。

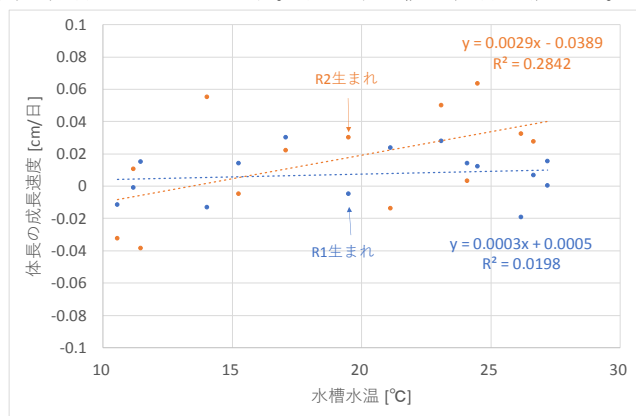


図-7 成長速度と水温の関係

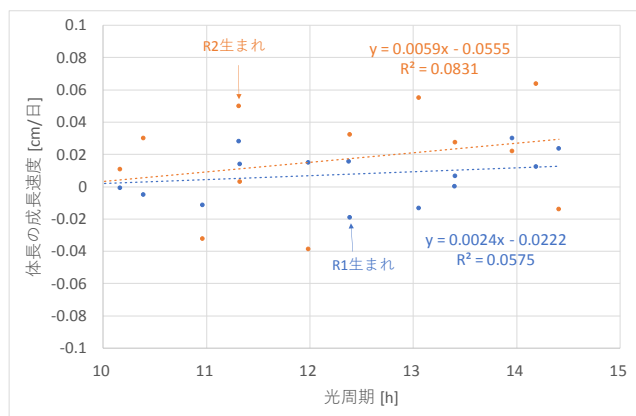


図-8 成長速度と光周期の関係

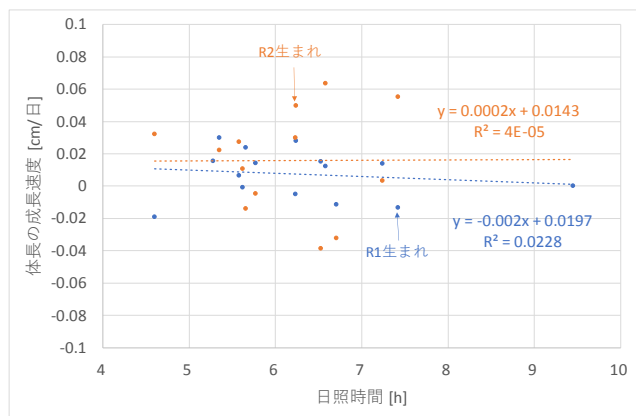


図-9 成長速度と日照時間の関係

成長速度と水温の関係（図-7）を見ると、「R1生まれ」と「R2生まれ」とともに正の相関が見られ、「R2生まれ」の方が近似直線の傾きが大きい。成長速度と光周期の関係（図-8）を見ると、「R1生まれ」と「R2生まれ」とともに弱い正の相関が見られる。成長速度と日照時間の関係（図-9）を見ると、「R1生まれ」は若干の負の相関が見られ、「R2生まれ」は相関が見られない。

図-7・図-8・図-9を勘案すると、成長速度への影響（寄与）が大きい順番は、水温・光周期・日照時間であると推測される。

## 8. まとめ

- 1) 夏季では、水槽水温が高くなり、「適水温」となってよく成長する。ただし、産卵期と重なると成長が鈍る。
- 2) 冬季では、水槽水温が低くなり、「不活発水温」となって餌を食べなくなり、成長が停滞する。
- 3) R2生まれ（水槽B）の方が、R1生まれ（水槽A）よりも成長が早い傾向が見られた。
- 4) これは、R2生まれ（水槽B）の方が、R1生まれ（水槽A）よりも低照度環境であったことが影響したと推測される。低照度の水槽環境によって、夜行性となり餌をよく食べた可能性もある。
- 5) 成長速度と水温・光周期・日照時間の関係を調べた結果、成長速度への影響（寄与）が大きい順番は、水温・光周期・日照時間であった。

## 謝辞

シロギス成長データのご提供ならびに養殖水槽の実測調査にあたり、本学海洋生物学科の有瀧真人教授をはじめ有瀧研究室の方々にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 福山大学ブランディング推進のための研究プロジェクト [https://www.fukuyama-u.ac.jp/project/project\\_branding/](https://www.fukuyama-u.ac.jp/project/project_branding/)
- 2) 黒木春樹, 池岡宏: "人工知能を活用した自発給餌システムによるシロギス養殖の高効率化および低コスト化に関する検討", 第18回情報科学技術フォーラム(FIT), pp.295-296, 2019.
- 3) 社団法人全国豊かな海づくり推進協会: 主要対象生物の发育段階の生態的知見の収集・整理報告 ([https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/g\\_thema/pdf/sub40b.pdf](https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_thema/pdf/sub40b.pdf)) .
- 4) 瀬戸熊卓見・吉野幸恵・土田修二・木下秀明: 水温および日長制御によるシロギスの複数年にわたる周年産卵, 海生研報, 第19号, pp.67-72, 2014.
- 5) 瀬戸熊卓見・吉野幸恵・土田修二・木下秀明: シロギスの産卵終了に及ぼす日長の影響, 海生研報, 第19号, pp.73-78, 2014年.
- 6) 伊澤康一: 養殖水槽におけるシロギス成長と温度・照度の関係ー瀬戸内里海の次世代養殖システムの開発研究ー, 日本太陽エネルギー学会講演論文集 (2021), pp.217-220, 2021年11月.
- 7) 気象庁ホームページ (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>)
- 8) 国立天文台ホームページ (<https://eco.mtk.nao.ac.jp/cgibin/koyomi/koyomix.cgi>)