

ICT・IoT・AI 技術による渡蟹養殖技術確立へ向けた実践的研究

代表研究者

檜原 茂

大阪工業大学 情報科学部 准教授

1 はじめに

漁業生産量減少、漁業従事者の高齢化・減少等の厳しい現状に直面している水産業を成長産業へと変えていくために、ICT・IoT・AI等の情報科学技術の導入・普及が求められている。現在、水産庁では、2027年までにスマート水産業により、水産資源の持続的利用と水産業の成長産業化を両立した次世代の水産業の実現を目指している[1]。スマート水産業と一言と言っても、その範囲は資源評価、漁業・養殖業、加工流通まで幅広い。

本研究課題で着目している ICT・IoT・AI 技術を用いたスマート養殖に関しては、日本国内外において、カキ、サバ、エビ類などの多品目について開始されている[2, 3, 4]。主なアプローチとしては、給餌システム、環境データの可視化など、これまで主に経験と勘で行われてきたことをデータ化することで、作業の効率化、適切な生産量の確保等に繋げようとしている。

このようなスマート養殖を渡蟹（ノコギリガザミ類）に適用するため、次世代養殖の研究開発に取り組んでいる。ノコギリガザミ類（図 1）は大きなハサミを持つ大型のカニで高級食材である。熱帯から亜熱帯の内湾や河口域の泥底域に生息し、諸外国では「マッドクラブ」や「マングローブクラブ」と呼ばれている。日本の生息地は沖縄県八重山諸島、高知県浦戸湾、静岡県浜名湖など数えるほどしかなく、全国的にも漁獲量が少ない。

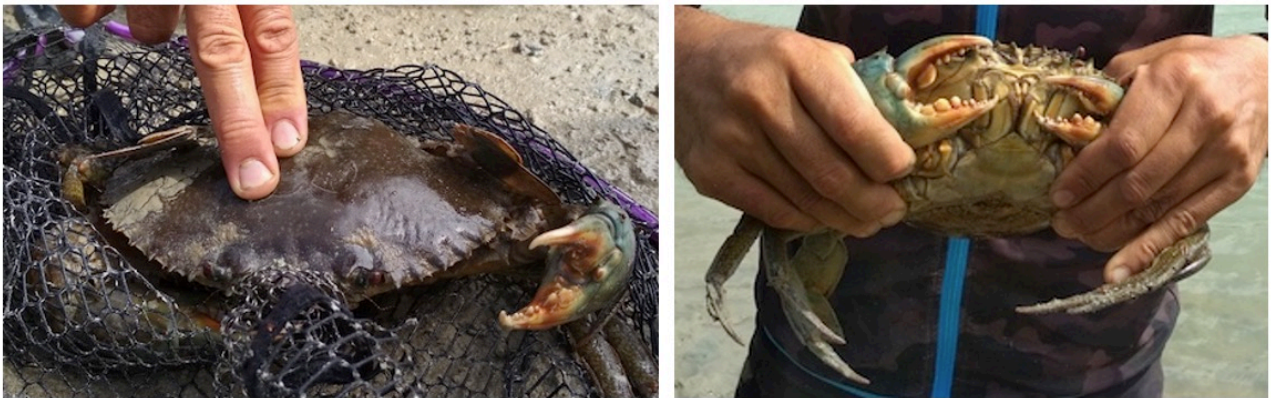


図 1：ノコギリガザミ

一方、濃厚で美味であり、市場価値が非常に高い。表 1 に示すように、シドニーフィッシュマーケットの販売高でノコギリガザミは 1,196 万豪ドル（約 9.3 億円）で第 1 位であり、キログラムあたりの単価も高く、国外では非常に人気がある[5]。中でも脱皮直後のものはソフトシェルクラブと呼ばれ、年間を通して高級シーフードとして食されている。ノコギリガザミ類は日本、東南アジア、インド洋など広く分布しており、主にインドネシアをはじめ、タイ、ミャンマー、ベトナムなどの東南アジアで種苗生産が行われている。人工種苗生産の試みも始まっているが、多くがマングローブ域における天然採苗に依存している[6]。

また、ノコギリガザミ類の完全養殖は現在もまだ確立されていない。そこで、本研究課題では、ノコギリガザミ類養殖のスマート化に貢献するため、『経験と勘に基づく』養殖方法を『データに基づく』養殖方法へ転換することを目指し、ハサヌディン大学（インドネシア）らの研究者とともに ICT・IoT・AI 技術を用いたデータ収集システムの構築及びデータ解析について取り組んだ。

以下、2 節では養殖環境の実地調査と考察、3 節では水産実験環境の構築、4 節では養殖における計測データの洗い出し、5 節では計測対象データの選定、6 節ではデータ収集システムの設計、7 節ではプロトタイプシステム開発、8 節ではデータ分析を述べ、最後に 9 節でまとめる。

表1：表1： シドニーフィッシュマーケット販売高（金額ベース）上位20種[1]（3位まで抜粋）

Position 2018/19	Position 2017/18	Description	\$ 2018/19	\$ 2017/18	Average \$/Kg 2018/19	Average \$/Kg 2017/18
1	1	Mud Crab（ノコギリガザミ）	\$11,963,635	\$12,850,753	\$34.22	\$31.14
2	2	Yellowtail Kingfish - farmed	\$11,322,103	\$10,312,145	\$17.15	\$16.99
3	3	Blue Swimmer Crab（ガザミ）	\$7,959,691	\$7,147,951	\$14.50	\$13.52

2 養殖環境の実地調査と考察

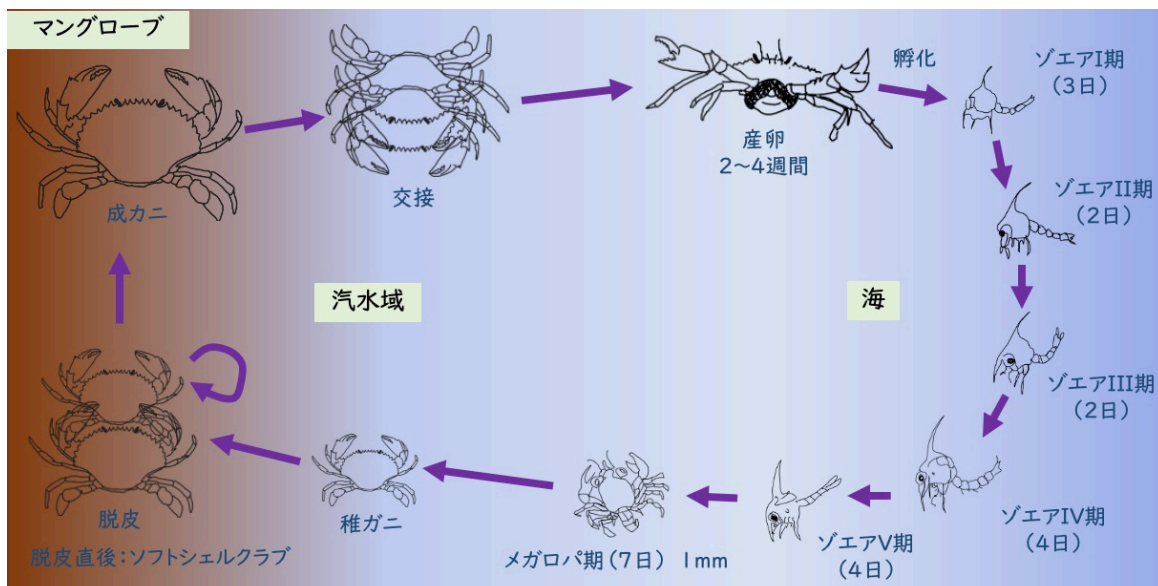
当初、インドネシア・スラウェシ島のハサヌディン大学で行われているワタリガニ養殖を実践的題材として研究開発を行うため、現地を実地調査する予定であったが、コロナの影響のため実地調査は残念ながら叶わなかった。そこで、代替案として、日本で唯一、対象のノコギリガザミの漁・養殖を手がけている沖縄県伊良部島 株式会社蟹蔵の協力を得て、現状での漁や養殖方法についてインタビュー等を行い、実際の現場などを視察した。

漁・養殖業全般に言えることであるが、第一に金銭的コストをかけないことが大前提となっている。多くが家族経営で行なっており、最新技術等を導入するには金銭的敷居が高く、導入したとしても利益に見合うだけ効果が出せるかなどの課題が多い。

また、ノコギリガザミの完全養殖技術は確立されていない。市場価値が高いにも関わらず、国内でワタリガニ養殖が定着しない理由は大きく次の2つにあると考えられる。

- ✓ 共食いにより高密度養殖が困難である
- ✓ コストがかかり利益に見合わない

ワタリガニは共食いという特有の課題を持つのに加えて、図2に示すようにノコギリガザミのライフサイクルは、成長過程によって、マングローブ、汽水域、海と生育環境が大きく異なり、魚やエビの養殖方法がそのままでは適用できない。現状の漁・養殖では、抱卵した個体を汽水域に放ち、その個体が沖まで移動した後、産卵し、その後、成長した稚ガニが汽水域の戻り、そこで大きく育った個体を漁として収穫、または出荷に満たない小さい個体は養殖するといった自然を活用した漁・養殖が行われている。また、天候だけでなく、伊良部島では島の開発等による自然環境の変化により漁獲量も変わってくる。



出典：大城 伸弘，「ノコギリガザミについて」，沖縄県水産海洋技術センター をもとに作成
https://www.pref.okinawa.jp/fish/kenkyu/sikenjo-data/ss/ss.114/159_163.pdf

図2： ノコギリガザミの成長過程

昨今、養殖業においては、生産者の経験と勤の可視化、自動化、省力化を実現するため、主に下記の技術開発が行われている。

- ① 水質管理（水温，pH 値，溶存酸素等）
- ② 給餌管理（自動給餌，給餌記録等）
- ③ 養殖対象種の状況管理（サイズ推定等）
- ④ リアルタイムモニタリング
- ⑤ 異常検知

また、スマート水産業で報告されている多くのシステムは、図3に示すようなシステム構成で構築されることが多い。実際のデバイスやデータ処理やデータ表示に関しては、それぞれが独自の開発を行っているため、他システムの良いところを活用することは容易ではないのが現状である。システム化することで、生産者の経験や勤の可視化が新たな気づきにつながると考えられるが、開発者・生産者側の双方において多くの実践的課題が存在する。

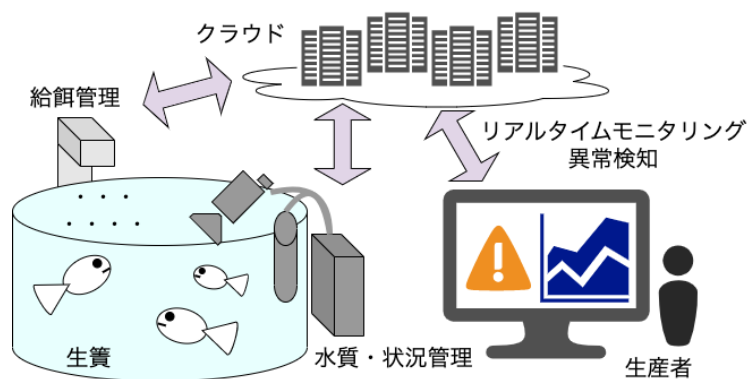


図3：養殖業におけるシステム概要図

開発者側においては、現場への設置・実装は環境（屋外、太陽光の影響など）の違いにより結果が異なることが多い。また、専門家から、情報科学技術の導入により明らかになる内容や利点を生産者に分かりやすく伝えることが何よりも重要となる。生産者側においては、日常業務に影響が出ないことやコストが見合うかなどが前提条件となるため、システム化を進める上では実際の業務内容と導入効果に関して十分な吟味が必要となる。

特に注意すべき点は、データの取り扱いについてである。水産分野におけるデータ利活用のガイドライン[7]においても、「データに焦点を当てて保護する法律はこれまで策定されておらず、結果として取り決めがなされないデータは、当事者が十分な保護を受けられない可能性がある」と記されている。暗黙知やノウハウに関しては、競争力に直接関わるため、システム化を進める上で、情報科学技術を導入する生産者側に不利益が生じないように、関係者全員が連携・対応する必要がある。

3 水産実験環境の構築

今回の研究開発において、インドネシアでの実地調査が困難となったため、日本側で実際にワタリガニ飼育を行う上での難しさを経験することが必要であると考え、2020年度に研究室内にワタリガニ1匹を飼育できる環境を構築し、映像データ取得を行えるようにした（図4）。しかし、データ取得をより効果的に実施するためには、複数匹を飼育し、センサ設置のスペースなどの拡張が必要となった。また、実際の飼育を通して、清掃や給餌等の飼育コストの削減も重要であることが明らかとなった。



図4：研究室内の飼育環境と映像取得のカメラの設置（2020年度）

2021年度には、2020年度に構築した飼育環境の改善・拡張を行い、飼育コストの削減、複数匹の飼育、またセンサ・カメラ等の設置が容易な飼育環境の再構築を行なった（図5）。改善・拡張した内容を下記にまとめる。

1. オーバーフロー型濾過方式の導入：水槽の清掃頻度の削減と清掃作業効率の向上
2. 水槽の増設：オス・メスのペアを飼育し、比較のために2水槽を設置
3. 水槽内部の分割：1水槽につき2匹飼育可能（同水槽での飼育は共食いの恐れ）
4. 水槽内部および周辺でのセンサ・カメラ等の作業・設置場所の確保

これらは、2020年度の実体験に基づいた改善・拡張であるが、手本がある中での改善・拡張はないため、他にもっと良い方法があるかもしれない。時間や予算の制限の中で、現状で考え得る最善で行なった。本研究では、特に水質・生体のデータ化を対象としているが、本実践を通して、このような環境が与える影響、飼育作業のコスト等に関してもデータ化することができれば養殖業への科学技術の貢献はより大きくなると考える。今後、実地調査を行う際には、これらの視点からも重点的に調査を行いたい。



図5：改善・拡張した飼育環境（2021年度）

4 養殖における計測データの洗い出し

図2に示すようにノコギリガザミには成長ステージがあり、必要な観測データがそれぞれ異なってくる。まず、研究室で飼育可能な稚ガニから成ガニを対象に、成長に影響を与えられとされる要因について調査を行った。調査結果として、大きく次の4つの要因に分類できる。自然界に関する要因として「太陽光、光周期、照度、水流」、水質に関する要因として「水温、塩分、不純物、溶存酸素量、pH、アンモニア量、窒素量、残餌や排泄物による汚れ」、給餌に関する要因として「餌の種類、量、給餌タイミング」、飼育環境に関する要因として「底質、傷害、共食い、飼育密度、隠れ場所、細菌性・真菌性の病気等」である。これらは生残率にもつながると考える。これらの中で、調整可能である項目は、自然界に関する要因においては「照度、光周期」でありLEDライトを使用しての調整はある程度可能と考えるが、太陽光ではないため、成長にどの程度影響が出るかは不明である。水質に関しては、上記のパラメータを計測することで現状を把握することが可能となり、計測結果に応じて調整が可能と考える。給餌に関しても、調整可能であるが、後述するように多くの観測データを収集して分析していく必要がある。飼育環境においては、現時点では一匹を飼育するため、共食いや飼育密度に関しては対象から外すことができると考える。今後、これらが成長に影響を与える要因として正しいかどうかについて評価していくことが必要となる。

5 計測対象データの選定

上記の考察に基づき、水質に関する計測対象データの調査を行なった。

1. 水温 (使用機材: DS18B20)
2. pH (使用機材: Gravity: Analog pH Sensor / Meter Pro Kit V2)
3. 溶存酸素量 (Dissolved Oxygen: DO)
(使用機材: Gravity: Analog Dissolved Oxygen Sensor / Meter Kit For Arduino)
4. 電気伝導率 (Electrical Conductivity: EC)
(使用機材: Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter(K=10))
5. 酸化還元電位 (Oxidation-Reduction Potential: ORP)
(使用機材: Gravity: Analog ORP Sensor Meter PRO)
6. 亜硝酸塩
7. 硝酸塩
8. 炭酸塩硬度
9. カルシウム

これらの計測対象データにおいて、1-5はセンサにより計測を行い、6-9は試薬紙を用いて計測する。また、1-5をセンサで計測を行う理由は、センサによる継続計測が可能かつ比較的安価に入手可能なためである。6-7に関するデジタル計測器もいくつかは存在するが、海水での継続計測には適さない、計測手順が多い、高価などの理由から、今回の開発では取り扱えるものではなかった。一方、試薬紙においては、安価かつ手軽である。実際には、水に1秒つけた後は色で判断する(図6)。試薬紙のデータ記録は作業上のコストとなり、煩雑な記録になりかねない欠点があるが、予算的なコスト面からは有用な計測方法であり、この作業コストの軽減とデータ収集は今後の興味深い研究課題の一つとなる。



図 6：試薬紙による計測

6 データ収集システムの設計

図 7 にデータ収集システムの概要を示す。データ収集システムでは次に示す 3 つのデータ収集を行う。

1. 環境情報（気温，湿度，気圧，光の強さ）
2. 水質情報（水温，pH，溶存酸素量，電気伝導率，酸化還元電位）
3. 映像情報

1, 2 は水槽の環境情報および水質を取得するためのセンシング機能である。ここでは，水槽内の水質だけでなく，水槽エリアの温度，湿度，気圧も合わせて計測している。また，センサで計測されたデータはサーバに送られる。3 はワタリガニの様子を映像で確認するための撮影・録画機能である。特に，ワタリガニは夜行性であるため，夜間の撮影は必須である。これらの映像データは全て動画ファイルとして記録される。これら取得したセンサデータ及び映像データにより，水質の変化や，ワタリガニの様子を遠隔から確認できる。

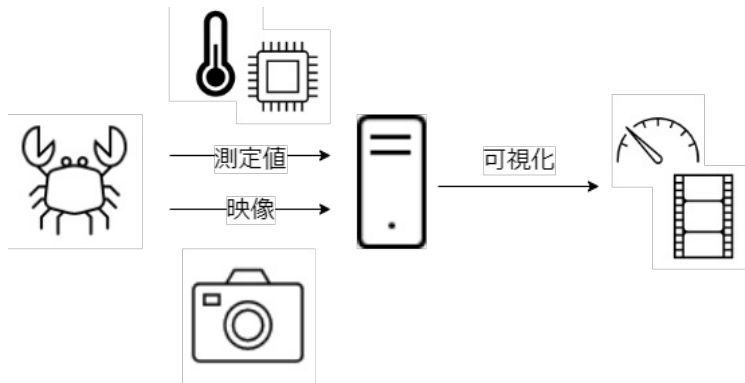


図 7：データ収集システム概要

7 プロトタイプシステム開発

本実験環境では，水槽エリアにおける環境データと水槽内の水質データを計測する。これらのデータはセンサと Arduino を用いて計測し，サーバとして機能する Raspberry Pi へと送信する。環境情報においては，水槽エリア内の気温，湿度，気圧，光の強さを測定する。水槽エリア (W:3440 mm, D:1730 mm, H:2310 mm) は大きくなく，その中で水槽用クーラー等の機器を動作させることになるため，熱等による機器のトラブル

の原因等を調べる際にも水槽外の環境状況を確認していくことは非常に重要な情報となる。一方、水質情報においては、水温、pH、溶存酸素量、電気伝導率、酸化還元電位を測定する。また、水槽エリア及び水槽の測定値をその場で確認できるよう小型モニタを設置した。図8は水槽エリアの環境情報を示した例である。上段は左から温度(T)、湿度(H)を、下段は左から気圧(P)と光の強さ(L、値は0から100)を表している。



図8：センシング情報の確認用モニタの実装

水槽映像の配信・録画を行うために、Raspberry Pi[8]と赤外線カメラモジュール(PiNoiR)を使用した。映像配信アプリケーションとして mjpg-streamer[9]を用い、録画には FFmpeg[10]を用いた。図9に mjpg-streamer によるストリーム配信の様子を示す。本結果はWebブラウザで確認できる。上述したように、ワタリガニは夜行性のため、夜間撮影は重要である。そのため、赤外線ライトを設置し、夜間撮影も可能とした。

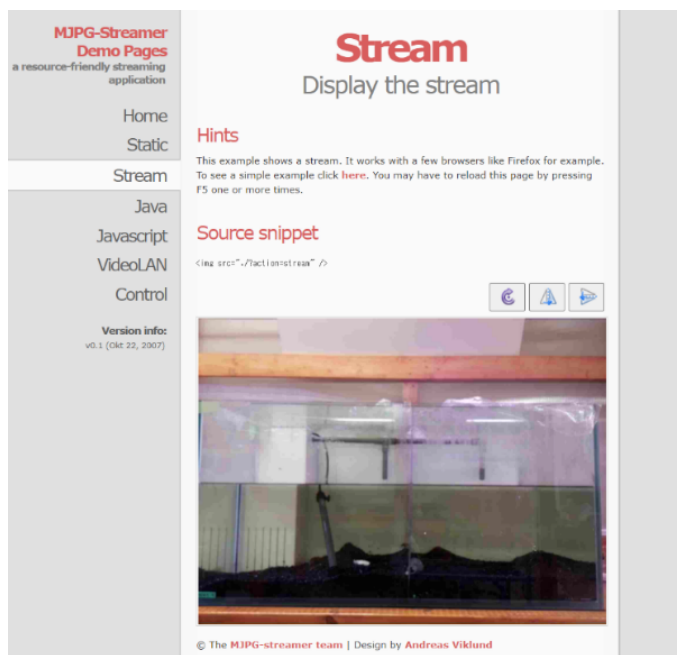


図9：Webブラウザ上でのストリーム配信

取得したデータを表示するためのモニタリング機能を実装した。これらのデータを遠隔からブラウザで確認できるように、Raspberry Pi上でNode-RED[11]を用いてWebページの表示を行った。Node-REDはIoTフローベースの開発ツールであり、ノードと呼ばれる処理を組み合わせることにより、データに対する処理の流れ(フロー)を視覚的に分かりやすく実装できる。今回作成したフローの一部を図10に示す。本フローでは、Arduinoから受信したセンシングデータをノードで操作するために、JSONオブジェクトへと変換し、その後、グラフ状に整形してWebページに表示するとともに、CSV形式でファイルに保存する。図11、12に、Node-REDにより作成された水槽のセンサデータのグラフと映像データを示すWebページを示す。

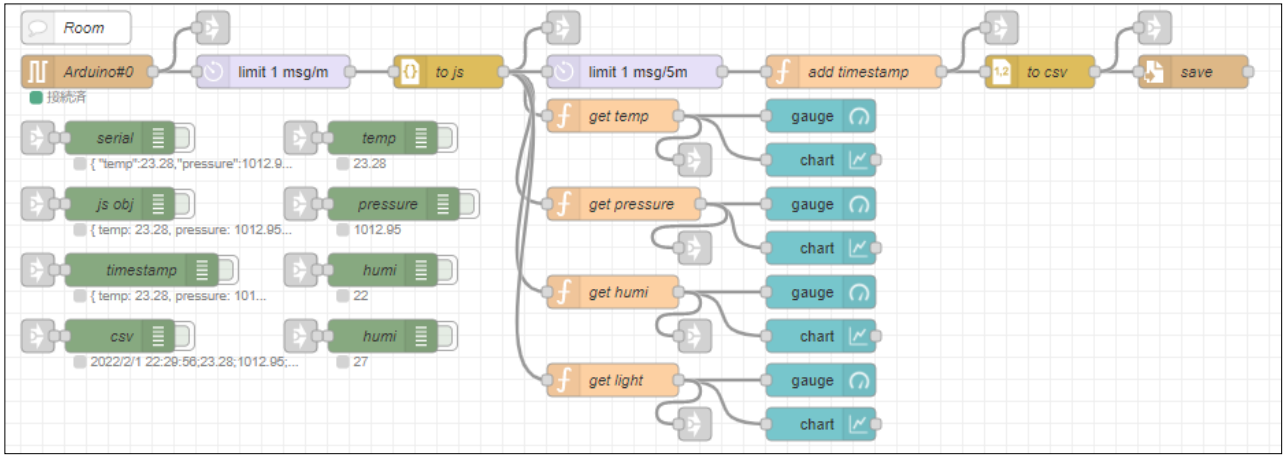


図 10：センサ・映像データの処理フロー

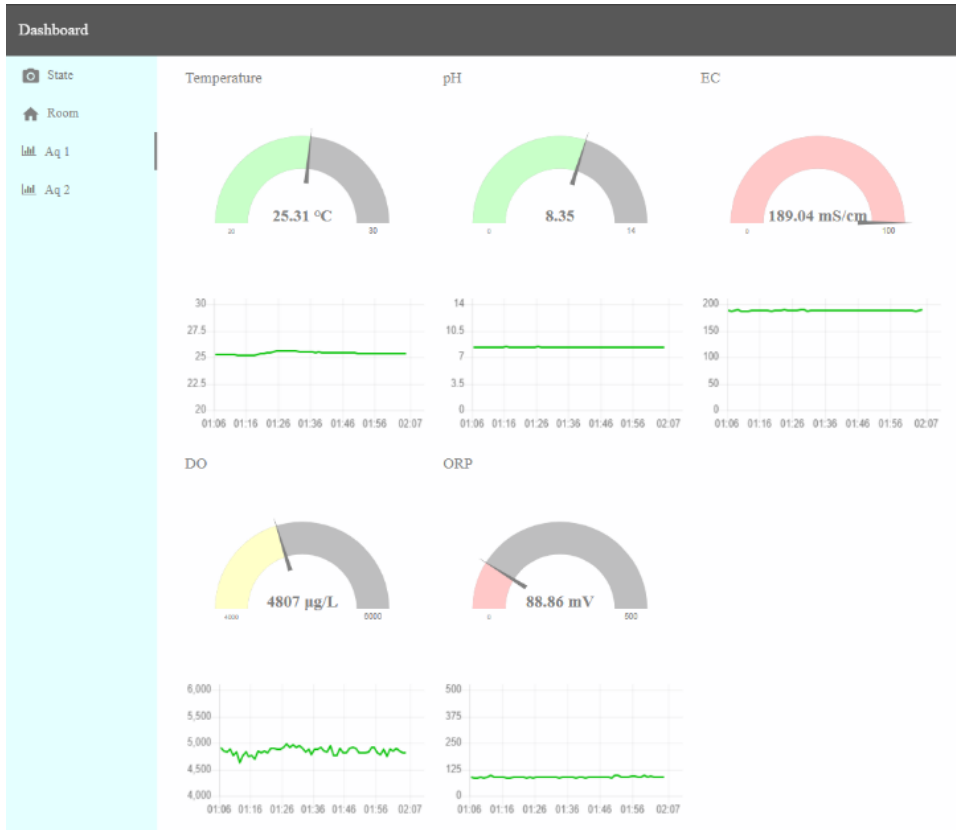


図 11：取得した水質データの表示

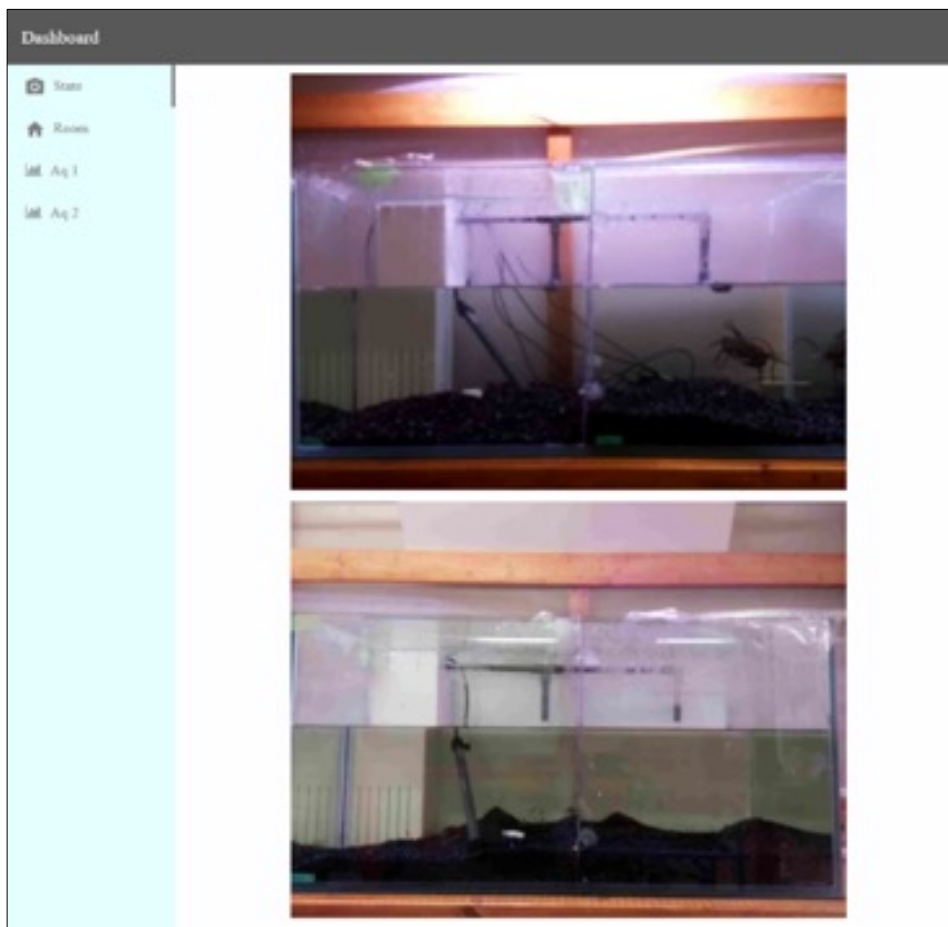


図 12：取得した映像データの表示

本実験環境の構築により、水槽内外の環境情報および映像を Web 上で確認することが可能となった。これにより 24 時間どこからでもワタリガニの様子を確認することができ、また、後日データ分析においても使用できる。収集したデータはサーバ上に記録されるため、観察対象の脱皮や死亡といった事象が発生した際、発生原因の推定などに利用することも可能となる。

一方、インドネシア・ハサヌディン大学との連携においては、孵化からメガロパ期までの観測に取り組んでいる。現時点では、図 12 に示すように、孵化を観測するためのセンサとカメラの設置について取り組んでいる。センサにおいては水温、塩分、pH を測定し、カメラで成長を確認している。

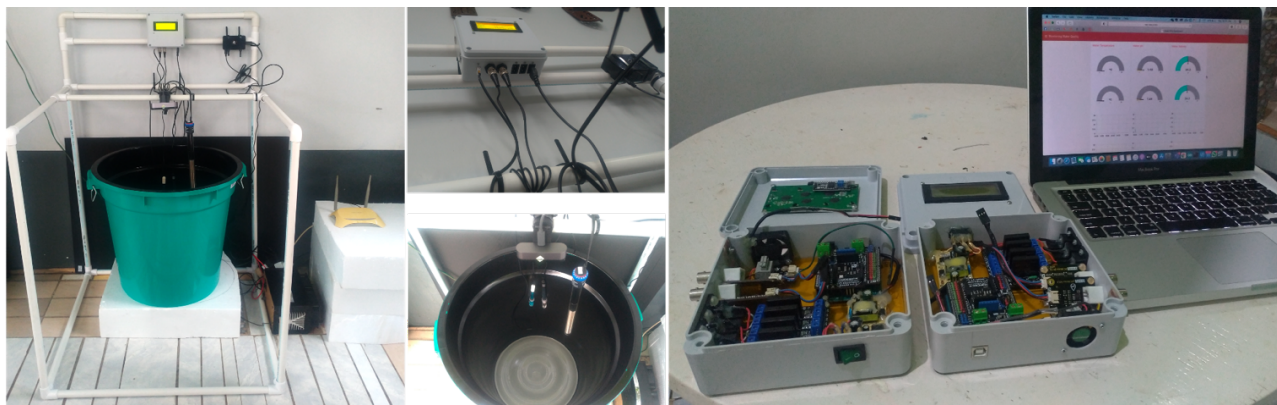


図 13：ハサヌディン大学におけるセンサとカメラの設置

8 データ分析

これまでの本システムの運用から、以下の2事例において役立っている。1つ目は、映像からの脱皮の兆候の確認である。図14に示すように、甲羅と腹部の間に大きな隙間ができ、脱皮前にはこのように隙間ができることが観測できた。観測後、半日内で脱皮を確認した。ソフトシェルクラブは、脱皮直後のガザミ類を水揚げするため、この特徴は今後の脱皮検知を行う一つの方法としての可能性があると考えられる。養殖場では上からの確認であるため、このような脱皮の兆候を確認したことがある例はこれまでのヒアリングでは聞いていない。また、ソフトシェルクラブの生産を行う際には、この兆候を捉えられるようにすることができれば収穫効率の向上につながる。



図14：甲羅と腹部の隙間による脱皮の兆候の確認

2つ目は、脱走経路の確認である。月曜日に給餌を行う際に水槽エリア内の隅でワタリガニが1匹死んでいることが確認された。脱走はされないように水槽を構築していたつもりであった。そこで、録画映像を確認することで、2日前の土曜の深夜に我々が想定していない箇所から逃げ出していたことがわかり対処を施した。図15に録画から確認した脱走の映像を示す。現在、センシングデータも取得しており、水質とワタリガニの活動の関係の分析などに活かす計画である。



図15：映像による脱走経路の確認

取得画像データから、養殖に必要な情報の取得、生活史に特徴的な行動の解明などに向けた、水槽で飼育されるノコギリガザミの常時記録と行動検知の自動化への試みた。ノコギリガザミの水槽内での行動は大きく分けて以下の3種類である。

1. 静止(採餌時を含む)
2. 移動 1(歩行)
3. 移動 2(遊泳)

これらの行動を分類し、脱皮の前後や成長の段階、時間帯といったライフサイクルとの関係を比較検証することは、ライフサイクルの各過程に特徴的な行動を見出すことにつながる。そこでモニタリングの映像を解析することで、ノコギリガザミの行動を常時分類、記録することが可能なソフトウェアの開発に取り組んでいる。

映像中のノコギリガザミの検出には、深層学習による物体検出アルゴリズムである YOLO(You Only Look Once)v3[13]の後継に当たる、ultra lytics による YOLOv5[14]を用いた。YOLOはCNN(Convolutional Neural Network)を用いて物体検出を行うモデルとして近年分野に寄らず広く用いられている。

YOLOでは学習済みモデルが複数提供されているが、今回は現システムのカメラの映像に適応した独自の学習モデルの生成を行っている。記録映像からサンプリングしたフレーム画像を学習データとし、ノコギリガザミに外接する矩形を手動で設定することでアノテーションを実施、これを繰り返した画像群をデータセットとして学習を行い、学習モデルを得た。この学習モデルをリアルタイム映像や記録映像に適用することでオンタイムでのノコギリガザミの検出が可能かを検証した。

カメラで撮影したRGB映像を用いた場合、照明装置による照明色や水槽を設置した部屋の環境光の変化によって起こるフレームごとの色や明るさの変化、水の濁り、エアポンプの泡、水槽壁面への映り込みといったアーティファクトの影響(図16)により、常時モニタリングに適応的な学習モデルを得ることが難しいことがわかった。

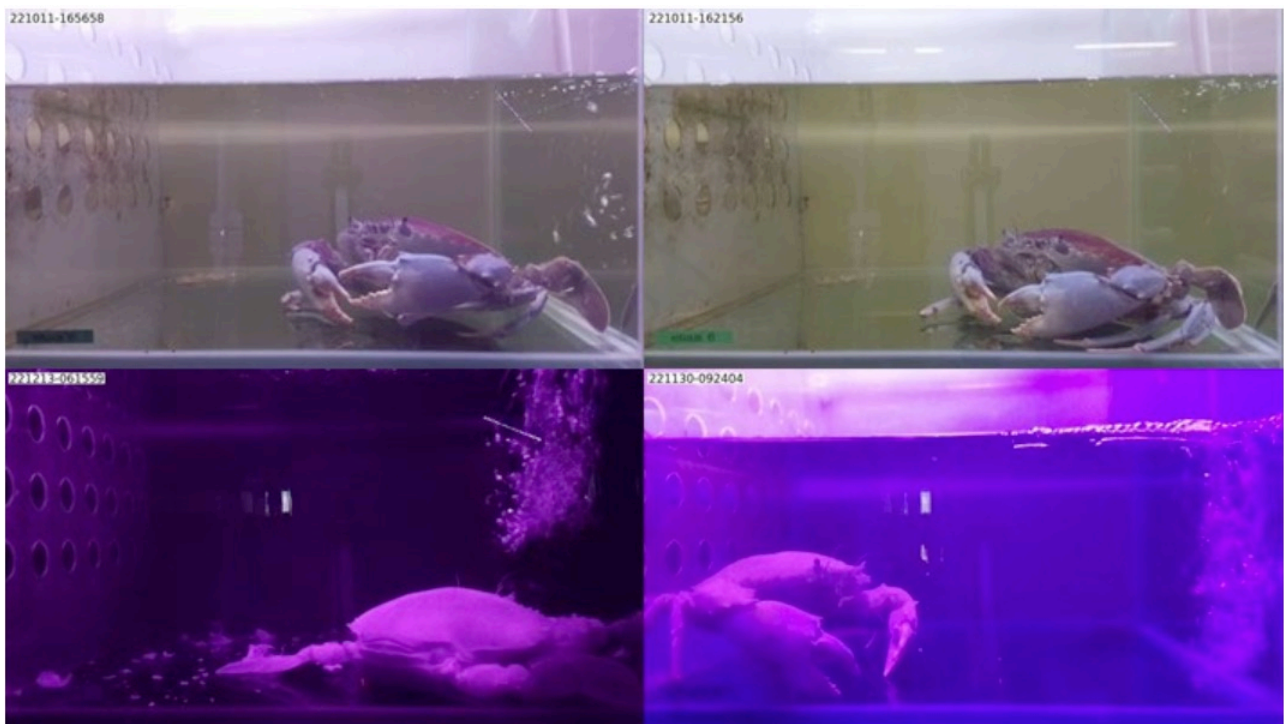


図16：照明色の違いによる画像の違い(上段:夕間(左), 中間(右) 下段:夜間(左), 朝間(右))

このことから、動画から色情報を破棄しグレースケールでの学習と検出を行ったところ、昼間時の白色照明下における検出率が大幅に改善し、同一モデルの朝夕間や夜間の映像への適用も一部で可能となった。現在、照明色の補正や輝度の補正といった前処理を加えることでグレースケール画像の輝度やコントラストを均一化するなど、検出率のさらなる向上を図っている。水槽内という限定的な実験環境下ではあるが、その可能性

が示された。

9 おわりに

本研究課題では、ICT・IoT・AI 技術をワタリガニ養殖に展開するため、ビジネスとしての環境を調査・考察し、技術として、データを収集するためのシステムの設計・実装を行なった。また、研究室規模ではあるが実際に対象となるワタリガニ（ノコギリガザミ）を飼育する中で、システムの運用を行なった。今回の研究課題を進める上で、明らかになったこととしては、養殖業として成り立つためには、金銭的成本が大きな制約となることで、システム設計の点から再設計を繰り返す必要があることがわかった。また、実際に使用していくためには、システムとして動作するだけでなく、実務者が使用・分析できるようにより分かりやすく、強固なシステムとして開発する必要がある。本研究課題では、ICT・IoT・AI 技術の導入が今後のワタリガニ養殖技術を確立するための参照モデルを示した。今後、この参照モデルをベースに、現地での運用等を行い、より実践的な研究開発を進めていく。

【謝辞】

本研究課題をご支援いただきました公益財団法人電気通信普及財団に心より感謝の意を表す。

【参考文献】

- [1] “第1部 第2章 我が国の水産業をめぐる動き,” 令和2年度水産白書:令和2年度水産の動向, 水産庁, pp. 78-121, 2022.
- [2] KDDI 株式会社, “事例紹介: 福井県小浜市「鯖, 復活」養殖効率化プロジェクトの今,” <https://www.kddi.com/corporate/csr/regional-initiative/case-study/case23/>. (参照 2023. 6. 28)
- [3] KDDI 株式会社, “IoT でカキ養殖, 徳島県海陽町で「あまべ牡蠣スマート養殖事業」開始,” 2020年3月. <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2020/03/30/4349.html>. (参照 2023. 6. 28)
- [4] 株式会社インターネットイニシアティブ, “タイのエビ養殖場において, IoT, AI を活用した水質環境・作業管理の実証実験を実施,” 2018年5月, <https://www.iiij.ad.jp/news/pressrelease/2018/0515.html>. (参照 2023. 6. 28)
- [5] 株式会社 野村総合研究所, “平成 31 年度海外農業・貿易投資環境調査分析委託事業(豪州) 報告書,” 2020年3月.
- [6] 古川, 岩田, 小林, “インドネシアにおけるノコギリガザミ漁業の現状と資源保全,” 東南アジア研究, 52 巻, 1 号, pp. 21-51, 2014.
- [7] 水産庁, “水産分野におけるデータ利活用ガイドライン(第1版),” 2022年3月.
- [8] Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.com/>. (2023. 6. 28 閲覧)
- [9] mjpg-streamer, <https://github.com/jacksonliam/mjpg-streamer>. (2023. 6. 28 閲覧)
- [10] FFmpeg, <https://ffmpeg.org/>. (2023. 6. 28 閲覧)
- [11] Node-RED, <https://nodered.org/>. (2023. 6. 28 閲覧)
- [12] Arduino, <https://www.arduino.cc/>. (2023. 6. 28 閲覧)
- [13] J. Redmon et al., “Yolov3: An incremental improvement”, arXiv preprint arXiv:1804.02767 (2018).
- [14] Ultralytics, “YOLOv5”, <https://ultralytics.com/yolov5>. (2023. 6. 28 閲覧)

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Crab Molting Identification using Machine Learning Classifiers	2021 International Seminar on Machine Learning, Optimization, and Data Science (ISMODE)	2022 年 1 月
IoT-based Experimental Aquarium Environment for Observing Crabs	2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTaIS)	2022 年 11 月
IoT を用いた水産実験環境の構築	電子情報通信学会技術研究報告	2022 年 3 月
ワタリガニ養殖の DX 化に向けた実践的課題に関する考察	情報処理学会第 85 回全国大会	2023 年 3 月
輝度の補正と深層学習による物体検出を利用した水槽内の蟹の行動記録への取り組み	情報処理学会第 85 回全国大会	2023 年 3 月