

スマート沖合養殖のためのIoT遠隔水中給餌装置の開発

今井 哲郎^{1,a)} 荒井 研一¹ 小林 透¹

概要: 浮沈式生け簀は、エアー制御によって生け簀を沈下・浮上させることができる係留システムである。浮沈式生け簀を用いた沖合養殖では、悪天候時には波浪の影響が少ない深さまで沈下させて施設の保全を図ることができる一方、労働力コストおよび餌コストの増大が課題である。著者らは、浮沈式生け簀へIoTと人工知能(AI)を導入することにより、給餌自動化など養殖作業の省力化による労働力コスト削減、生け簀内部の常時観測と給餌タイミング/給餌量の最適化による餌コスト削減を実現するスマート養殖システムを開発している。本稿ではその機能の一部として、水中においても給餌を可能にする水中給餌装置を試作し、IoT化によってスマートフォンから遠隔操作で給餌を実施する機能を実装した。海上でのフィールド実験により、試作したIoT水中給餌機が、水深15mの海中にあっても餌タンクの水没を防ぎ、餌タンクの開閉制御を実施できることを確認した。また陸上での追加実験により、管理・制御用スマートフォンからの遠隔での操作によって、餌タンクの開閉制御を正常に実施できることを確認した。

Development of IoT remote underwater feeding device for smart offshore aquaculture

1. はじめに

沿岸域で行われている養殖施設は、水質が安定しないため赤潮や青潮による被害が発生しやすく、また設置場所が飽和状態で大規模化が困難であることなどの課題を抱えていることから、近年外洋で行われる沖合養殖のための技術開発が進められている[1]。外洋で行われる沖合養殖は、沿岸域で行われている養殖と比べ、高い流動性により水質がクリアで安定し、かつ大規模な生け簀を設置できるメリットがある[2]。沖合養殖で用いる生け簀は、季節風による高波発生時や台風通過時などには時間と労力をかけて曳航して保全することが必要であるが、この問題を回避するための手段として、浮沈式生け簀がある。浮沈式生け簀は、エアー制御によって生け簀を沈下・浮上させることができる係留システムであり、悪天候時には波浪の影響が少ない深さまで沈下させ、施設の保全を図ることができる。

浮沈式生け簀を用いた沖合養殖には、以下のメリットがある[3]。

- 台風・季節風などによる高波から施設・魚貝類の保全・保護

- 赤潮・青潮被害による斃死対策
- 藻類固有の繁茂水深差を利用した藻類の自然淘汰
- 降雨や河川などで発生する塩分濃度低下と表水面水温低下などに起因する、魚貝類への影響軽減
- 盗難予防
- 油濁および河川汚水からの回避

一方で、浮沈式生け簀による養殖の課題は、給餌のための労働力コストである。沿岸養殖に比べ、浮沈式生け簀による沖合養殖は、

- 1) 沖合の生け簀内の魚の空腹度を観測/予測して、
 - 2) 餌を船で沖合まで運搬し、
 - 3) 生け簀を浮上させ、
 - 4) 餌を投入し、
 - 5) 生け簀を再沈下させる
- 作業が必要である。さらには、
- 6) 悪天候時においても安定した給餌の実施

をするにも困難が伴う。これらを実施するためには養殖事業者の労働力が必要で、それは多大なコスト増を招く。ほ

¹ 長崎大学大学院 工学研究科
Graduate school of engineering, Nagasaki University
^{a)} imai@nagasaki-u.ac.jp

かにも、養殖全般の課題として餌コストが重要であることが知られていることから、

7) 適切な給餌量と適切なタイミングでの給餌

によって少ない餌で効率よく魚を育てることが重要であるが、これは現在のところ熟練養殖技術者の経験に基づく能力に依存するところが大きい。

2. スマート養殖システム

第1節で述べた課題を解決するために、本稿ではIoTとAIを用いたスマート養殖システムを提案する(図1)。スマート養殖システムの機能とメリットは以下の通りである。

a) 給餌作業の遠隔実施

船で現地の生け簀まで移動する必要がなくなり、労働力コストを削減できる。すなわち4)の省力化である。

b) 餌タンクの水中配置

現在の給餌機は、餌を貯蔵するタンクが水上に備え付けられていたために、特に夏期には餌の腐食の進行が早く、そのためあまり多くの餌を一度に貯蔵することが難しかった。餌タンクを水中に備え、低温かつ乾燥した状態を保つことで、餌の腐食の問題を軽減できる。これは2)の負荷軽減、すなわち餌補給頻度の低減による労働力の削減となる。

c) 水中給餌の実施

水中に配置された餌タンクからの水中給餌を実現することにより、餌の補給時を除き、生け簀を常に水中に配置することができるようになる。そのため、給餌時の生け簀浮上・再沈下作業のための労働力コストを削減できる。すなわち3)、5)の省略となる。また、浮上・再沈下に伴う環境変動によって魚が受けるストレスを軽減できるという付加的メリットもある。

d) 既存の養殖施設への付加的実装

新規大規模養殖施設を建設することなく、既存の養殖施設へ装置を付加する形で実装できることで、養殖事業のAIとIoTによるスマート化を小規模から始めることができる。日本における海面養殖事業者は約89.6%が個人経営体であり[5]、小規模事業者でもスマート養殖のスムーズスタートが可能であることのメリットは大きい。

e) 生け簀内部の常時観測

水中の生け簀内の魚の様子や餌の食べ残し量を水中カメラや各種センサで観測・遠隔観測端末に送信することで、養殖事業者は生け簀内部の状況を常時観測し続けることができる。それにより、養殖事業者は最適な給餌タイミングと給餌量を決めることができる。これ

は1)の省力化である。

f) 給餌タイミングと給餌量の最適化

生け簀内部の状況・給餌タイミングと給餌量を電子的に蓄積することによって、熟練養殖技術者の最適給餌タイミングと給餌量を機械学習によって学習することができる。これは7)の実現である。

g) 通信途絶時の自律動作

沖合に配置される生け簀は、携帯電話向けのモバイルデータ通信を利用しても、常に良好な通信環境であることは保証できないが、そのような環境下にあっても生物である魚介類を安定して飼育し続けることが必要である。そのためには、通信が良好に保たれている場合には養殖事業者やインターネット上のクラウドサーバからの指令を受けて最大限の最適制御を行う一方で、クラウドサーバとの通信が途絶した状況にあっても、定期的な給餌を実施する等、ある程度の適切な制御を自律的に実行することが求められる。これは6)の実現である。これはエッジコンピューティングの一形態であるが、通常のエッジコンピューティングは通信負荷の低減、クラウドの負荷低減、エンドデバイスの負荷低減、エネルギー消費の削減、データセンターでの計算処理のオフロード等を実現するためのアーキテクチャである[4]のに対し、本システムにおけるエッジコンピューティングは、不安定な通信環境においても動作可能性を保証するためのものである。

本稿では、a)、b)、c)、d)の機能を実現するための水中給餌装置およびスマートフォンによる遠隔給餌システムの試作を行った。

3. 関連研究

養殖業におけるICTの活用としては、以下の事例が挙げられる[6]。

まずマリノフォーラム21や東京大学等のグループによる取り組みとして「環境IT技術を活用した新たな養殖技術開発事業」がある[7]。この取り組みでは、生け簀の浮沈作業や給餌作業の遠隔操作、ICTによる養殖環境のモニタリング、給餌タイミングの自動化、生け簀内の観測による養殖魚のサイズや健康状態の把握等、本研究の開発目標であるスマート養殖システムに求められる各要素技術の開発に取り組んでいる。一方で、浮沈式生け簀内の水中に配置可能な給餌装置については対象となっていない。

日鉄エンジニアリング株式会社が中心となって実施している取り組みとして、農林水産省「知」の集積と活用による研究開発モデル事業[8]がある。この取り組みでは、IoTを活用した最適生産管理システムの開発、大型生簀システムの高度化、自動給餌システムの高度化、環境に調和

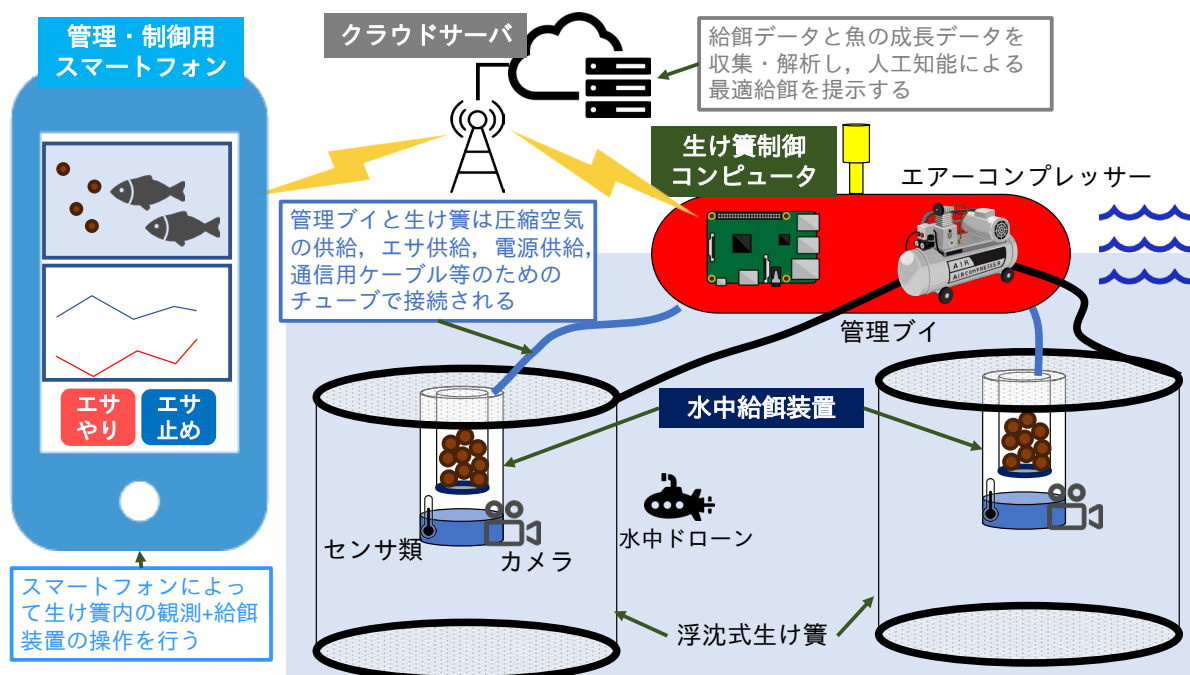


図 1 スマート養殖システムのコンセプト図

Fig. 1 Concept diagram of Smart Aquaculture System

した養殖の設計が行われており、これらはスマート養殖システムに求められる各要素技術である。一方で、本取り組みは新規大規模養殖プラットフォームでの実装が想定されているため、個人経営体によるスモールスタートは困難で、また浮沈式生け簀内の水中に配置可能な給餌装置についても開発対象としていない。

ほかに、愛媛大学の小林らを中心とするグループによる「海洋物理モデルと海況 4D ビッグデータ解析を活用した水産業支援」がある [9]。この取り組みは、赤潮による経済損失の低減を目的として、従来より安価で通信費の安い水温センサーの開発と普及により、センサーのネットワークシステムを構築することで、赤潮分布情報等の海況情報を一元的でわかりやすく、かつ迅速な伝達を実現したものである。この研究は、ICT による養殖環境のセンシングによって養殖業の支援を行っている点で本研究と類似しているが、主に赤潮の影響の大きい沿岸養殖をメインターゲットとしているために、スマート養殖システムの開発目標の一つである給餌の省力化・自動化は、ターゲットになっていない。

4. 水中給餌装置

本稿で試作した水中給餌装置について述べる。水中給餌装置は水中の生け簀内に配備され、遠隔操作によって餌の供給/停止を制御することで生け簀内の魚に餌を供給するための装置である。水中給餌装置が備えるべき機能は、以下のように整理できる。

要件 1) 餌タンクを水中に備え、かつ生け簀本体が海中に

沈んでいるときでも餌タンクが水没しないこと

要件 2) 水中で餌の供給/停止動作が実施できること

我々は、上記要求機能を満たす水中給餌装置のプロトタイプを作成した。水中給餌装置のシステム構成図を図 2 に、プロトタイプの外観を図 3 に示す。本体の外部形状は円筒形で、内部に同じく円筒形の餌タンクが具備されている。本体下部は密閉されておらず、餌タンク下部の蓋を開放することで餌を本体下に放出することができる。本体には管理パイプ内のエアコンプレッサーから圧縮空気を注入するためのチューブが接続されており、以下の 2 つの目的を実現する。一つは餌タンクのエアスペースを確保することである。すなわち、水深に応じてエアコンプレッサーから水中給餌装置上部に高圧空気を供給することで、水深が深く水圧が高い場所でも餌タンクが水没しないようにする。この空気供給の制御は、水中給餌装置下部の水位を装置内部に配置された水位検知用フロートが検知することで、自動的に行われる。具体的には、外部水圧が上がり本体下部の水位が上昇すると、フロートが上昇し、フロートが上部のセンサに接触すると、電気制御によってエアスペース確保用空気弁が開放され、高圧空気が供給される。高圧空気が十分に供給されて水位が下がると、フロートが上部センサから離れ、空気弁の開放が止まる。もう一つの目的は餌タンクの開閉を制御することである。餌タンク開閉はエア制御によって行われ、その動作は餌タンク開閉制御用空気供給チューブに接続された空気弁を制御することによって行われる。生け簀制御コンピュータが管理・制御用スマートフォンからの指示を(クラウドサーバを経由し

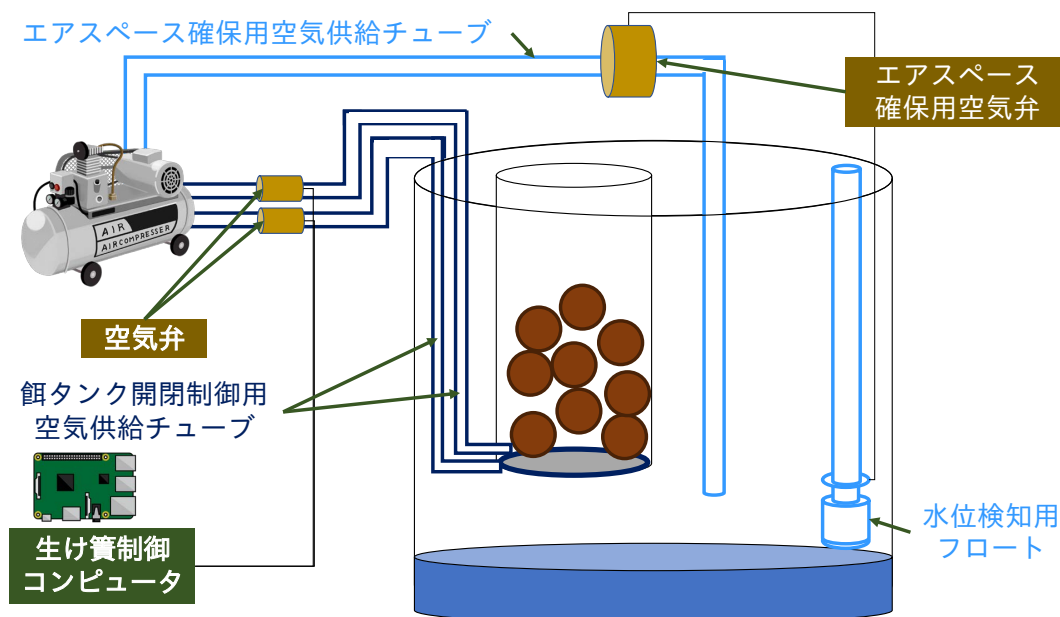


図 2 水中給餌装置のシステム構成図

Fig. 2 System architecture of an underwater feeding device



図 3 水中給餌装置のプロトタイプの外観

Fig. 3 A photograph of a prototype of underwater feeding device

て) 受信すると、空気弁を制御して餌タンク解放、餌タンク閉鎖を行う。餌タンク開閉制御については、次節で詳しく述べる。

5. スマートフォンによる遠隔給餌システム

本稿で試作した遠隔給餌システムについて述べる。遠隔給餌システムは、養殖事業者がスマートフォンを操作することにより、陸上にいながら沖合の生け簀の水中給餌装置

を制御し、任意のタイミングで餌の供給/停止を実施するためのシステムである。遠隔給餌システムが備えるべき機能は、以下のように整理できる。

- 要件 1) スマートフォンやタブレットから餌の供給開始/停止の制御が可能であること
- 要件 2) 不安定な通信環境下でも安定した動作が見込めること
- 要件 3) 既存の養殖施設へ付与する形で実装可能なこと

これらの機能を実現するために、本システムで開発した遠隔自動給餌システムの概要を図 4 に示す。本システムは、管理・制御用スマートフォン、インターネット上のクラウドサーバ、管理ブイに具備される生け簀制御コンピュータ、空気弁、海中の生け簀に具備される水中給餌装置からなる。

管理・制御用スマートフォンは、養殖事業者が状況把握や給餌動作制御等を実施するための端末である。インターフェースとして給餌トリガーボタンがあり、これはスマートフォン上で動作する Web アプリケーションの形式で実装された。スマートフォンのブラウザから“えさやり”/“えさどめ” ボタンを操作することで、給餌動作/給餌停止の指示を与えることができる。図 5 は管理・制御用スマートフォンで動作する Web アプリケーションの画面キャプチャである。

インターネット上のクラウドサーバでは、管理・制御用スマートフォンからの餌タンクの開閉制御の信号を受信し、テキストファイルとして保持する。次で述べる生け簀制御コンピュータでは、このテキストファイルを定期的に参照し続けることで、管理・制御用スマートフォンによる

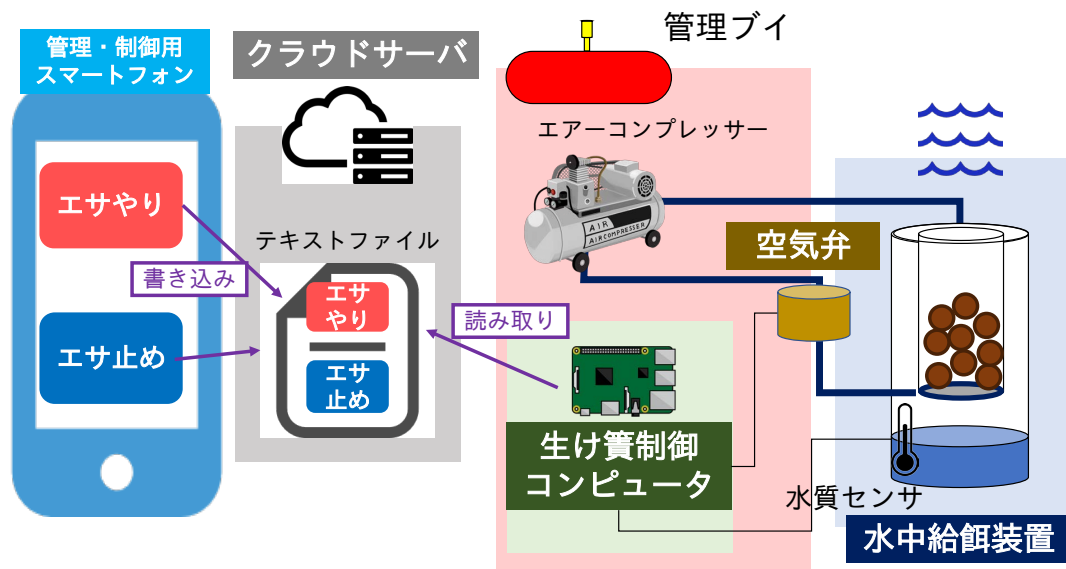


図 4 遠隔給餌システムのシステム構成図

Fig. 4 System architecture of a remote feeding system



図 5 制御用スマートフォン上で操作する Web アプリのキャプチャ画面

Fig. 5 A screen image of a Web application on control smartphone.

操作が行われたことを検知し、実際の餌タンクの開閉制御を行う。

生け簀制御コンピュータは、管理ブイ内部に配置されたシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi) に実装され、水中カメラや各種センサのデータ収集、クラウドサーバとのデータ授受、水中給餌装置制御のための空気弁の制御を行う。

空気弁は、エアーコンプレッサーおよび水中給餌装置と接続され、水中給餌装置内部の餌タンクの開閉制御をする

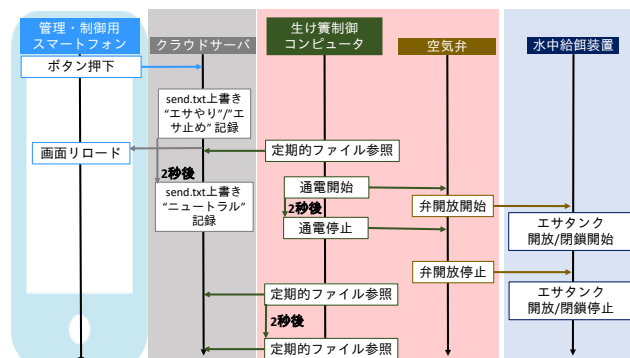


図 6 遠隔給餌システムのシーケンス図

Fig. 6 Sequence diagram of Remote Feeding System

ためのものである。空気弁は餌タンク解放、餌タンク閉鎖、ニュートラルの3状態を取り、生け簀制御コンピュータによって制御される。

本システムの処理の流れを述べる。図 6 はシーケンス図である。スマートフォンの“えさやり”のボタンが押されると、クラウドサーバに伝達され、ボタンの状態を保持するテキストファイルに“えさやり”が記録される。このテキストファイルは、2 秒後には自動的にニュートラルに書き換えられる。生け簀制御コンピュータでは定期的にクラウドサーバのテキストファイルを参照しており、“えさやり”となったことを確認すると、空気弁を通して水中給餌装置の餌タンクの開放を行う。空気弁の状態は、2 秒後に自動的にニュートラルに戻る。“えさどめ”ボタンが押された場合も、同様のシーケンスで餌タンク閉鎖制御が実施される。

なお生け簀制御コンピュータは生け簀付近のブイに配置されており、これは沖合にあるために、2 節 g) で言及したように、モバイルデータ通信を利用しても常に良好な通信

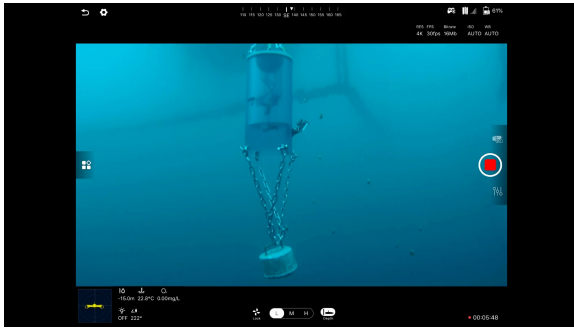


図 7 フィールド実験

Fig. 7 Field experiment for operation verification

環境が整っていることは保証できない。また管理・制御用スマートフォンの方も、餌の供給開始/停止の指示を与えた後に通信が途切れる可能性がある。そのため、管理・制御用スマートフォンから生け簀制御コンピュータへのメッセージングには、直接セッションを確立して常時通信を行う方法ではなく、常時稼働と良好な通信が期待できるクラウドサーバを介した方法を採用している。

今回の遠隔給餌システムのプロトタイプに用いた機器とソフトウェアの仕様を表 1 に示す。

表 1 遠隔給餌システムのプロトタイプの機器とソフトウェアの仕様
Table 1 A H/W and S/W specification list for a prototype of our remote feeding system

管理・制御用 スマートフォン	Apple iPad 第 6 世代 32GB iOS 12.1 Safari 12.0
生け簀制御 コンピュータ	Raspberry Pi 3 Model B+ Raspbian GNU/Linux 9.5 (stretch) Python 3.5.3
クラウドサーバ	Conoha VPS CentOS 7.5 Apache 2.4.6 MySQL 5.5.56-MariaDB PHP 7.2.6

6. フィールド実験

水中給餌装置の動作確認のために、フィールド実験を実施した(図 7)。フィールド実験は長崎市の三重地区にある漁港付近で実施された。本実験は漁船で沖合養殖場のそばまで移動し、漁船上から水中給餌装置を水深 15m まで下ろすことによって実施された。実験の結果、餌タンクのエアスペース確保が正常に行われたことが確認できた。表 2 に、5m, 10m, 15m の各水深での空気室および餌タンクの空気圧を示す。水深が深くなるにつれて空気圧が上昇していることが分かる。すなわち、水深が深くなるにつれて水中給餌装置下の水圧が上昇し、それに伴い水中給餌装置内の水位検知用フロートが上昇し、それに反応して船上のエ

表 2 フィールド実験結果：水深での餌タンクの空気圧

Table 2 Results of a field experiment: Air pressure of a feed tank at each depth

水深	空気圧 (MPa)
5m	0.05
10m	0.10
15m	0.15

アーコンプレッサーから水中給餌装置上部へ圧縮空気が供給され、餌タンクのエアスペースが確保されるという、エアスペース確保のための制御が正常に動作していることが確認された。また併せて、エアー制御による餌タンクの開閉制御がともに動作することを確認した。

なお今回のフィールド実験では、本来管理ブイ内に配置される生け簀制御コンピュータ、エアーコンプレッサー、空気弁は漁船上に配置された。またフィールド実験では餌タンクの開閉制御は空気弁を直接制御することによって行われたが、その後の陸上での追加実験により、管理・制御用スマートフォンからの操作によって生け簀制御コンピュータが空気弁を制御し、餌タンクの開閉が正常に動作することを確認した。

今回のプロトタイプについて、水中給餌装置および遠隔給餌システムの各機能要件を満たしていることを確認する。まず水中給餌装置の各機能要件に関して述べる。フィールド実験によって、今回試作した水中給餌装置がエアーコンプレッサーと水中給餌装置内の水位検知用フロートおよび空気弁により、水深と水圧に応じた適切な空気供給が実施できた。このことから、要件 1 を満たしている。また水中での餌の供給開始/停止の制御が正常に動作したことから、要件 2 も満たしている。次に遠隔給餌システムの機能要件に関して述べる。フィールド実験後の陸上での追加実験によって、スマートフォンによる操作から餌タンク開閉制御を遠隔で実施し、餌の供給開始/停止が正常に動作することが確認できたことから、要件 1 について満たしている。次に本システムでは、管理・制御用スマートフォンと生け簀制御コンピュータの間の通信手段として、常時稼働と良好な通信が期待できるクラウドサーバを経由させる方式を採用した。これにより沖合の海上に設置された生け簀付近であっても、安定した給餌操作の実施を実現した。このことから、要件 2 についても満たしている。また本稿で提案した遠隔給餌システムは、新規大型養殖施設への設置だけではなく、既存の生け簀に水中給餌装置を設置し、付近に生け簀制御コンピュータ、エアーコンプレッサー、空気弁、電池等を収容した管理ブイを設置することにより実装できる。このことから、要件 3 についても満たしている。

7. おわりに

本稿では、AI と IoT によるスマート養殖システムのう

ち、水中給餌装置の試作およびスマートフォンからの遠隔操作が可能な遠隔給餌システムを実装し、フィールド実験を通して基本動作確認を行った。スマート養殖システムの実現に向けて、今後はまず水中カメラ・各種センサを用いて生け簀内の魚の活性度や与えた餌の食べ残し量を観測する機能を実装する。これにより、養殖事業者が生け簀内の状態を計測することができる。また、水中カメラや各種センサの情報を用いて魚の活性度や与えた餌の食べ残し量を自動的に推定し、給餌タイミングと給餌量を機械学習によって自動的に最適化する機能を開発する。この機能の実装により、労働コストを抑え、かつ経済的に最適な給餌を行うことができ、養殖による利益を最大化することができる。さらには、通信環境の良好な時にはクラウドサーバとの通信により最大限の給餌最適化を行う一方で、通信途絶時でも生け簀制御コンピュータ単独で自律給餌制御を実施することができる機能を開発する。これにより、通信途絶時でも安定した自律動作を実現することができる。

謝辞 本研究は、長崎県産業振興財団の平成 30 年度海洋技術開発研究委託事業の助成を受けたものである。また本研究を進めるに当たり、非常に有益な助言をいただいた粕谷製網の深堀一夫氏に深く感謝する。

参考文献

- [1] 農林水産省：平成 25 年度 水産白書，農林統計協会 (2014).
- [2] Komeyama, K., Kadota, M., Torisawa, S., Suzuki, K., Tsuda, Y. and Takagi, T.: Measuring the swimming behaviour of a reared Pacific bluefin tuna in a submerged aquaculture net cage, *Aquat. Living Resour.*, Vol. 24, No. 2, pp. 99–105 (2011).
- [3] 粕谷製網株式会社：粕谷製網株式会社. http://www.kasutani.com/fishery_relation/yousyoku_keiryu/yousyoku_keiryu.html, (参照 2019-12-04).
- [4] Bilal, K., Khalid, O., Erbad, A. and Khan, S. U.: Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers, *Computer Networks*, Vol. 130, pp. 94 – 120 (2018).
- [5] 農林水産省：2018 年漁業センサス. 2018 年漁業センサス結果の概要（概数値），<http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/gyocen/index.html#y>, (参照 2019-12-11).
- [6] 農林水産省：平成 29 年度 水産白書，農林統計協会 (2018).
- [7] 農林水産省：平成 28 年度「環境 IT 技術を活用した新たな養殖技術開発事業」報告書. http://www.maff.go.jp/j/budget/yosan_kansi/sikkou/tokutei_keihi/h28itaku/h28ku_seika_ippan/attach/pdf/h28taku_seika_ippan-62.pdf, (参照 2019-12-04).
- [8] 日鉄エンジニアリング株式会社：【採択】農林水産省『「知」の集積と活用による研究開発モデル事業』～大規模沖合養殖システム～. <https://www.eng.nipponsteel.com/news/2018/20180305.html>, (参照 2019-12-09).
- [9] 総務省：身近な IoT プロジェクト midika-iot.jp. <http://www.soumu.go.jp/midika-iot/admin/wp-content/uploads/2017/03/midika-iot-h28-seika-13.pdf>, (参照 2019-12-04).