低コスト水中プロファイリングフロートを用いた水中環境調査システムの開発

神山 瑠星（兵庫県立長田高等学校）
松本 慎太郎（大阪明星高等学校），大塚 雄日（立命館慶祥高等学校）

1) 研究背景・目的

近年，地球温暖化や気候変動が水環境および生態系に深刻な影響を及ぼしている．その一例として，水温の上昇に伴う生物の生息域の北上が予測されている．

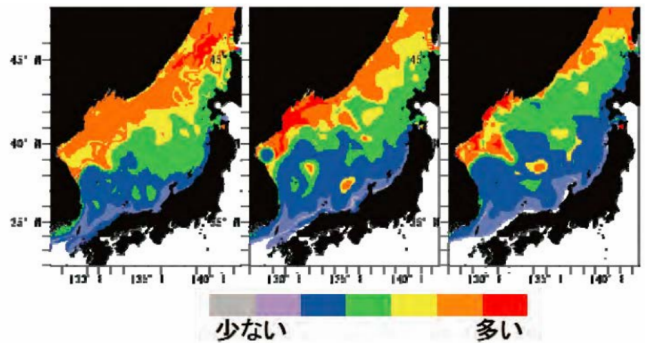


Fig.1 温暖化による水温予測結果を用いた 2000 年，2050 年及び 2100 年の 7 月の日本海におけるスルメイカの分布密度予測図 [1]

国内では 2019 年および 2020 年に，琵琶湖で観測史上初めて表層水と深層水の循環である「冬季全層循環」の停止 [2] が確認され，生態系への影響が懸念されている．これらの水環境問題の全容や原因を解明するためには，複数地点における深度別の水温や生物分布を継続的に観測し，モニタリングを行うことが不可欠である．しかし，研究用途に適した水中フロートは高額であり，予算が限られる研究チームでは多地点観測の実施が困難である．

本研究では，湖沼および沿岸域の水深約 100 m を対象とし，深度ごとの水温および生物分布を多点観測可能な低コスト水中フロートを開発し，水中環境観測機の導入コスト低減を目指した．開発機体については実際の湖沼および沿岸域での実証実験により性能評価を行った．また，今年度は通信機能の搭載によるリアルタイムデータ送信や，操作用コンソールの開発による運用の簡易化にも取り組んだ．

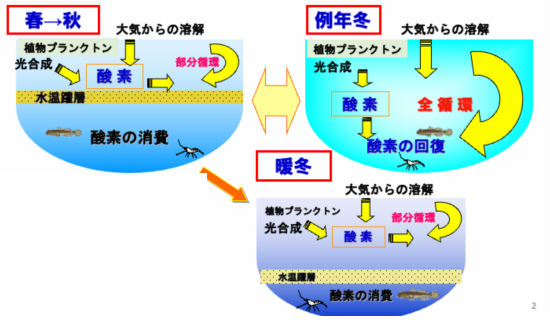


Fig.2 全層循環の流れ [3]

2) 2025 年 9 月までの研究開発

2.1. 全体概要

2023 年から 2025 年 8 月にかけて自動で水中を浮沈し，水温などの環境データを記録することができる自立型水中フロートを開発した．センサーは高精度温度センサ，水圧センサ，4K カメラを搭載し，水温・水深・映像データの高精度取得を可能とした．

浮力調整機構には圧縮炭酸ガスを用いた方式を採用し，電磁弁によってガス流量を制御して浮沈を行う方式とした．これにより，従来のモータ駆動方式と比較して省電力化を実現し，長期観測への適用が可能となった．この設計方針は，琵琶湖や沿岸域での浮沈を繰り返す運用に適している．

2.2. センシング機構

水温度計測には Measurement Specialties 社製 TSYS01 を採用し，±0.1℃の精度で温度データを取得可能とした．水圧センサには Blue Robotics 社製 MS5837 を用い，解像度 ±2mm，絶対精度 ±100cm の正確な深度計測を可能とした．さらに，機体内部には 4K カメラ（GoPro Hero10）を搭載し，水中環境の映像を高精細に記録可能とした．

データの取得・保存および浮力調整機構の制御には Arduino Nano Every を採用し，電子回路は専用 PCB 基板を設計・製作してシステムを構築した．電源には 10000mAh のリチウムイオンポリマーバッテリーを使用し，長時間の連続観測へ対応可能である．電子基板やカメラなどの各コンポーネントは，3D CAD で設計，3D プリンタで製作した部品を用いて内部に固定した（Fig. 3）．内部構造は衝撃や振動への耐性を考慮して設計されており，過酷な水中環境でも安定して動作する．

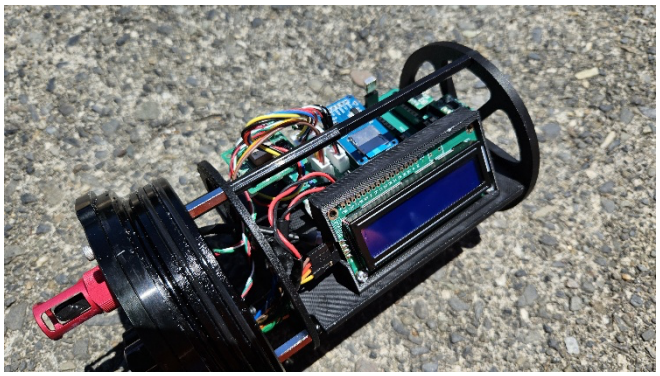


Fig.3 3D プリンタ製部品を用いた内部部品固定機構

2. 3. 浮力調整機構

本機体は圧縮炭酸ガスを動力源とし，2 基の電磁弁によってガス流量を制御することで，バルーンを膨張・収縮させて浮力を調整する．機構の概略図を Fig.4 に示す．

この方式により，水中環境や水深の変化に応じた柔軟な浮力制御が可能となり，同時に機体の軽量化とメンテナンス性の向上も実現した．

また，この機構はモーターを使用した方式と比較し，省電力で機体を制御可能であり，長期間の観測により適している．

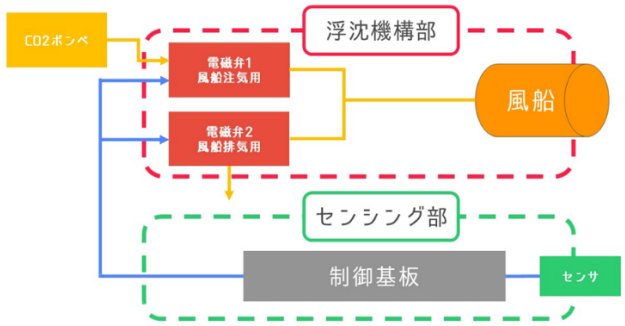


Fig.4 水中フロート内部の圧力機構図

2. 4. 外装

昨年度は外装を設けず，結束バンドなどで筐体や炭酸ボンベを固定していたが，後述の 2025 年 8 月の大瀬崎海洋実験に際して，筐体やバルーンを覆い，他部品も一体的に固定可能な外装を 3DCAD で設計し，3D プリンタで製作した(Fig. 5)．これにより，ねじ止めによる部品の確実な固定，足や持ち手の追加による運用性の向上，着地時の安定性確保を実現した．

さらに，従来よりも大型のダイビングライトを搭載し，夜間や低照度環境でも映像取得が可能となった．海域での使用を考慮し，外装固定に用いるねじには耐食性の高いステンレスを採用した．



Fig.5 3D プリンタ製の外装

2. 5. 魚類の検出・分類 AI の開発

昨年度，魚類の検出と分類を自動で行うシステムを構築した．これは，海洋生物の生息地や行動を効率的に観測するためである．カメラ映像に写る全ての魚を人力で調査するには膨大な時間を要する．そのため，自動的に魚類の分類が可能なシステムの開発を行った．

結果として魚類の検出と分類に成功した．

3) 採択後の開発

3. 1. LTE モジュールによる通信機能の追加

これまでの機体には通信機能が搭載されていなかったため，位置情報を把握できず，実際の運用時には機体をロストする可能性があった．また，継続的な観測の際にリアルタイムにデータを取得することができなかった．

そこで，新たに LTE 通信機能を実装し，GPS データを含む各種観測データの記録及びサーバーへの送信を行うシステムを構築した．これにより，機体の位置情報を常時取得できるため，紛失リスクの低減をするとともに，リアルタイムに観測データを取得することができる．

通信モジュールには u-blox 社製 SARA-R410M-02 を採用し，アンテナには ANT-8827 を使用した．SIM カードは SORACOM 社のプラン D（docomo 回線）を用いている．

本システムでは，HTTPS 通信を用いて後述の GAS（Google Apps Script）サーバーへセンサデータを POST 送信する仕組みを採用している．送信するデータ項目は，時刻，GPS 位置情報，水温，水深，内圧・外圧，電波強度の 6 種類である．また，水中環境における電波の減衰特性を評価するため，環境データに加えて電波強度（CSQ 値）を SD カードにも同時保存するようにした．(Fig. 6)

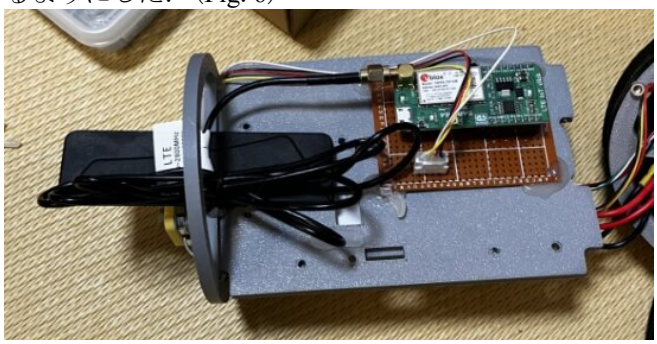


Fig.6 3D プリンタ製の外装

水は電波を吸収・減衰させるため，水中では電波通信が成立しない．したがって，LTE 通信を行うためにはアンテナを常に水上に出しておく必要がある．しかし，現状の筐体構造ではアンテナを水中に露出することが難しいため，新たに外装を再設計した．新たな外装では，筐体ごとアンテナを水上に浮上させることで通信を可能にした．筐体フレームにはアルミフレーム（長さ 50cm）を採用した．固定には U ボルトと EPDM ゴムシートを用い，滑り止めおよび振動吸収を兼ねた構造とした．(Fig.7)

また，機体の浮上時に水上で安定させるために重心をできる限り下方に配置する必要があるため，風船と浮子を機体下部に設置し，水上に浮上した状態でも安定した浮力を維持できるようにした．なお，浮力機構部は比較的重量があるため，筐体の最下部に配置した．

おもりは外部から調整できるようにタッパー容器に収納し，結束バンドを用いて固定した．今後はねじなどを用いた完全固定を行いたい． (Fig.8)

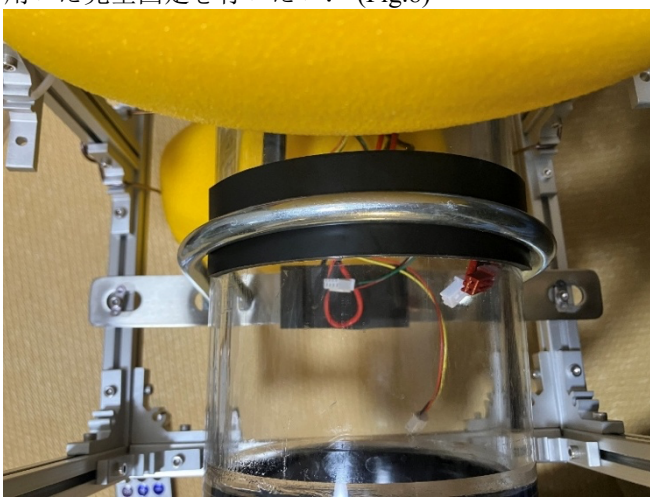


Fig.7 筐体とフレームの固定部分

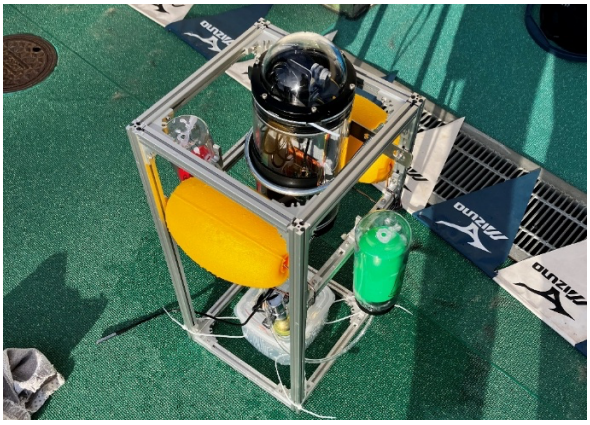


Fig.8 完成した機体

3. 2. 運用コンソールの新規開発

本研究で開発した自律型水中フロートは，水温・水深・映像など多様なデータを取得できるものの，実際の運用においては，これらの情報をリアルタイムに把握し，機体の状態を適切に監視する仕組みが不可欠である．特に，湖沼や沿岸域における長時間観測では，通信の安定性が変動しやすく，機体の位置や状態を即座に把握できないことが調査の安全性に直接影響する．また，多地点観測を行う場合には複数機体の状態を同時に監視する必要があり，現場の負担を軽減する運用インタフェースの存在が重要になる．

こうした背景から，本研究では LTE モジュールを用いた通信機能の拡張に合わせて，取得データを自動保存し，機体の位置や状態を視覚的かつ直観的に把握できる運用コンソールを新たに開発した(Fig.9)．このコンソールは PC・タブレット・スマートフォンなど一般的なブラウザで動作し，研究施設内だけでなく，湖岸や船上といった現場からでも即時にアクセスすることができる．

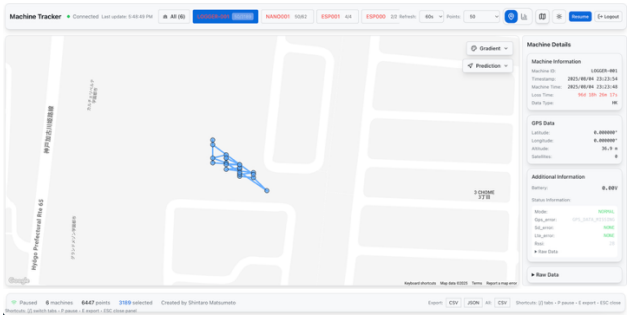


Fig. 9 開発した運用コンソール

専用アプリケーションを新たに導入する必要がなく，インターネット接続環境さえあればどこからでも利用可能であることから，低コスト研究装置の運用基盤として適している．

運用コンソールの中心機能は，位置情報とセンサー情報を地図上に表示することである．機体から送られる緯度・経度などのデータは自動で受信・蓄積され，現在位置と移動履歴が地図上で確認できる．

運用コンソールの中心機能は，位置情報とセンサー情報を地図上に表示することである．機体から送られる緯度・経度などのデータは自動で受信・蓄積され，現在位置と移動履歴が地図上で確認できる．これにより，運用者は異常が発生した機体を迅速に特定し，回収や探索の判断を行うことが可能となった．

運用コンソールの中心機能は，位置情報とセンサー情報を地図上に表示することである．機体から送られる緯度・経度などのデータは自動で受信・蓄積され，現在位置と移動履歴が地図上で確認できる．

このように，開発した運用コンソールは水中フロートの遠隔監視とデータ管理を低コストで実現し，多地点観測を行う研究チームに有用な基盤となる．

4) 大瀬崎海洋実験

4. 1. 目的・手法

2025 年 7 月 25 日に静岡県沼津市大瀬崎の水深約 10m 地点において，海水環境に対する機体の耐性確認，複数回の連続浮沈運用による動作確認，新たに開発した外装によって撮影できる映像の確認を目的として実地試験を行った．

また，取得した映像に対する魚類自動分類システムの分析を実施し，その精度を検証した．実験はゴムボートを用いて沖から機体を放流し，約 5 分間隔で浮沈を繰り返して実施した．

4. 2. 実験結果

実験の結果，深度ごとの水温データの収集と 4 回の連続浮沈に成功した．また，海水による劣化も特に認められなかった．映像の撮影も成功し，魚やイカなどの生物を撮影することができた．

取得した水深と水温の散布図を見ると，表層付近では温度変化の少ない表層混合層が確認でき，水深約 6m 以降では急激な温度変化が起こる水温躍層を観測できていることが分かる(Fig. 10, 11)． 表層混合層が約 6m と薄くなっているのは，夏期の強い日射によって表層

水温が上昇し，下層との混合が抑制される現象を観測したものと考えられる．

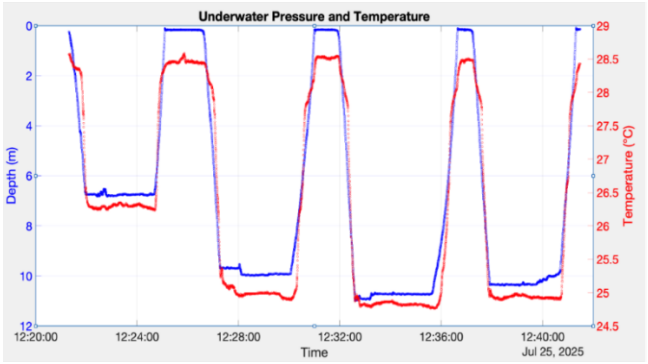


Fig.10 大瀬崎海洋実験における時刻に対する深度と水温

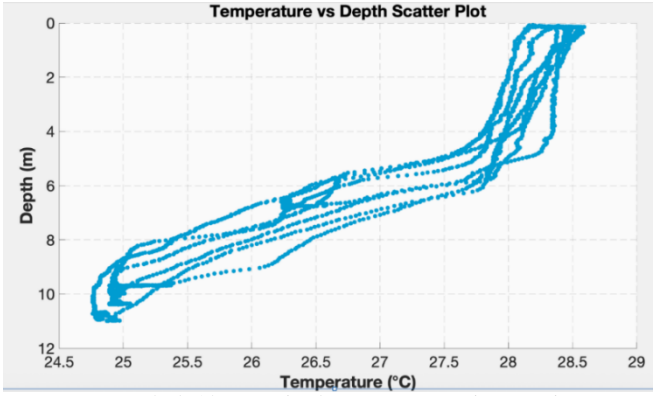


Fig.11 大瀬崎海洋実験における温度別深度分布

4. 3. 魚類自動分類システムによる分析

昨年度までの活動で開発した魚類自動分類システムを用いて取得映像を分析した結果，目視で魚と判別可能な魚影に対しては約 9 割を魚として検出した．しかし，明らかに魚ではない物体も魚として検出する例が見られた．このことから，今回の分析においては，再現率は高いが適合率がやや低いといえる．(fig. 12)

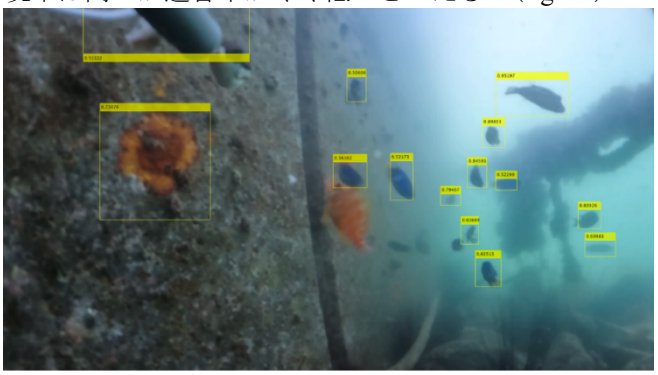


Fig.12 魚類自動検出システムによる分析結果

5) 琵琶湖深深度試験

5. 1. 目的・手法

2025 年 7 月 31 日に琵琶湖の水深約 100m 地点において，圧力の高い環境でのデータ収集を検証する目的で深度試験を行った．実験は船で湖の中心部に移動して実施した．現状の浮上機構では強い水圧下でバルーンを膨張させることができず，自律浮上が不可能であったため，引き上げは手動で行った．機体を湖底まで沈降させ，20 分間データを収集した後に引き上げた．

5. 2. 実験結果・考察

実験の結果，水深約 89m までの耐圧性能を確認するとともに，約 0. 3 秒間隔でのデータ取得に成功した．水深と水温の散布図を見ると，大瀬崎での実験と同様に表層混合層および水温躍層が確認できた．さらに，水深 30m 以深では温度変化の見られない下層の観測にも成功した． 表層混合層に関しては，大瀬崎での実験と同様の現象により薄くなった状態の観測に成功したものと考えられる．

また，浮上時と沈降時の水温データがほぼ一致していることから，取得データの妥当性を示すことができた．(Fig. 13)

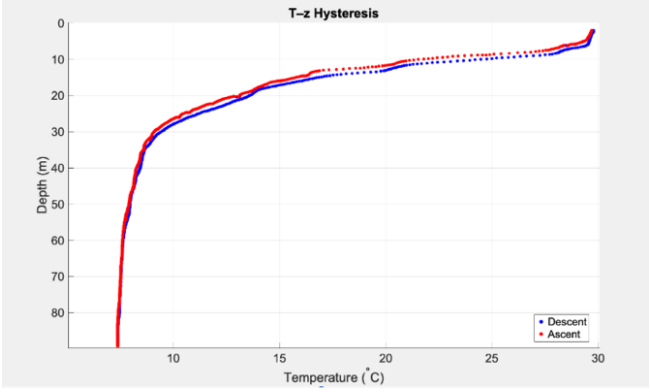


Fig.13 琵琶湖深深度実験における深度別温度分布

6) 新規開発機体の性能評価実験

6. 1. 実験目的

本実験の目的は，自作の水中観測機における浮沈制御機構および LTE 通信機能の動作確認を行い，機体バランスや防水性能を評価することである．

6. 2. 実験手法

学校の 25m プールにて以下 2 つの実験を行った

i. 浮沈確認実験

機体浮上したときに機体の一部が水上に出るかの確認をする．

ii. LTE 通信確認実験

LTE 通信モジュールを稼働させ，通信可否および受信電波強度（CSQ 値）を確認した．比較のため，事前に docomo 回線のスマートフォンを機体内部に設置し，ビデオ通話を用いた通信試験も行った．

6. 3. 結果・考察

i. 浮沈確認実験

複数回の浮沈に成功した．(Fig. 14)

浮上時には機体のドーム部分および筒の一部が水面上に出る状態となり，バランスも良好で姿勢変化はほとんど見られなかった．着底時にも転倒は発生せず，安定した動作が確認された．

浮力体 1 個あたりの浮力は約 1kg であり，浮きを 1 つ減らすことで重量 1kg の削減が可能であるが，重心が変化するので注意が必要である．

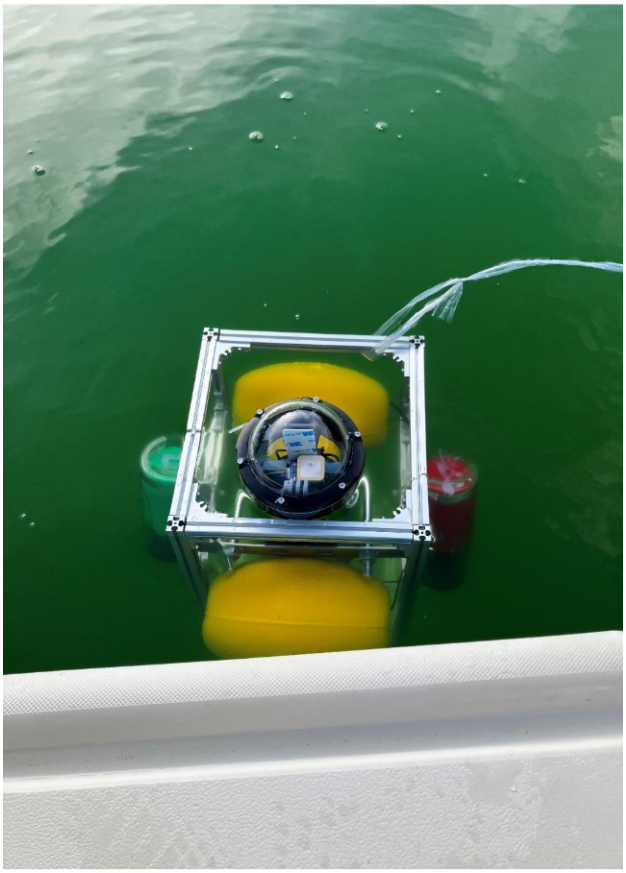


Fig.14 実験の様子

ii. LTE 通信確認実験

浮上時に通信することに成功した．コンソールからは GPS データを含む環境測定地の情報が確認できた．このことから本機体を放流した場合でも正常に現在地をリアルタイム共有できることが分かった．また，予備実験ではスマートフォンを同様に機体内へ入れ，ビデオ通話により通信を確認したが，機体が完全に水没すると通信は途絶したため，機体全体が沈まない限り通信は可能であると考えられる．しかし，今回はプールで実験を行ったが，琵琶湖などの基地局から離れたところになると結果が変わってくる可能性はあるため，実地試験も行う必要がある．

7) まとめ・今後の展望

本研究では，水中環境観測機の導入コストの低減を目標として，湖沼や沿岸域を対象とした低コスト自律型環境調査用水中フロートの開発を行っている．今年度は通信機能や運用コンソール，外装の新規開発を行い，機体の実用性を向上させた．また，琵琶湖や大瀬崎といった自然環境での機体の性能実証と，プールでの実験による機体の通信性能の確認などを行った．

今後は，推進機構を持つ水上ドローンを母艦として開発することで指定位置への自動航行を実現し，観測の完全自律化を目指す．また，現在までに実施できていない 24 時間以上の連続動作によるデータ取得実験や，複数機を同時に稼働させる多点観測実験を行い，実環境調査に向けた性能の実証を行いたい．

8) 謝辞

本研究の完成にあたり，多くの方々のご支援をいただきました． _

まず，琵琶湖環境プロジェクトの運営ならびに実験場所，研究環境の提供をしていただいた一般社団法人 e-kagaku 国際科学教育協会の皆様に深く感謝申し上げます．

また本研究に必要な物品の購入にあたっては，高校・高専気象観測機器コンテストの製作費及び最優秀賞の賞金を活用させていただきました．ご支援していただいた一般財団法人 WNI 気象文化創造センターに心より感謝申し上げます．

最後に，本研究にご協力いただいた全ての皆様に感謝申し上げます．

9) 参考文献

[1] 農林水産省，『気候変動が農林水産業に及ぼす影響等に関する報告書（第 1 巻・第 2 巻）』，2018．［オンライン］．
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/report2018/attach/pdf/report-124.pdf

[2] 後藤直成，伴修平，吉山浩平，堂満華子，尾坂兼一，「温暖化に起因する全循環の短期化・停止が琵琶湖生態系に及ぼす影響」，滋賀県立大学環境科学研究院，2021．［オンライン］．
https://www.usp.ac.jp/kenkyu/items/9fb15611d462732a04d4712563bbfd39_1.pdf

[3] MLGs Promotion，窪園真那，「琵琶湖の深呼吸 “全層循環”を学ぼう！」，MLGs WEB，2023 年 4 月 6 日．［オンライン］．
https://mlgs.shiga.jp/archives/4530

[4] 海洋研究開発機構（JAMSTEC），「コラム：全層循環の停止はなぜ起こるのか」，JAMSTEC Web サイト，2021 年 2 月 5 日．［オンライン］．
https://www.jamstec.go.jp/j/pr/topics/column-20210205/