

瀬戸内海 しまなみ沿岸生態系に眠る多面的機能の解明と 産業支援・教育 テーマ①：生態系の解明 藻場環境観測システムの開発（概要）

田中聡・伍賀正典・仲嶋一
工学部スマートシステム学科

■研究目的

瀬戸内海の里海と呼ばれる生物多様性を有する沿岸海域において、藻場内部に生息する魚類の生態解明、藻場の分布や流れの調査のために、海中の様々な環境情報を多角的に取得するシステムを開発することを目標として、海中ロボット（ROV）や自立型観測機器の開発を2017年度から進めている。生物の生態は環境に大きく依存して（適応して）いることは周知の通りである。海流によってプランクトンや稚魚が漂流し、それを追って大型魚が集まる。そのような捕食者から逃れるように藻場に隠れて多くの魚類が生息するとは考えられているが、実際はそれがどのような場になっているのかを知ることが難しい。今回の研究プロジェクトではそのような場にメスをいれるために多数の観測機器を海底に設置あるいは浮かべて、広い範囲で藻場の中の環境を明らかにすることを目標としている。そのためには生息する生物に大きな擾乱を与えないで観測する手段を比較的low価格で用意する必要がある。

筆者らはそうした場に固定カメラを設置して長時間の動画やデータの記録を残すことを最終目標としている。生物観察用や観光用など海底に置くカメラは既に多く製品化されている。しかしながら、筆者らの目標とするのはまずは物理的な環境要因を画像から解析することである。すなわち瀬戸内海のような遠浅で水底まで日光が入るような環境において、どのように海流や温度が変化してそれにともなってどのように海藻や魚類が移動・変化するのかを調べることである。海流の速度や方向の測定は超音波流速計やマイクロ波レーダを用いた方法が使われているが、海上の風に流される表層流と深部の水流は全く違う場合があり、生物の住処である低層の藻場の内部では中層とは異なる流れにより生物や稚魚が移動しているケースも多い。

そこで、海底にカメラを置き海中を移動する物体に焦点をあてて追跡することにより、その深さでどのような海流があるのかを調べようというのが“海底カメラ”（図1）の目的である。この装置は、画像取得のために実装されたカメラを海底から海面の方向に向けて設置し、海中を移動する物体の3次元座標を測定することにより海流の方向や流速を求める機能がある。さらに水深、流速、温度（水温）、カメラの方向、時刻を測定してデータの補正を行う。

本装置は実験段階とはいえ実用システムとしての運用を目指していることから、信頼性および安全性、長期安定性に十分に配慮した設計が求められているとともに、性能のみならず、運用上の利便性や課題にも配慮した構造とし、周辺機器および運用ソフトウェアやマニュアルの充実も視野に入れて開発を進めている。



図1 開発した海底カメラ

■2018年度の進捗状況（図2）

本年度は実際に海底カメラを製作およびシステム制御プログラム作成と動作試験&デバッグを半年間行った。並行して海底カメラの外装に用いるカメラハウジングの設計と製作を行い、電子回路部分を実装する作業を行った。2018年度の後半において大型水槽を用いてカメラハウジングの水密性能の確認を行い、さらには実際に因島のキャンパス沖の海中での投入実験をおこない、カメラハウジングの性能評価および、海底カメラとしての運用方法を確認する実験を行った。2019年に入って、実際の藻場の近くに設置してステレオカメラとして撮影する実験を行った。同時に、初期に開発したカメラ基板の問題点を解決するための改造を実施し運用性を高めた。

記録した画像のポストプロセスのための PC 用のソフトウェア開発を進めた。記録した 3D ステレオ画像はカメラの歪みや左右カメラの位置ずれを補正して距離測定や立体化を行う必要がある。この目的のため、チェッカーボードパターンを用いたステレオ補正を行い、3D の再構成を実現した。また、大量の動画像を整理してコンピュータで管理する仕組みが必要となっている。この目的のために、動画に記録されたタイムスタンプを機械的に読み取る OCR システムを実装し、動画ファイルの目的のフレームを検索するソフトウェア（仮称 SBC Viewer）を制作した。一方、動画像から流速を求めるためのオブジェクトトラッキング技術については 2 次元画像ベースでの研究を進めた結果、解決すべき課題が多く次年度に継続して研究する。

本体内部に搭載している各種センサについておおむね動作を確認できた。しかしながら、温度・湿度・圧力センサは本器の運用において漏水監視や水温測定といった期待された機能を実現できていない。9 軸加速度・地磁気センサは本器が海底に固定された状態で設置されることから安定した情報を取得でき、懸念された容器の周辺の地磁気や回路の電磁力の影響で乱れることはなかった。水圧センサについては系統的雑音の混入がみられることへの対応および大気圧補正といった課題が残されている。

海底カメラの設置場所の事前探査や設置状態の確認、さらにはロスト時の捜索に役立つことを期待して、ROV (Remotely operated vehicle) を導入し試験運用を行った。実際の海上での運用では海流によりテザーが引かれるため、本体の方向制御が困難になる、また潮流に打ち勝つ十分な推力が得られないなどの課題があり、操縦技術や運用技術の向上が求められた。

海水温のプロファイル計測のための水深・水温測定用のロガーを導入したが、熱容量が大きすぎるため期待した応答速度と測定性能を得ることができなかった。また、プロペラ型流速計を改造して測定点の座標と流速を記録できるシステムを製作し運用を試みたが、2 次元面上で流れの方向を記録する準備できていなかったため、評価できるまでの結果が得られなかった。

開発の進捗



図 2 海底カメラの開発の進捗

■ 2019 年度の目標と開発計画

前年度に引きつづき藻場の観測実験と観測機器やソフトウェアの改善作業を進めていく予定である。その中において、2018 年度に製作した海底カメラのフルシステムではサイズが大きく重いことから本学の中型観測船のウインチで設置や引き揚げをしなければならず、中型観測船は水深の浅い藻場に近寄れないという課題があった。一方、本体の重量を増やすためのバラストウェイトをはずした軽量な海底カメラの状態では手作業で運用ができるものの逆に水中重量が軽すぎるために荒天時に弱く設置が安定しないといった相反する課題があった。さらに、1～3日の観測ができるバッテリーしか搭載できなかったことから、より長時間の動画記録のために、さらなる省電力化とバッテリーの追加もしくは着脱ができる仕組みが求められた。また、内蔵している電子機器に比べてカメラハウジングが高額であったため、多地点の同時観測といったニーズに対してはコスト的に低廉でバランスのとれた設計が必要であるという指摘もあった。

こうした問題の解決のために2019年度の前半においてこれらの問題点を解決できる次期バージョンの海底カメラを設計・製作し運用実験をおこなう。

PC用の画像解析ソフトウェアについてはオブジェクト認識技術を用いたトラックの実装により、海流測定や生物の認識といった応用システムの開発を継続して行う。特に、昨年度の研究における課題のうちオクルージョン（画像の分割）課題について集中的に研究と解析を進める。

次に、水温のプロファイル測定については熱容量が小さく瞬時計測ができる光ファイバ型の温度計の導入を行うことを検討しており、藻場探査用のROVについてはその操作性を改善した機体の投入を行う予定である。

9軸センサや温度センサなどの環境観測情報を動画管理システムに統合して観測結果をわかりやすく表示できるようにデータベース機能を強化する予定である。



図3 ROVの運用

藻場環境観測システムの開発 (海底カメラの製作)

田中 聡 伍賀 正典
工学部 スマートシステム学科

■ 藻場観測システムの課題とその対応[1][2]

藻場の内部環境を計測するためには藻場の内部に計測器を設置してデータを記録するシステムが必要である。海中での運用に起因する表1のような重要な課題があり、システム設計においては機器のコストと運用の利便性を含めたうえで総合的にバランスをとる必要がある。

運用課題のNo.1, 2, 3については図1のような海上の浮体と水中のセンサをテザーで通信し、あるいは電源供給も行うといったアイデアがとりざたされ、海上と海中モジュールとのリアルタイム通信や電源供給における運用の手軽さへの期待が語られる。しかしながら、近年の異常気象における強風や荒天や波浪に十分耐えうるものを実現することは現段階では無理であると判断している。よって、電源も記録装置も一体化し設置→引揚げ→メンテナンス→設置 を1週間程度で繰り返すスタンドアローン方式を選択した。これはNo.6の付着生物問題に対しても実用的な対応となる。

表1 海底カメラの運用課題

No	運用課題	対策
1	海中では電波が届かない 光や超音波を含めた無線通信は困難	スタンドアローンで運用し、定期的なメンテナンスを行うため、メンテナンスの容易化設計をする。
2	海底から海上へのケーブル接続は荒天時に破損	
3	海底に長期間(1週間以上)置くと付着生物により機能が劣化, 停止する。	
4	海水の腐食性が高く金属には対策が必要	海水耐食性, 対候性の高い材料を用いる。
5	強い紫外線によるプラスチックの劣化	
6	付着生物によるセンサや観測窓の汚れ	定期的なメンテナンス
7	盗難や故意の破損の危険	管理しやすい場所への設置.監視の強化 単価の削減
8	強い海流に流される	潮流に対する抵抗の小さい形状 水中重量を重くする
9	外部温度変化による結露	乾燥剤による防湿

No.7の人為的な被害に関する点およびNo.4, 5の海食や劣化の問題さらにNo.8の海流そしてバッテリー容量といった観点から海中重量が大きい大型の金属製のカメラハウジング(容器)が必要であると考え、アルミ製の円筒型ハウジングを設計・製作した(本報告の別稿「筐体設計試作」参照)。アルミ製のハウジング本体にセンサや電子回路さらにバッテリーなどの重量物を詰め込んだ場合には水中重量は10kg程度である。さらに気中重量27kgのSUSバラストを追加しておよそ水中重量は33kgとなる。製作したカメラハウジングは円筒形であり海底に設置した場合に海流がカメラハウジングのフランジ部分に当たって海底から引きはがそうとする鉛直方向の力は流速U[m/sec]に対して重心位置で最大 $4U^2$ [kgf]程度と概算される[1]。秒速2m/sの早い場所でも16kgfであるから、瀬戸内海において極めて流れの早い場所でないかぎり安定的に設置が可能である。

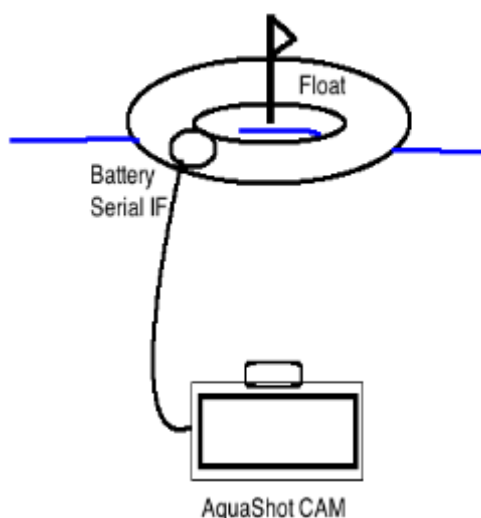


図1 海上ー海中の間のワイヤ連結

■ 海底カメラへの要求性能

製作した海底カメラの本体の性能を表 2 に示す。試作機を用いた実測によるものであるため、昨年度の設計段階での報告書に記載した諸元に比べ具体的な数値となっている。

表 2 海底カメラの諸元

No	性能	値	備考
1	外形サイズ	W320L320 H200mm	
2	重量	およそ 40kg	潮流対応
3	材質	本体アルミ バラスト SUS	長期の海水中では腐食の可能性あり
4	耐圧	差圧 2 気圧以上	水圧 2 0 m 以上
5	ステレオカメラ 基線間隔	100 mm	
6	カメラ解像度	1280x720(HD) 15FPS	最大 2 K 画像 最大 100FPS
7	カメラ画角	62degree	魚眼を使えば 110
8	カメラ深度	近点 70mm	遠点は海水の透明度による
9	録画システム	H.264 動画圧縮 SD カード記録	システム負荷像大により 1 時間に数回, 40 秒記録動作が停止する.
10	記録時間	SD128GB 10 日 夜間は少なめ	データの取り出しに 5 時間から 1 日
11	動作時間	バッテリー次第 20000mAH 24 時間	観測窓の汚れによる限界あり
12	環境測定データ	温度・湿度・気圧 バッテリー残量 水圧 (深度測定) 加速度・ジャイロ・地磁気 (方位)	カメラ方向と位置を測定する.

■ 海底カメラの電子回路 [3]

カメラ部分を含む海底カメラの電子回路基板を図2に示す。また、図3はブロック図である。

海底カメラの基板は2組のマイクロコンピュータボード Raspberry Pi3 とカメラモジュール V2 によって構成されたステレオカメラと外部から赤外線リモコンにより電源制御および内部ステータスを表示するためのサブプロセッサとして Arduino Nano を搭載している。さらに海底カメラの姿勢を検出するための加速度・ジャイロ・地磁気センサとカメラハウジングの内部状態を計測する気圧・温度・湿度センサ、水深を計測する水圧センサが搭載されている(表3)。

コントローラの CPU として当初はより小型の Raspberry Pi Zero WH を採用していたが、カメラ処理のプロセスがほとんど50%を超える状態が続き他のプロセスに支障が発生する状態が続いていたことから、性能が十分でないと判断しマルチコアタイプの raspberry Pi3 に変更した。これによりソフトウェア開発に余裕ができた。

カメラやセンサのデータは Raspberry Pi 上の SD カードに記録される。SD カードの容量は128GB のものを用いている。なお、SD カードはシステムが存在するパーティションと動画データを記録するパーティションを分けているため、システム異常で動画データがフルになってもシステムに影響を与えない。

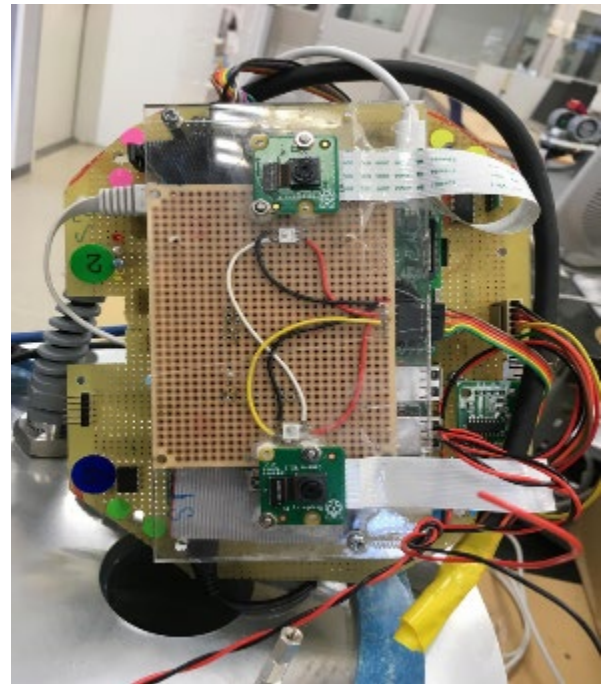


図2 海底カメラのセンサ基板

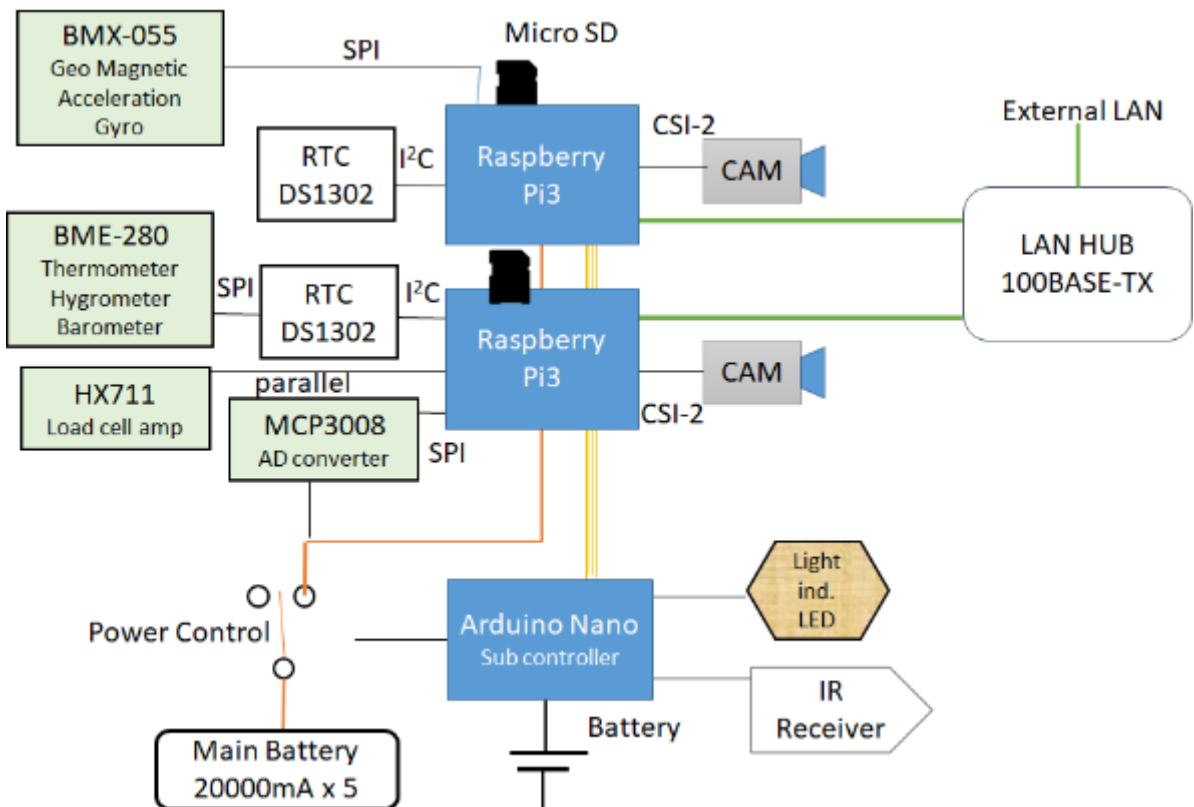


図3 海底カメラのブロック図

表3 搭載されているセンサ

センサ	用途
加速度ジャイロ地磁気センサ BMX-055	海底カメラの画面の方向を測定
気圧、湿度、温度センサ BME-280	内部気圧、湿度、温度を測定
水圧センサ PGM-H	水圧から水深を測定
電圧計	バッテリー
IR リモコン CHQ1838	本体電源制御リモコン

2つの Raspberry Pi 3の間は LAN(100Base-TX)で接続されており、主にシステム時刻のずれを監視するために用いられる。また、LAN の HUB を介して容器の外部に防水コネクタを介して接続されている。したがって、容器の開閉をしなくとも内部のデータを取り出したりバッテリー充電を行うことは可能であるが、100GBにも達する動画データを LAN のみで取り出すには2日間もかかるため、SD カードを取り出して直接読み出す方が現実的である。

カメラの同期タイミングを制御するために2つの Raspberry Pi ボード間に req-ack の信号線を設けている。Raspberry Pi とサブプロセッサの arduino nano との通信は Raspberry Pi が正常に動作していないケースを想定しているため4本の平行信号でステータス情報のみを送信するようになっている。

電源が切れた場合でも現在時刻のずれできるだけ少なくするために RTC(Real Time Clock)をそれぞれの Raspberry Pi に接続している。残念ながら使用している RTC は高精度ではないため、一日に1度の時刻校正は必要といえそうだ。このため、時刻ずれの対策として LAN を介してお互いの Raspberry Pi のシステム時刻をやり取りして記録し、時刻ずれを常に監視している。

■ 電源回路と赤外線リモコン

カメラハウジングの内部にはモバイルバッテリーを3~5個搭載できる。電源はモバイルバッテリー(出力5V)を並列に接続して使用する。モバイルバッテリーは低価格で入手性が良いが、消費電力の低減のために、出力電流が小さい場合には出力が停止してしまう機能が搭載されている場合が多い。このため本システムではサブプロセッサを別のバッテリーで動作させ、メイン電源であるモバイルバッテリーが停止した場合には必要に応じてリレースイッチを再投入してモバイルバッテリーを再起動させる仕組みとした。

サブプロセッサが電源制御を行うためサブプロセッサに外部から赤外線リモコンで容器を閉じたまま電源を ON/OFF する機能を搭載した。さらに、プロセッサの内部状態を表示するフルカラーLEDをライトと兼用として設けた。

図4はLEDライト兼インジケータを点灯したところである。海底カメラの電源投入時は赤色が点灯するが Raspberry Pi3 の観測用のソフトウェア3つが正常に動作している時には明るい緑色に点灯する。一部のソフトウェアに不具合があると緑色が弱くなり黄色に見える。図5に赤外線リモコンの受信機の回路図を示す。赤外線リモコンは海底カメラ容器をネジ締めした状態で電源の ON/OFF を外部から制御するものである。赤外線リモコンの本体(ボタン)はプロジェクトの制御用リモコンを流用している。受光器は3.3Vでも動作する CHQ-1838 を用いている。これは、メインバッテリーであるモバイルバッテリーが停止していてもサブバッテリーのリチウムイオン電池3.7Vの出力さえあれば電源を切り切りすることでモバイルバッテリーを再起動できるからである。電源を投入するためのリレーは5V動作品であるが、3.7Vのリチウムイオン電池でもかろうじて動作した。インジケータあるいはライトとなるLEDは左右のカメラ位置の近くに1つ



図4 海底カメラ LED とリモコン

ずつ取り付けしている。この LED は RGB の 3 色タイプであるが内部にコントローラが内蔵されており、発光の輝度を各色 1 2 8 段階でコマンドにより制御できる。ただし、LED との通信のパルス幅が 150nsec と非常に短いパルスを使うので制御は AVR マイコンのネイティブなコードのプログラムで高速動作に対応した。

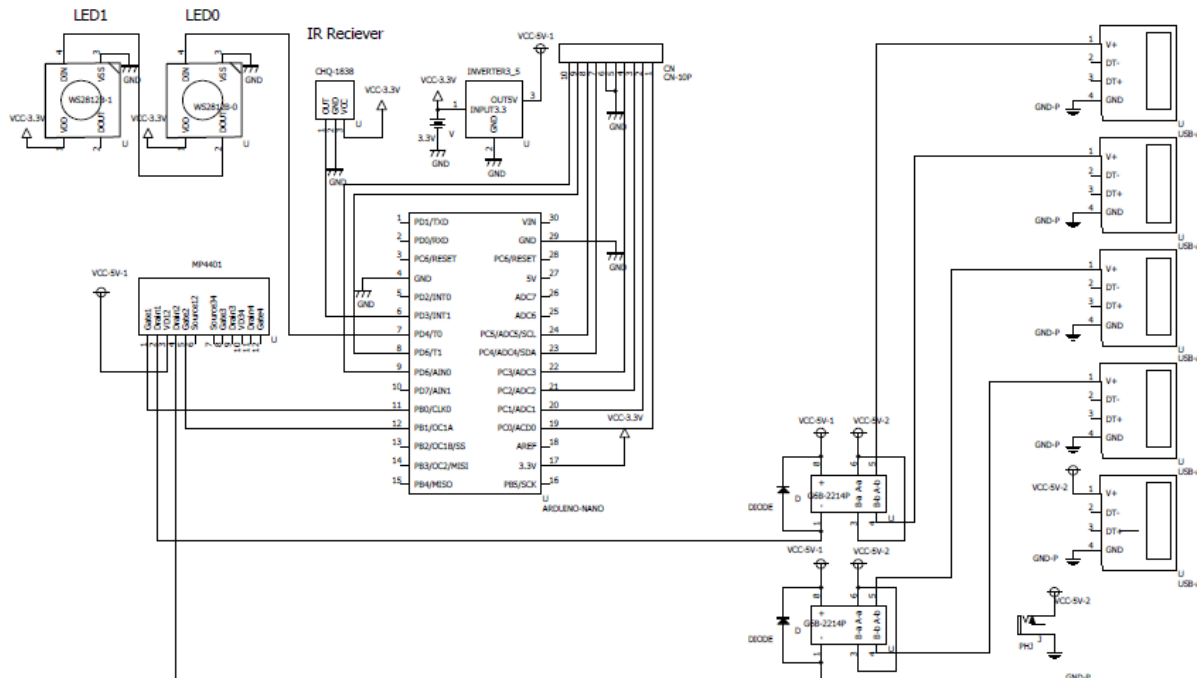


図 5 赤外線リモコン 電源制御回路

■ システムソフトウェア

Raspberry Pi を動作させるための OS として Raspbian Lite (Raspbian Stretch) を用いている。Lite 版は動作しているソフトウェアが少なく、組込みに向いている。さらに、動作の軽量化と省電力動作のために Wi-Fi Bluetooth を停止し、ビデオ関係も次のコマンドで HDMI を停止している。

```
/opt/vc/bin/tvservice --off
```

これにより 0.1W 節減できる。USB を停止するとさらに 0.5W の低減できるので省電力効果が大きい。有線 LAN のインターフェイスも停止するため、いまのところ使っていない。

動作している主なソフトウェアを表 4 に示す。

表 4 動作しているソフトウェア (プロセス)

No	プログラム名	目的・動作	開発言語	新規
1	mjpeg_streamer experimental	Motion JPEG 動画を LAN 経由で UDP 送信する		×
2	raspicam	カメラ画像の入力とタイムスタンプを記録する。また動画圧縮をおこない SD カードに記録する機能もある。	C++(2011) OpenCV 4.0.1	◎
3	Sensor	周辺の各種センサの値を読み記録する。	python	○
4	systemmanager	主にシステムの管理を行う。起動時に必要なプログラムを遅延起動	python3	○

		する。動画ファイルの容量を監視して多くなると古いものから削除する。動作しているプログラムのステータスを監視して電源管理システムである、サブプロセッサ (Arduio nao)と通信する。制作したプログラムのうち、このプログラムのみ Systemd から起動している。		
5	ntpd	システム時刻の管理と他のコンピュータとの時刻同期。		×
6	Postgresql	データベース。センサデータの記録およびシステムパラメータの保持。		×
7	phppgadmin	Postgresql データベースの設定およびデータの読み出し。システムパラメータを設定するために用いる。		×

No.1 の `mjpeg_streamer` は、もともと開発した海底カメラの展示デモのために実装したものであるが、デバッグやチューニング作業に便利であるため基幹システムの一つとなった。このシステムは、システムパラメータにより動作を停止することができるので観測実験時には使用しないようにする。No.2 はカメラの入力兼録画システムであるが、`mjpeg_stremer` のプラグインとして開発している。詳細は次項にて説明する。

No.3 はセンサの入力を管理し `postgresql` データベースに送るプログラムである。およそ1秒ごとに値が得られるがシステム負荷の変化により一定ではない。そこでデータの取得時刻（システム時刻）を同時に記録している。

No.4 はシステム監視が主な目的である。動画データは20分でおおよそ100MB程度が出力されるがSDカードがフルになる前に古い動画データから削除する。また、起動時に他のシステムとの競合が発生しないようにプログラムの遅延起動を行う。ソフトウェア（プロセス）の実行状態の監視し、電源システムへの通報を行う。システム時刻や他の Raspberry Pi の時刻を取得して記録する作業も行う。

No.5 はシステム時刻を同期させるために用いる。各 Raspberry pi にはバッテリーでバックアップされた RTC モジュールがそれぞれ搭載されているので、電源が切れても大きくシステム時刻が狂うことはないはずだが、何らかの原因で大きく外部の時刻からずれてしまう場合には外部の正確な基準時計と同期させる仕組みが必要である。Raspbian(Stretch)では `systemd-timesyncd` が標準となっているが、外部 NTP サーバとの同期がうまくいかないケースがあるのであえて `ntpd` を用いている。ここで、実験の現場ではインターネット設備がないケースがあるので別稿「海底カメラに付属する測定システムについて」で説明する船上システムに GPS を組み込み、これを高精度の NTP サーバとして動作させて時刻合わせを行なっている。時刻合わせには LAN を経由するため外部インターフェイスとの整合性は良く、利便性は高いが、消費電力を押し上げる要因でもあるため次期バージョンでは廃止を検討している。

No.6, No.7 は観測データを保存し、システムパラメータを設定するためのデータベースシステムに関するものである。入出力するデータ量はそれほど大きくないが、システム負荷は瞬時的に大きいので、次期バージョンでは廃止する予定である。

■ カメラソフトウェア[2]

カメラ部分には Raspberry Pi 専用の Raspberry CAM Ver2 モジュールを用いた。OS の Raspbian ではこのカメラを Video デバイスとして扱うことは可能であるが、画像のタイミングコントロールやタイムスタンプの挿入、あるいは動画圧縮という作業を行うために、MMAL(MultiMedia Abstraction Layer)という画像・音声処理用のファームウェアを直接制御する

ことにより撮影・録画する機能を実装した。MMALはOpenMAXに準拠しているがサブセット版であり、機能制限も多く、かつ、そういった機能制限を明示するドキュメントも開示されていないことから試行錯誤で動作確認するほかなかった。

今回構成したカメラ部のブロックダイアグラムを図6に示す。各ブロックはMMAL上でコンポーネントと呼ばれ、入出力に画像や音声のバッファを必要な個数を用意することができる。プログラマからみると、画像データをキューと呼ばれるデータセットに書き込んで入力バッファに入れる(送信する)と、バッファが処理されて出力バッファとして取り出される。画像の遅延を少なくするためにはバッファの個数が少なめがよい。

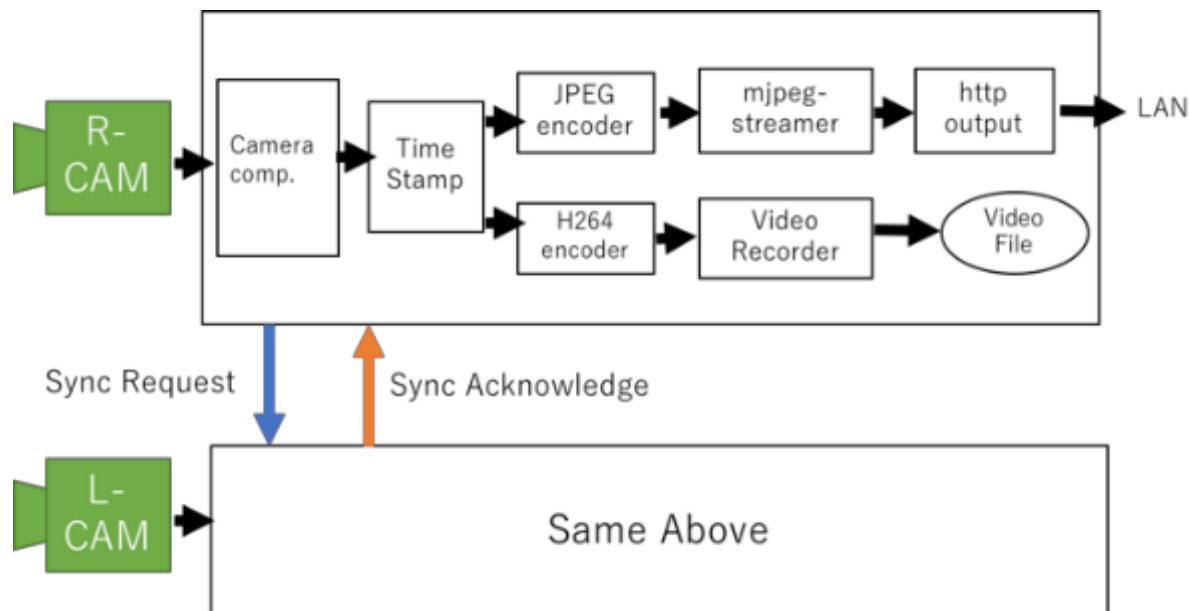


図6 ステレオカメラブロックダイアグラム

カメラの入力は画素のデータとして Camera Component から出力されるが、内部に変換機能があることから OpenCV で処理できる Mat クラスに変換しやすい RGB の 24 ビット出力を用いた。Time Stamp ブロックはカメラで撮影した時刻を

[年月日時分秒.マイクロ秒 コンピュータ名]

の順で図7のように書き込んでいる。

20180913144711.188855 stereo2

図7 書き込まれたタイムスタンプの例

タイムスタンプの書き込まれた画像はJPEGに変換されてLANで送信されるプロセスと、H.264フォーマットで圧縮してSDカードにファイルとして書き込まれるプロセスに分かれる。動画圧縮は大変コンピュータパワーの必要な仕事であるが、Raspberry Piには12個のモバイル向けのQPU(Quad Processing Unit 24GFlops)が搭載されておりこれを用いてJPEGやH.264への動画圧縮を実行するMMALのコンポーネントが準備されている。QPUとCPUはメモリ共有されているのでデータ転送にかかる時間は小さいが、QPUを効率よく動作させるにはQPUのメモリアreaを十分にとる必要がある。今回の設定では全メモリ1GBの半分の500MBをQPUに割り当てた。JPEGエンコードされたデータはmjpeg-streamerによってLANで送信される。エンコード自体は高速であるがLANの出力が遅いことがネックとなっており、HD動画(1280x720)場合では2FPS程度のパフォーマンスしか得られなかった。一方でH.264圧縮はQPUのおかげでHD動画でも20FPS程度まで実現できる。今回は15FPSで動作させている。しかし、15FPSでのフレーム間隔を測定してみると標準では66.6msecの間隔でなければならないところで、図8のように1フレームが飛んで倍の時間間隔となっているものが半分程度まであることが分かった。また、中には40秒程度出力が出ないタイミングがあり、パフォーマンスの改善が必要であるといえる。

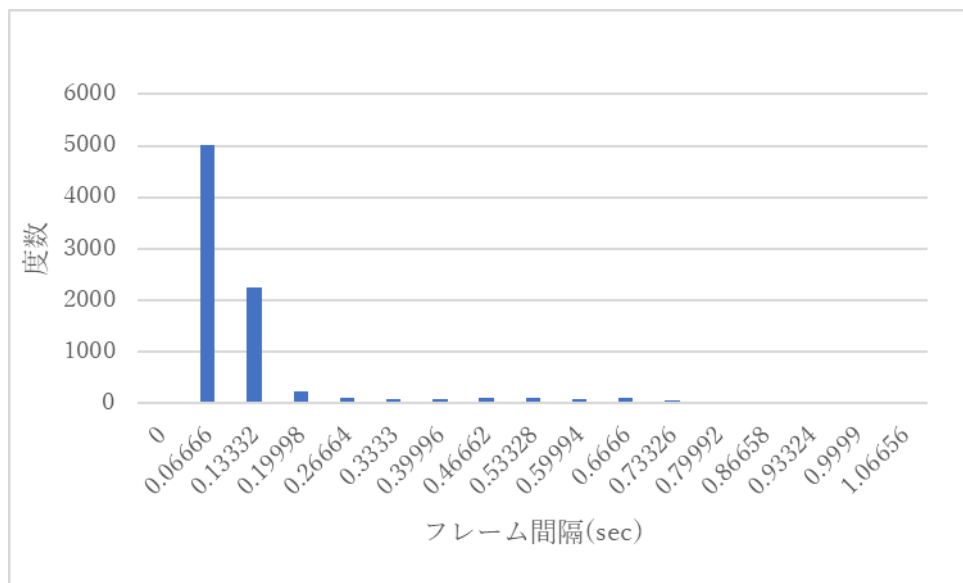


図 8 フレーム間隔のばらつき

右カメラと左カメラの同期は2つの Raspberry Pi を接続する Sync 信号により行っている。R カメラがマスタとなり、フレームが取得できた際に request 信号を立ち上げる。L カメラはそれを受けて自分が準備できると Ack 信号線を立ち上げる。それと同時にフレームを書き込む。

カメラモジュールには機械式シャッターも絞りもないためシャッター速度に関するものは CCD のデータ送りに対応したスクロール速度である。本格的で高速なステレオカメラでは左右のカメラでこのスクロールのタイミングを同期させなければならないが現在のシステムでは実現が難しいといえる。

■ 温度・湿度・気圧センサ

容器の内部の温度、湿度、気圧を測定するために BME-280 を実装している。海中への投入実験を行った際の測定結果を一例として図 9 に示す。気圧が変化しているところが投入時である。投入後に内部温度が少し低下しているが、湿度の変化はほとんど見られない。水槽実験等を通して以下のような知見を得た。

1. 容器の内部への漏水があっても湿度の変化はほとんどなく、湿度計は漏水の検出には役立たない。気圧計の変化は漏水の検出に役立つ可能性がある。
2. 容器に入れられている除湿剤は漏水があってもこれを吸湿するほどの能力がない。吸湿ポリマーの方がよい。
3. 容器内部はバッテリーの発熱や電子回路の発熱で温度が上がっているので外部の水温と比較するのは妥当ではない。

このような点からみて、本センサの有用性は低く、次期バージョンでは直接水温を測定する外部センサを導入することとする。

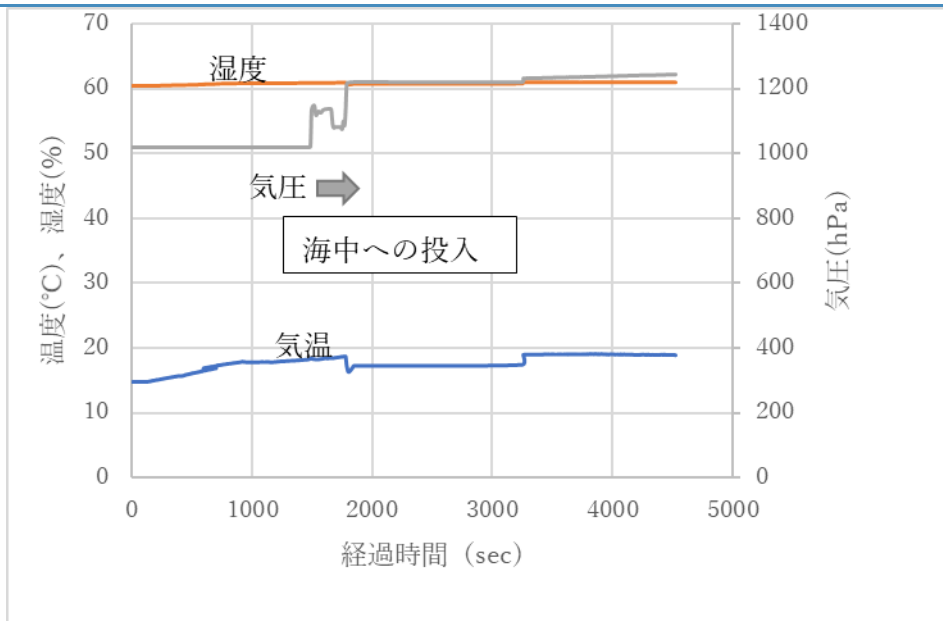


図9 海中投入実験における温度、湿度、気圧変化

■ 方向センサ

海底カメラが海底に設置されたとき、その本体の方向や傾きの姿勢を知ることにより画像の方向を確認することができる。システム基板には地磁気+加速度+ジャイロの9軸センサ（BMX-055 Boche 社製）が搭載されており、この値を用いて画面方向を知ることができる。センサの方向とカメラの位置の関係を図10に示す。センサのZ軸の+方向がカメラの正面の向きとなっている。カメラ画面から見た回転軸方向は ω_y がYaw、 ω_z がroll、 ω_x がPitchに該当する。

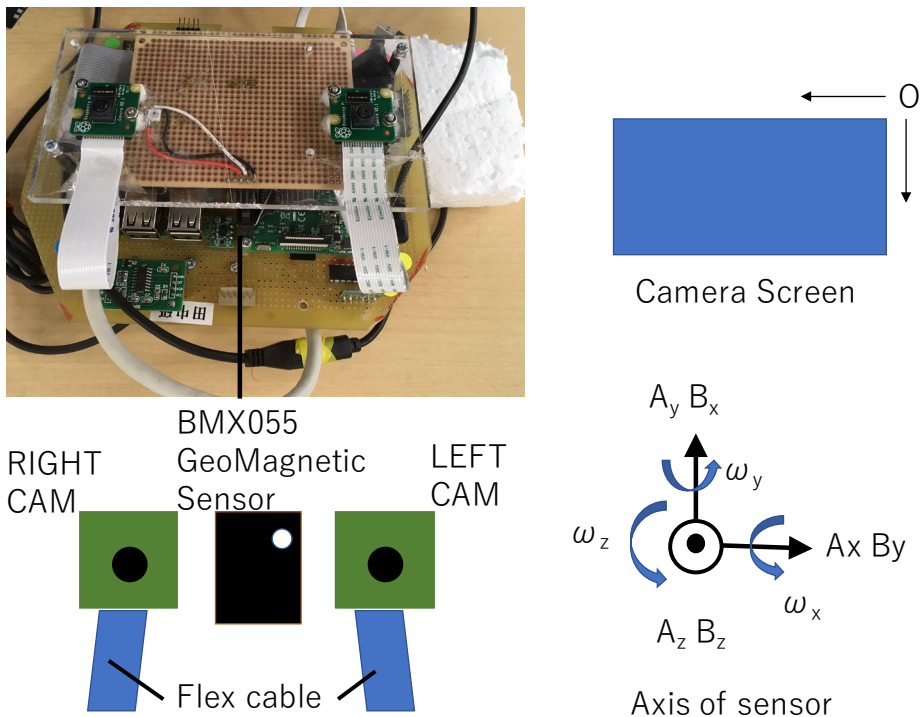


図10 方向センサとカメラ向きの関係

センサの値は数+Hz の速度で出力可能であるが、Raspberry Pi の処理が追い付かずその速度で

一定間隔で取り出すことが難しい。そこでセンサの入力は1秒ごととし、さらにタイムスタンプを同時に記録した。海洋における撮影実験時の測定データを図1 1に示す。この実験ではカメラを船上から何度も引っ張り上げたため最終的にはカメラは海底に対して横倒しの状態で海底を見渡すような方向で設置された。

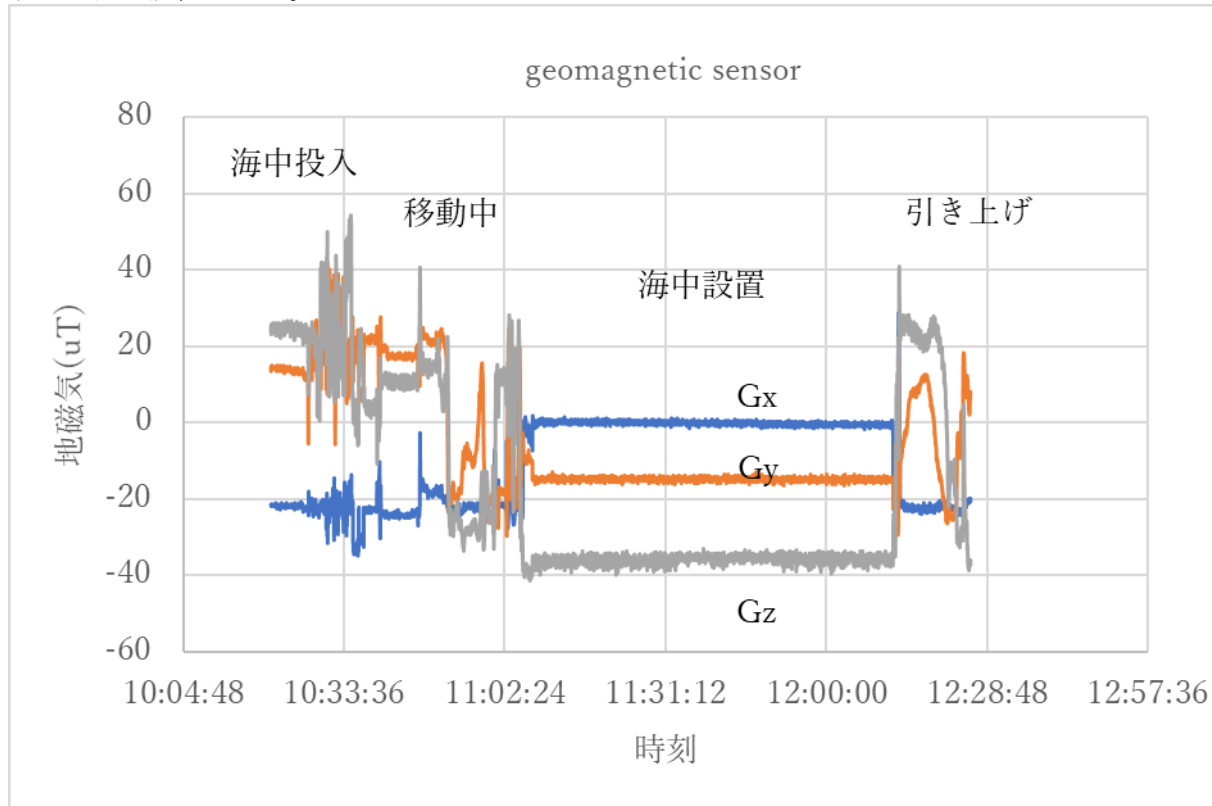


図 1 1 海中撮影実験時の地磁気センサの変化

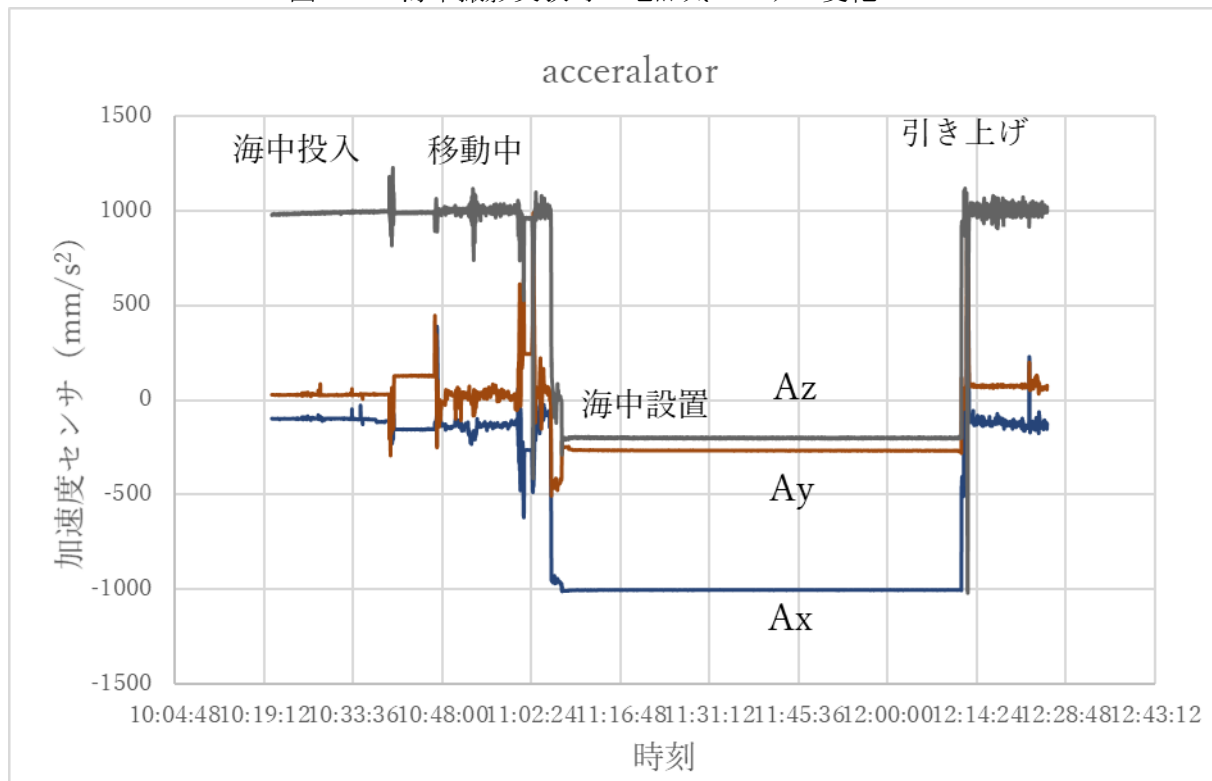


図 1 2 海中撮影実験時の加速度センサの変化

地磁気センサは本体周辺や環境の残留磁気に影響を受けやすい。今回の実験では海底設置後の地磁気の値は極めて安定している。実験結果から参考文献[5]に示される計算式を用いて設置時の姿

勢 (ZYX のオイラー角) は roll: -120° pitch: 74° 、yaw: 30° と計算される。参考までに撮影した画像を図 1 3 に示すが、画像では左側に海底があり、奥に海底が見渡せる。これは海底カメラが図 1 4 のような姿勢になっていることを示している。

このような結果からみて今回使用した地磁気センサと加速度センサによりカメラの姿勢を計測することは十分可能であるといえる。



20190110202912.942271_stereo1

図 1 3 海中実験において撮影された画像 (左側が海底)

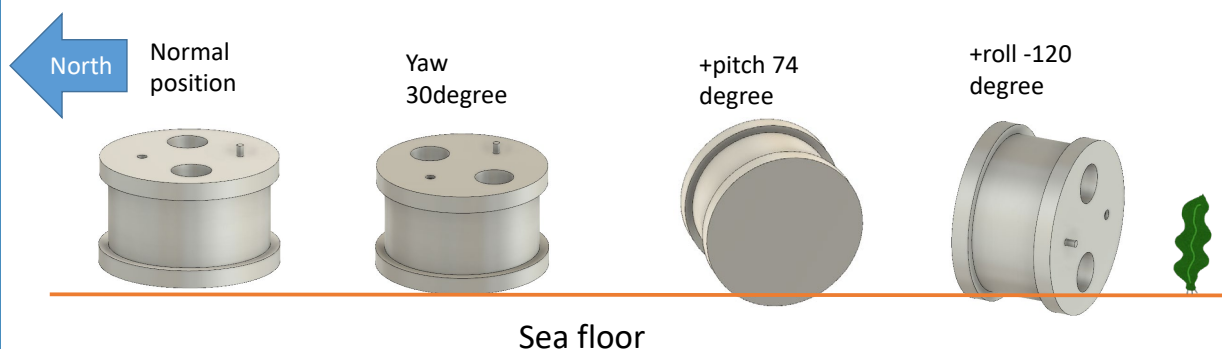


図 1 4 カメラの姿勢 (オイラー角)

■ 圧力センサ (水深)

水深を測定するために容器の外壁に水圧センサ (PGM-5KH 共和電業) を搭載している。水圧センサはダイアフラム式となっており、ダイアフラムに接続された抵抗値をブリッジにより測定する方式である。検出アンプとしてロードセルアンプ HX 7 1 1 を用いている。本実験では圧力センサの出力値 (アンプの出力) と水深の関係は正確には求められていない。

図 1 5 に前述の海中撮影実験の際の計測データを示す。この実験において投入時の水深は 3 m 程度であったが、その後水深は 4 m まで上昇した。実験データはそのような変化が示されているが断続的に系統的な数値の減少がみられる。この原因は現時点では不明である。

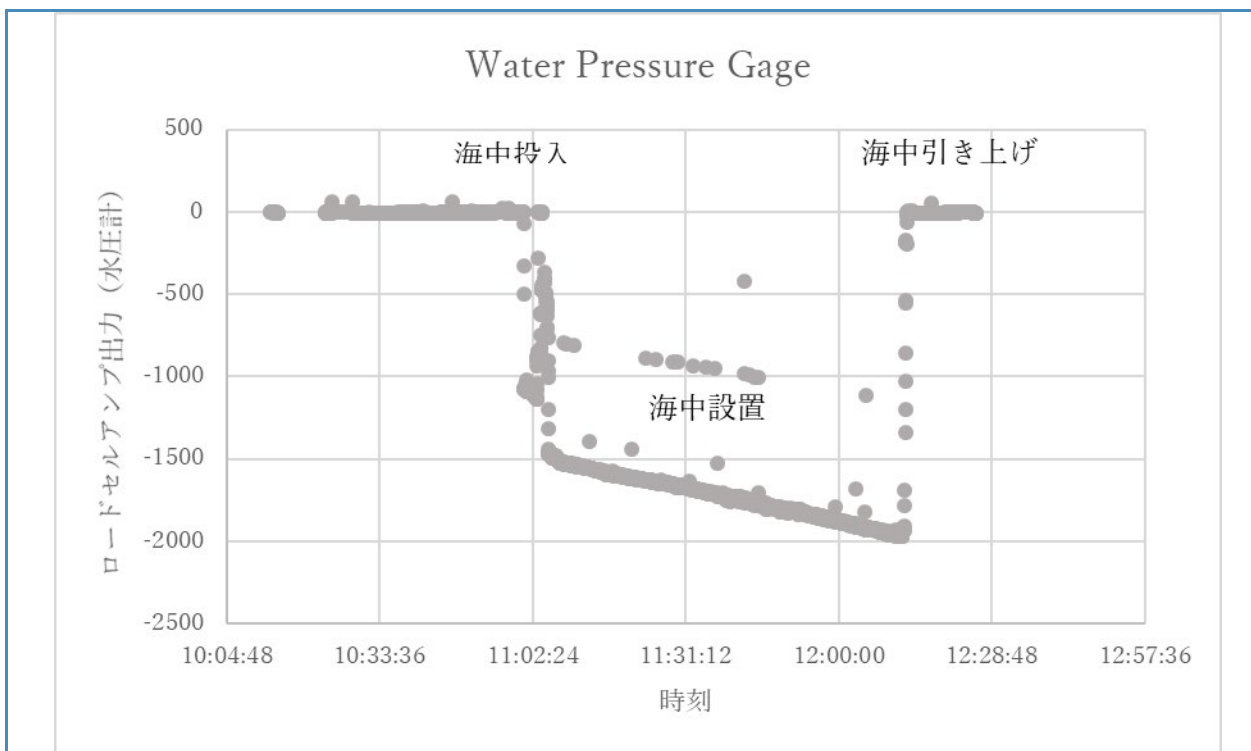


図 1 5 海中撮影実験時の圧力計の変化

■参考文献

- [1]田中 聡、村上 祐紀、伍賀正典、仲嶋一：「藻場探査用海底カメラの運用」, 2019 年電子情報通信学会総合大会、D12-52, 平成 31 年 3 月 22 日.
- [2] 田中 聡 村上 祐紀 伍賀正典 仲嶋一、藻場観測のための海底カメラの開発 福山大学工学部紀要 第 41 巻 2018 年 2 月.
- [3]田中 他：数字列のタイムスタンプを用いて同期する海底ステレオビデオカメラの動画記録システム, 電気関係学会中国支部連合大会, 2018 年 10 月 21 日.
- [4]宇野木他：海洋技術者のための流れ学, 第 2 章, 東海大学出版会.
- [5] Talat Ozyagcilar: Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors, Freescal Semiconductor Application Note, Document Number AN4248, Rev4. 0, 11/2015.

藻場環境観測システムの開発 (海底カメラに付属する測定システムについて)

田中 聡
工学部 スマートシステム学科

■ 概要

海底カメラを実験現場で運用するためには船に乗って目標の観測点に向かい、時刻合わせやシステムパラメータ設定などを現場で行う必要がある。また、水深を測定するためには、水圧計の値を補正するため大気圧を大気中で測定する必要がある。さらに取得したデータのポストプロセスのための機器やソフトウェアが必要となる。これらを表 1 に一覧表としてまとめた。

No. 1 の船上システムは船上システムは以下の 4 つの機能を持っている。

1. 流速計の計測・記録
2. GPS 位置データの記録
3. 海上の温度、湿度、気圧の測定
4. GPS による正確な時刻を持つ stratum 1 の NTP サーバの機能

No. 2 は市販の水深、水温計であり、海中に沈めて水深、水温を同時に記録する。No. 3, 4 は制作したソフトウェアである。

表 1 海底カメラのサブシステム

No	サブシステム名 (構成)	概要
1	船上システム	船上から投入する水流計やGPSロガーによる位置情報の記録。海上の気温、気圧 (リファレンス) の記録。
2	海水温計 (HOBO Logger)	海水温のプロファイル測定
3	画像データ処理システム	ポストプロセスのためのソフトウェア オブジェクトトラッキング等の画像解析
4	画像データベース	取得データおよび解析した画像データの管理のためのデータベース

■ 藻場計測と船上システム

藻場の観測では船で目的の現場に向かい、船上から海底カメラを投入する (図 1)。投入する直前の準備として有線 LAN を接続して内部の時刻を同期させる。さらに、電源制御システムの赤外線リモコンで LED を消灯させる。つぎに船のウインチや手作業で海底カメラを海中に下す。また、海底カメラには小さいブイをつけて設置場所の目印とする。観測点では測定器を用いて温度プロファイルおよび海流の流速の測定を行ない設置を完了する。

一定期間の観測が終了すると観測点から海底カメラを引き上げて回収する。これらの手順を安定して運用するための事前チェックリストを用意している。

船上システムのブロック図を図 2 に示す。測定したデータは Raspberry Pi Zero の postgresql データベースに記録されるので通信によりデータを回収できる。海底カメラを接続するときには Wi-Fi のアクセスポイントに有線 LAN で接続する。PC 等は Wi-Fi でアクセスポイントに接続する。

海上では波をかぶる場合や雨天で運用する場合があることから、防水対策を十分に行っておく必要がある。

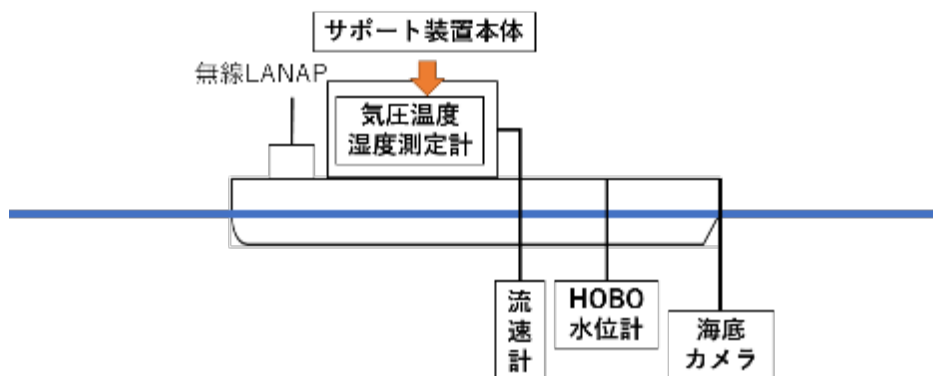


図1 観測装置

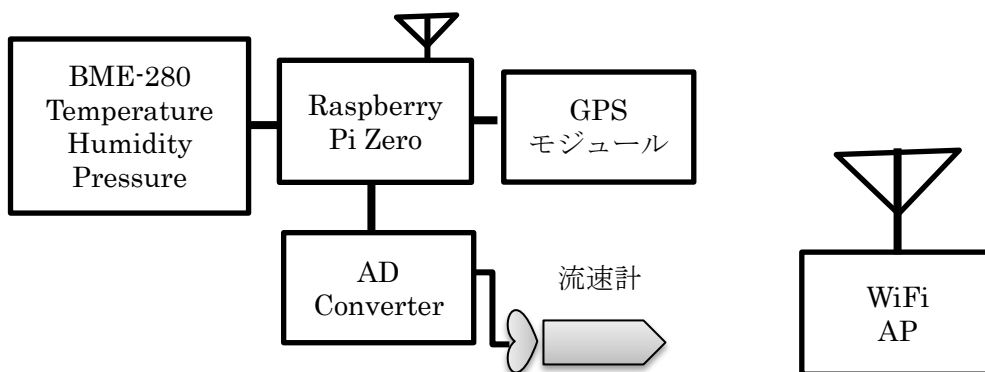


図2 船上システムのブロック図

■ 流速計

図3は実際に使用するプロペラ型流速計（株式会社東邦電探社のCM-1C）である。プロペラ部分の構造を図4に示す。



図3 流速計

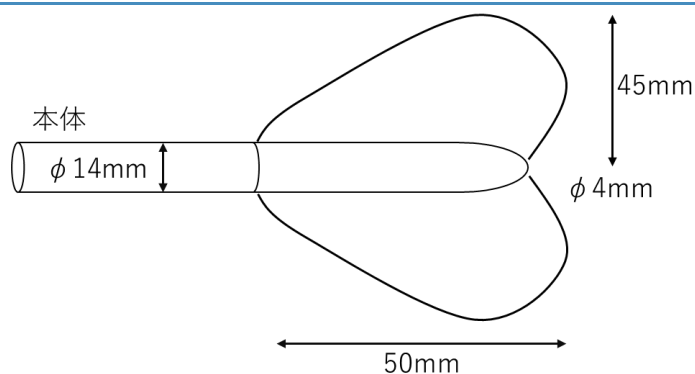


図4 プロペラ部の構造

プロペラがかき分ける水の量を計算するためにはプロペラ回転体の体積を求める必要がある。プロペラの側面から見た見かけ上の面積は画像解析結果より 12cm^2 である。プロペラを軸方向から見た回転体の最大断面積 S は $\pi \times 4.5 = 63.5[\text{cm}^2]$ である。

Solidworks に側面の外形データを写真から入力して、パプス・ギュルタンの定理を用いてプロペラ回転体の体積 V を求めることができる。結果は 46cm^3 となった。これより、水の質量 ρ 、海流速 U に対してプロペラの回転数 γ は $\gamma = \frac{U\rho S}{\rho V} = 1.38U$ [回/s] となり、回転数から流速を求めることができる。

海流計の出力電圧は直流であるが、プロペラの回転に合わせて脈動するため、ソフトウェア上で 0.1Hz 程度のローパスフィルタをかけている。

■ 水温プロファイル測定

図5の右側は海水温を測定する HOBO LOGGER [2] であり、左側は PC とのインターフェイスである HOBO シャトルである。このロガーは海上でリファレンスの気圧を測定するロガーと対で用いる。

このロガーのテストのために水深 15cm の水槽で測定実験を行った。このロガーの記録速度は最小が 1 秒ごとであるが、実験では 10 秒おきに設定して 2 時間測定した。

HOBO シャトル
(PC インターフェイス)



HOBO
データロガー



図 5 海水温計(HOBO LOGGER)

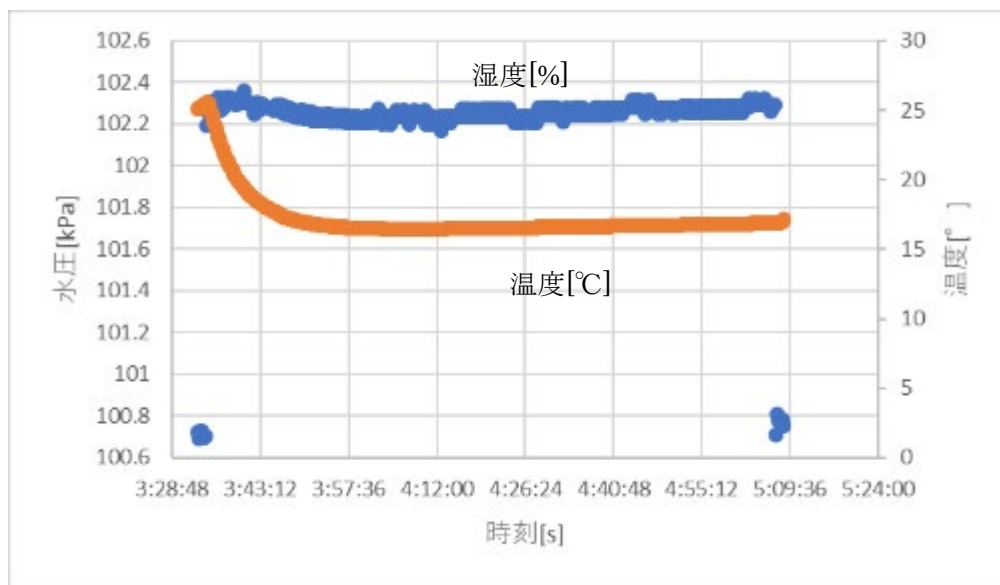


図 6 海水温計(HOBO LOGGER)の実験結果

図 6 はその測定結果である。温度が水温に到達するまでおよそ 20 分程度かかっていることがわかる。このように応答が遅いことから残念ながら目的とする温度プロファイルの測定には全く向かないといえそうだ。

■時刻同期

海底カメラでは Linux を実行しているコンピュータ間で時刻同期を行う手法として標準的な ntpd を用いている。しかしながら、同期先のコンピュータとの時刻差が 30 分以上になると自動では同期できなくなる。この場合には net time コマンドで強制的に同期させなければならない。

■ 画像ポスト処理システム

海底カメラで記録した画像やデータを本体から回収した後で、PC 上でデータ解析するためのプログラム、SBC Viewer を開発した。このプログラムは海底カメラは開発者のみならず広く他の研究者にも利用してもらうことを想定しているため、マイクロソフト Windows 上での開発が望ましいが、AI などの最新の技術を導入する場合には Linux 上での開発の方がスムーズに進む場合が少なくない。そこで今回は両者の折衷案として Windows 上で WSL (Windows Service for Linux) を動かし、そこで ubuntu Linux を実行して python 言語で動かすという方法を用いた。WSL はマイクロソフト社が提供する Windows 上の仮想 OS 実行環境であり、同社がその上で動作する ubuntu Linux を提供しているというところが強みである。プログラムは Python3 で書かれており GUI 部分は Tkinter を用いた。

図 7 は SBC Viewer のメインコンソールの画面である。この画面では表示したい H.264 形式の動画ファイルを開いて 1 フレームずつ画面に表示することができる。‘<’ や ‘>’ ボタンは 1 フレームずつフレームを前後におくるボタンである。‘<<’ や ‘>>’ は動画ファイルを切り替えるボタンである。海底カメラでは録画開始時刻の数字が動画ファイル名の一部となっているので、時刻の順序でファイルを検索できる。PLAY ボタンは通常の動画再生を指定のフレームレートで実行する。

‘TIME STAMP’ は動画ファイルのタイムスタンプを読み取って目的のタイムスタンプの画像を選び出して表示する機能である。また、動画ファイルの先頭からのフレーム番号 (先頭は 0) を用いてフレームを呼び出す機能もある。

これらの再生機能は左右の動画を独立に操作できるが、下部にある ‘<’ や ‘>’ は左右の

動画を同時にフレーム送りや再生をするためのボタンである。

‘SubMenu’ ボタンは表示させる画像を選択するサブメニュー（図 7）を表示する。

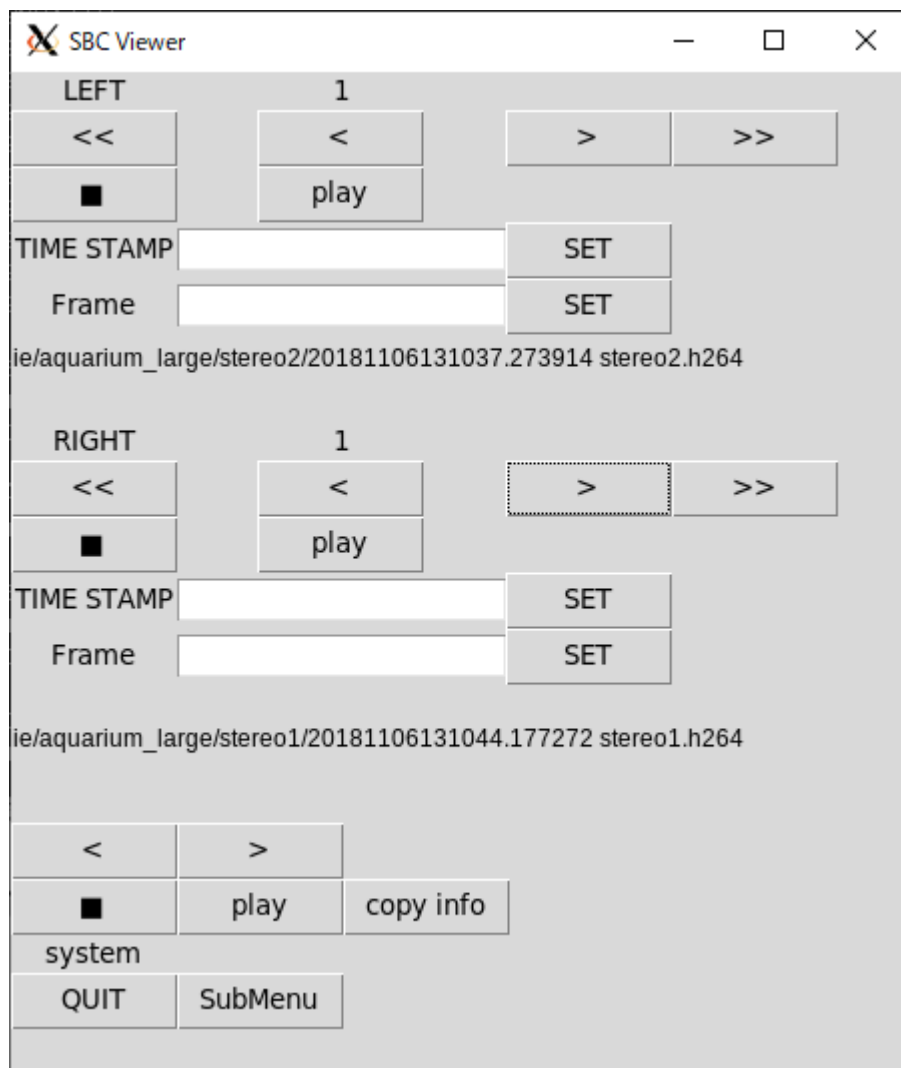


図 7 SBC Viewer のメイン画面

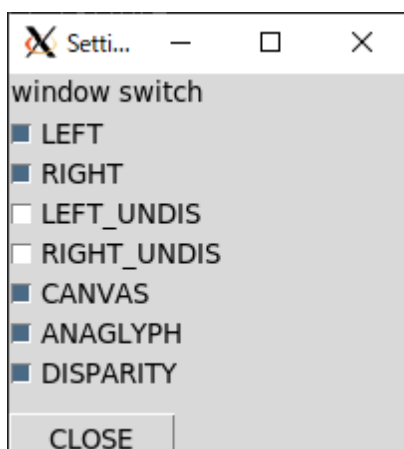


図 8 サブメニュー画面

H. 264 の動画ファイルを再生するためには次のような課題がある。

1. H. 264 ファイルは mp4 ファイルと違ってファイルシークで目標のフレームに移動できない（コーデックの問題と考えられる）。目的のフレームを読み出すには最初から読み直す必

要がある。

2. 動画ファイルは1つのフレームのすべての情報を含んでいるキーフレームと差分しか含まないフレームがある。正しくフレームを画像にするためには少なくともキーフレームから読み始めなければならない。H.264のキーフレーム間隔は60フレームごとである。
3. 「海底カメラの製作」の項に記したように、このシステムではシステムの負荷の変動でフレーム間隔が遅延しフレーム数だけで時間を計ることができない。

以上の点から、左右のカメラの同じ時刻の画像フレームを呼び出す場合を考えると、動画ファイルを1フレームずつ読み出してそれぞれのタイムスタンプをOCRで読みながら目的の時刻のフレームを探すという動作をしなければならないことがわかる。しかしながら、使用しているTesseract-OCR 4.0.0では1つのフレームのタイムスタンプを読み出すためにおよそ0.5秒かかっており、およそ20分の動画のすべてのフレームを読み出すためには2.5時間かかってしまう。そこで、このような重い処理は1回だけで済ませることができるよう[ファイル名、フレーム番号、タイムスタンプ]の組み合わせ情報をデータベース化して保存し、次に同じファイルを読み出す時にはタイムスタンプは読まないという方式とした。また、H.264でフレームシークができない点を考慮して、読み出したフレームをバッファに保存しておき、フレームを前後にコマ送りする場合などは瞬時にフレームのバッファから読み出す仕組みとした。これにより4FPSの実行速度が得られているがさらにチューンアップが必要である。

図9にソフトウェアの構成をブロック図で示す。同じ色のブロックは同じスレッドを校正している。スレッドに分割して動作するため、マルチプロセッサのシステムでは効率よく動作する。

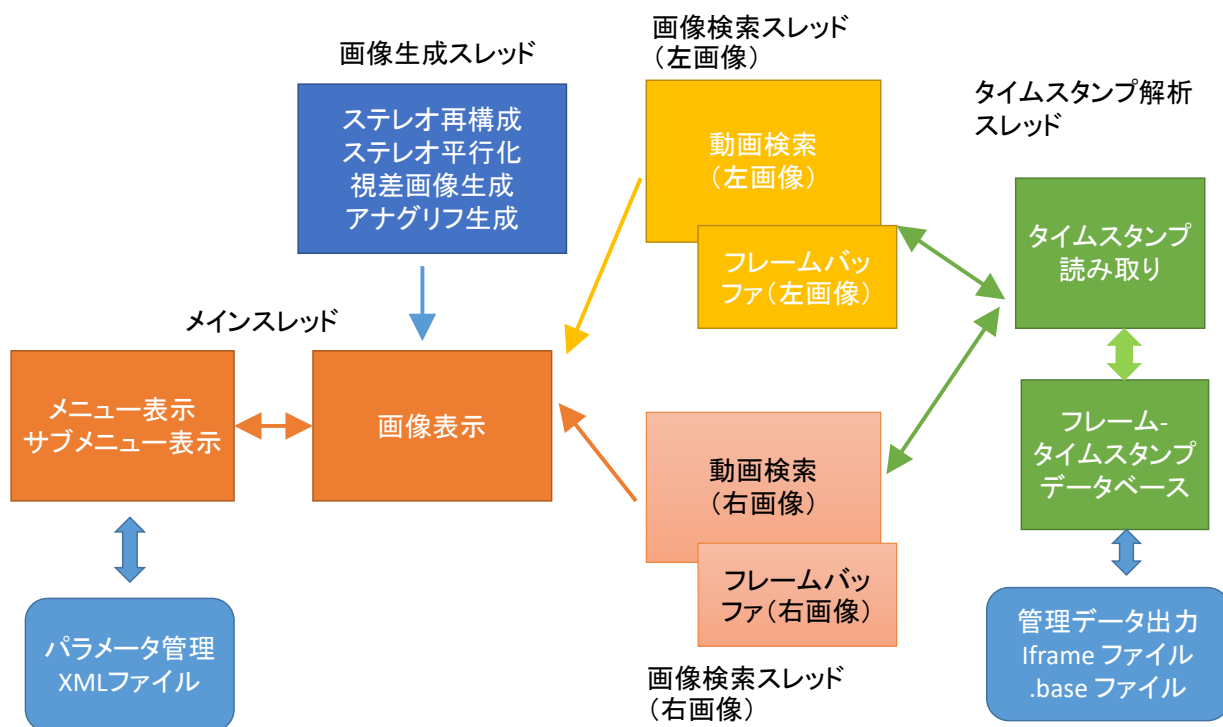


図9 SBC Viewer のソフトウェア構成

SBC Viewerの動作で保存すべきパラメータは、stereorect.xmlファイルにXMLファイルに記録する。

図10にPC上の動作画面の例を示す。

現在のバージョンでは動画フレームの検索にかなりの時間がかかることから、このパフォーマンスを向上させる。また、深度情報を数値で表示できる機能を追加する予定である。

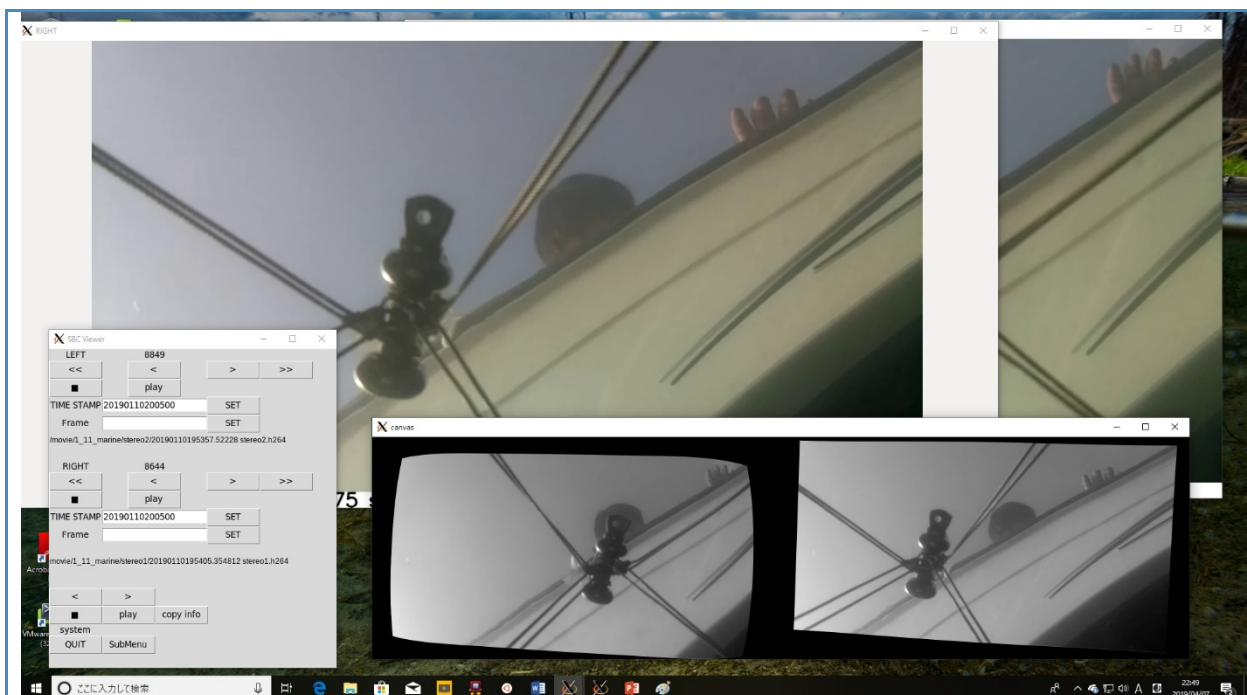


図 1 0 SBC Viewer の画面イメージ

■参考文献

- [1] 田中 聡 村上 祐紀 伍賀正典 仲嶋一、 藻場観測のための海底カメラの開発 福山大学工学部紀要 第 41 巻 2018 年 2 月.
- [2] ONSET HOBO LOGGER, <https://www.onsetcomp.com/>

藻場環境観測システムの開発 (筐体設計試作)

仲嶋一

工学部スマートシステム学科

本文

■ 目的

藻場の環境を長期に観測するためには、水圧に耐えて機器を防御する耐圧筐体が不可欠である。このため、ステレオビジョン用の2個の撮影窓を有し、最大設置水深 10m に対して十分な安全係数を持つ耐圧嚙気を設計する事を目的とした。

■ 成果

1) 設計

観測器耐圧筐体を以下の仕様にて設計した。まず、観測器には海水流速計測用のステレオカメラ、潮位測定用の水圧計、海水温計測用の温度計、方位計測用の磁気センサを搭載する。ステレオカメラは基線長を 100mm で設計されており、流速を水深毎に測定することを考慮して上方を視線方向とする。また、カメラの画角は広角方向（基線方向）で全角 61° であり、カメラとガラス面の距離は 5mm 以下に設置する。開発された処理回路系及びセンサの収納に必要な内部寸法は、対角 200mm 以上、高さ 150mm 以上である。

磁気センサを使用することから筐体材料は非磁性であることが必要であり、軽量ということからアルミニウムを使用する事とした。設計の簡単化のために JIS のフランジ設計を流用する事とし、円筒胴を差込溶接式フランジと閉止フランジにて密閉する構造を選択した。円筒の片側の閉止フランジにセンサを配置して上方に向けて設置する構造とし、上下方向を安定に設置するため反センサ側の底面にバラストとして非磁性ステンレス製の板を取り付けることとした。

筐体内寸は、上記内部測定回路の寸法制約より直径 200mm、高さ 150mm 以上であるため、円筒胴の選定としてフランジへの溶接を考慮して肉厚 6.5mm の規格品である内径 203.3mm、外径 216.3mm、の A5052 パイプの切り出しとし、それに適合する、JIS B2220 5K 200A フランジを選定した。このフランジの呼び圧力は 0.5MPa であり、圧力-温度基準によると使用温度 20~120 では最高使用圧力は 0.7MPa（水深 70m 相当）である。

この容器の強度計算は以下ようになる。

- ・ガラス窓

カメラ用の観測窓は照明用の LED をカメラ周辺に配置することを考慮し、開口径 50mm で設計した。使用したカメラ（画角 61°）の場合、カメラ/窓の間隙（空気）5mm、ガラス（屈折率約 1.5）厚 10mm の窓に必要な直径が約 14mm であることから、視野として全く問題のない径となっている。この窓の耐圧計算として、等分布荷重を受ける全周固定支持円板の最大曲げ応力 σ を計算した。最大曲げ応力 σ は、 w を等分布荷重 [MPa]、 r を円板半径 [mm]、 t を板厚 [mm] として、

$$\sigma = \frac{3wr^2}{4t^2}$$

と書ける。

水深 20m での等分布荷重（水圧）は約 0.2MPa であるので、円板半径 25mm のとき、

$$\sigma = \frac{93.75}{t^2}$$

である。フロート板ガラスの長期許容応力は日本板硝子のガラスカタログによるとエッジにて 6.9MPa であるので、安全係数 2 で約 5.3mm、安全係数 7 で約 9.8mm となる。今回は厚さ 10mm で設計しているの、設計水深 20m では安全係数 5 となるが、本来の使用条件が海藻の生息する 10m では安全係数は約 10 となる。

・円筒胴

平均半径 r 、肉厚 t の円筒に対し、薄肉条件 $t/r < 10$ においては、限界圧力 P_k は、

$$P_k = \frac{E}{(n^2 - 1) \left[1 + \left(\frac{nl}{\pi r} \right)^2 \right]^2} \left(\frac{t}{r} \right) + \frac{E}{12 \left(1 - \frac{1}{m^2} \right)} \left[(n^2 - 1) + \frac{2n^2 - 1 - \frac{1}{m}}{1 + \left(\frac{nl}{\pi r} \right)^2} \right] \left(\frac{t}{r} \right)^3$$

ただし、 E はヤング率、 m はポアソン数となるので、アルミニウム (A5052 相当品) の円筒胴、内径 203.3mm、外径 216.3mm、フランジ間 110mm においては、ヤング率を $6.93 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 、ポアソン数を 2.94 として、 $n=5$ で限界圧力 $P_k=69.7 \text{MPa}$ が得られる。

・閉止フランジ

等分布荷重を受ける円板の応力は、周辺固定指示の場合、ガラス窓で使用した

$$\sigma = \frac{3wr^2}{4t^2}$$

であり、自由指示の場合、

$$\sigma = \frac{3}{8} \frac{3m+1}{m} \frac{r^2}{t^2} w$$

となる。本設計の場合、フランジ部は固定されているが固定側の本体自体が剛体ではないため、応力は固定指示と自由指示の中間的値となると推測される。ポアソン数が 2.94 の場合、応力は自由指示の方が大きくなるのでこれを採用すると、設計板厚 20mm では圧力 3.8MPa において応力 219MPa となり降伏点となる。

センサ窓側の閉止フランジは窓穴が開けられており、平板における応力とは異なるが、十分に高い耐圧であり特に問題ないと考えられる。むしろ今回の設計は、今後軽量化、低価格化のための最適化を必要とする。

図 1 に、設計した耐圧管体の組立図を示す。気中重量はアルミ管体 18.5kg、ステンレスバラスト 27kg、総重量 45.5kg である。また、内容積 4.7ℓ から、水中重量は 30.5kg である。

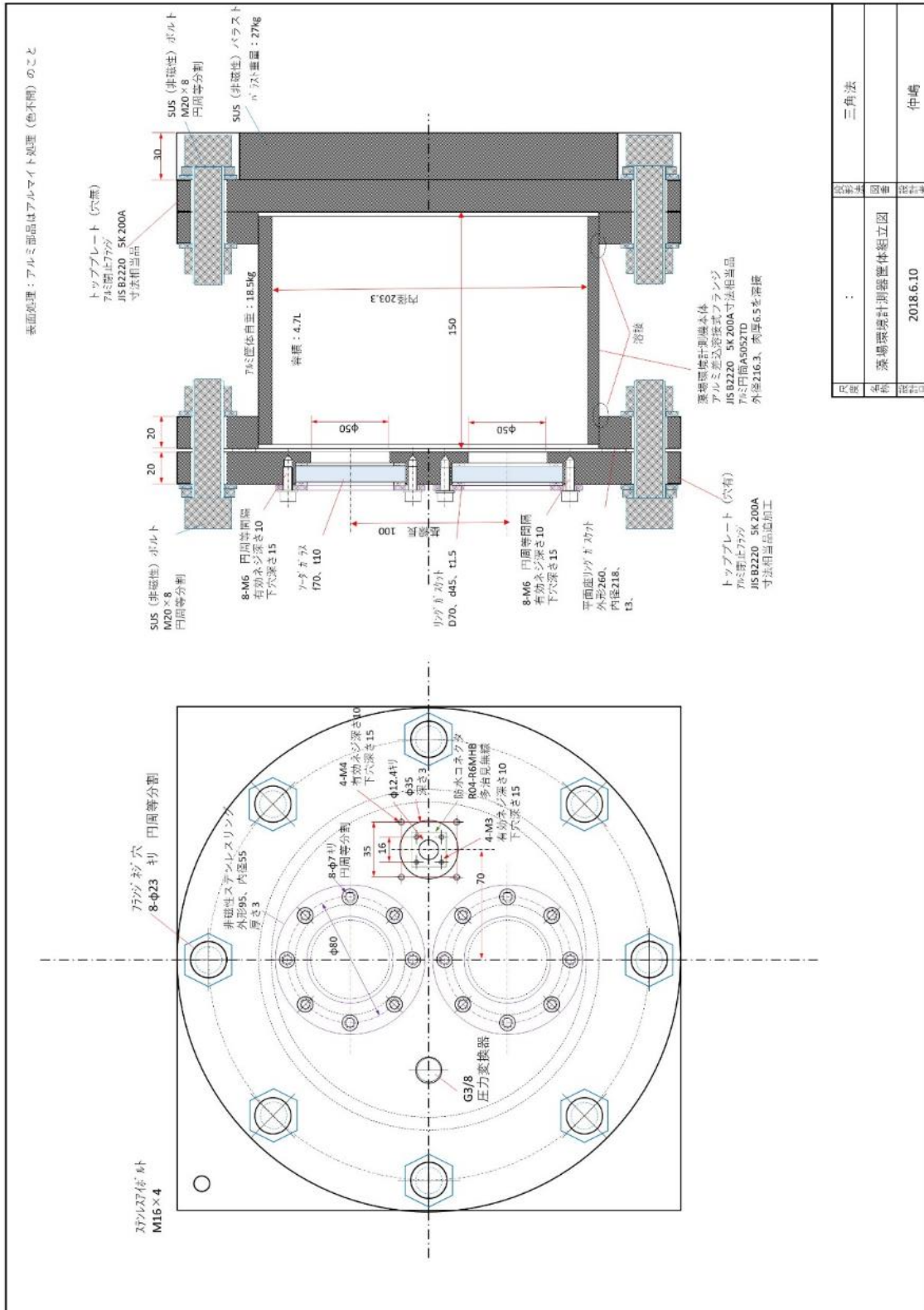
2) 耐圧性能の評価

試作した容器 (図 2) を、福山大学内海生物資源研究所の沖合である因島中浜沖にて海中投入して漏水試験を行った。バラスト付きの管体は総重量 45.5kg と重く、人力で舷側より海に投入するのは危険を伴うため、船首にウインチのある 4.9t の実習船「第二爽風丸」を使用した投入試験を行った。投入地点までの航行時の安定のため、船首に取り付けて固定した固定状態を図 2 の写真に示す。また、海中に投入した直後の写真を図 3 に示す。漏水試験においては、2 倍の安全係数を考慮して 20m の水深の位置に投入し、約 1 時間放置して引き上げ、漏水の有無を確認した。その結果、機械加工の加工段差に起因する漏水が発見されたため、改修を行って再投入試験を行い、耐圧能力が確認できたため観測機器の搭載を行って本運用試験を行う事とした。

■今後の計画

藻場環境計測器のプロト機に対応した管体の設計を行ってその性能を確認したが、内蔵するステレオカメラの基線長が長くまた回路基板が大きかったため、容器の容量が大きく隙間の多いものとなった。このため浮力が大きくなり、海底に沈降させるために空中重量の大きなも

のとなった。当初は大型の実習船のウインチを利用して海中投入を行ったが、実運用試験においては大型船の喫水の関係から 5m以浅の沿岸域に近づけず、最終的にはバラストを外した状態で小型船（全長 5.6m，幅 1.9m，定員名）の側舷から人力で海中投入，引き上げをする事とした。このため水中重量が軽く，比較的動きやすい状態となったため，次回の観測器では内容積を小さくし，空中重量を削減すると共に，水中重量との差を小さくして海底での安定性を確保できるよう改善する必要がある。



図名	深場観測計測器筐体組立図
図番	2018.6.10
図種	仲崎
図法	三角法

図 1. 耐圧筐体組立図



図 2 試作した耐圧筐体



図 3 船首に固定した状態の観測器



図 4 海中投入時

藻場環境観測システムの開発 (海底カメラによる海洋観測実験)

田中 聡 仲嶋 一
工学部 スマートシステム学科

■研究の概要 [1]

海底カメラを用いて海底の撮影と本機の性能の検証を行なった。まず、大型水槽を用いて海底カメラ容器の水密性能を検証した。次いで因島キャンパスにおいて海水への投入実験をおこない、容器の水密性能の問題点や運用上の課題を確認した。さらに藻場に投入して藻場の観測が可能なことを示した。次いで1週間の長期観測実験のために2018年3月19日に因島キャンパス沖に設置したところ、4日後の2月22日に本体が行方不明となり2019年4月5日現在も捜索中である。

■フィールド実験の研究経過

海底カメラおよびROVの動作を検証するためのフィールド実験を行った。(表1)

表1 フィールド実験と実験結果

	日時	実験項目	実験目的	結果
1	2018/10/2	大型水槽 水密試験	長時間水中に設置することによる水密性能の評価(約1日)および本体と外部の無線通信の可否を調べた	容器内部への漏水は観測されなかった。温度、湿度ともに正常。 2.45GHzのLPWAの通信は水深10cmまで可能であった
2	2018/10/19	海中投入の運用 試験	因島キャンパス沖の30mの海底に投入し水密性能と運用方法を評価(1時間程度)	内部にわずかな浸水の跡がみられた。→漏水対策の実施
3	2018/11/9	海中投入と撮影 実験	因島キャンパス沖の10mの海底に投入し水密性能の確認および海底カメラ装置の動作確認	一部の動画の撮影ができたが、投入の衝撃で電源系の一部が停止したためステレオ動画撮影は失敗。漏水はなかった。→電源系の改修
4	2019/1/11	藻場撮影実験	電源回路を改良したカメラを3mの深さの藻場に投入しステレオ動画撮影(約1時間)	藻場のステレオ動画撮影に成功→長時間動作のために電源系の改修
5	2019/2/25	藻場撮影実験と ROVの運用テスト	電源回路を改良したカメラを2mの深さの藻場に投入しROVの運用を同時に行う運用試験	水密コネクタのキャップが閉じられていなかったために容器が浸水し電源停止。ROVの運用にも課題が残された。→電源系を本体ボードと一体化してバッテリーの増量
6	2019/3/15	ROVの運用の習 熟	因島キャンパスの大型水槽においてROVの運用の習熟	ROV運用に大きな問題がなかった。

7	2019/3/19	長期間の藻場撮影実験のための設置作業	因島キャンパスの藻場に設置して昼夜 1 週間の長期藻場撮影実験	4 日後にブイとともに本体が行方不明
8	2019/3/25 2019/3/26	本体の搜索	海上から肉眼と釣用の水中カメラを投入して搜索 周辺海域の沿岸の回り調査	行方不明
9	2019/5/7	本体の搜索	大潮に合わせて海上からビデオ撮影による搜索	

■ 水密試験

製作した容器の水密試験は工学部棟にあるアクリル製の大型水槽と因島マリンバイオセンタの前の海中でおこなった。大型水槽は水深が 1 m 程度しかないが図 1 のように水中にクレーンで投入して 1 日放置して漏水をチェックした。

一方、海中の実験では海底カメラ容器に除湿剤のみを入れて水深が 30 m の場所に海中に 1 時間程度設置した。

水槽の実験では 1 日経過しても全く漏水は見られなかったが、30 m の水深ではわずかな漏水が見られた。これはステンレスのフランジふたの部分の平滑度がわずかに不十分でガスケットの間に隙間ができることが原因とみられた。また、水深 30 m は設計上の上限であることからこれほど深いところでの運用は避けることとした。また、浸水対策としてフランジふたの平滑度を上げるための再加工を行い、ガスケットのまわりを液体ガスケットで補強した。



図 1 容器の耐水試験（大型水槽）

■ 水中無線通信の実験

海底カメラの内部に 2.45GHz 帯の無線通信モジュール TWE-LITE (RED)^[2] (モノワイヤレス株式会社製) を入れて最大出力 10mW で外部の受信アンテナとの間で通信実験をおこなった。TWE-LITE の送信アンテナはマッチ棒アンテナであり容器の唯一の開放部分である窓のそばに置いた。受信アンテナは図 2 のように水槽の外部に高利得アンテナを設置した。

結果として本体が水面から 10 cm 沈んだところで通信ができないレベルとなった。これは受信アンテナを水槽のどの位置にもっていても受信できなかった。



図 2 無線通信の実験

■ 海中撮影実験

2018 年 11 月 9 日の動作実験はカメラの電子回路を搭載して行った初めての撮影実験である。実験は広島県尾道市因島に所在する福山大学内海生物資源研究所(マリンバイオセンター)近くの海で実施した (図 3)。



図 3 実験海域(Google Map より引用)

この実験では水深 10m の海中における海底カメラ映像の取得とカメラの動作を確認するためのものである。海底カメラは 27kg のステンレスバラストを装着し、海底までウインチを用いて船上から沈めた。本体は海底カメラのバラストを支点としてステンレスワイヤーでロープに吊り上げている(図 4)。ブイとして 30cm 径の浮き球をロープ端にとりつけてあり、設置場所の目印としている。

カメラの総重量は 40kg にもなるため船のデッキから手作業で降ろすことは難しいため次のような手段で実験場所に運搬した

1. 船首のウインチを用いて海底カメラを船の船先にロープで懸架する。
2. そのまま海中沈め、控え索を張って本体のゆれを防ぐ。
3. 図 5(a)のように水中に沈めた状態のまま観測実験ポイントまで運搬する。
4. 観測ポイントでウインチを動かしてロープをそのまま下し、海底に海底カメラを沈め、ブイを浮かべる。(図 5(b))
5. 回収時はブイをフック付の船竿で引っかけて船体にあげ、そのままウインチを動かし、ロープを巻き上げ回収する。

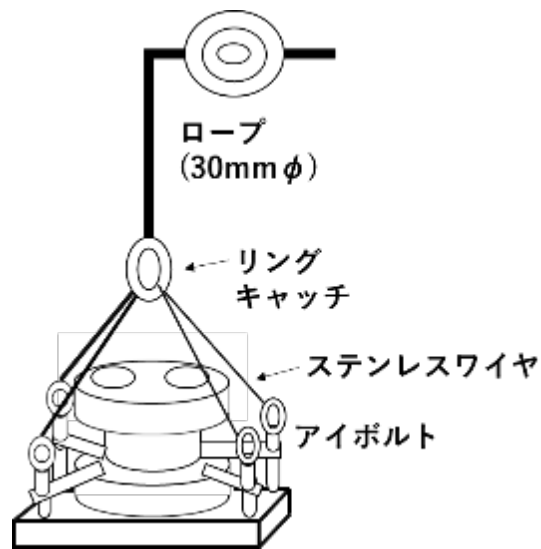


図 4 海底カメラの吊り下げ

重量のある海底カメラは運用が難しく大きな課題となった。

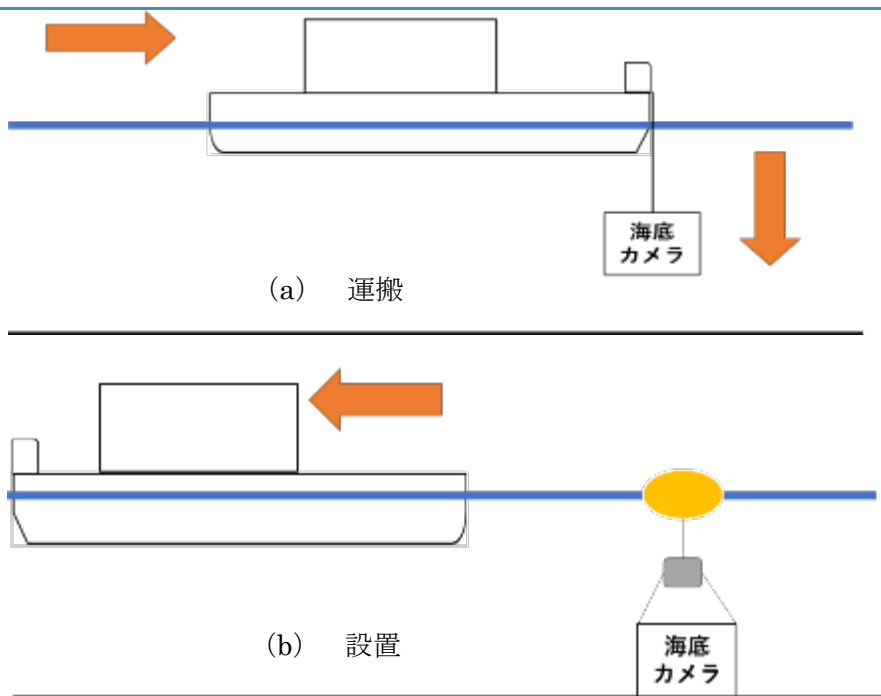


図 5 海底カメラの運搬と設置



図 6 海底カメラ搭載（重いのでロープ作業となる）



図 7 海底カメラの投入（船首のウインチでゆっくり下ろす）



図 8 海中に投入されるカメラ



図 9 浮かべたブイにより設置場所がわかる



図 10 陸揚げ作業（重いので慎重にロープ作業をする）

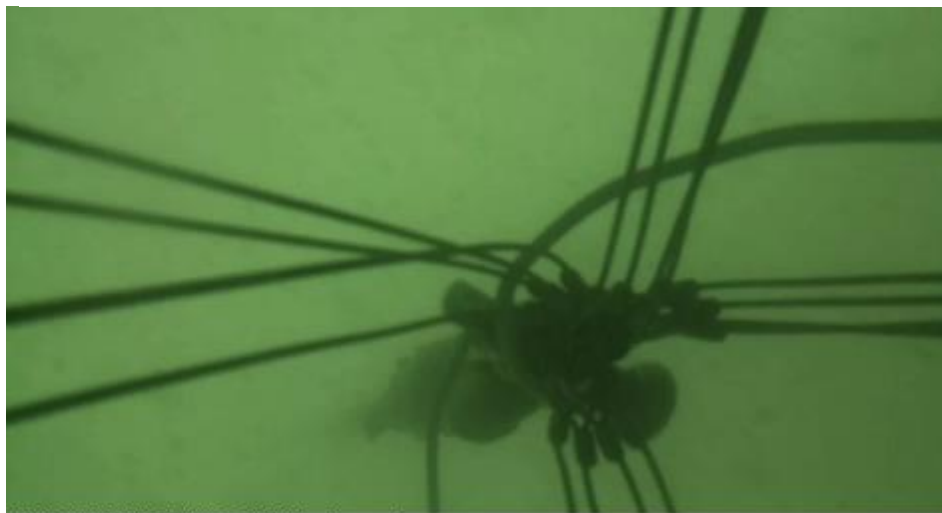
■ 海底の撮影実験

海底カメラにカメラ部品等の電子機器を搭載して10mの深さで撮影実験を行った。モバイルバッテリーに接続したUSBコネクタがカメラの設置作業の衝撃でゆるんだため、2つのカメラのうちの1つが停止してしまった。しかしながら、1つのカメラでの海中動画の撮影には成功した。図11以降に撮影で来た画像を紹介する。なお、カメラをつり下げるワイヤやそれを束ねるリングキャッチが画面内に入る。カメラからリングキャッチまでの距離は450mmである。



20181108014300.509308 stereo2

図 11 船から降ろされていく海底カメラ（船底が写っている）



20181108015749.129511 stereo2

図 12 海底への着地時（緑色で何も見えない。視界は1 mもない）



20181108015834.253945 stereo2

図 13 魚影がカメラの端に現れた

11月はまだ暖かく海水中のプランクトンの量も多い。このため海水の透明度は1mもないという状態である。その中で1度だけ魚影が見られた。図11の画像が他の画像に比べて灰色がかがっているのは当時の天気が曇りであり、水深の浅いところでは空の色がそのまま反映されている。

■ プロペラ型流速計の運用実験

プロペラ型流速計を用いて海流の測定を試みた。流速の結果は得られたものの海洋では河川と違って頻繁に流速が変化することから計測には流速のみならず方向も同時に測定しなければならないことが明らかになった。ただし、海中にある流速計では、海面が風により波面が移動する方向とは明らかに異なる海流の流れ方向を示すことが実験で確かめられた。この点から、陸上からマイクロ波レーダやドローンの画像で流速を測定する方法は信頼性が低いと予想される。



図14 プロペラ流速計の運用

■ HOB0 ロガーの運用実験

HOB0 水温・水深ロガーを用いて海水温のプロファイル測定を試みた(図14)。HOB0 ロガーはロープで吊り下げて時間をかけて海中に投入する。図15が実験結果である。水圧は水深に該当する。数回の投入と引き上げを行っている。

水圧の変化に対して温度変化が極めて応答が遅いことがわかる。別稿に水槽実験の結果を示しているが、早い上げ下げが必要な実験にはこのロガーは向いていないといえる。



図15 海水温の測定実験

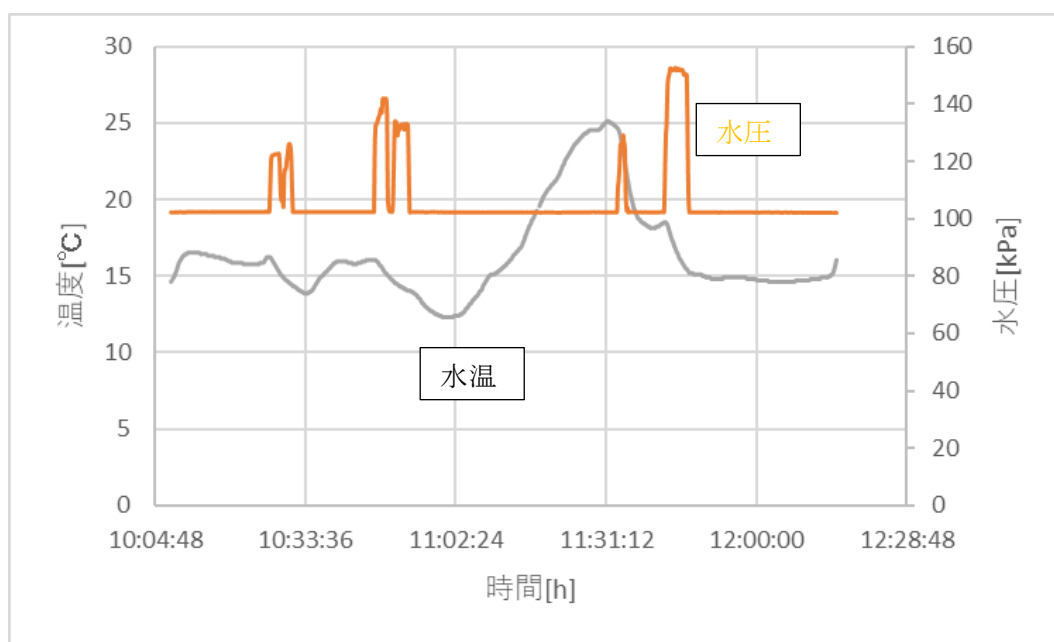


図16 水温・水深プロファイラによる海洋の温度測定

■ 海中調査実験

2019年1月11日海底カメラを用いて藻場を海中撮影する実験を行った。内海生物資源研究所の近くの八重子島周辺にある海域で実施した(図17)。



図17 八重子島周辺(Google Mapより引用)

八重子島周辺は因島大橋の下の水道から少し離れているので流速が1ノット程度と本流部分より弱いので海底カメラの27kgのバラストを外した状態で投入することとした(図18)。水中重量は約5kgとなる。この状態であれば人力で船上を移動させ、設置ひきあげが可能である。また、実験場所の藻場は水深が浅いので喫水制限の小さい第一爽風丸(図19)で移動した。



図18 バラストを外して軽量化した海底カメラ



図 19 (第一) 爽風丸

海底カメラとブイを 10mm φ の細い状態で目的地に手作まで持ち上げて投入した。水深は約 2m~3m であった。ブイが設置ポイントで浮いていることを確認して 1 時間放置し、回収時はブイを掴んで船体に運び回収した。海底に到着時にカメラが横倒しとなり水面ではなく水平方向にカメラが向いてしまっているため海底の映像が撮影できている。画像を縦長に表示しているのは画面方向も横倒しになっているためである。

図 20 から海底の撮影画像を紹介する。



図 20 海中に投入した海底カメラ (船上から)



図 21 アカモクの中を藻場に降りていく



図 23 海底に生物が現れた



図 24 多くの海藻が見られる

観測は1月の冬場に行っているが夏、秋と違い海水の透明度が高く、およそ6m以上の遠方を観測することができる。また、生物相も豊かで多くの海藻を見ることができた。

■ フィールド実験の結果[3]

海底カメラのフィールド実験により得られた課題と次期バージョンの海底カメラの製作に向けた対策を表2に示す。

表 2 海底カメラの課題と対策

機能	課題	対策
漏水対策	除湿剤では漏水に対応できない	吸湿ポリマーを併用して早く水を排除する
本体重量	重過ぎると船の上での運用が難しい。軽すぎると流出や盗難の懸念がある	ウエイト部分と本体部分を分離して本体部分だけを引き上げても持ち上がらないようにする。
モニタリング	水中では無線通信ができないため、リアルタイムの情報共有や状態監視ができない。	周辺に防犯カメラをとりつける。LPWANを用いたモニタリングシステムの導入
バッテリー	モバイルバッテリーのUSBコネクタが抜けやすい。 内蔵できるバッテリー容量が不十分	モバイルバッテリーの使用をやめる。 本体基板と電源基板を一体化する。 本体外部にバッテリーパックをつけ、増設できるようにする。
LEDライト	LEDライトがカメラに映りこむ	観測窓とライトを一体化して光の反射を少なくする。

プロペラ型流速計の運用や水温ロガーの運用でも課題が多かった（表3）。これらについては大幅な見直しが必要である。

表3 海底カメラサブシステムの課題と対策

機器	課題	対策
プロペラ型流速計	河川では流れの方向が一定であるが、海洋では方向が頻繁に変化するため、方向も同時記録する必要がある。	超音波流速計の導入。 コンパスを統合した方向を自動記録する流速計の開発予定。
HOBO 水位計データロガー	温度測定の応答時間が極めて長い（20分）のため、水温プロファイル測定に極めて時間がかかる。	熱容量の小さい水温計の導入。多点同時計測のできる光ファイバ温度計など。

■ 謝辞

本実験を実施するにあたりご協力いただいた福山大学生命工学部海洋生物科学科の有瀧 真人センター長をはじめスタッフ各位、操船や観測のお手伝いをいただいた、藤井船長以下の各位に深謝いたします。また、本学科の卒業生の村上祐紀君の地道な努力に敬意を表します。

■ 参考文献

- [1] 村上祐紀：「藻場探査用海底カメラのための物体追跡技術の開発」福山大学工学部スマートシステム学科 2018年度卒業研究論文.
- [2] モノワイヤレス株式会社: <https://mono-wireless.com/jp/index.html>
- [3] 田中 聡・村上祐紀・佐賀正典・仲嶋 一：藻場探査用海底カメラの運用, 2019年電子情報通信学会総合大会, D-12-52, 2019年3月22日.

藻場環境観測システムの開発 (観測補助用 ROV の導入)

仲嶋一

工学部スマートシステム学科

■ 目的

環境観測器を藻場の中に投入する際、投入前に海底環境や藻場の生育状態を把握する事、投入時に所望位置に設置されているか確認する事は信頼性の高い環境データを得るために重要である。海中探査ロボットは別プロジェクトにて開発中であるが、開発には時間を要するため、本環境観測システムの補助とするため市販の ROV (Remotely operated vehicle) を購入し、支援 ROV システムを構築することを目的とした。

■ 成果

1) ROV の選定

数種類の ROV が市販されているがその仕様は様々であり、速度重視のもの、無駆動時の浮上を基準としスラストによる駆動により潜水を行うものなどがある。藻場や観測器の筐体を観測するためには定位置での安定なホバリング、特に海底近くでの砂泥の巻き上げを抑えるため、極力スラストを使わないでホバリング可能なものが必要であり、予算内での購入の可能な ROV として OpenROV を選定した。

仕様を表 1 に示す。

表 1 ROV の仕様

重量	2.6 kg
寸法	L 300 mm×W 200 mm×H 150 mm
最大深度	100 m
最大速度	2 knots
バッテリー駆動時間	2～3 hour
浮力	中性

2) 全体構成

図 1 に全体の構成を示す。ROV (左) と遠隔操作用の水上機器は約 50m のテザーで結ばれており、Ethernet を介して端末と通信を行う。ROV は初期状態で正浮量となっていたため、48g の金属片を船体下部に装着し、中性 (若干の正浮量) となるように調節した。テザーは購入状態では通信線を兼ねたツイストペア線であり、テザーの受ける海水の抵抗を考慮したものと思われるが、非常に細く強度を考慮したものではなかった。本機は藻場で用いるものであり、アカモクなどの長い藻に絡まるのが想定され、引き上げが必要であるが、既製のテザーでは断線の恐れがあるため、φ0.85mm のナイロンテグスを追加して装着している。実環境でもアカモクに絡まって航行不能になる事態が発生し、テグスを用いて引き上げを行った。図 1 の写真の右側のボックスは通信用の Ethernet 端末及び USB 分配部に海水が付着するのを防ぐためのプラスチック密封ケースである。



図1 全体構成

3) 運用試験

福山大学マリンバイオセンター水族館およびその前面の因島中浜沿岸にて運用試験を行った。水族館の大水槽にて観察動作の安定性の評価を実施したが、ほぼ中性浮力であるため上下動用のスラスタを停止しても短期間（10秒程度）であれば図2のように位置を保持しており、容易にホバリングが行えることが確認できた。

図中矢印で示すところにテザーが写っているが、負浮量であり水底を引きずる状態となっている。このような状態で図4のようなアカモク等のガラモ場に侵入するとテザーが絡まって航行不能となることが容易に想像でき、先に述べたように、実際の現場の運行にてアカモクに絡まるトラブルが発生しテグスにより引き上げざるを得ない状態となった。このようなことを避けるため、ワイヤレスの藻場探査ロボットを開発中であるが、当面の運用としてはテザーの絡まりを極力抑える工夫が必要となる。

また、製品の初期状態ではテザーはROVの尾部に締結されており、このためROVが母船より遠方に航行するとテザーの引きずり力が増加し、ROVの尾部を後ろ側に向けるモーメントが大きくなって回頭できなくなる現象が発生した。このため、テザーをROV上部のほぼ重心位置に締結しなおし、テザーを引きずる力が回転モーメントとならないように修正している。

しかしながら、海底の状態は明瞭に観測でき、藻場観測器の投入予備調査のみならず、藻場の生態系の観測にも適用可能であることが判った。但し、生態系の観測には最適化のための追加のシステムアップが必要になるとと思われる。



図2 水族館大水槽での試験の様子（ホバリング）



図3 操作の様子



図4 因島中浜沖のアカモク



図5 因島中浜沖での ROV 撮影画像 (1)



図6 因島中浜沖での ROV 撮影画像 (2)

■今後の計画

本機は藻場環境計測他藻場研究のための事前調査等の補助機をして継続的に使用するが、藻場生態系の観測機として適用できる可能性がある。その場合には、船舶からの投入・遠隔操作でなく、陸上から夜間も含め長時間の遠隔操作、観察を行う必要があり、給電方法、テザーの扱い、通信方法の開発が必要である。専用海中ロボットの開発と並行して生態系観察機としての適用検討を進め、専用機開発のための知見の獲得にも供する予定である。