

技術報告

ワカメ養殖のための 低コスト表層水温計測ブイシステムの開発

手塚尚明*¹・吉田吾郎*¹・多田篤司*²・棚田教生*²・中西達也*²

Development of a low-cost sea surface temperature monitoring buoy system for
wakame *Undaria pinnatifida* cultivation

Naoaki TEZUKA, Goro YOSHIDA, Atsushi TADA, Norio TANADA and Tatsuya NAKANISHI

With the recent trend of ocean warming, poor growth of seedlings and damage from grazing by herbivorous fish have become prominent problems affecting the cultivation of wakame *Undaria pinnatifida*. In this study, we describe the development of a low-cost self-built buoy device that can be used for sea surface temperature monitoring of wakame seaweed farms. This device is a Raspberry Pi-based sensor node enclosed in a buoy body with wide top and narrow bottom diameters made of PVC pipes and fittings. We performed several operational tests at sea and demonstrated stable operations for 7 months, attesting to the feasibility of operating this low-cost self-built sensor device at sea.

キーワード：温暖化, 水温モニタリング, Raspberry Pi, 海藻養殖
2020年10月20日受付 2021年11月17日受理

近年、海域の温暖化傾向に伴い沿岸域の生態系には様々な変化が見られている (Serisawa *et al.* 2004, Yamaguchi 2010, Kiyomoto *et al.* 2013, 中西ら 2019)。主に西日本沿岸のワカメ *Undaria pinnatifida* 養殖場では、近年、秋季の養殖開始時期に水温の低下が遅れ、種苗の生育不良や魚類等による食害がしばしば発生している (棚田 2016, 桐山ら 2018, 棚田ら 2019)。ワカメ養殖場の水温をリアルタイムに把握し、水温低下のタイミングに合わせて養殖を開始することで、種苗の生育不良や食害を回避できる可能性があるが、市販のリアルタイム水温計測システムは通常高価で手軽に導入できない。また、沿岸域では、公的研究機関により定期的に水温等のモニタリング調査が実施され、長期的な高精度水温情報が得られているものの、時空間的な分解能には限界がある。

一方、近年IoT機器の普及が進み、様々なセンサから得られる膨大な情報の活用が進められており、農業分野でも低価格なマイコンボードやセンサを利用した生産管理が行われている (深津 2014)。

海域では機器の防水や電源、通信環境、費用対効果の問題から、ワカメ養殖等の沿岸漁業では通信機能を備えたセンサの利用はほとんど進んでいないが、和田ら (2008) は独自開発した水温計測端末を漁業用のブイに取り付け、水温計測値を専用データベースサーバに送信するシステムを構築し、実海域において運用を行っている。Tezuka *et al.* (2016) は、低価格マイコンボード Arduino とソーラー電源を組み合わせたフィールドサーバ (深津・平藤 2020) を干潟上に設置し、画像モニタリングを行った事例を報告している。市村ら (2017) は、

*¹ 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所 (廿日市庁舎)
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5

Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan
tezukan9@fra.affrc.go.jp

*² 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課

低価格マイコンボード Raspberry Pi とソーラー電源を組み合わせた、水温、電気伝導度、画像等のモニタリングシステムを、ノリ漁場内の航路塔に設置し運用を行った事例を報告している。荒木ら (2018) は Raspberry Pi と電源管理モジュール、ソーラー電源を組み合わせた省電力な水温計測端末の構成例を報告している。江崎ら (2019) は Raspberry Pi とソーラー電源を用いた水温、電気伝導度、画像等のモニタリングシステムをカキ筏上で運用した事例を報告している。しかしながら、低価格マイコンボードを使用したシステムを海上で長期間安定して作動させるには、プログラムやハードウェア構成の検討に加え、電源、防水方法、設置方法の検討が必要であり、実際にこれらのシステムを海上で長期間安定して運用した事例や、その際に生じる問題、作動安定性の評価についてはほとんど報告がない。

本研究は約半年間に及ぶワカメの海面養殖期間を通じて安定して作動する低コスト表層水温計測システムの実現を目的とし、低価格マイコンボード Raspberry Pi と DS18B20 防水温度センサを使用した水温計測端末を上下異径の塩ビ配管製ブイ本体に収容することで、作動安定性の高い水温計測ブイ端末を開発するとともに、海上での長期間 (約半年間) の作動検証によりその実用性を評価した。本研究における低コスト表層水温計測ブイシステムは、以下の仕様を満たすものを開発目標とした。

- ・市販モジュールを使用し材料費5万円以下で製作可能
- ・表層水温を1日2回以上計測しデータ送信
- ・約半年間の海上作動を実現する安定性と防水性
- ・水温計測精度は $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以下
- ・片手で持ち運び可能なサイズ

これらの仕様は、約半年間のワカメの養殖期間中、表層水温 (国内ワカメ養殖場の水温範囲はおおよそ 5°C か

ら 25°C) をある程度精度よく計測可能であり、計測頻度は高頻度である必要はないが、安定して作動する、小型で安価な水温計測システムの実現を目的としたものである。また、電源には乾電池を使用し、海面上に直接投入使用可能な、小型で可搬性が高く防水性の高いブイ仕様とした。加えて、構成部品に市販モジュールを採用することで、誰もが製作し導入可能な自作型システムの実現を目指した (深津・平藤 2020)。

材料と方法

本節では、水温計測端末の構成および設定、ブイ本体の構成、水温センサの誤差評価、ならびに海上作動テストの方法について順次述べる。水温計測端末の部品やプログラム等の一部は、海上作動テストの結果を踏まえて適宜変更、修正した。これらの変更、修正点については本節 (材料と方法) に記述し、詳細な理由については次節 (結果) に記述した。

水温計測端末の構成 水温計測端末は、低価格マイコンボードとして普及している Raspberry Pi (Raspberry Pi 財団) をベースとし、Raspberry Pi に接続可能な水温センサ (DS18B20 防水温度センサキット、後半のテストではキット付属の水温センサを樹脂封入タイプの SEN-11050 に交換)、通信モジュール (AK020)、および電源管理モジュール (Slee-Pi2) を用いて構成した (写真1)。最終的な水温計測端末の構成部品および参考価格を表1に示した。Raspberry Pi には複数のモデルが存在するが、消費電力の小さなモデル A+ を使用し、電源管理モジュール (Slee-Pi2) と組み合わせ間欠的に作動させることで、省電力で安定した作動が可能な構成とした。電

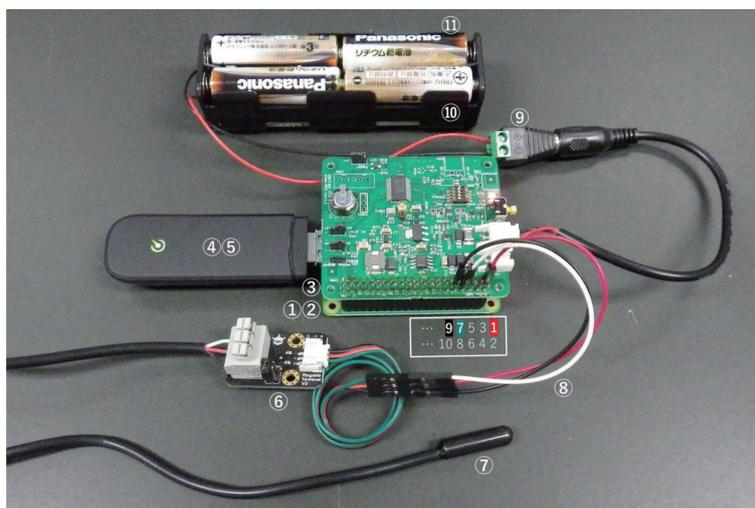


写真1. Raspberry Pi をベースとした水温計測端末

白丸数字は表1の部品番号と対応

白枠内の色付き数字は水温センサキット配線の接続ピン番号 (1番: 3.3V, 7番: データ線, 9番: GND)

源には単三リチウム乾電池を8本直列で電池ケースに収容して使用し、Raspberry Pi上に重ねて取り付けられた電源管理モジュール経由でRaspberry Piに電力を供給した。なお、電源は後述するブイ本体に収容可能なサイズとするため単三8本電池ケースを使用した。電源管理モジュールには電圧コンバータが内蔵されているため、6Vから24Vの任意の電源を接続できる。また、単三アルカリ乾電池を使用してもほぼ同様に作動するが、単三リチウム乾電池は単三アルカリ乾電池に比べ電池容量が大きく作動期間が長いことや、軽量、低温に強い等の特徴がある(Panasonic 2021)。水温センサは、キット付属の基板とジャンパワイヤを介してRaspberry Pi(正確にはRaspberry Piに取り付けた電源管理モジュールのピンヘッド)に接続した。なお、キット付属の水温センサはステンレス管に封入されており、後述する海上作動テストでは当初キット付属の水温センサを使用した(テスト1, 2)、腐食する場合はあったため、後半のテスト(テ

スト3, 4)では樹脂で封入された同型(DS18B20)の水温センサ(SEN-11050)に交換した。通信モジュールにはSORACOMのSIMカードを挿入し、データ送信先にはSORACOMのデータ保存および可視化用サーバ(SORACOM Harvest)を利用した。これらの水温計測端末を構成する部品はハンダ付けせずに接続可能であり、容易に組み立て可能である。また、構成部品の合計価格は3万円以下と安価であり、月額500円程度(SORACOMのSIMカードおよびサーバ使用料金)で運用できる。

水温計測端末の設定 Raspberry Piは起動後、水温計測、データ送信、次回起動時刻設定、シャットダウンを繰り返すよう、OS(2019-04-08-raspbian-stretch-liteを使用)の導入や各種設定を行うとともに、メインプログラムおよびパラメータファイルを導入した。Raspberry Piの設定手順を表2に示した。

メインプログラムは、事前に室内にて1時間毎に1ヶ

表1. 水温計測端末の構成部品および参考価格

部品番号	品名(メーカー, モデル, 品番等)	参考価格(円)
1.	Raspberry Pi (RS, model A+, RS 品番 833-2699)	3,000
2.	microSDHC カード (Toshiba, Exceria, 8-32GB)	1,000
3.	電源管理モジュール (Mechatrax, Slee-Pi2)	12,100
4.	通信モジュール (エイビット, AK-020)	5,500
5.	SIM カード (SORACOM, plan-D, Harvest 有効化) (500円/月)	
6.	水温センサキット (DFRobot, 防水 DS18B20 キット)	1,000
7.	水温センサ (SparkFun, 防水 DS18B20, SEN-11050)	1,500
8.	ジャンパワイヤ (SEEED, オス-メス, SEEED-110990045)	700
9.	2.1mm 標準 DC プラグ-スクリュー端子台 (秋月電子)	100
10.	電池ホルダ (タカチ電気工業, SN3-8A)	200
11.	単三リチウム乾電池 (Panasonic, FR6HJ, 8本)	2,000
	(合計)	27,100

表2. Raspberry Piの設定手順

1.	OS インストール (2019-04-08-raspbian-stretch-lite)
2.	1-wire 有効化(水温センサ用), UART 有効化(USB シリアル接続用)
3.	wvdial インストール
4.	AK020 使用設定 (SORACOM 社 setup_air.sh を実行)
5.	Slee-Pi2 使用設定 (Mechatrax 社 setup.sh を実行)
6.	起動短縮設定 (dhcpcd, keyboard-setup, avahi-daemon, wpa_supplicant, wifi-country, triggerhappy を disable に設定)
7.	メインプログラム, パラメータファイル導入
8.	/etc/rc.local 設定 (パラメータファイル読み込み, 古いログ消去, メインプログラム実行, ログ出力)

月以上の作動検証を繰り返し長期間安定して作動するよう構成したが、後述する海上作動テストの結果を踏まえて、後半のテスト（テスト3、4）では一部修正したものを使用した。最終的なメインプログラムの構成を図1に示した。起動からシャットダウンまでの1回の作動に要する時間は、ネットワーク接続に要する時間によって変化するが、通常約1分である。ただし、ネットワーク接続に失敗した場合は30秒毎に最大300秒まで通信モジュールのリセットを繰り返すため、1回の作動時間は

最長で5～6分となる。

1回の作動あたりの消費電力は約29mWhで（簡易電圧電流チェッカーRT-USBVACを介してSlee-Pi2に電力供給し作動電圧約6Vで1時間毎に24回作動した際の積算電流116mAhから、 $6V \times 116mAh / 24回 = 29mWh/回$ として算出。電圧電流チェッカーの作動電圧が最大7V、Slee-Pi2の作動電圧が6V以上のため約6V電源を使用し消費電力を計測した。実際の電源には約13Vを使用したため、厳密には電圧コンバータの変換効率の差の分、消

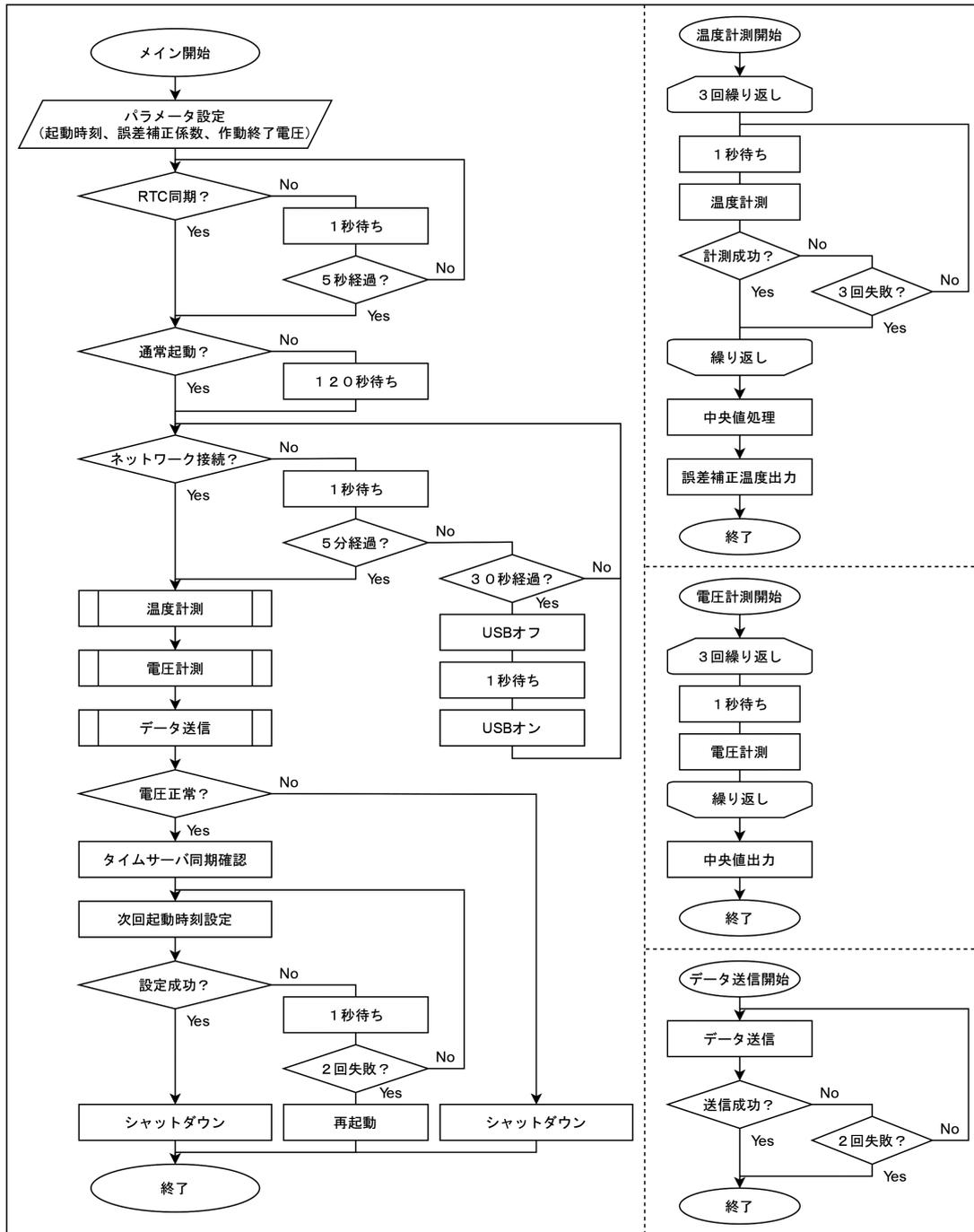


図1. 最終的なメインプログラムの構成

費電力も若干異なると考えられる。)、単三リチウム乾電池の電池容量を約3,000mAhとすると、8本直列(作動電圧約13V)で使用した場合の作動回数はおおよそ1,344回(13V×3,000mAh/29mWh/回=1,344回)と予想され、作動間隔を1時間毎とした場合の作動日数は56日間、4時間毎では224日間と予想される。しかしながら、作動時間がネットワーク接続に要する時間によって変動すること等から、実際の作動回数および作動日数は後述する海上作動テストにより評価した。

また、メインプログラムとは別に、起動時刻や、水温センサの誤差補正係数、作動終了電圧を設定するためのパラメータファイルを用意し、これらの設定を適宜変更可能な仕様とした(パラメータファイルを/boot領域に置くことでRaspberry Piにログインすることなく普段利用しているPC上でmicroSDカード内のパラメータファイルを直接編集できる)。新たに水温計測端末を用意する場合は、これらの設定を済ませたOSイメージをmicroSDカードに書き込みRaspberry Piに挿入することで、作動可能な端末を複製できる。

バイ本体 バイ本体は塩ビパイプや塩ビ配管用品を用いて製作した(写真2)。バイ本体は全長570mm、外径(最大部)120mm、バイ本体のみ重量1,516g、総重量(オモリ、電源、水温計測端末、端末固定用塩ビパイプを収容した使用時の重量)2,230gで、片手で持ち運び可能なサイズとした。また、バイ本体上部と下部の直径が異なる異径形状(上部はφ114mm、長さ140mmのVP100、下

部はφ48mm、長さ300mmのVP40を使用)とすることで、浮力と動揺に対する安定性の高い構造とした(浮力と安定性は水槽上で確認しパイプ径や長さを決定した)。バイ本体には100号オモリ(約375g)2個分相当の内容物を収容可能であり(写真3)、後述の海上テストでは、100号オモリ1個に加え、水温計測端末(122g)、電源(141g)、端末固定用塩ビパイプ(80g)をバイ内部に収容した。バイ本体の材料および価格を表3に示した。バイ本体は材料費1万円未満で製作可能であり、構造も単純なため比較的容易に自作可能である。

塩ビパイプはカット加工品を購入し、塩ビパイプ用接着材で他の塩ビ配管用品と接着した。塩ビパイプは接着前にあらかじめカット面外縁をヤスリ掛けして角を丸



写真3. 塩ビ配管製バイの喫水線

バイ本体に100号オモリ2個(約750g)を収容し、海水水槽上に浮かべた際の喫水線
海上作動テスト時は、100号オモリ1個(約375g)、水温計測端末(122g)、電源(141g)、端末固定用塩ビパイプ(80g)をバイ内部に収容した

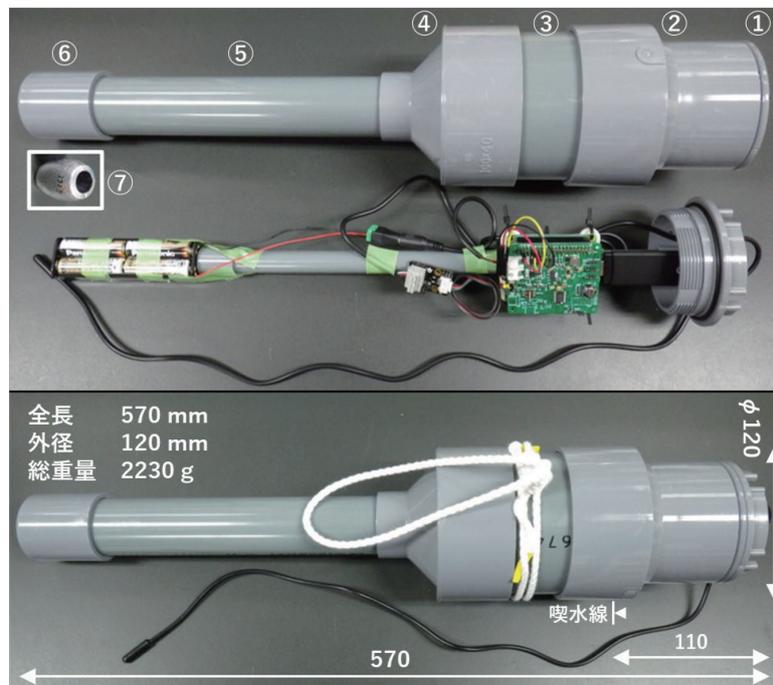


写真2. バイ本体に水温計測端末を収容した様子

上段：バイ本体最下部に100号のオモリを収容し、端末は最上部に固定した(白丸数字は表3の部品番号と対応)
下段：バイ本体に端末を収容し、本体中央部にロープを取り付けた

表3. プイ本体の材料および参考価格

部品番号	品名（メーカー，規格等）	参考価格（円）
1.	掃除口（積水化学工業，CO-75）	600
2.	DV インクリーザ（DV-IN 100×75）	500
3.	塩ビパイプ（VP100，長さ 140mm）	500
4.	DV インクリーザ（DV-IN 100×40）	400
5.	塩ビパイプ（VP40，長さ 300mm）	300
6.	TS キャップ（TSC40）	200
7.	オモリ（大川工業中通しオモリ 100 号など）	500
8.	塩ビパイプ用接着剤（セメダイン A など，1～6 接着用）	500
9.	ケーブルグランド（タカチ電気工業，AG8-5B）	300
10.	M8 ネジタップ付きドリル（電動ドリル別，9 取付用）	1,500
11.	接着剤（セメダイン，スーパー X ブラック，9 接着用）	500
12.	塩ビパイプ（VP13，長さ約 350mm，端末固定用）	200
13.	TS キャップ（TSC13，2 個，端末固定用）	100
14.	塩ビサドル（未来工業 S-14 など，2 個，端末固定用）	100
15.	結束バンド（幅 2.5mm 以下，端末固定用）	100
16.	養生テープ（端末および配線固定用）	200
	（合計）	6,500

メーカー不問の同一規格品，汎用品はメーカー名を省略した

め、接着時は換気のよい場所で作業した。フタ部には電動ドリルでネジ穴を開け、水温センサを外部に引き出すためのケーブルグランドを接着して取り付けた（ケーブルグランドの接着にはセメダインスーパー X を使用。後半のテスト 3，4 ではケーブルグランドと水温センサのケーブルの隙間にも接着剤を充填した）。プイ内部の最下部にはオモリを収容し、オモリの上部に電源を、最上部に水温計測端末を配置するよう収容した。水温計測端末は、端末固定用塩ビパイプ（VP13）の上端近くに塩ビサドルと結束バンドを使用して固定し、電源は同じ塩ビパイプの下端に養生テープを使用して固定した。また、配線や接続部はできるだけ動かないよう養生テープや結束バンドで固定した。特に、水温センサの配線とキット付属基板の接続部はクリップで挟み込んで接続する仕様になっており、後述の海上作動テストでは波浪時の動揺により接続が緩む場合があったため（テスト 3）、最終的なテスト（テスト 4）では接続部が動かないよう養生テープで確実に固定した。端末を固定した塩ビパイプは、フタ内側中央に接着した TS キャップ（TSC13）に接続し、プイ内部に収容した。

水温センサの誤差評価 水温センサ DS18B20 は精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ （ -10°C から $+85^{\circ}\text{C}$ の温度範囲におけるメーカー

保証精度）、分解能 0.0625°C で計測可能であり、メーカーが公表しているデータシートには 0°C から $+70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲における典型的な誤差曲線が示されている（Maxim Integrated 2019）。また、水温センサ DS18B20 の計測値の経時の変化は小さく、約半年間の連続使用でドリフトは 0.1°C 以下であったことが報告されている（Lewis *et al.* 2016）。

しかしながら、水温センサは個体毎に固有のセンサ誤差を有することから、個体毎に基準温度計との計測値の差（センサ誤差）を実測し、誤差補正を行うことで、より高精度な計測を実現できる。そこで、水温センサ 2 個体（SparkFun 防水 DS18B20 センサ SEN-11050）と、精度 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 、分解能 0.01°C の高精度基準温度計（MK Scientific RF-100）を、 0°C 、 10°C 、 20°C 、 30°C に調温した水を張ったフタ付き発泡スチロール容器（KC-3）に収容し、各温度で 5 分毎に 7 回の水温計測を行った。 0°C の調温には氷水を用い、その他の水温は冷水と水道水または湯を混合して調温した。水温計測の間、容器内の水は小型 USB ポンプで常時攪拌した。

水温センサの計測値 (t) と基準温度計の計測値 (T) の差（センサ誤差）を二次式で近似し（式 1）、水温センサの計測値からセンサ誤差近似値を差し引くことで補正後水温を得た（式 2）。

$$\text{センサ誤差} = t - T = At^2 + Bt + C + e \quad (\text{式 1})$$

$$\text{補正後水温} = t - (At^2 + Bt + C) \quad (\text{式 2})$$

式 1 の A , B , C は二次式の回帰係数および切片, e は回帰残差である。なお, 回帰残差 (e) は補正後の誤差 (補正後水温と基準温度計の計測値の差) に等しい (式 3)。

$$\text{補正後の誤差} = t - (At^2 + Bt + C) - T = e \quad (\text{式 3})$$

二次式による近似および誤差補正の計算には R を用いた (R Core Team 2020)。

海上作動テスト 水温計測端末をブイ本体に収容し, 広島県廿日市市 (水産技術研究所の実験筏), または徳島県美波町 (日和佐地先のワカメ養殖実験筏) の海上にて, 計 4 回の海上作動テストを実施した (写真 4)。海上作動テスト 1 から 3 では結果を踏まえて問題点をその都度修正, 改良し, 最終的なテスト 4 で長期間の海上作動を



写真 4. 海上作動テストの様子

上段: 広島県廿日市市 (水産技術研究所の実験用筏) にブイを設置した様子

下段: 徳島県美波町 (日和佐地区のワカメ養殖実験筏) にブイを設置した様子

確認した。海上作動テスト毎の実施地点, 実施期間, 作動間隔, ならびにテストに使用したブイ個体名を表 4 に示した。

テスト 1 およびテスト 3 は短期間 (約 1 ヶ月間) の海上作動検証を目的とし, 作動間隔は 1 時間毎に設定した (毎正時に起動し, 水温計測, データ送信, シャットダウンを繰り返す)。テスト 2 および最終的なテスト 4 は長期間 (約半年間) の海上作動検証を目的とし, テスト 2 の作動間隔は 6 時間毎 (0:00, 6:00, 12:00, 18:00 に起動しデータ送信) に, テスト 4 の作動間隔は 4 時間毎 (0:00, 4:00, 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 に起動しデータ送信) に設定した。

ブイは A, B, C の計 3 個体を製作し, 同時期に開始したテスト 1 とテスト 2 にはそれぞれ別のブイ個体 (ブイ A およびブイ B) を, テスト 3 とテスト 4 には同一のブイ個体 (ブイ C) を使用した。ブイ A とブイ B はともにキット付属のステンレス管に封入された水温センサを使用し, 他の構成部品やメインプログラムも同じで, 実質的な差はない。ブイ C は, テスト 1 とテスト 2 の結果を踏まえた改良型で, 樹脂封入タイプ水温センサを使用し, 水温センサのケーブルとケーブルグランドの隙間に接着剤を充填することで気密性と防水性を向上させた。同時にブイ C では, 作動終了電圧を 10.5V に設定し, 電源電圧が作動終了電圧以下に低下した場合は以後の起動時刻設定を行わず作動終了するよう, また, 水温計測エラーが発生した場合に再度計測を行うようメインプログラムを修正した。その他, 最終的なテスト 4 では内部の配線を養生テープでより確実に固定した。

結 果

水温センサの誤差評価 水温センサ 2 個体のセンサ誤差 (水温センサと基準温度計の計測値の差) を図 2 に示した。0°C ではセンサ誤差のばらつきがほぼないが, 0°C では水温変化がほとんどないため, 水温計測値に変化が生じないことに起因する。0°C 以外の水温では約 30 分間 (5 分毎に 7 回) の計測の間, 少しずつ水温が変化するため, 水温計測値も変化する。この間の水温変化の速度は 30 分あたり 0.2°C から 0.7°C と十分に小さいため,

表 4. 海上作動テスト毎の実施地点, 実施期間, 作動間隔, ブイ個体名

テスト	実施地点	開始日	作動間隔	終了日	ブイ個体名
1	広島県廿日市市	2019年10月1日	1時間毎	11月24日	ブイ A
2	広島県廿日市市	2019年10月9日	6時間毎	2月9日	ブイ B
3	徳島県美波町	2020年1月7日	1時間毎	2月5日	ブイ C
4	広島県廿日市市	2020年2月17日	4時間毎	9月21日	ブイ C

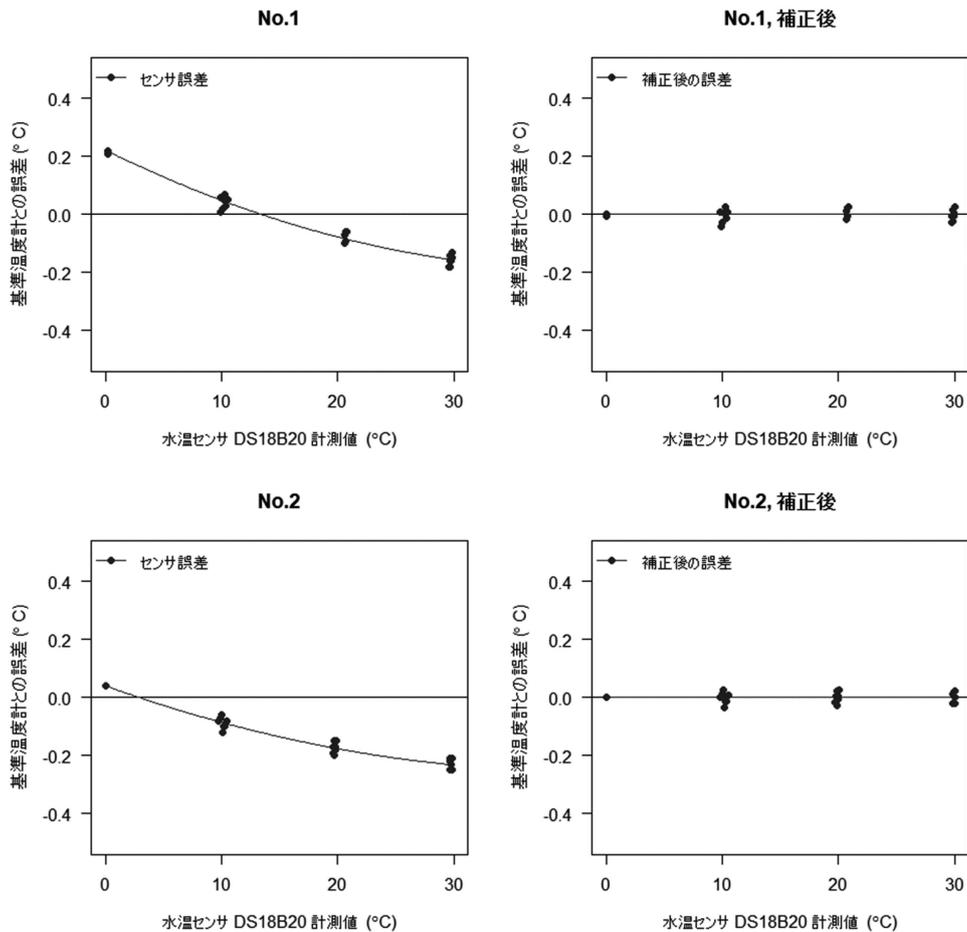


図2. 水温センサ (DS18B20) 2個体のセンサ誤差

上段：水温センサNo.1のセンサ誤差 (左) および補正後の誤差 (右)
 下段：水温センサNo.2のセンサ誤差 (左) および補正後の誤差 (右)

二種類の温度センサの応答速度の差はセンサ誤差のばらつきにはほとんど影響せず、センサ誤差のばらつきは主に二種類の温度センサの分解能の差に起因する。

センサ誤差は水温センサ個体毎に、また水温毎に異なり、0°Cから30°Cの温度範囲における水温センサNo.1のセンサ誤差は+0.22°Cから-0.16°C、水温センサNo.2のセンサ誤差は+0.04°Cから-0.23°Cであった。補正後の誤差 (補正後水温と基準温度計の計測値の差) は水温センサNo.1で最大0.040°C、水温センサNo.2で最大0.034°Cで、補正後の誤差は±0.1°C未満に減少した。また、補正後の誤差 (回帰残差に等しい) の標準偏差に相当する二次近似式のRMSE (Root Mean Square Error) は水温センサNo.1で0.017°C、水温センサNo.2で0.016°Cであった。なお、前述のとおり補正後の誤差は主に二種類の温度センサの分解能の差に起因し、補正後の誤差の最大値 (No.1で0.040°C、No.2で0.034°C) は基準温度計の分解能0.01°Cと水温センサDS18B20の分解能0.0625°Cの差である0.0525°Cに近かった。

海上作動テスト 海上作動テスト時にSORACOM Harvestにデータ送信され、可視化された水温および電圧のグラフを図3に示した。また、海上作動テスト毎の作動日数、作動回数、データ送信成功率 (データ送信成功回数 / 作動回数)、水温計測エラー率 (水温計測エラー回数 / データ送信成功回数) を表5に示した。

テスト1 (作動間隔1時間毎, ブイA) では、10月1日のテスト開始から11月24日に電圧低下により作動停止するまで、正常な作動を確認できた。テスト1の作動日数は54日間、作動回数は1,305回、データ送信成功率は99.9% (1,304/1,305)、水温計測エラーは発生しなかった。データ送信に失敗した事例は、ネットワーク接続待ち時間に制限を設けたため、作動としては正常である。作動停止時は、電源電圧が急激に10V以下に低下し、その後はRaspberry Piが起動時刻を過ぎても起動できずに停止した。このため、テスト3および4 (ブイC) では作動終了電圧を10.5Vに設定し、電源電圧が10.5V以下に低下した場合は以後の起動時刻設定を行わずに作動終了するようメインプログラムを修正した。また、ブイ回



図 3. 海上作動テスト時にSORACOM Harvestに送信され、可視化された水温および電圧のグラフ

左上：テスト 1，右上：テスト 2，左下：テスト 3，右下：テスト 4

テスト 1（10月 1日開始，11月 24日終了）およびテスト 4（2月 17日開始，9月 21日終了）のグラフはデータ表示可能最大件数（1,000件）を超えたため全期間表示されていない

表 5. 海上作動テスト毎の作動回数およびデータ送信成功率

テスト	作動間隔	作動日数	作動回数	データ送信成功率	計測エラー率
1	1 時間 毎	54 日間	1,305 回	99.9%	0.0%
2	6 時間 毎	97 日間	492 回	100.0%	0.6%
3	1 時間 毎	29 日間	691 回	100.0%	2.2%
4	4 時間 毎	217 日間	1,302 回	99.8%	0.0%

取時に水温センサのステンレス管に腐食（さび）が確認されたため、テスト 3 および 4（ブイ C）では水温センサを樹脂封入タイプの製品に交換した。

テスト 2（作動間隔 6 時間毎，ブイ B）では，10 月 9 日のテスト開始から 12 月上旬まで当初順調に作動したが，12 月上旬に水温センサの計測エラーが計 3 回記録され，その後，2 月 9 日に予期せず作動停止した。テスト 2 の作動日数は 97 日間，作動回数は 492 回，データ送信成功率は 100%，水温計測エラー率は 0.6%（3/492）であったが，予期せぬ作動停止により予定していた約半年間の海上作動は達成できなかった。ブイを回収し，内部を目視で確認したところ，Raspberry Pi の USB コネクタ付近に結露が原因とみられる腐食が確認された。このため，テスト 3 および 4（ブイ C）では，フタの O リングにシリコングリースを確実に塗布し，水温センサのケーブ

ルとケーブルグラウンドの隙間に接着材を充填することで，気密性と防水性を向上させるとともに，計測エラーが発生した場合は再度計測を行うようメインプログラムを修正した。

テスト 3（作動間隔 1 時間毎，ブイ C）では，1 月 7 日のテスト開始から当初順調に作動していたが，1 月 27 日の日没後から 29 日未明にかけて発生した波浪時に，水温計測エラーが計 15 回記録された。このエラーはテスト 2 で記録されたエラーとは異なり，水温センサのケーブルが外れたことを示すものであった。1 月 29 日以後，水温計測エラーは発生しなかったが，ブイを設置していたワカメ養殖実験筏が波浪により破損していたため，2 月 5 日にブイを回収した。テスト 3 の作動日数は 29 日間，作動回数は 691 回，データ送信成功率は 100%，水温計測エラー率は 2.2%（15/691）であった。回収後，ブイ

内部を目視で確認したところ、水温センサとセンサキット付属基板の接続部が緩み、接触不良が生じていた。この接続部は、水温センサの配線を基板上のクリップで挟み込んで接続する仕様になっており、波浪時の動揺で接続部が緩んだものと考えられた。このためテスト4では接続部が動かないよう、キット付属基板および接続部周辺の配線を養生テープで固定した。

最終的なテスト4（作動間隔4時間毎、ブイC）では、2月17日のテスト開始から、9月21日に電圧低下により作動終了するまで、約7ヶ月間にわたって正常で安定した作動が確認された。テスト4の作動日数は217日間、作動回数は1,302回、データ送信成功率は99.8%（1,300/1,302）、水温計測エラーは発生しなかった。

電池残圧がなくなるまで正常作動したテスト1およびテスト4の作動回数はそれぞれ1,305回および1,302回とほぼ同じで、予想された作動回数1,344回に近かった。テスト2およびテスト3では海上での長期運用時に生じうる、内部結露に起因する作動不良（水温計測エラーおよび作動停止）や、波浪による配線の緩みの発生を確認し、これらの適宜対策を経て、最終的にテスト4において海上での約7ヶ月間にわたる安定した作動を確認した。

考 察

水温計測システムを海上で運用するには、水温計測端末のほか、データ送信先のサーバ、端末を防水するためのブイ本体が必要となる。本研究では、水温計測端末をRaspberry Piをベースに市販モジュールを用いて構成し、データ送信先にはSORACOM社のサーバ（SORACOM Harvest）を利用することで、容易に導入可能で低価格なシステム構成とした。また、長期安定作動を実現するプログラムの検討や、塩ビ配管用品を用いて製作可能な、防水性と安定性の高いブイ本体に端末を收容することで、最終的な海上作動テストでは4時間毎の作動間隔で約7ヶ月間にわたる安定した作動を実現できた。低価格な水温計測システムの先行研究として、和田ら（2008）は独自開発した水温計測端末を漁業用のブイに取り付け、水温計測値を専用データベースサーバに送信するシステムを構築しているが、本研究では市販モジュールやサービス、塩ビ配管製のブイ本体を組み合わせることで、誰もが製作し運用可能なシステムを実現するとともに、海上での安定した長期作動を達成できた。

本システムは材料費約3.5万円で製作可能であり、通信料やデータ送信先のサーバ（SORACOM Harvest）の利用料として月あたり500円程度で運用が可能である。ただし、本研究で利用したSORACOM Harvestに送信したデータは契約者のみ閲覧可能であり、第三者がデータを閲覧したい場合はSORACOM Lagoon（Soracom Harvestのデータを共有できるサービス）を利用するか、別途データ送信先のサーバを用意する必要があるが、個

人的な利用であれば十分に活用できるであろう。

水温センサは個体毎に誤差があるが、高精度な基準温度計を用いて誤差補正を行うことで、より高精度な計測が可能である。ただし、高精度な基準温度計は高価であり、本研究のように0°C、10°C、20°C、30°Cの4点でセンサ誤差を計測し、誤差補正する手順は少々煩雑である。より簡易的な例として、精度よく計測したい水温範囲が20°C前後に限られている場合は、20°Cのみ1点でセンサ誤差を計測し、センサ誤差を定数近似し誤差補正する方法（式1の $A=B=0$ とし、 C のみ使用して誤差補正）や、10°C、20°Cの2点でセンサ誤差を計測し、センサ誤差を一次式で近似し誤差補正する方法（式1の $A=0$ とし、 B, C のみ使用して誤差補正）を採用してもよいであろう。図4に、20°Cのみ1点で誤差補正した場合と、10°C、20°Cの2点で誤差補正した場合の、補正後の誤差を示した。20°Cのみ1点で誤差補正した場合は、補正後の誤差は0°C付近で開発目標とした $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の精度範囲を超えるものの、10°Cから30°Cの範囲で $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以下に収まっている。10°C、20°Cの2点で誤差補正した場合は、0°Cから30°Cの範囲で補正後の誤差は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以下となり、十分な精度が得られている。また、海上作動時のブイ計測値と他の水温計計測値の比較として、図5に海上テスト3の実施期間中のブイ計測値（補正後水温）と、ワカメ養殖実験後に同時に設置していた水温ロガー（Hobo CO-U20L-01、精度 $\pm 0.44^\circ\text{C}$ 、分解能 0.1°C ）計測値の推移を示した。ブイ計測値と水温ロガー計測値には若干の差が見られるものの、1月7日から15日にかけての水温低下傾向や、1月16日の急激な水温上昇等、ほぼ同様な推移を示している。1月15日（10:00）にブイ計測値が突然 15°C 以下に低下しているが、設置用ロープ補強作業のため一時的に船上に引き上げた際の気温が記録されたため、異常値ではない。

海上作動テストではいくつかの問題（水温計測エラー、波浪時の配線の緩み、内部結露に起因する作動停止）が発生したが、これらについては対策が可能と考えられる。水温計測エラーについては、水温センサの配線が緩んだ場合を除けば、エラーが発生した場合に再度計測を行うようプログラムを修正することで計測エラー率を低減できた。波浪時にブイ内部の水温センサの配線が緩み、水温計測エラーが生じたケースについては、ブイ内部の部品ができるだけ動かないよう部品やケーブルを固定するほか、波浪が強い場所では、水温センサの配線をネジ固定式の端子台に接続するアダプターモジュール（ebay.com, DS18B20 Temperature Sensor Probe WaterProof Plugable Terminal Adapter Module）を使用することや、水温センサの配線をはんだ付けする対策が考えられる。内部結露については、ブイ本体のフタのOリングを適宜清掃しシリコングリースを塗布することや、水温センサのケーブルとケーブルグランドの隙間に接着剤を充填するほか、フタを閉める際に水蒸気を含まない窒素ガス

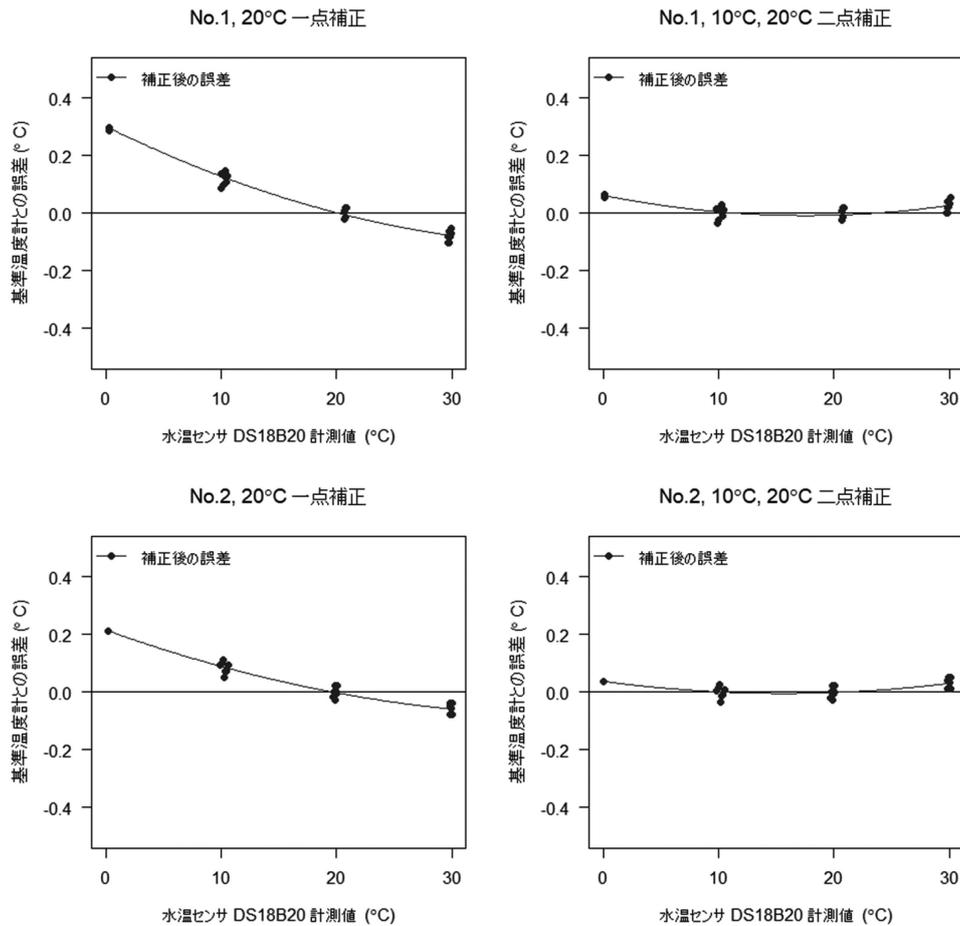


図4. 誤差補正方法の比較

左：20°Cのみ一点で誤差補正した場合の補正後の誤差
 右：10°C, 20°Cの二点で誤差補正した場合の補正後の誤差
 (上段：水温センサNo.1, 下段：同No.2)

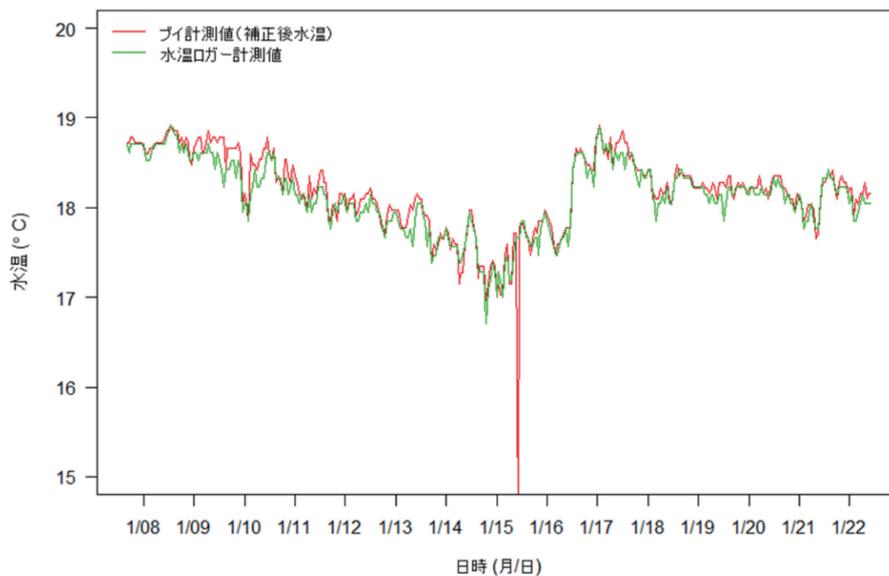


図5. 海上作動時(テスト3)のブイ計測値と水温ロガー計測値の比較

1月15日にブイ計測値が15°C以下に低下しているが、ロープ補強作業に伴い一時的に船上に引き上げた際の気温が記録されたため

等を充填することや、ブイ内部に乾燥剤を収容することで、より確実に結露を防ぐことが可能と考えられる。

本システムで得られるリアルタイム水温情報は、ワカメ養殖の開始時期の調整に活用できると考えられる (Kakehi *et al.* 2018)。ワカメ種苗を海面で育成する育苗の開始時期は水温 20～23°C 以下が好適とされ (團ら 2015, FAO 2015), また, アイゴの摂餌量は水温 16°C 以下で大きく低下するとの報告がある (川俣・長谷川 2006, 野田ら 2017, 上田・棚田 2018, 長谷川ら 2018)。養殖場の水温をリアルタイムにモニタリングし, 水温低下を目安に育苗や本養殖の開始時期を調整することで, 種苗の生育不良や食害を回避しようと考えられる。また, 本システムは, ワカメ養殖のほか, ノリ養殖等の他の藻類養殖でも, 表層水温を低コストでモニタリング可能なシステムとして利用できるであろう。

海域では陸域に比べ通信機能を備えたセンサの活用が進んでおらず, 普及には費用対効果の向上が課題である。本研究で構築した Raspberry Pi をベースとした水温計測端末や, 塩ビ配管用品で製作したブイ本体は低価格ではあるものの, 費用対効果の検証や有用性の向上は今後の課題である。リアルタイム水温情報はワカメ養殖の開始時期の調整等に有用と考えられるものの, 一方で, 水温情報だけではワカメの生育や食害の発生情報を直接得ることはできないため, ワカメの生産管理には必ずしも十分でない可能性も考えられる。本システムで使用した Raspberry Pi は, 水温センサ以外にもカメラ等の接続が可能のため (市村ら 2017, 江崎ら 2019, 森岡 2019), 撮影画像からワカメの生育状況や食害発生をリアルタイムに確認できれば, より有用なシステムとなる可能性がある。また, ブイを長期間運用することにより水温等の情報が集積すれば, ワカメの生育や食害の発生等との関係を解析することで, 水温等の情報からワカメの生育や食害の発生をより正確に予測できる可能性も考えられる。農業分野では, 低価格マイコンボードを活用した自作型センサネットワークの活用が試みられているが (深津・平藤 2020), 海域では陸上とは異なる電源や防水, 設置方法の検討が必要となり, 自作機器を長期間安定して運用するには課題があった。本研究は, 海上での低コスト自作型センサ運用が実現可能であり, 工夫次第で誰もが有用性の高いシステムを構築できる可能性を示している。

謝 辞

本研究は農研機構生研支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」の支援を受けて行った。本研究の推進にあたって有益な助言を頂いた事業関係者各位に感謝申し上げます。

文 献

- 荒木康輔・藤橋卓也・遠藤慶一・黒田久泰・小林真也 (2018) 海況予報情報サービスのための海水温連続観測装置の開発. 情報処理学会全国大会講演論文集, **80**, 4.553-4.554.
- 團昭紀・大野正夫・松岡正義 (2015) 徳島県のワカメとコンブ資源の開発研究の変遷. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課研究報告, **10**, 25-48.
- 江崎修央・中井一文・濱口沙織 (2019) LTE通信×クラウドでどこからでもはじめての海洋IoTセンシング&カメラ・モニタリング. *Interface*, **45**(11), 44-55.
- FAO (2015) Cultured Aquatic Species Information Programme. *Undaria pinnatifida*. Cultured Aquatic Species Information Programme. Text by Shao Jun Pang, Xia Li and Thierry Chopin. In: FAO Fisheries Division [online]. Rome. Updated 2 February 2015. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Undaria_pinnatifida/en, cited 13 October 2020.
- 深津時弘 (2014) 農業分野におけるセンサネットワーク技術の利用と課題. 電子情報通信学会誌, **97**, 688-694.
- 深津時弘・平藤雅之 (2020) 個人によるモノづくりの視点から見た農業センサネットワークの課題と改善手法の提案. 農業情報研究, **29**, 1-13.
- 長谷川一幸・磯野良介・島隆夫・渡邊幸彦・渡邊裕介・箕輪康 (2018) 低水温期におけるアイゴ未成魚のアラメ摂餌と水温の関係. 海洋生物環境研究所研究報告, **23**, 65-68.
- 市村康・鐘ヶ江潤也・梅津健一・藤田孝康 (2017) ラズベリーパイを活用した漁業者向けリアルタイムモニタリングシステム. 平成 29 年度日本水産工学会学術講演会学術講演論文集, **2017**, 146-149.
- Kakehi S, Naiki K, Kodama T, Wagawa T, Kuroda H, Ito SI (2018) Projections of nutrient supply to a wakame (*Undaria pinnatifida*) seaweed farm on the Sanriku Coast of Japan. *Fish. Oceanogr.*, **27**, 323-335.
- 川俣茂・長谷川雅俊 (2006) アイゴによるアラメ・カジメ摂食に及ぼす波浪と水温の影響. 日本水産工学会誌, **43**, 69-79.
- 桐山隆哉・土内隼人・狩野奈々・大橋智志・高田順司 (2018) 2015 年度漁期にみられた長崎県沿岸におけるワカメ生育不良. 長崎県水産試験場研究報告, **43**, 1-7.
- Kiyomoto S, Tagawa M, Nakamura Y, Horii T, Watanabe S, Tozawa T, Yatsuya K, Yoshimura T, Tamaki A (2013) Decrease of abalone resources with disappearance of macroalgal beds around the Ojika Islands, Nagasaki, southwestern Japan. *J. Shellfish Res.*, **32**, 51-58.
- Lewis AJ, Campbell M, Stavroulakis P (2016) Performance evaluation of a cheap, open source, digital environmental monitor based on the Raspberry Pi. *Measurement*, **87**, 228-235.
- Maxim Integrated (2019) DS18B20. Programmable resolution 1-Wire digital thermometer. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>, cited 12 January 2021.

- 森岡澄夫 (2019) 僕たちラズパイ団 IoT 樽放流イベント参戦記 ついに川に放流! ボール型ラズパイ放流カメラ製作. *Interface*, **45**(6), 19-28.
- 中西達也・棚田教生・北野慎容・蓑田仁美・安芸浩資 (2019) 徳島県南部海部郡沿岸の2007年から2017年における藻場の変遷. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課研究報告, **13**, 1-34.
- 野田幹雄・小林孝平・荒木めぐみ・安倍大地・村瀬昇 (2017) アイゴの採餌による大型海藻の藻体欠損量に影響する要因について～水温別の日間採餌量の見積と群れの大きさの影響～. 海苔と海藻, **85**, 20-33.
- Panasonic (2021) リチウム乾電池の特長は? https://jpn.faq.panasonic.com/app/answers/detail/a_id/18174/, 2021年2月1日.
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>, cited 12 January 2021.
- Serisawa Y, Imoto Z, Ishikawa T, Ohno M (2004) Decline of the *Ecklonia cava* population associated with increased seawater temperatures in Tosa Bay, southern Japan. *Fish. Sci.*, **70**, 189-191.
- 棚田教生 (2016) フリー配偶体を用いたワカメの実用規模種苗生産法および高水温耐性品種の開発. 海洋と生物, **38**, 464-471.
- 棚田教生・多田篤司・手塚尚明・清本節夫 (2019) 養殖漁場でワカメ種苗の食害魚撮影に初めて成功. 徳島水研だより, **109**, <https://www.pref.tokushima.lg.jp/tafftsc/suisan/material/suikendayori/>, 2020年10月13日.
- Tezuka N, Shigeta T, Uchida M, Fukatsu T (2016) Tidal flat observation and monitoring using still video and network cameras. *Techno-Ocean*, **2016**, 532-535.
- 上田幸男・棚田教生 (2018) 飼育下のアイゴの生残および摂餌に及ぼす冬季の低水温と餌の影響. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課研究報告, **12**, 11-19.
- 和田雅昭・畑中勝守・戸田真志 (2008) 養殖漁業支援のためのユビキタスブイの開発. 情報処理学会論文誌, **49**, 1833-1843.
- Yamaguchi A (2010) Biological aspects of herbivorous fishes in the coastal areas of western Japan. *Bull. Fish. Res. Agen.*, **32**, 89-94.