

## 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用と観測の現状<sup>†</sup>

伊能康平<sup>\*1</sup>, 杉山伸二<sup>\*1</sup>, 金 敬洋<sup>\*1</sup>, 土屋主税<sup>\*1</sup>, 野澤理香<sup>\*1</sup>, 小河原秀水<sup>\*2</sup>, 吉 宣好<sup>\*3</sup>,  
中山浩一郎<sup>\*4</sup>, 永蔵克己<sup>\*5</sup>, 内村 忍<sup>\*5</sup>

Operation and observations of the Autonomous Ocean Vehicle (AOV)<sup>†</sup>

Kohei INO<sup>\*1</sup>, Shinji SUGIYAMA<sup>\*1</sup>, Takahiro KON<sup>\*1</sup>, Chikara TSUCHIYA<sup>\*1</sup>, Rika NOZAWA<sup>\*1</sup>,  
Hidemi OGAHARA<sup>\*2</sup>, Nobuyoshi YOSHI<sup>\*3</sup>, Koichiro NAKAYAMA<sup>\*4</sup>, Katsumi NAGAKURA<sup>\*5</sup>,  
and Shinobu UCHIMURA<sup>\*5</sup>

### Abstract

Japan Coast Guard has been operating the Autonomous Ocean Vehicle (AOV) since 2016 in order to precisely determine datum levels and observe meteorological and oceanographic conditions. In this paper, we report the problems and improvements concerning long-term observation. Moreover, we review the tide level data processing method related to determining datum level precisely and show recent examples of meteorological and oceanographic observation.

### 1 はじめに

#### 1.1 本稿の目的

四方を海に囲まれた我が国にとって、領海や排他的経済水域 (EEZ) の外縁の根拠となる低潮線の精密な調査や、航行の安全に資する海上の気象・海象情報の収集は重要である。2018 年 5 月に閣議決定された海洋基本計画 (第 3 期) においても、我が国の海域の総合的管理に必要な情報や海上交通の安全に資する気象や海象の収集・調査

を実施することとされている。

海上保安庁では、海洋調査能力の向上のため、2016 年度から自律型海洋観測装置 (AOV: Autonomous Ocean Vehicle) を導入した。直近では、2019 年度に第十管区に 2 基、第十一管区に 2 基新たに AOV を導入しており、2020 年 7 月現在、第七、八、九、十及び十一管区海上保安本部で 4 基ずつ、計 20 基の AOV が運用されている。AOV は、長期間、波の力により自律的に移動し、無人

<sup>†</sup> Received September 17, 2020; Accepted October 30, 2020

\* 1 沿岸調査課 Coastal Survey Division

\* 2 第八管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 8th Regional Coast Guard Headquarters.

\* 3 第九管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 9th Regional Coast Guard Headquarters.

\* 4 第十管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 10th Regional Coast Guard Headquarters.

\* 5 第十一管区海上保安本部 海洋情報調査課 Hydrographic and Oceanographic Division, 11th Regional Coast Guard Headquarters.

で気象・海象を観測できる機器である。航行できる水深が確保できていればどこでも観測可能であることから、験潮器の設置が困難な離島においても潮位観測を行うことができる。潮位観測にあたっては、精密な最低水面を算出するため、長期間連続して観測できることを活かし、1つの海域について1年間以上潮位を観測している。また、潮位観測と合わせて、海上交通の安全に資する情報として気象・海象情報を収集し、各管区のホームページで速報値を公開している。

本稿では、この数年間の取り組みを俯瞰して、AOVの概要、長期観測の課題とその改善に向けた取組について記載する。また、これまでに報告されてきた精密な最低水面の算出のための解析手法をまとめるとともに、AOVが気象・海象観測においても有効であることから、AOVを用いた気象・海象観測の事例についても記載する。

## 1.2 AOVの概要

AOVは、米国Liquid Robotics社がWave Gliderという製品名で開発した、海面で自律航行する無人機器に、海象、気象、高精度位置情報を取得するための複数の観測機器を取り付けたものである。AOVの外観および搭載機器等をFig. 1及びTable 1に示す。

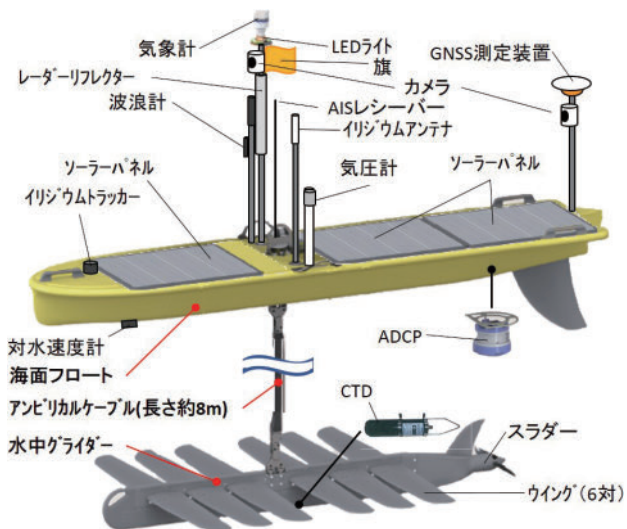


Fig. 1. Appearance of the AOV.

図1. AOVの外観。

AOVは波の上下動により推進し、観測機器の電力はソーラーパネルで発電した電力を用いるため、燃料を用いずに長期間運用できる。AOVは海面に浮かぶフロート部と水中にあるグライダー部からなり、フロートとグライダーは長さ約8mのアンビカルケーブルで接続している。グライダー部が上に動くときは、グライダーに接続したウィングの前方が上に、後方が下に向いている。このため、ウィングが上から受ける水流は、ウィングに前向きの力を加えることとなる。グライダー部が下に動くときは逆に、ウィングの前方が下に、後方が上を向き、ウィングが下から受ける水流は、ウィングにやはり前向きの力を加える。このように、波の上下動は、常にグライダー部を前進させる力として作用する。

AOVと陸上のオペレーターとの間の通信はイリジウム衛星通信により行われ、操作や観測データの受信はインターネット経由で行う。また、AOVはGNSS (Global Navigation Satellite System)、対水速度計、自動船舶識別装置 (AIS :

Table 1. Size, weight, average speed and equipment of the AOV.

表1. AOVの寸法、重量、平均移動速度、搭載機器。

寸法	海面フロート	305 cm × 81 cm × 23 cm	
	水中グライダー	213 cm × 142 cm × 21 cm	
重量	約170 kg		
平均移動速度	約1.3 kn		
調査機器	種類	観測項目	
	気象計	Airmar社製 PB200	気温、風向・風速、気圧
	気圧計	In-Situ社製	気圧、気温
	ADCP	Teledyne社製 600kHz	流向・流速
	波浪計	LORD社製	有義波高、周期
	GNSS測定装置	Trimble社製、IMU搭載 / Septentrio社製	高精度位置情報
	CTD	Teledyne社製	水温・塩分
	カメラ	Liquid Robotics社製 / マリンワークジャパン社製	海況/ AOVの状況
その他機器	種類	用途	
	GNSS受信機	位置把握	
	対水速度計	移動補助	
	AISレーダー	安全対策	
	LEDライト	視認性向上	
	スラダー	航行制御	
	レーザーリフレクター	安全対策	
	リジウムアンテナ	通信	
リジウムトラッカー	安全対策		

Automatic Identification System) レシーバーにより、機体の位置や移動速度、周囲の大型船舶の航行状況などをモニターしており、観測データや機体内部の状態と合わせ、それらの情報もインターネットから確認することができる。

既報の西村・他 (2017), 松永・他 (2018) からの追加点として、海況及び AOV の状況把握用のカメラを導入し、一部の機体に搭載している。また、2019 年度に導入した AOV には気圧と気温を測定できる気圧計を搭載している。

### 1.3 他機関の Wave Glider を用いた研究状況

Wave Glider は、船舶と比べて低コストで長期間の連続したデータを取得できる。また、海中に潜らず、海面付近の気象と海象を同時に継続して観測できる。これらの特性を活かし、Wave Glider は様々な観測に広く利用されるようになってきている。ここで、Wave Glider を用いた国内外の研究の状況を俯瞰する。

Wave Glider が開発された当初は、Wave Glider の航行速度等に関する研究が見受けられる (Hine et al., 2009)。その後は Wave Glider に搭載した ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) や CTD (Conductivity Temperature Depth profiler) 等を用いた、垂表層の海流や水温・塩分を観測する研究に用いられている (Mullison et al., 2011; Daniel et al., 2011)。その他、現場光学観測や生物が発する音響の観測を通じて、水産情報への利用も試みられている (Frolov et al., 2011; Pagnielo et al., 2019)。

我が国での研究例として、沖縄科学技術大学院大学において、沖縄付近で台風の目付近で風と海流を連続して観測している (Mitarai and McWilliams, 2016)。また、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) では、東京大学地震研究所等との共同研究により、カメラや音響装置をとりつけた離島火山の監視 (Ichihara et al., 2018) や、海底地殻変動を捉えるための GNSS-音響観測に試験的に用いられている (Iinuma et al., 2019)。

また、GNSS アンテナと受信機を取り付け、海

面の精密な楕円体高を算出することも試みられている。海面高度の算出には、従来、配置場所が限られる潮位計、時空間的な解像度が粗い衛星高度計が用いられてきた。Wave Glider はこれらを補完する観測機器として期待されており、スコットランドのロス湖では、1 日間のキネマティック PPP (Precise Point Positioning) による海面高度の観測が行われた (Morales et al., 2016)。また、北海では、13 日間のキネマティック PPP による海面高度の観測が行われた (Penna et al., 2018)。最近では、災害のシグナルとなる海底の動きを長期間にわたり観測する手法を開発するために、海底の高精度圧力センサーと Wave Glider の GPS 受信機により、ホノルル沖で 3 日間海底圧力と海面高度が観測された (Foster et al., 2020)。

ただし、Wave Glider と GNSS を組み合わせたこれらの研究は、静穏な環境下での観測や、長くとも 2 週間程度の観測に限られている。静穏とは限らない日本周辺の海上において、AOV を用いた長期間の潮位観測により、精密な最低水面を算出することは、高度な技術力が必要である。

一方、Wave Glider を用いた気象・海象観測は世界各地で行われている。当庁の AOV 観測においても、本稿で述べるように一定の成果が上がっており、今後も継続した海象観測成果が期待できる。

## 2 運用

### 2.1 調査プロセス

AOV による調査は、機体の投入、観測、機体の揚収、収集したデータの解析が一連の流れとなる。機体の投入、観測、機体の揚収の詳細については西村・他 (2017)、松永・他 (2018) に記載されているため、ここでは概要を記載するにとどめる。

投入は、測量船もしくは用船に機体を積み込み、観測海域付近にてクレーンにより行われる。フロント部とグライダー部をバンドで固定した状態で機体を吊り上げ、着水直後にバンドを切り離すことで投入が完了し、AOV は自律的に観測海

域へ向かう。

観測海域に到着した AOV は、運用者が設定した約 5 km 四方の観測海域内で 8 の字のコースを航行しながら観測を行う。観測中はインターネット経由で陸上から監視・指示される。観測された風向・風速、気温、波浪、流向・流速、水温、塩分は 24 時間、衛星通信を介してリアルタイムで陸上に送られている。

## 2.2 長期観測における課題

AOV は 2016 年度に新しく導入した機器であり、台風等による荒天、冬期の少ない日光量等の厳しい環境下での運用には多大な苦勞を伴ってきた。

ここでは、長期観測に関する課題である、電力不足と圧流による調査海域からの離脱について紹介する。長期間の運用に関しては、AOV の船舶への衝突防止や台風避航の運用なども課題となり、それらへの対応は西村・他 (2017)、松永・他 (2018) に記載されている。

### 2.2.1 電力不足

まず、電力不足に関して、Table 2 に、AOV の

電力の要目を示す。

AOV の電源はソーラーパネルのみであるため、曇天、雨天により充電ができない日が続くと電力不足となる。また、ソーラーパネルへの海苔等の付着、その他の場所への貝類の付着も、電力確保のほか、移動にも支障を生じさせる原因となる。

西村・他 (2017) では、海洋生物付着防止のために、シリコン系防汚塗料であるバイオクリンの塗装が有効であること、太陽光パネルに塗布しても運用に影響が生じないことを示している。また、西村・他 (2017) では、900 Wh のバッテリー一つでは 2、3 日の曇天が続くと電力不足に陥ることが指摘された。松永・他 (2018) では、2017 年の調査でバッテリーを 2 台搭載し、電力量を 1800 Wh にしたところ、9 月時点で天候に起因した電力不足が生じていないことが報告された。

しかし、その後の観測の中では電力不足となる事例が生じた。AOV の電力量が 900 Wh 未満になった時を電力不足の目安とすると、バッテリーを 3 台として電力量を 2700 Wh とした場合であっても、曇雨が続いた際には電力不足となった。

Table 2. (a) Electric energy and (b) power generation and consumption of the AOV. Note that power consumption of Ethernet and GNSS observation shows the values before the power reduction described later.

表 2. AOV の電力の要目。(a) 電力量。(b) 発電力及び消費電力。なお、イーサネット通信及び GNSS 観測の消費電力は後述する電力節減前の値を示している。

**a**

	電力量(Wh)	備考
CCU	800	
バッテリー	900	電力量は1個当たりの値

**b**

	発電力(W)	備考
ソーラーパネル(旧型)	50	発電力は1枚当たりのピーク時の値
ソーラーパネル(新型)	60	発電力は1枚当たりのピーク時の値
	消費電力(W)	備考
Core Load	3.55	イリジウム通信、GPS等航行に必須の要素
Core Payload	2.6	AIS, LEDライト等、安全な航行に必須の要素
イーサネット通信	2.4	
気象・海象観測	2.78	気象計1回/1時間、波浪計1回/1時間、ADCP6回/1日、CTD1回/1時間で観測した場合
GNSS観測	4.8	うち3.5 WはGNSS受信機の消費電力
スラスター	20-50	必要に応じて使用

電力不足は、様々な季節・海域で生じたが、特に日照量が低い冬期の日本海で顕著であった。観測機器を全てオフにした場合でも、安全な航行の維持に1日あたり最低150 Whが必要になるが、冬期の日本海の発電量は一日約200 Wh程度、特に12月下旬～1月上旬には150 Wh程度となり、観測機器を十分に動かすことは困難になる。Fig. 2に2018年10月から2019年3月までの隠岐諸島西方海域におけるAOVの電力収支を示す。10、11月は安定していた電力量が12月に入ると減少し始めることがわかる。

また、冬期の日本海側は日照量が低いことに加え、ソーラーパネルに付着する海苔の成長期とも重なっている。前述の防汚塗料を塗装した場合でも、1ヶ月間の運用により、海水面付近に位置するソーラーパネル全面に海苔や、水中の微生物が作用してできる粘着物質であるスライムが付着したこともあった (Fig. 3a, b)。このときの日射量と発電量の関係を以下に示す (Fig. 3c)。日射量は観測海域近隣の松江市のデータを使用した。日射量が同程度であっても、投入直後の12月下旬から1月初めに比べ、1月中旬以降の発電量が減少していることがわかる。今後、発電効率改善のため、新規塗料の開発、AOVのソーラーパネルでの効果検証を進めていく。

現在、電力不足への対応として、電力の節減を進めている。まず、機体の制御を司るCCU (Command and Control Unit) と観測機器の制御を司るMPU (Modular Payload Unit) 間の通信に使用しているイーサネット通信をシリアル通信に変更することで、イーサネット通信の消費電力分2.4 Wの電力削減になることから (Table 2b)、順次変更を進めている。

また、観測機器の中で最も電力消費量の多いGNSS受信機の省電力化のために、既存のTrimble社製のBX935-INS (約3.5 W) から、Septentrio社製のThe AsteRx-m2 UAS (約1.5 W) の導入を進めており、2019年度に導入した十管区の2基 (「きびなご3号」, 「きびなご4号」), 十一管区の2基 (「ぐるくん」, 「たまん」) には、低電力のGNSS受信機を搭載した。

GNSS受信機の搭載による省電力化の効果を把握するため、低電力のGNSS受信機と従来型のGNSS受信機の消費電力を比較した。AOVに搭載されたGNSS受信機の消費電力を直接取得する方法が無いため、AOVの電力管理システムが1時間毎に取得するS1ポートの消費電力を比較した。S1ポートはGNSS受信機のほかADCPや波浪計等の電力にも使用しているが、新型GNSSを搭載した4基については、GNSS受信機以外の

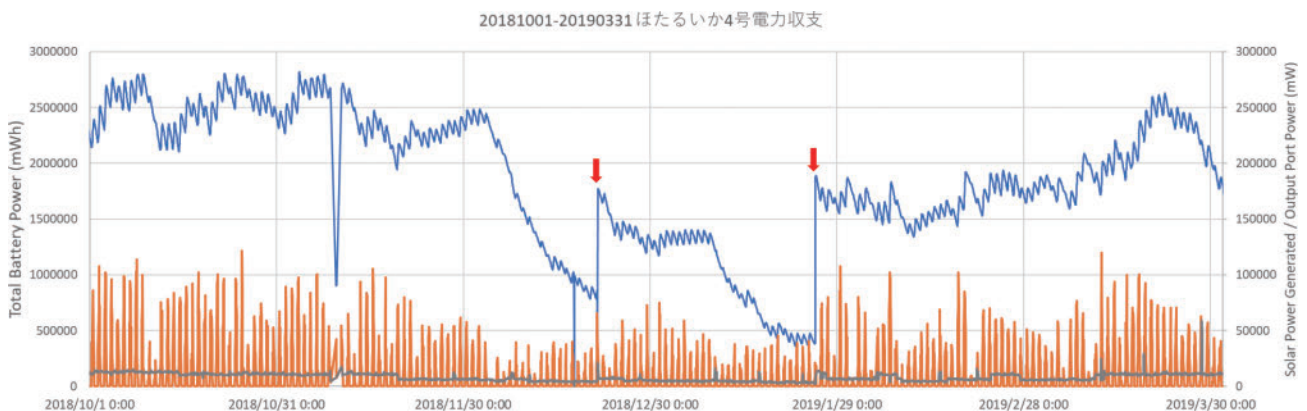


Fig. 2. Power balance of AOV *Hotaruika4* at west of the Oki Islands from October 1, 2018 to March 31, 2019. The blue line shows electric energy (mWh, left vertical axis). The red line and gray line show power generation and power consumption, respectively (mW, right vertical axis). The Arrows indicate point of battery exchange.

図2. 2018年10月1日から2019年3月31日の隠岐諸島西方海域におけるAOV「ほたるいか4号」の電力収支。青線が電力量を示す (mWh, 左の縦軸)。また、赤線は発電力、灰線は電力消費を意味する (mW, 右の縦軸)。矢印は点検に伴うバッテリー交換の時点を示す。

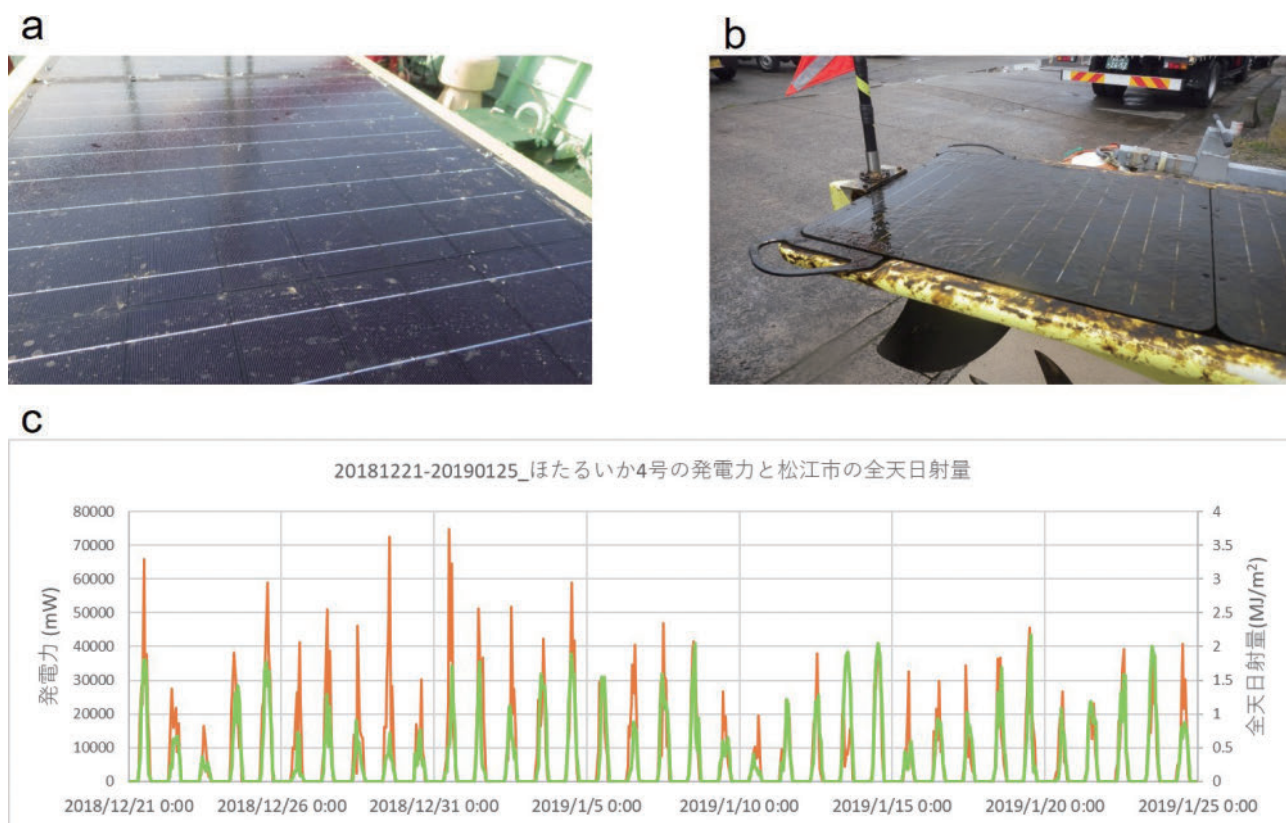


Fig. 3. The reduction of power generation efficiency caused by a seaweed breeding. (a) The solar panel of *Hotaruika4* before launched to west of the Oki Islands on December 21, 2018. (b) The solar panel of *Hotaruika4* after recovered from west of the Oki Islands on January 25, 2019. (c) Power generation of *Hotaruika4* (mW, left vertical axis) and global solar radiation in Matsue ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ , right vertical axis). The red and green lines show power generation and global solar radiation, respectively. The global solar radiation data was obtained from Japan Meteorological Agency's web site (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>).

図3. 海苔の発生とそれに伴う発電効率の変化. (a) 2018年12月21日の隠岐諸島西方海域投入前の「ほたるいか4号」のソーラーパネルの写真. (b) 2019年1月25日の揚収後の「ほたるいか4号」のソーラーパネルの写真. (c) 隠岐諸島西方海域で運用された「ほたるいか4号」の発電力と松江市の全天日射量. 赤線が発電力 (mW, 左の縦軸), 緑線が全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ , 右の縦軸) を意味する. 全天日射量のデータは気象庁のホームページからダウンロードしたデータを使用した (<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>).

構成変更が無いことから, S1ポートの消費電力を従来機と比較することでGNSS受信機の消費電力の違いを確認できる. 2020年2月1日~2月29日に宮古島周辺で観測した「ぐるくん」のS1ポートの消費電力 (Fig. 4a) 及び2019年6月1日~6月29日に奄美大島周辺で観測した「きびなご1号」のS1ポートの消費電力 (Fig. 4b) の推移を示す.

「きびなご1号」は, 1か月間の平均で約6.06 Wの消費電力であるのに対し, 新型GNSS受信

機を搭載した「ぐるくん」は約3.89 Wとなっており, 消費電力を約2.17 W抑えることができている. 両GNSS受信機のカタログ上の消費電力を比較すると, 新型のSeptentrio社製「AsteRx-m2」が約1.5 W, 従来のTrimble社製「BX935-ins」が約3.5 Wであることから, 新型GNSS導入による消費電力の削減の効果が表れているものと考えられる.

しかし, 新しいGNSS受信機に切り替えた場合であっても, 充電できない日が数日程度続くと

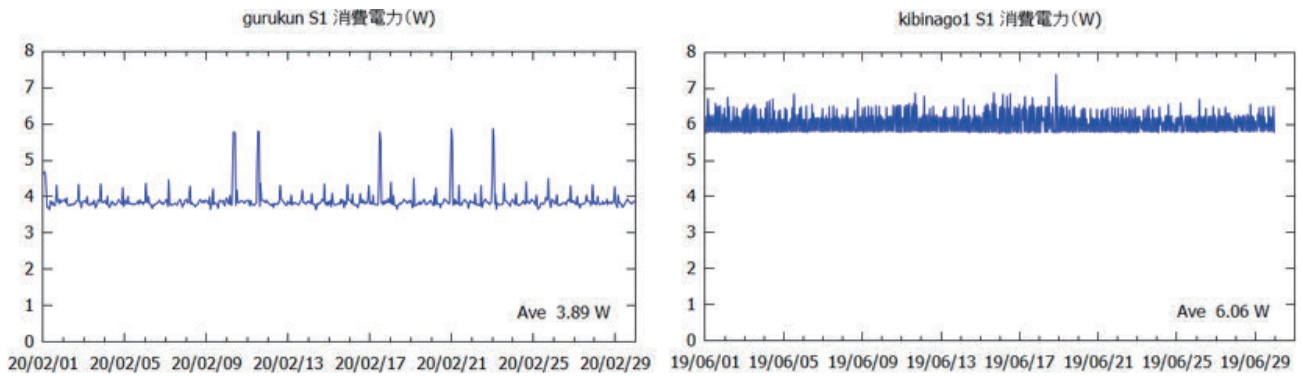


Fig. 4. The comparison of power consumption of the new and old GNSS receivers. (a) Time series of the S1 port power consumption of the *Gurukun* equipped with the new GNSS receiver. (b) Time series of the S1 port power consumption of the *Kibinago1* equipped with the old GNSS receiver.

図 4. 新旧 GNSS 受信機を搭載した場合の消費電力の比較. (a) 「ぐるくん」の S1 ポート消費電力の推移 (新型 GNSS 受信機搭載). (b) 「きびなご 1 号」の S1 ポート消費電力の推移 (従来型 GNSS 受信機搭載).

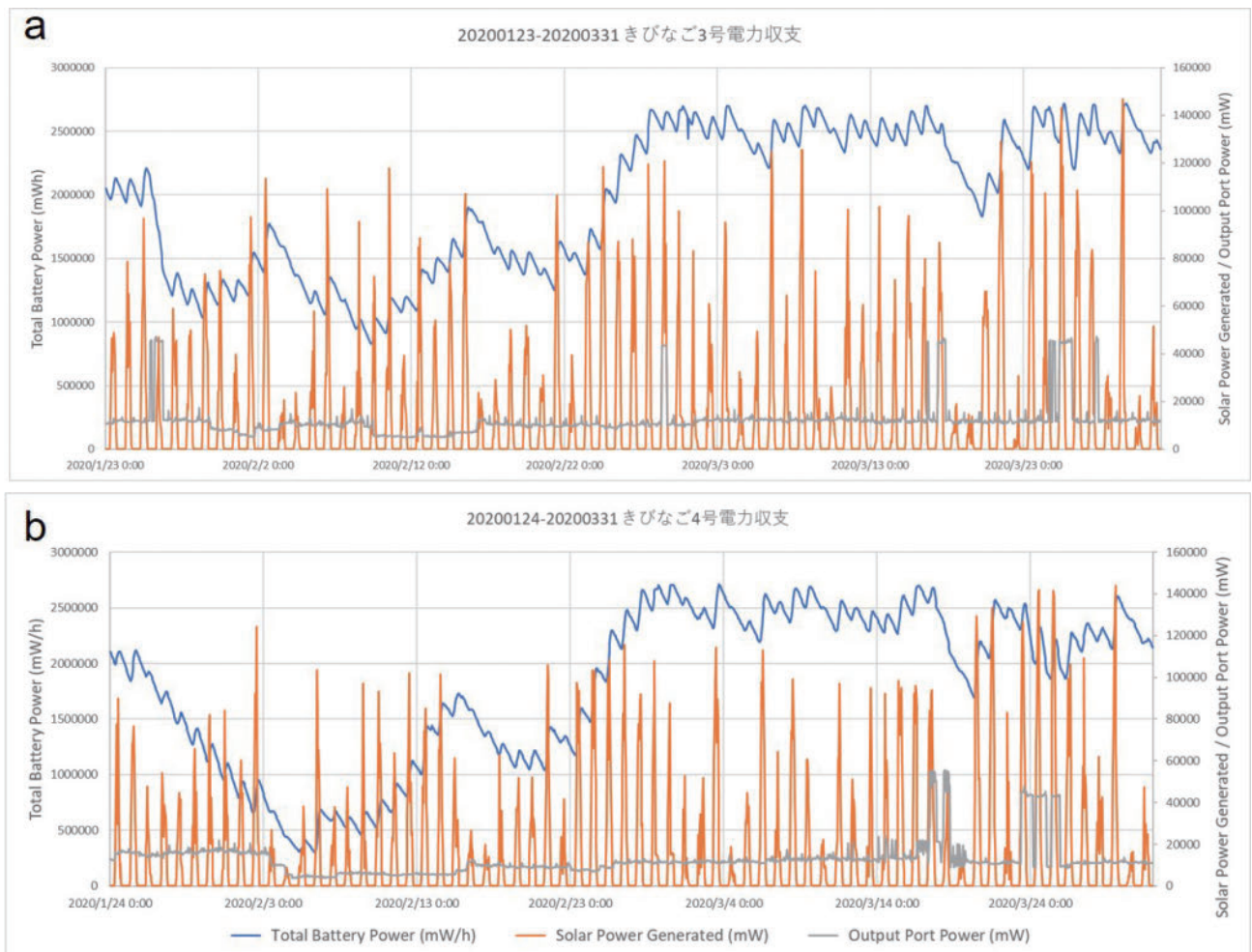


Fig. 5. Power balance of (a) *Kibinago3* and (b) *Kibinago4* from January to February, 2020. The blue line shows electric energy (mWh, left vertical axis). The red line and gray line show power generation and power consumption, respectively (mW, right vertical axis).

図 5. (a) 「きびなご 3 号」, (b) 「きびなご 4 号」の 2020 年 1 月から 2 月の電力収支. 青線が電力量を示す (mWh, 左の縦軸). 赤線は発電電力, 灰線は電力消費を示す (mW, 右の縦軸).

依然として電力不足となる. Fig. 5 に 2020 年 1 月から 3 月の, 奄美大島北方における「きびなご 3 号」, 奄美大島西方における「きびなご 4 号」の電力収支を示す. 「きびなご 3 号」, 「きびなご 4 号」は主に 1 月から 2 月にかけて, 電力量を維持するため, 観測機器の一部あるいは全てをオフにし, 消費電力を抑えている.

電力不足は依然として運用上の課題となっている. 消費電力の少ない観測機器への変更に加え, 新たな発電方法の模索等, 引き続き, 改善に向けた検討を続けていく.

### 2.2.2 調査海域からの離脱

次に, 調査海域からの離脱について説明する. GNSS データの処理にあたっては, 後述するように観測海域外のデータを除外しており, 調査海域からの離脱はデータ不足の要因となる. AOV の

平均航行速度は 1.3 knot であり, 調査海域において航行速度以上の流れが生じると, やがて調査海域から離脱してしまう. 特に, AOV は波の上下動により推進力を得るため, 波が小さい場合に推進力を得られず流されやすくなる. スラスターを稼働させることで最大 1 knot 程度加速できるものの, そのために必要な電力はおよそ 50 W であり, 電力管理との兼ね合いで常時使用することはできない.

Fig. 6 に調査海域から離脱した例を示す. Fig. 6 の例では 2020 年 1 月 24 日から 2020 年 5 月 10 日までの間, 奄美大島西方において観測していた AOV の航路を示している. この海域では, 航行していた 108 日間のうち 12 日程度, 圧流により調査海域を離脱している. 流速は海域によって異なるため一概には言えないが, Fig. 6 の観測海域では最大 2.6 knot 程度の南向きの流れが観測され

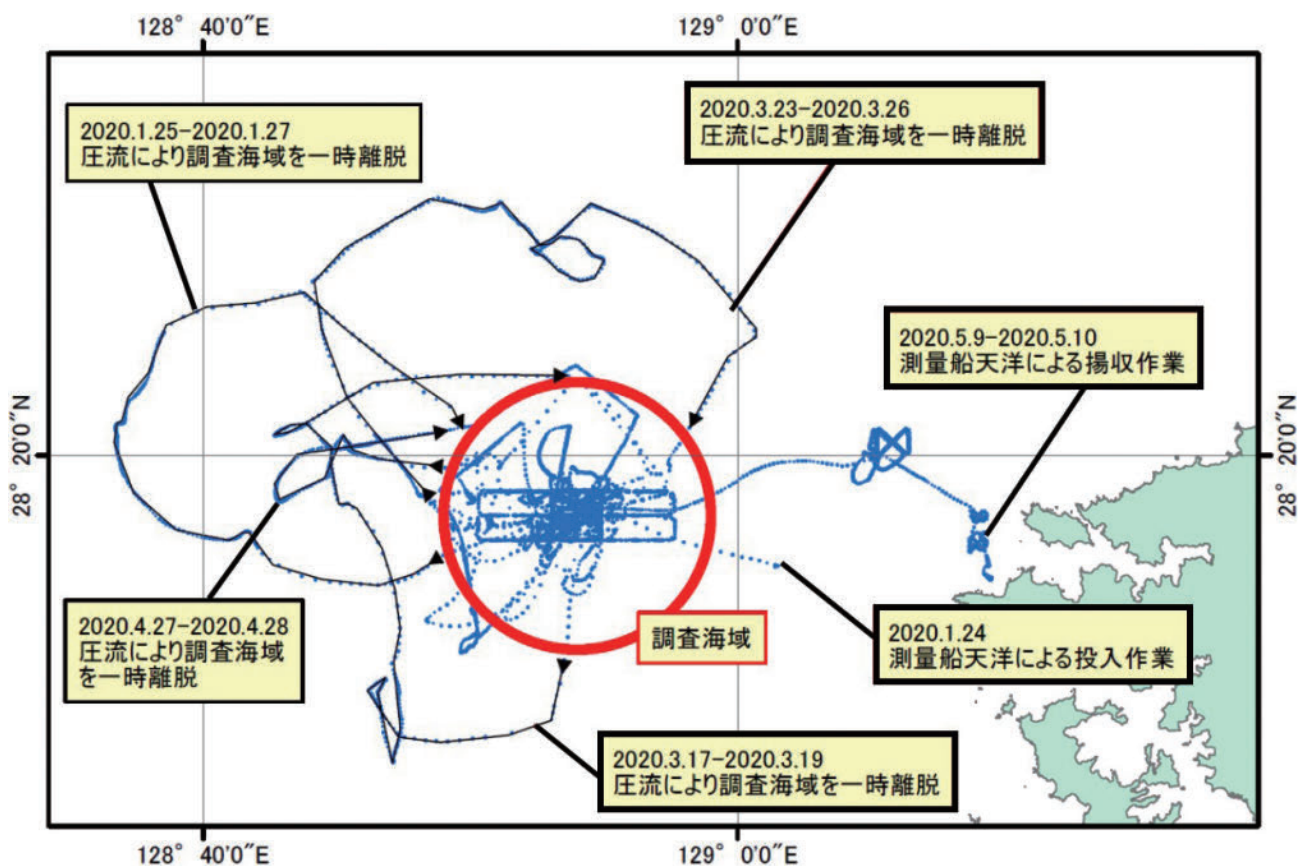


Fig. 6. An example of leaving a survey area. Thin and dotted lines show the track lines of *Kibinago4* west of the Amami Oshima from January 24, 2020 to May 10, 2020. The inside of the red circle indicates the survey area.

図 6. 調査海域から離脱した例. 2020 年 1 月 24 日から 5 月 10 日の「きびなご 4 号」の奄美大島西方の航跡. 赤い円の内側が本来の調査海域.



ており、観測海域にとどまるためには、スラスターの強化等により3 knot以上の速度がでるようにする必要がある。

### 3 気象・海象観測の活用事例

海上保安庁のAOVによる気象・海象観測の成果は、これまでも海洋情報部研究報告等で報告されてきた。西村・他(2017)では、ADCPにより、沖縄本島東方の暖水渦を確認したことを報告している。松永・他(2018)では、十管区が運用する「きびなご1号」が黒潮の強流上を通過した際に得られた海流データが海洋速報に活用されたこと、2016年台風17号および18号通過時のAOVによる海上の気象、海象について報告している。また、当庁のAOVデータが活用された事例として、沖縄気象台で、人工衛星による波高の観測値と当庁が取得した石垣島付近のAOVの波高の観測値を比較し、波高の実況監視に有効であることを報告している(友利・他, 2018)。

以下では、松永・他(2018)以降の気象・海象観測の活用例を示す。まず、各管区のホームページのAOVデータのアクセス状況について記載する。次に、既報で取り上げられていない日本海側の観測事例として、海洋速報への活用、台風通過時の気象、潮流の解析、海上模様の撮影について報告する。

#### 3.1 AOVデータへのアクセス状況

1章で記載したとおり、気象・海象の観測結果は各管区のホームページで公開されている。AOVデータへのアクセス数をカウントしたところ(ホームページがメンテナンス中でアクセス数をカウントできなかった九管区を除く)、2018年の1~12月の合計が77695回、2019年の1~12月の合計が124332回と増加していた。なお、2020年の1~6月の合計は93534回だった。アクセス数が増加している理由を明らかにすることは困難だが、運用機体の増加に伴う観測期間の長期化、2019年4月に各種漁業団体へ実施したAOVの周知活動の影響が可能性として考えられ

る。今後、AOVの観測データがさらに広く利用されるためには、周知活動等のほか、他の情報提供サービスとの連携が有効と思われる。海上保安庁では、海洋状況表示システム(愛称:海しる)という、様々な海洋情報を地図上に表示できるサービスを運用している。海しるには200項目以上の海洋情報が掲載されており、様々な分野での利用が想定されている。AOVの観測成果を海しるに掲載することで、当庁のAOV観測を認知していない様々な分野の新規ユーザの目に留まる機会の増加が期待される。

#### 3.2 海洋速報への活用例

AOVの観測データの一部は、各管区の海洋速報としても公開しており、Fig. 7に一例を示す。九管区では、日本海中央を横断する測線上において気象・海象の観測を行っている。海流の観測においては、測線の北側ではおおむね強い海流が北

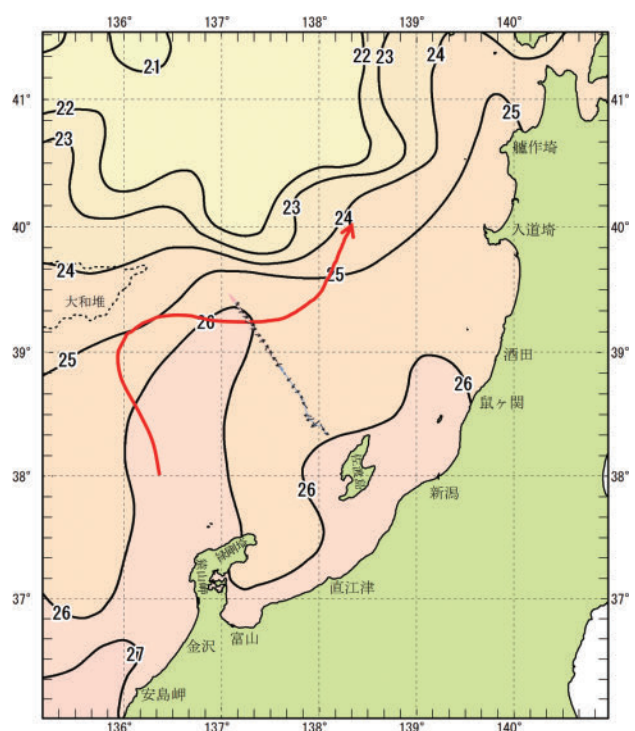


Fig. 7. The quick bulletin of ocean conditions of the 9<sup>th</sup> regional coast guard headquarters from August 31 to September 6, 2018 and ADCP data observed with AOV.

図7. 九管区海洋速報第35号(8/31~9/6)と海流図。

東方向へ流れている一方、南側では北東方向への顕著な流れは確認できなかった。測線の北側は対馬暖流の南縁を観測していたと思われる。

### 3.3 台風通過時の観測例

次に、2台の AOV が同時に一つの台風を観測した事例を示す。2018 年 9 月 4 日、佐渡島北西海域にて九管区が運用する、「のどぐろ 3 号」と「のどぐろ 4 号」が 2018 年台風第 21 号通過時の気象・海象を観測した。

台風通過のコースと各機体の位置関係を Fig. 8 に示す。

台風第 21 号の中心は 9 月 4 日 21 時 00 分ころに「のどぐろ 3 号」の南東と「のどぐろ 4 号」の北西を通過した。このときの風向・風速データを

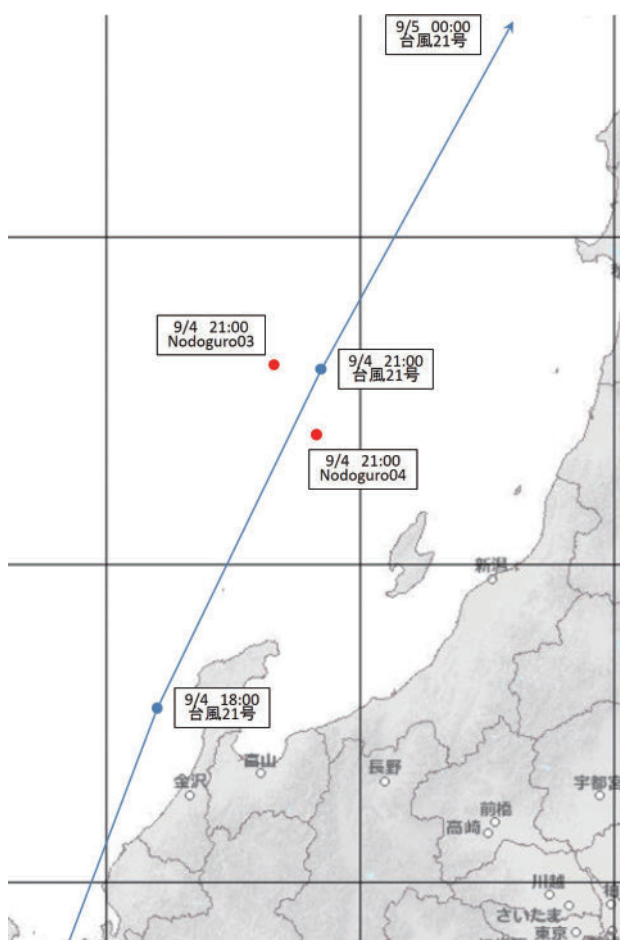


Fig. 8. Locations of Nodoguro3 and Nodoguro4 and the trajectory of the typhoon center.

図 8. 2018 年台風第 21 号通過時の機体と台風の位置関係。

Fig. 9 に示す。

台風の西側にいた「のどぐろ 3 号」は東風から北風に反時計回りの、東側にいた「のどぐろ 4 号」は東風から南風に時計回りの風向きの変化をとらえた。これは、台風の風が地上では反時計回りとなることと整合的である。また、風速について、「のどぐろ 3 号」に関しては、19 時 35 分に約 13 m/s を記録した後一旦小さくなり、20 時 50 分に約 7 m を記録した後再び急速に強まり、22 時 20 分には約 22 m/s を記録した。「のどぐろ 4 号」が観測した風速に関しては、20 時 05 分に約 19 m/s を記録した後一旦小さくなり、20 時 45 分に約 11 m/s を記録した後再び急速に強まり、22 時 00 分には約 24 m/s を記録した。これらの V 字の風速の変化は「のどぐろ 3 号」、「のどぐろ 4 号」が台風の日に入ったことを示している。風速の最大値は「のどぐろ 3 号」、「のどぐろ 4 号」の両方で台風の日通過後に記録された。なお、この台風の日は室戸岬を通過しており、室戸岬で記録された最大瞬間風速も台風の日通過後であったことが報告されている（山本・他, 2019）。

### 3.4 潮流の観測例

次に、既報で報告されていない、ADCP データを活用した潮流の解析事例を示す。八管区では、隠岐諸島西方および東方海域において、水面下 3 m の ADCP データを活用し、32 昼夜の調和分解を行い、10 分潮の流速、遅角を算出し、同海域の潮流の影響を評価した。隠岐西方海域においては、2018 年 10 月 1 日から 11 月 5 日までの内、観測海域外に出た 10 月 6 日、15 日を除く 33 日間、東方海域においては、2018 年 6 月 1 日から 7 月 13 日までの内、観測海域外に出た 6 月 7 日、26 日、7 月 4 日、5 日を除く 38 日間のデータを活用した。

隠岐諸島西方海域の流速の北方成分と東方成分を Fig. 10a, b に、潮流の影響を除いた 25 時間移動平均の流れを Fig. 10c に示す。恒流は 42.3° 方向に 0.33 knot であった。この傾向は過去の観測とも一致しており（吉・他, 1995）、西から東に

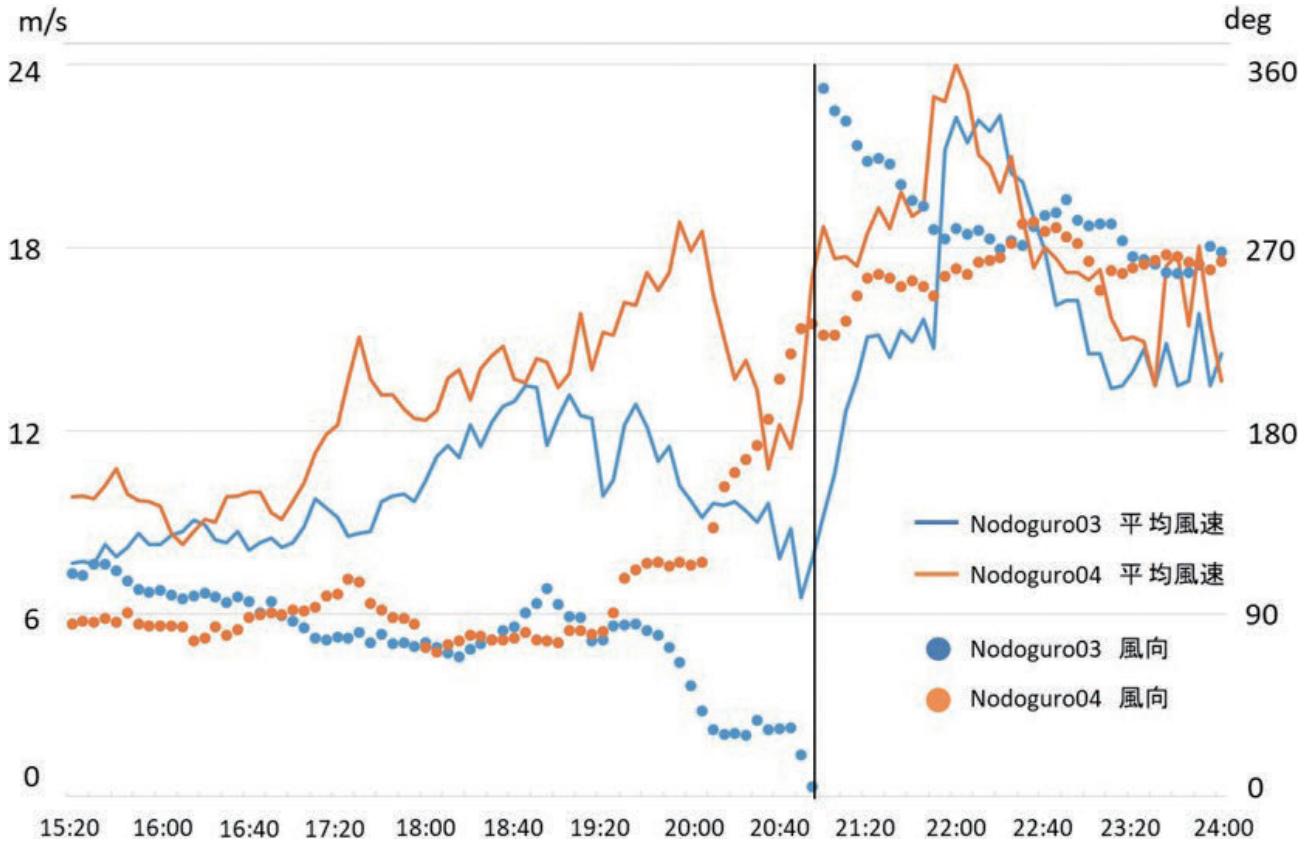


Fig. 9. Surface winds when passing the typhoon. The blue and orange lines show average wind velocity (m/s, left vertical axis) observed by *Nodoguro3* and *Nodoguro4*, respectively. The blue and orange dots show wind direction (deg, right vertical axis) observed by *Nodoguro3* and *Nodoguro4*, respectively. The black vertical line indicates the time 21:00, when the typhoon center passed between *Nodoguro3* and *Nodoguro4*.

図9. 台風第21号通過時の風速・風向データ. 青線及びオレンジ線が「のどぐろ3号」及び「のどぐろ4号」が観測した平均風速 (m/s, 左の縦軸), 青ドット及びオレンジドットが「のどぐろ3号」及び「のどぐろ4号」が観測した風向 (deg, 右の縦軸) を示す. グラフ中の垂直の黒線は台風が「のどぐろ3号」及び「のどぐろ4号」の間を通過したところである21時00分を示す.

流れる対馬暖流の影響と思われる.

隠岐諸島西方海域の調和定数は Table 3 のとおりで, 半日周潮 (M2, S2 分潮) に比べ, 日周潮が卓越している (K1, O1).

隠岐諸島周辺を含む山陰海岸沖の陸棚域で日周潮が卓越することは磯田・川上 (1995) にも記載されている. 同報では, 山陰海岸沖の日周潮の卓越を対馬海峡で生じる渦の伝播により説明しているが, 同報のモデル計算によると, この渦は隠岐に達する前に消滅し, 隠岐諸島西方での日周潮の卓越の原因はよくわかっていない. Fig. 11 に, 大潮期における最大流況 (日周潮流, 半日周潮流, 1/4 日周潮流の合成値) を示す.

上げ潮最大の方向及び流速が  $86.1^\circ$  0.16 knot,

下げ潮最大の方向及び流速が  $270.6^\circ$  0.13 knot であった. 隠岐諸島西方海域では, 大潮期であっても, 恒流の流速が潮流より大きく, 潮流の影響は少ないことがわかる. 日本海では, 潮汐波が侵入する海峡の断面積が日本海の表面積に比べ小さく, 海峡付近を除き潮流は小さいものと期待されるため, 潮流が弱かったことは妥当であると思われる.

次に, 隠岐諸島東方海域の流速の北方成分と東方成分を Fig. 12a, b に, 潮流の影響を除いた 25 時間移動平均の流れを Fig. 12c に示す. 全体的に隠岐諸島西方に比べ流速は小さかった.

北方成分はほとんどが 0.4 knot 未満の流速で, 一方向に卓越した流れではなく, 東方成分は北方

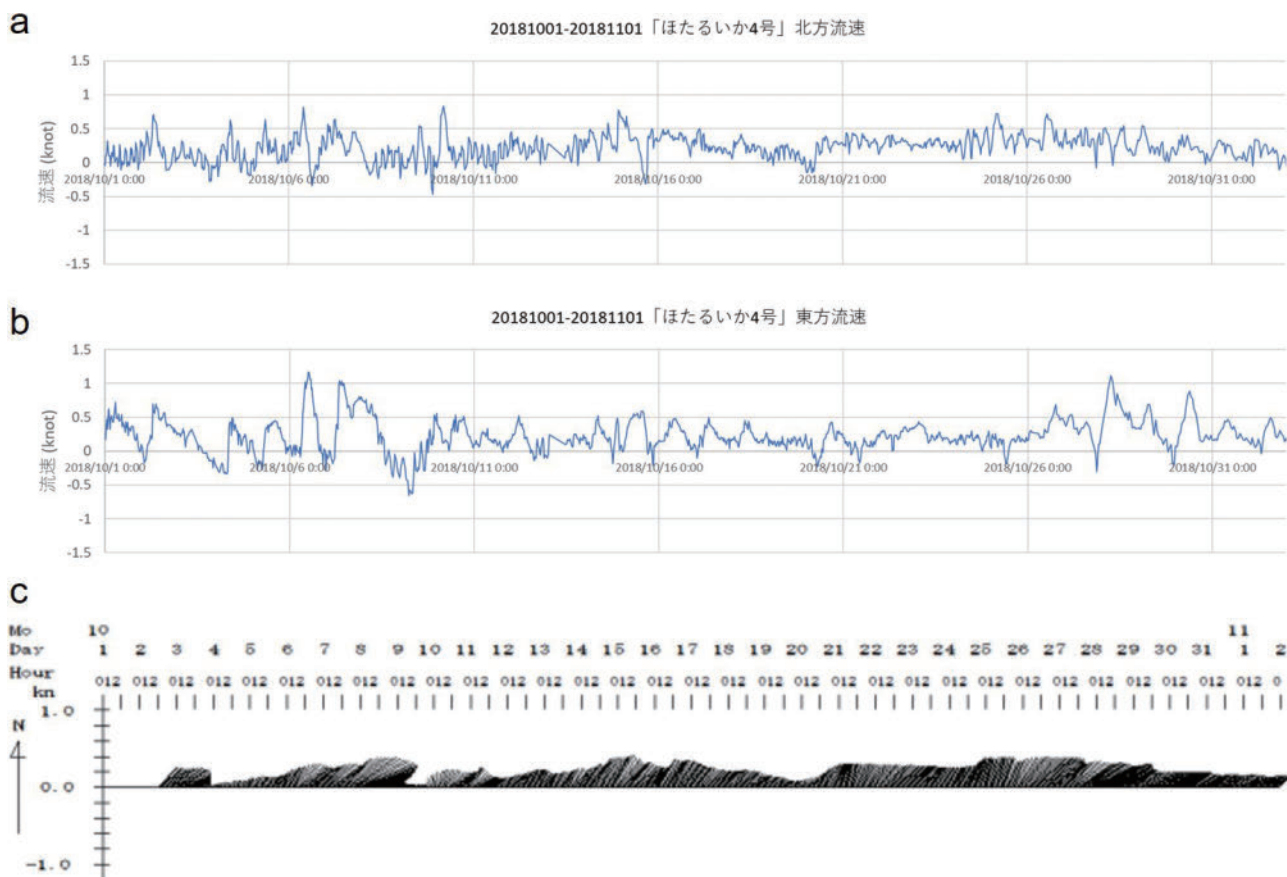


Fig. 10. (a) Northern and (b) eastern components of the ocean currents (knot) at west of the Oki Islands. (c) 25 hours running mean of the ocean currents (knot) at west of the Oki Islands.

図 10. 隠岐諸島西方の流れの (a) 北方成分及び (b) 東方成分 (knot). (c) 隠岐諸島西方の流れの 25 時間移動平均 (knot).

Table 3. Harmonic constants of west of the Oki Islands.  
表 3. 隠岐諸島西方の調和定数.

位置 : 36° 10' 45" N 132° 57' 58" E  
観測年月日 : 2018/10/1 ~ 2018/11/1 (32 昼夜)  
観測層 : 水面下 4.0m

	北方分速		東方分速		主方向 265	
	V (kn)	$\kappa$ (deg)	V (kn)	$\kappa$ (deg)	V (kn)	$\kappa$ (deg)
M 2	0.002	146.4	0.018	254.2	0.018	73.6
S 2	0.012	134.5	0.034	206.6	0.034	24.9
K 2	0.003	134.5	0.009	206.6	0.009	24.9
N 2	0.025	126.5	0.027	218.7	0.027	34.1
K 1	0.020	193.3	0.078	256.6	0.079	75.5
O 1	0.012	325.4	0.036	54.3	0.036	232.6
P 1	0.007	193.3	0.026	256.6	0.026	75.5
Q 1	0.049	118	0.025	89.5	0.028	273.6
M 4	0.003	266.9	0.001	118.1	0.000	315.6
M S 4	0.004	204.9	0.000	283.6	0.001	56.1
恒流	流速 (knot)		0.325			
	流向 (deg)		42.3			

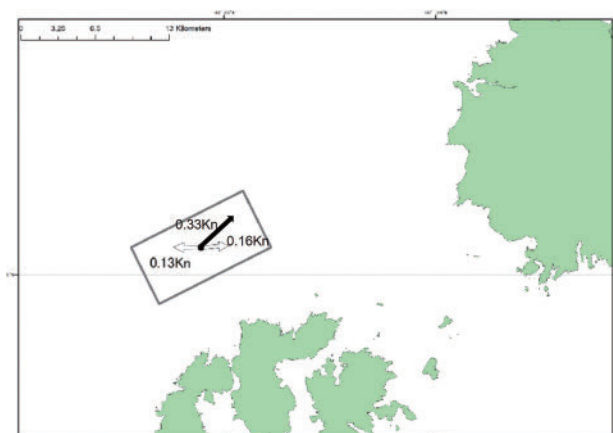


Fig. 11. Maximum flows at west of the Oki Islands. The black and white arrows show residual and tidal currents, respectively.

図 11. 隠岐諸島西方の最大流況. 黒矢印は恒流, 白矢印は潮流を意味する.

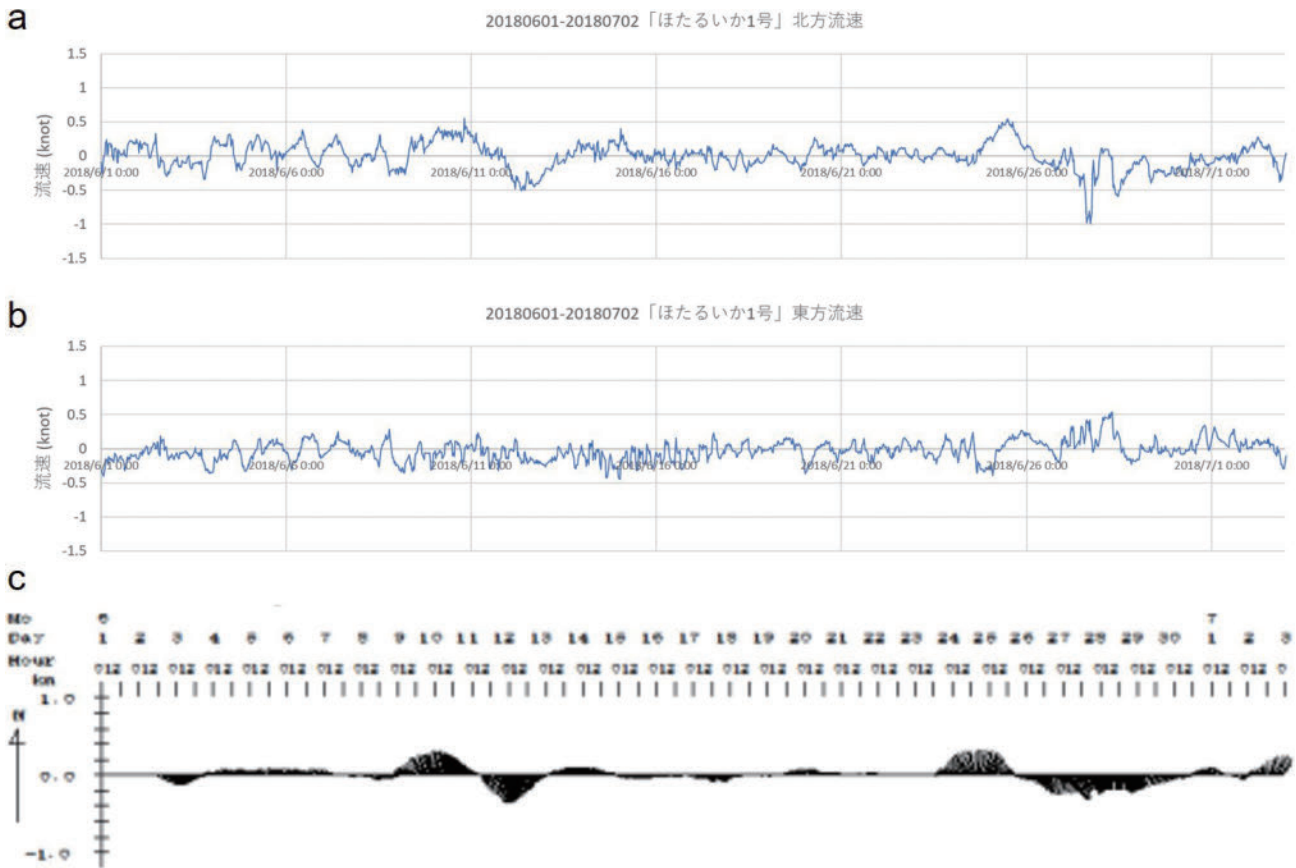


Fig. 12. (a) Northern and (b) eastern components of the ocean currents (knot) at east of the Oki Islands. (c) 25 hours running mean of the ocean currents (knot) at east of the Oki Islands.

図 12. 隠岐諸島東方の流れの (a) 北方成分及び (b) 東方成分 (knot). (c) 隠岐諸島西方の流れの 25 時間移動平均 (knot).

成分よりさらに流速が小さかった。恒流は  $266.2^\circ$  方向に  $0.03 \text{ knot}$  であった。隠岐諸島西方海域に比べ流速が小さい理由は、観測海域が対馬暖流に対して島の影にあり、海流の影響を受けにくいためと思われる。

隠岐諸島東方海域の調和定数は Table 4 のとおりであり、半日周潮 (M2, S2 分潮) に比べ、日周潮が卓越しており (K1, O1), 各分潮の流速は隠岐西方と比べて小さかった。

Fig. 13 に、大潮期における最大流況 (日周潮流, 半日周潮流,  $1/4$  日周潮流の合成値) を示す。

上げ潮最大の方向及び流速は  $2.2^\circ \ 0.08 \text{ knot}$ , 下げ潮最大の方向及び流速が  $224.8^\circ \ 0.07 \text{ knot}$  であった。隠岐諸島東方海域も西方海域同様、潮流は小さいことが確認された。

Table 4. Harmonic constants of east of the Oki Islands.  
表 4. 隠岐諸島東方の調和定数。

位置: $36^\circ 17' 21'' \text{ N } 133^\circ 27' 27'' \text{ E}$						
観測年月日: 2018/06/01 ~ 2018/07/01 (32 昼夜)						
観測層: 水面下 4.0m						
	北方分速		東方分速		主方向 117	
	V (kn)	$\kappa$ (deg)	V (kn)	$\kappa$ (deg)	V (kn)	$\kappa$ (deg)
M 2	0.003	348.4	0.010	285.3	0.009	277.6
S 2	0.010	70.6	0.015	170.8	0.015	187.9
K 2	0.003	70.6	0.004	170.8	0.004	187.9
N 2	0.006	29.8	0.011	141.7	0.011	155.1
K 1	0.038	286.1	0.019	34.6	0.028	70.6
O 1	0.018	87.9	0.012	167.0	0.012	208.9
P 1	0.013	286.1	0.006	34.6	0.009	70.6
Q 1	0.033	229.8	0.015	318.3	0.020	8.2
M 4	0.005	82.0	0.005	32.5	0.003	359.6
M S 4	0.009	243.7	0.003	347.2	0.005	33.6
恒流	流速 (knot)		0.028			
	流向 (deg)		266.2			

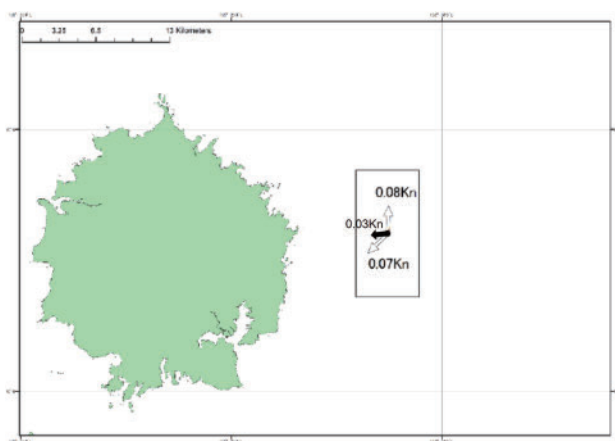


Fig. 13. Maximum flows at east of the Oki Islands. The black and white arrows show residual and tidal currents, respectively.

図 13. 隠岐諸島東方の最大流況. 黒矢印は恒流, 白矢印は潮流を意味する.

### 3.5 海上模様等の撮影

最後に、2種類のカメラによる海況と AOV の状況の撮影事例を示す。撮影は 2018 年 7 月から 8 月にかけて隠岐諸島東方海域で行われた。機体中央に設置した Liquid Robotics 社製のカメラは海上模様を (Fig. 14a), 機体後部の GNSS アンテナに設置したマリンワークジャパン社製のタイムラプスカメラにより撮影した画像からは、波高 5–6 m の海況で AOV が波をかぶっている様子や (Fig. 14b), レーダーリフレクターが回転した様子をそれぞれ見て取れる (Fig. 14c, d).

なお、Liquid Robotics 社製のカメラは電源を AOV からとっており (3 W 未満), データは CCU に保存している。マリンワークジャパン社製のタイムラプスカメラの電源は電池であり、データはカメラ付属の SD カードに保存している。

Liquid Robotics 社製のカメラは、消費電力や、衛星通信でデータを送信する場合の通信コストの問題があるものの、将来的にこれらの問題が解決されればリアルタイムでの海況把握のツールとなることが期待できる。タイムラプスカメラは、データを SD カードに保存しており、揚収後に画像を確認し、観測中の AOV に生じた不具合の把握等に有効なツールとして期待できる。

### 4 精密な最低水面の算出に向けて

AOV の観測結果から精密な最低水面を算出するためには、観測されたデータのうち、GNSS データが用いられる。GNSS データの処理方法は、松永・他 (2018), 土屋・他 (2019), 土屋 (2020) の解析・検証作業を通じて構築されている。まず、GNSS の 1 Hz 観測データについて PPP-AR 解析 (単独精密測位: Precise Point Positioning with ambiguity resolution) により、AOV の GNSS アンテナの三次元位置 (緯度, 経度, 楕円体高) を算出する。PPP-AR 解析とは、GNSS 測位のうち搬送波位相を観測する手法の一種である。複数の観測点からなる基準局網で衛星の軌道や時計に関する広域誤差を推定した補正情報を生成し、基準局網と共通の衛星で行う測位を高精度化する。基準局網と共通の衛星が捕捉できている限り、広範囲で高精度な測位が可能とされる (日立造船, [https://www.hitachizosen.co.jp/gps/sokui/realtime/rtnet\\_pppar/](https://www.hitachizosen.co.jp/gps/sokui/realtime/rtnet_pppar/))。楕円体高の算出にあたり使用するソフトウェア等は松永・他 (2018) に記載されている。

PPP-AR 解析により得られた AOV の三次元位置を、現地の水位の時系列データとして資料整理し、AOV の観測海域の天文最低低潮面 (Lowest Astronomical Tide, 以下、「LAT」という) を算出する。LAT は平均的な気象条件のもとで任意の天文学的条件の組み合わせによって予測される最低潮位のことであり、少なくとも 1 年間の観測から得た調和定数による 19 年以上の潮汐推算から算出される (佐藤・熊谷, 2017)。

土屋・他 (2019) は、精度の高い LAT を求めるための課題を整理し、下記に示すような方法で資料整理することとした。

GNSS アンテナ位置の緯度経度から、5 km 四方より狭く設定された観測海域内の観測データを抽出する。GNSS アンテナは、フロート上の 60 cm のポールの上に設置されている。フロート上面は水面から約 3 cm 浮いているとし、水面—アンテナ間の高さを 63 cm と仮定し、GNSS アンテナ位置から減じることで水面の楕円体高とした。

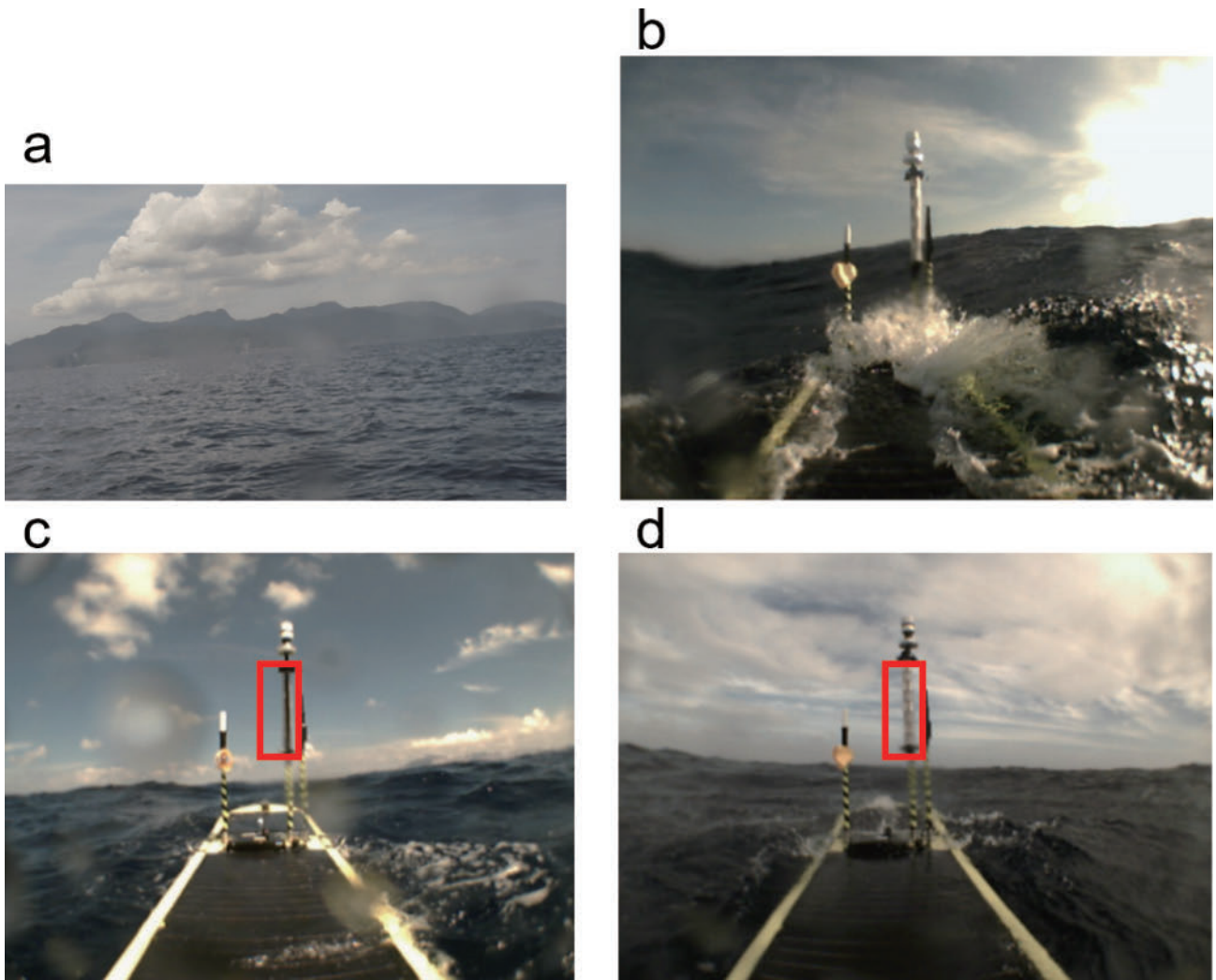


Fig. 14. Photographs taken with the equipped cameras. (a) A photograph taken with the camera made by Liquid Robotics. (b), (c), (d) Photographs taken with the camera made by Marine Works Japan. The red squares show the rotated radar reflector.

図 14. AOV 搭載カメラで撮影した写真。(a) Liquid Robotics 社製のカメラで撮影した写真。(b), (c), (d) マリンワークジャパン社製のカメラで撮影した写真。赤枠は回転したレーダーリフレクターを示す。

この水面の楕円体高を前後合計 200 秒の移動平均することで、波浪による短周期成分を除去する。この水位の時系列から毎時潮位時系列を作成する。

毎時潮位時系列には、GNSS 解析のミスフィックスによる高さの不自然な移動が含まれることがある。近接する常設験潮所の毎時潮位を参照して、明らかにミスフィックスであるデータを特定して除去する。

得られた毎時潮位時系列には、AOV の観測海域からの離脱、GNSS 解析のミスフィックス等により、欠測が多く含まれる。欠測が多く含まれる

と、1 年間の調和分解でも、周期の近い成分を適切に分離できず、オーバーフィッティングによって非現実的な振幅と遅角が算出されてしまう。そのため、AOV の毎時潮位時系列の調和分解に当たっては、欠測期間の長さに応じて分潮を選択することとした (土屋, 2020)。

1 年間の調和分解により、1 年、半年周期成分も求められるが、これは年々変動することが知られている。そこで、1 年、半年周期成分は、近隣の常設験潮所の 10 年間の観測データに基づく調和定数を使用することとした。

AOV の観測海域の平均水面は、約 1 年間の平

均値が求められるが、通常の臨時潮汐観測と同じく、これを近隣の常設観測所との短期平均水面比較の手法により補正し、5年平均水面を求める。得られた平均水面上で、19年間の潮汐推算を行い、最も低い面をLATとする。

今後、AOV観測の資料整理にあわせ上記の処理を行い、順次精度の高いLATを算出していくこととなる。

## 5 おわりに

本稿では、海上保安庁が2016年から開始したAOV観測について、運用上の課題、気象・海象観測、精密な最低水面の算出に向けた現在の取り組みについて記載した。

電力不足に対しては、松永・他(2018)で報告されたバッテリーの追加に加え、機体内の通信方法の変更やより消費電力の少ない観測機器への交換といった対応をしたものの、依然として電力不足に陥る場合もある。また、観測海域からの離脱もGNSSデータ不足の要因となっている。

気象・海象観測については、2018年に始まった九管区での観測において、台風の北側と南側で同時に気象・海象を観測したほか、対馬暖流を安定して観測するなど、自律移動、長期観測といったAOVの特性を活かした成果があがった。また、ADCPデータを活用した調和分解により、潮流を評価している管区もあり、AOVの制御が可能な流速の海域では潮流観測も可能であることが示された。その他、気象・海象データのさらなる活用に向けては、他の情報提供サービスとの連携が重要と考えられる。

精密な最低水面の算出については、手法が確立されてきており、今後、1年間分の観測データを利用し、各観測海域における精度の高いLATを算出していく。

## 謝 辞

AOVの投入・揚収作業は、海上保安庁海洋情報部の測量船「明洋」、「天洋」、「海洋」で実施させていただきました。乗組員の皆様のご尽力に感

謝いたします。

## 文 献

- Daniel, T., J. Manley, and N. Trenaman (2011) The Wave Glider: enabling a new approach to persistent ocean observation and research, *Ocean Dynamics*, 61, [10], 1509–1520.
- Foster, J. H., T. L. Ericksen, and B. Bingham (2020) Wave Glider-Enhanced Vertical Seafloor Geodesy, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37, [3], 417–427.
- Frolov, S., J. Bellingham, W. Anderson, and G. Hine (2011) Wave Glider-A platform for persistent monitoring of algal blooms. In *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA* (1–5).
- Hine, R., S. Willcox, G. Hine, and T. Richardson (2009) The wave glider: A wave-powered autonomous marine vehicle, In *OCEANS 2009* (1–6)
- 日立造船, RTNet/PPP-AR: 精密単独測位解析, [https://www.hitachizosen.co.jp/gps/sokui/realtime/rtnet\\_pppar/](https://www.hitachizosen.co.jp/gps/sokui/realtime/rtnet_pppar/), 参照 2020年7月30日.
- Ichihara, M., H. Sugioka, K. Nishida, N. Tada, M. Takeo, and Y. Hamano (2018) Acoustic monitoring of an island volcano using Wave Glider: A test operation at Nishinoshima, Japan, *EGUGA*, 14495.
- Iinuma, T., M. Kido, Y. Ohta, T. Fukuda, F. Tomita, R. Hino, and I. Ueki (2019) GNSS-Acoustic Observation Using the Wave Glider to Detect the Seafloor Crustal Deformation Associated with the Temporal Change in the Interplate Locking State. *AGUFM*, 2019, T51H-0390.
- 石田雄三 (2017) 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用に向けて, 海洋情報部研究報告, 54, 74–83.
- 磯田 豊・川上雅宏 (1995) 山陰海岸沖の潮汐・潮流, 沿岸海洋研究, 32, [2], 177–185.
- 気象庁, 過去の気象データ検索, <https://www.>



- data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php,  
参照 2020 年 7 月 30 日.
- Mitarai, S. and J. C. McWilliams (2016) Wave glider observations of surface winds and currents in the core of Typhoon Danas, *Geophysical Research Letters*, 43, [21], 11-312.
- Morales Maqueda, M. A., N. T. Penna, S. D. P. Williams, P. R. Foden, I. Martin, and J. Pugh (2016) Water surface height determination with a GPS wave glider: a demonstration in Loch Ness, Scotland, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, [6], 1159-1168.
- Mullison, J., D. Symonds, and N. Trenaman (2011) ADCP data collected from a Liquid Robotics Wave Glider®, In 2011 IEEE/OES 10th Current, Waves and Turbulence Measurements (CWTM) 266-272.
- 西村一星・増田貴仁・糸井洋人・土屋主税・加藤弘紀・松坂真衣・佐藤勝彦・田中友規・野坂琢磨・野坂琢磨・石田雄三・下田 力・楠本仁麦 (2018) 自律型海洋観測装置 (AOV) の運用, 海洋情報部研究報告, 56, 68-78.
- Pagniello, C. M., M. A. Cimino, and E. Terrill (2019) Mapping fish chorus distributions in southern California using an autonomous wave glider, *Frontiers in Marine Science*, 6, 526.
- Penna, N. T., M. A. Morales Maqueda, I. Martin, J. Guo, and P. R. Foden (2018) Sea surface height measurement using a GNSS wave glider. *Geophysical Research Letters*, 45, [11], 5609-5616.
- 佐藤 敏・熊谷 武 (2017) 日本沿岸の Lowest Astronomical Tide について, 海洋情報部研究報告, 54, 84-94.
- 友利 健・鈴木史記・佐々木泰憲 (2018) 海上保安庁自律型海洋観測装置による気象観測データの特性調査, 沖縄技術ノート, 82, 7-8.
- 土屋主税 (2020) 欠測の多い潮位データの最小二乗法による調和分解, 海洋情報部研究報告, 58, 109-125.
- 土屋主税・林王弘道・松永智也・小林研太・久米奈緒子・山崎哲也・加藤弘紀・鈴木英一・宗田幸次・横田裕輔 (2019) 自律型海洋観測装置による潮位解析の方向性, 海洋情報部研究成果発表会, 東京, 2019 年 1 月 17 日.
- 山本晴彦・渡邊祐香・那須万理・川元絵里佳・坂本京子・岩谷 潔 (2019) 2018 年台風 21 号 (Jebi) により大阪湾沿岸で発生した強風・高潮災害の特徴, *自然災害科学*, 38, [2], 169-184.
- 吉 宣好・佐藤 敏・万代康史・後藤礼介 (1995) 「日本沿岸の流れシリーズ 3」山陰沿岸の流れ, *水路部技報*, 13, 74-82.

## 要 旨

海上保安庁では, 精密な最低水面の調査及び気象・海象情報の収集のために, 2016 年度より自律型海洋観測装置 (AOV) の運用を開始した. 本稿では, AOV による長期観測に関する課題とその改善に向けた取組について記載した. また, 精密な最低水面の決定に関してこれまで報告されてきた潮位観測データ処理の手法をまとめるとともに, AOV を用いた気象・海象観測における事例を示す.