

自律型海洋観測装置 (AOV) の運用†

松永智也*¹, 山崎哲也*¹, 糸井洋人*¹, 加藤弘紀*¹, 増田貴仁*²,
西村一星*², 土屋主税*³, 佐藤勝彦*⁴, 田中友規*⁵, 野坂琢磨*⁶,
石田雄三*⁷, 下田 力*⁸, 楠本仁麦*⁸

Operation of Autonomous Ocean Vehicle†

Tomoya MATSUNAGA*¹, Tetsuya YAMAZAKI*¹, Hiroto ITOI*¹,
Hiroki KATOU*¹, Takahito MASUDA*², Issei NISHIMURA*²,
Chikara TSUCHIYA*³, Katsuhiko SATOU*⁴, Tomonori TANAKA*⁵,
Takuma NOSAKA*⁶, Yuzo ISHIDA*⁷, Chikara SHIMODA*⁸,
and Yoshimu KUSUMOTO*⁸

Abstract

The Japan Coast Guard started using Autonomous Ocean Vehicles (AOV) for oceanographic observations in 2016 and has greatly improved its operations from then on. For example, it has established a recovery method based on its survey vessels and found an effective paint to prevent marine biofouling for long-term observation. Recently, it has succeeded in the acquisition of precious oceanographic data in the near center of typhoons and Kuroshio Current. In this paper, we provide an overview of the Japan Coast Guard's efforts related to AOV operations and present some results of our observations.

1 はじめに

2016年度より運用を開始した自律型海洋観測装置 (AOV: Autonomous Ocean Vehicle) (Photo 1) について, 西村・他 (2017) で報告されているが, その後の AOV の観測をよりよくするため

の工夫や観測成果について報告する。

2 AOV の観測状況

2017年9月現在, 5台の AOV が観測している。第七管区海上保安本部管内に1台, 第八管区海上

† Received September 8, 2017; Accepted November 27, 2017

* 1 環境調査課 Environmental and Oceanographic Research Division

* 2 企画課 Administration and Planning Division

* 3 総務部 政務課 政策評価広報室 Policy Evaluation and Public Relations Office, Policy and Legal Affairs Division, Administration Department

* 4 第七管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 7th R.C.G. Hqs.

* 5 第八管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 8th R.C.G. Hqs.

* 6 第十管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 10th R.C.G. Hqs.

* 7 第十一管区海上保安本部 海洋情報調査課 Hydrographic and Oceanographic Division, 11th R.C.G. Hqs.

* 8 株式会社ハイドロシステム開発 Hydro Systems Development, Inc.



Photo 1. Autonomous Ocean Vehicle (AOV).
写真1. 自律型海洋観測装置 (AOV).

保安本部管内に2台、第十管区海上保安本部と第十一管区海上保安本部管内にそれぞれ1台の計5台である。これまでのAOVの最長観測記録は第十管区海上保安本部の142日間である。1年間観測を予定していたが、他のAOVのトラブルにより、すべてのAOVに緊急対策を講じる必要があったため観測を中断した。

3 現場における作業 (回収作業)

小型船舶での回収作業を想定した一例について西村・他(2017)により報告されているが、ここでは2017年6月に測量船「明洋」で実施したものを示す。

回収前のブリーフィングで同月に実施した測量船「海洋」でのAOV回収の作業映像を用い、測量船「明洋」の乗組員に説明し、実際の作業後に測量船「明洋」に適した作業要領を整理した。測量船「海洋」との違いは、ギャロスの形状と後部甲板の作業スペースで、ギャロスは左右にフレームのあるタイプである。甲板にはギャロスを納めるための支柱が2本立っていて、作業スペースや動線も限られた状態であったため、作業方法はほぼ変わらないが、作業中にフレームや障害物に注意した動きが求められた (Photo 2)。測量船「明洋」では、左舷側の後部甲板が使用できないため、左舷側のキャプスタンの代わりに巻上機を使用した。作業前にまず、ゴムボートの組み立て、



Photo 2. [S/V Meiyo] Recovery workspace. These particular types have frames on both side of the A-frame crane.

写真2. 測量船「明洋」揚収作業スペース。ギャロスは左右にフレームがあるタイプ。

ギャロスに取り付ける滑車等の仕掛けの準備をする。ゴムボートを海上に降ろした後に、ギャロスに2つ滑車を取り付け、一方をAOVのフロート、もう一方はAOVの水中グライダーの引き上げ用とし、巻上機と左舷側のキャプスタンを使用して揚げ降ろしする。測量船「明洋」の位置と向きは船尾を風下、AOVを風上とし、測量船「明洋」のクラッチを脱にしてバウスラスターで姿勢を制御する。

準備後、AOV回収作業に入る。AOVに信号を送りAOV後方から回収用ブイをリリースさせる。回収用ブイにはロープがついていて、そのロープをゴムボートで回収し手繰り寄せ、フロートのサイドリフトポイントにえい航索を取り付け、4ノット以下で測量船「明洋」船尾までえい航する。測量船明洋後部甲板にえい航索を渡し、AOVを手繰り寄せる。後部甲板でゴムボートから回収用ブイを受け取り、回収用ブイをフロート後部の振れ止め索とする。ゴムボートでフロート先端部に振れ止め索、サイドリフトポイントに吊り上げ索を取り付ける (Photo 3)。その後、巻き上げ体制に入る。フロートのアンテナがある面を船尾から外側に向けてフロートを引き上げる (Photo 4)。フロートがある程度まで引き上げた



Photo 3. Attaching lifting rope to the side lift point of the AOV.

写真3. AOVのサイドリフトポイントへ吊り上げ索の取り付け.



Photo 4. Lifting the AOV's float.

写真4. AOVのフロートの引き上げ.

ところで、フロートからアンビリカルケーブルで約8m下につながっている水中グライダーを引き上げるため、回収用治具をアンビリカルケーブルに這わせて降下 (Photo 5) させ、水中グライダー上部金具に装着する。動力部である水中グライダーの推進力は止まっていないため、一旦フロートを海上に降ろし、回収用治具に取り付けた回収用ロープを巻き上げ、水中グライダーを水面上まで引き上げ、水中グライダーの先端に振れ止め索を取り付け (Photo 6)、海上模様が悪い場合は、フロートが進まないよう水中グライダーを先に船上に引き上げ、後でフロートを揚収

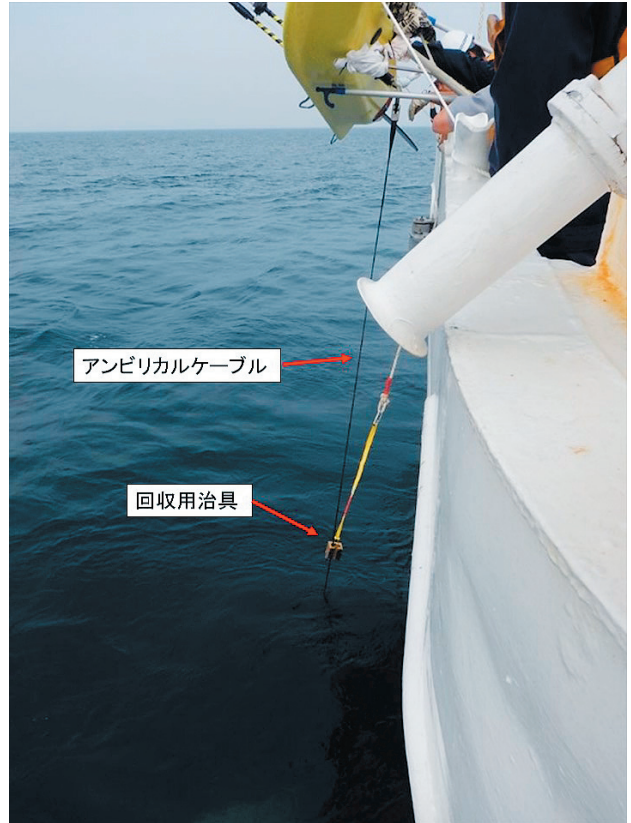


Photo 5. Dropping recovery device along the umbilical cable.

写真5. アンビリカルケーブルに這わせて回収治具投下.

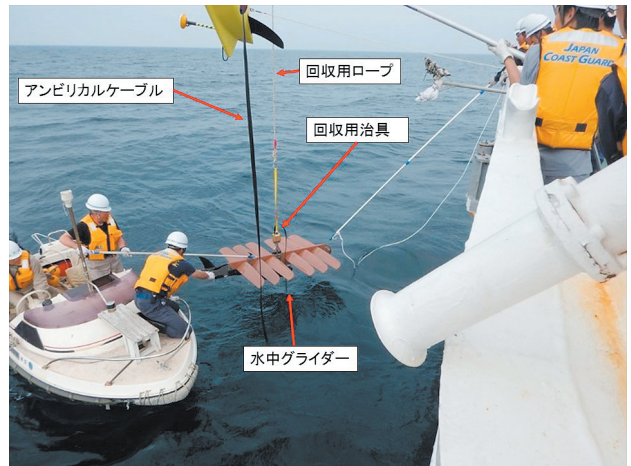


Photo 6. Attaching tag line to underwater glider.

写真6. 水中グライダーへの振れ止め索取り付け.

する。今回のような海上模様が穏やかな場合は、水中で水中グライダーが安定しており、迅速に作業を行うことで安全性も向上することからフロートを先に引き上げる。なお、作業に必要な人員は Table 1 のとおりであった。このように回収作業

Table 1. Arrangement for the AOV recovery (S/V Meiyō).

表 1. AOV 揚収作業配置 (測量船「明洋」).

揚収配置	職名
総指揮	船長
総指揮補佐	業務管理官
船橋指揮	航海長
操舵操縦	航海士
機関操縦室・機関室	機関長・主任機関士(船務)
通信室	通信長
後部指揮	首席航海士
後部指揮補佐(本庁管区連絡担当)	上乗り班長
記録	通信士・主計士2名
ギャロス操作	機関士
巻上機操作	航海士補
キャブスタン操作	機関士補
キャブスタン補助(ロープ)	主計士補
フロート振れ止め	航海士・航海士補2名
グライダー振れ止め	観測長
安全管理	主任航海士(船務)
防眩物・サスマタ	上乗り 2人
ゴムボート	航海科、機関科、観測科 3人
架台(回収補助装置担当)	上乗り
計	24人

は海上模様等により作業工程を変更することを想定し、作業前にはあらゆる事態を想定した検討を行い、意見を交わすなど作業を実施する人の意思疎通と熟練度が重要となることが再確認された。

4 長期の無人海洋観測に向けた取組み

長期連続観測の実施のためには、海洋生物付着による浮体重量及び水流抵抗の増加を抑え、必要な電力を供給するソーラーパネルのガラス面への海洋生物付着による給電力低下を抑止しなければならない。ここでは、2016年に防汚効果の比較試験を実施し良好な結果を得た(西村・他, 2017)シリコン系防汚塗料である(株)中国塗料製の生物付着防止剤バイオクリンECOの塗装を施した効果について紹介する。西村・他(2017)では東京港台場で2016年9-10月の期間に調査したが、今回は、三陸沖で2014年7月から12月に観測したAOVと奄美大島西方で2016年9月から2017年2月に観測したAOVを比較した。三陸沖で観測した加水分解型塗料(ソーラーパネルには塗装ができない)を施した結果(Photo 7)

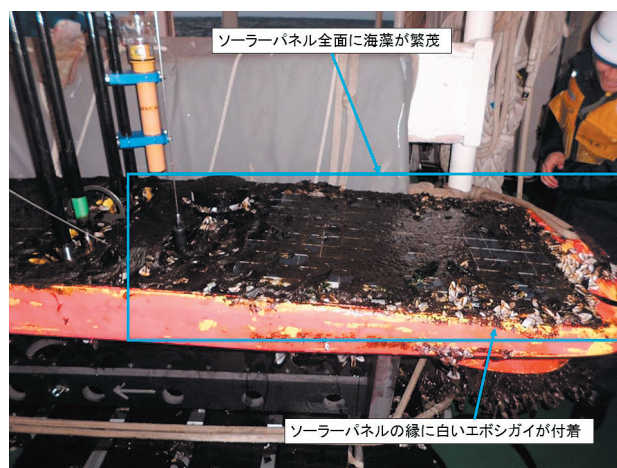


Photo 7. The result of the hydrolysis paint coating (observations from July to December 2014).

写真7. 加水分解塗料塗布結果(2014年7月~12月観測)。

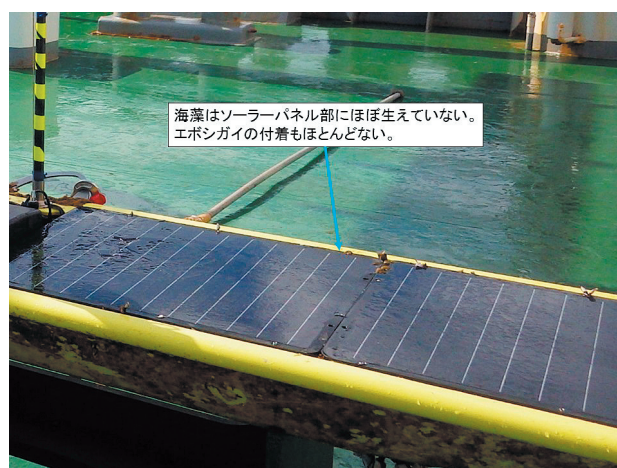


Photo 8. The result of the Bioclean ECO coating (observations from September 2016 to February 2017).

写真8. バイオクリンECO塗布結果(2016年9月~2017年2月観測)。

と奄美大島西方で観測したバイオクリンECOを施した結果(Photo 8)である。加水分解型塗料は、海洋生物の付着を防ぐ防汚剤と海水に触れると徐々に溶解する樹脂で構成される塗料である(舩岡, 2011)。生物付着状態は写真からも明らかであり、バイオクリンECOを塗布したAOVは付着物が少なく、また付着していても表面のみであり、拭き取りで簡単に除去することができた。次にバッテリーの充電量と給電力の状況であるが、Fig. 1は海洋生物付着により給電力が徐々に

落ちているため、数ヶ月単位で見ると右肩さがりに充電量が落ちていることが特徴であり、Fig. 2は、悪天候で一時的に充電量が落ちても天候が回復すれば給電力も回復するため充電量が元に戻っていることが特徴である。奄美大島西方に投入したAOVは、海洋生物付着による給電力の低下抑制の効果もはっきりと現れており、バイオクリンECOを塗布したAOVは回収するまで給電状況は良好であった (Figs. 1, 2).

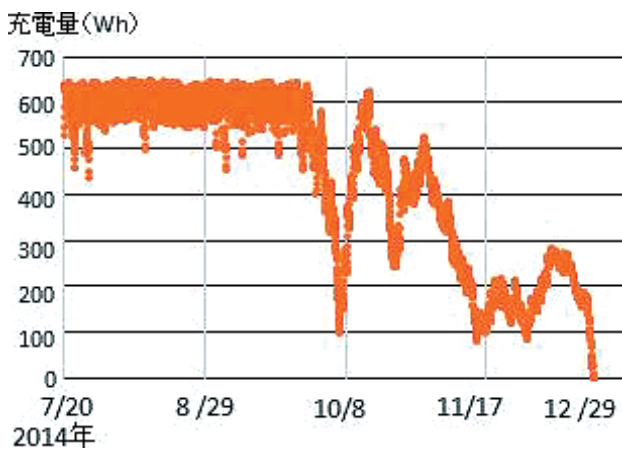


Fig. 1. Charged amount in the AOV battery observed in Sanriku offshore from July 2014 to December 2014.

図1. 2014年7月から12月に三陸沖で観測したAOVの充電量.

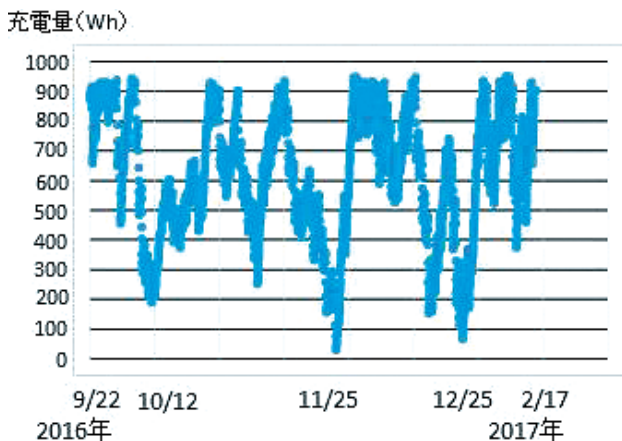


Fig. 2. Charged amount in the AOV battery observed in the west of Amami Oshima from September 2016 to February 2017.

図2. 2016年9月から2017年2月に奄美大島西方で観測したAOVの充電量.

5 潮位観測に向けた取組み

海上を移動するAOVにGNSS測定装置を装備し、験潮所の設置が難しい離島などで連続的な潮位観測の試みをしている。観測データ等はイリジウム衛星を介して通信しているが、GPS L1周波数帯とイリジウム周波数帯は近いことから、イリジウム信号がGPS信号に干渉してデータ異常を起していた。電波干渉を解消すべく対策を講じたので紹介する。

イリジウム信号はフロート中心部分から発信されており、そこを中心とした上側の仰角100度内に影響を及ぼしている。GNSSアンテナの位置の検討としては、フロートの先端又は後部に設置することとなるが、荒天でもアンテナを維持するためには波浪の影響が比較的少ない後部に取り付けることが得策である (Fig. 3)。また、GNSSアンテナの衛星情報受信条件を満たすには、波の影響を避けアンテナを高くする必要がある。しかし、アンテナを高くすると下方からイリジウム信号を受けることとなり、その信号をブロックする対策も必要となる。ブロックの対策としてはアンテナの下部に遮蔽板を取付けるか、アンテナの底部に電磁波シールドを施すかだが、海上という過酷な条件下ではできる限り物の設置を避けるため、電磁波シールドを施すこととした (Photo 9)。さらにアンテナと受信機の間、特定の周波数の信号をシャットダウンするノッチフィルターを取り付

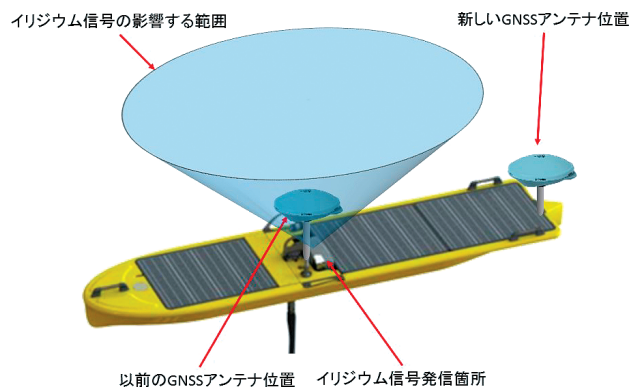


Fig. 3. Influence range of Iridium signal and the mounted position of GNSS antenna.

図3. イリジウム信号の影響範囲とGNSSアンテナの取り付け位置.



Photo 9. GNSS antenna with electromagnetic wave shield (yellow part).
 写真9. 電磁波シールド（黄色い部分）を取り付けたGNSSアンテナ。

け、電磁波シールドでもブロックできなかったイリジウム信号を可能な限り除去することとした。GNSS解析では、基線長20 kmの制限があるRTK (Real Time Kinematic) 解析に代えて、日立造船株式会社が開発したGNSS Automatic Remote Data processingシステム（以降GARDシステムという。）により精密単独測位 (PPP-AR: Precise Point Positioning with ambiguity resolution) による解析を行うこととした。GARDシステムはGNSSを利用した連続観測及び精密解析システム用のソフトウェアである。グラフィックユーザーインターフェースを基に直感的な操作が可能で、ベルン大学が開発したソフトウェアであるBernese 5.2によるスタティック基線解析と、GPS Solution Inc. と日立造船株式会社が共同開発したソフトウェアであるRTNetによる精密単独測位によるキネマティック解析 (PPP-

AR) を実施することができる。電波干渉の対策を講じる前と後のAOVのGNSSデータを解析した結果を楕円体高時系列として示す (Figs. 4-7)。Fig. 4とFig. 5は第七管区海上保安本部のAOV「とらふく1号, 2号」, Fig. 6とFig. 7は第八管区海上保安本部のAOV「ほたるいか2号」を用いて海上で観測したデータである。対策前は値が定まっておらず解析した結果の信頼性が低いことを示すフロート解 (赤い点) になっているが、対策後は解析した結果の信頼性が高いことを示す

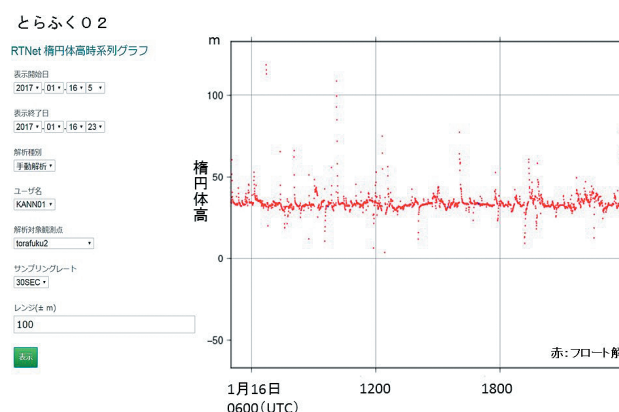


Fig. 4. The analysis results of GNSS data acquired by the AOV "Torafuku2" (2017/1/16 6:00 to 23:00 (UTC)).

図4. AOV「とらふく2号」が取得したGNSSデータ解析結果 (2017年1月16日06時～23時 (UTC))

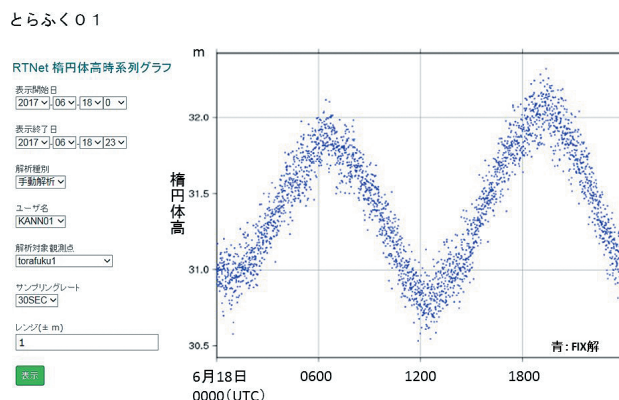


Fig. 5. The analysis results of the GNSS data acquired by the AOV "Torafuku1" (2017/6/18 0:00 to 23:00 (UTC)).

図5. AOV「とらふく1号」が取得したGNSSデータ解析結果 (2017年6月18日0時～18日23時 (UTC)).

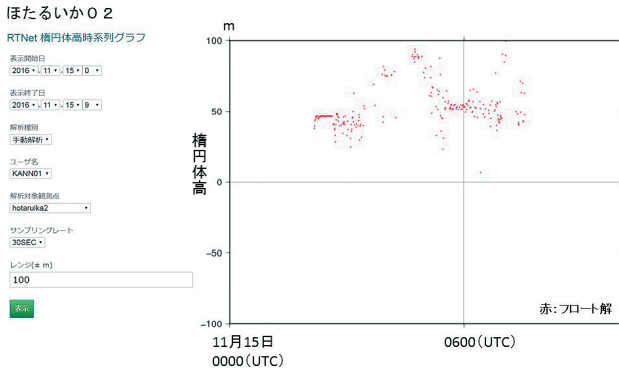


Fig. 6. The analysis results of the GNSS data acquired by the AOV “Hotaruika2” (2016/11/15 0:00 to 9:00 (UTC)).

図 6. AOV「ほたるいか2号」が取得したGNSSデータ解析結果 (2016年11月15日0時～9時).

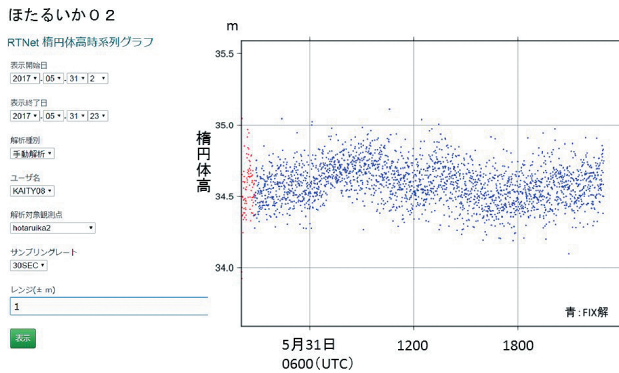


Fig. 7. The analysis results of the GNSS data acquired by the AOV “Hotaruika2” (2017/5/31 2:00 to 23:00 (UTC)).

図 7. AOV「ほたるいか2号」が取得したGNSSデータ解析結果 (2017年5月31日2時～23時).

fix 解 (青い点) となり潮位とみられるカーブを描いている。ただ、海上では fix 解となるが陸上でテスト観測した際 fix 解とならないことがあり、原因は調査中である。

6 成果速報

2016年9月から、AOVにより様々な気象・海象を観測してきており、観測した成果のうち代表的なものについて報告する。なお、風速については気象計 Airmar 社製 PB200、波浪については波浪計 LORD 社製 3DM-GX3-35 を使用し観測した (Photo 10)。

計測の仕組みは、気象計については気象計内部



Photo 10. Weather station and wave meter on AOV.
写真 10. AOV の気象計と波浪計。

を風が通過するようになっており、内部にある4つのトランスデューサーで風の強さや方向を観測する仕組みになっている (Fig. 8)。波浪計は GPS と Internal Measurement Unit (以降、IMU という) を搭載しており、GPS で位置、速度、時刻、IMU で Z 方向の加速度、ピッチ、ロール、方位を観測し、波浪データとしてまとめている。

なお、ここでいう風速や最大風速は気象庁で定義しているものと異なり、風速は気象計の観測報告から観測報告までの間の平均値、最大風速は観測報告から観測報告までの間の最大値 (使用しているのは5秒間移動平均値) であり、通常は30分間隔にしているが、任意で変更が可能である。

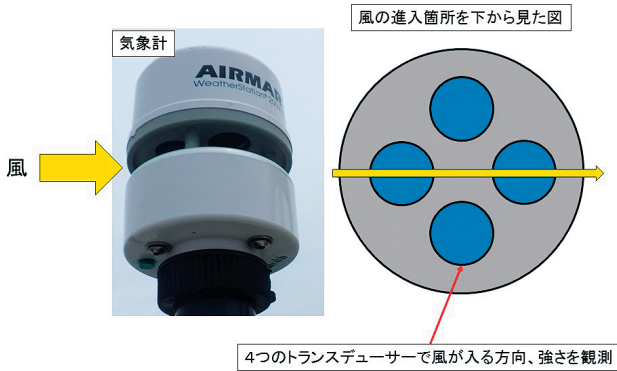


Fig. 8. The observation systems for speed and direction of wind in the weather station.

図 8. 気象計における風の観測の仕組み.

波の高さは、観測報告から観測報告までの間のスペクトル有義波高である。スペクトル有義波高とは、観測した波を様々な周期の成分に分解し、最も振幅の大きな成分を持つ波高のことである。

風向・風速のサンプリング間隔は1秒間に1回、波浪計のサンプリング間隔は1秒間に4回である。

6.1 2016年台風17号通過時のデータ

2016年9月27日、沖縄県波照間島の南方で観測していた第十一管区海上保安本部のAOV「アノマ」の南方を台風17号が通過した (Fig. 9)。波高、最大風速、風速及び気象庁が発行している台風位置表の最大風速並びに風向をグラフに表す (Figs. 10, 11)。台風位置表の最大風速は10分間の平均風速の最大値を示している。波高は、27日03時00分にピークに達し、最大波高12.5mを観測した。なお、波浪データの送信が断続的にAOVから送信できない状況が9月26日17時30分から27日07時00分まで続き、その後のリモート操作により、波浪計の電源をオフにした。また、最大風速は、台風の北東に位置した27日05時30分にピークに達し、52.3 m/sを観測した。このとき観測した風速や波高は海上保安庁のAOVで観測したデータの中で最大のものである。気象庁による台風の最大風速は、27日6時に40 m/s、27日9時～12時にピークとなり45 m/sで、AOVによる実測値よりもやや小さい。風向

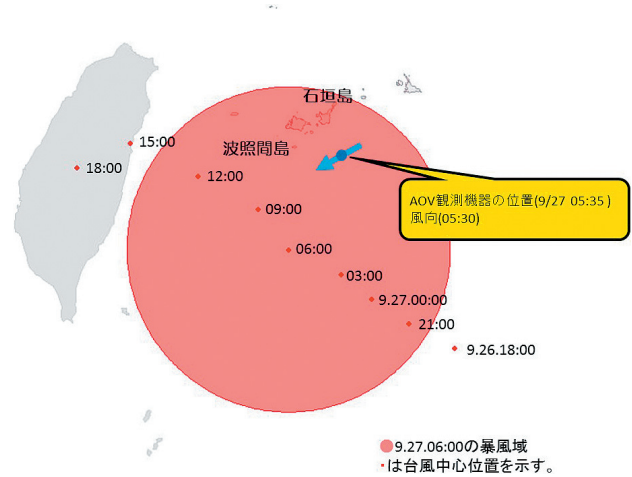


Fig. 9. The passage route of typhoon No.17 (September 27, 2016). Blue dot and arrow show the position of the AOV and observed wind direction, respectively. Red dots and pink circle indicate positions of the typhoon and its storm area.

図 9. 台風17号通過経路 (2016年9月27日)。青点はAOVの位置、青矢印は観測された風向を示す。赤点は台風の中心位置、ピンク円は暴風域に対応する。

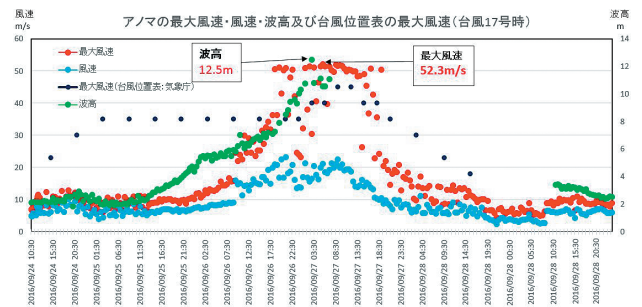


Fig. 10. Maximum wind speed, average wind speed, wave height observed by the AOV "Anoma" and the maximum wind speed according to the typhoon position table (provided by Japan Meteorological Agency) for typhoon No.17.

図 10. AOV「アノマ」による台風17号接近時の最大風速・平均風速・波高の観測結果及び台風位置表 (気象庁) の最大風速。

は、最大風速のピークを迎えた27日05時30分に71度となった。

6.2 2016年台風18号通過時のデータ

2016年10月5日、長崎県五島列島の北端の小値賀島の西方を観測していた第七管区海上保安本

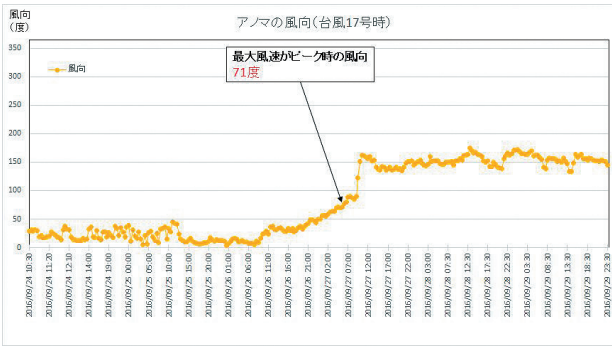


Fig. 11. Wind directions observed by the AOV “Anoma” for typhoon No.17.

図 11. AOV アノマによる台風 17 号接近時の風向観測結果.

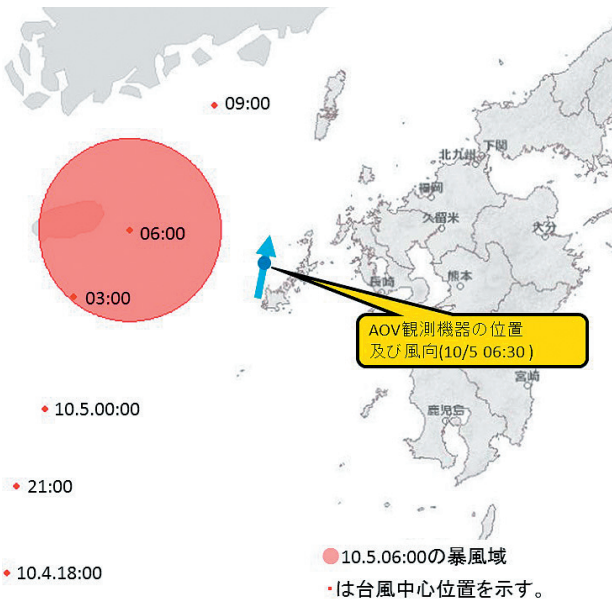


Fig. 12. The passage route of typhoon No.18 (October 5, 2016). Blue dot and arrow show the position of the AOV and observed wind direction, respectively. Red dots and pink circle indicate positions of the typhoon and its storm area.

図 12. 台風 18 号通過経路 (2016 年 10 月 5 日). 青点は AOV の位置, 青矢印は観測された風向を示す. 赤点は台風を中心位置, ピンク円は暴風域に対応する.

部の AOV「とらふく 1 号」の西方を台風 18 号が通過した (Fig. 12). 波高, 最大風速, 風速及び気象庁が発行している台風位置表の最大風速並びに風向をグラフに表す (Figs. 13, 14). 波高は, 10 月 4 日 07 時 30 分にピークに達し最大波高 9.9 m を観測した. また, 最大風速は, 台風の南東

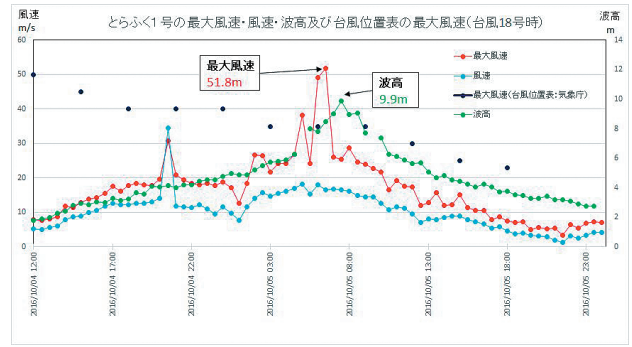


Fig. 13. Maximum wind average speed, wind speed, wave height observed by the AOV “Torafuku1” and the maximum wind speed according to the typhoon position table (provided by Japan Meteorological Agency) for typhoon No.18.

図 13. 台風 18 号接近時の最大風速・風速・波高の観測結果 (とらふく 1 号) 及び台風位置表 (気象庁) の最大風速.

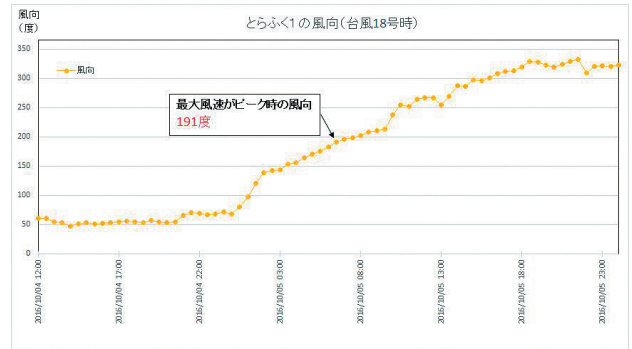


Fig. 14. Wind directions observed by the AOV “Torafuku1” for typhoon No.18.

図 14. 台風 18 号接近時の風向の観測結果 (とらふく 1 号).

に位置した 06 時 30 分にピークに達し, 最大風速 51.8 m/s を観測した. 気象庁による台風の最大風速は, 3 日に 60 m/s とピークとなり, 5 日 6 時には 35 m/s と衰えていた. 風向は, 最大風速のピークを迎えた 5 日 06 時 30 分に 191 度となった.

6.1 及び 6.2 を総じて, 今回のような台風中心付近の気象・海象データの収集は, 測量船で実施することは非常に難しいミッションであり, 正に AOV の有用性を証明することとなった.

6.3 台風通過時の運用

AOV は, 高波や強風による観測機器その接合

部の破損や AOV 本体の破損のリスクを考慮して、台風接近時は避航する運用をとっている。また、メーカーから荒天時の運用としてフロートと水中グライダーのバランスをもとに AOV の進行方向の後方 ± 60 度から高波を受けないように注意がなされている。同じ海域に留まる場合は、波を横から受ける移動を長くし、後方から受ける移動を短くする方がよいとの提案があった。Fig. 15 にコースの設定例を示す。

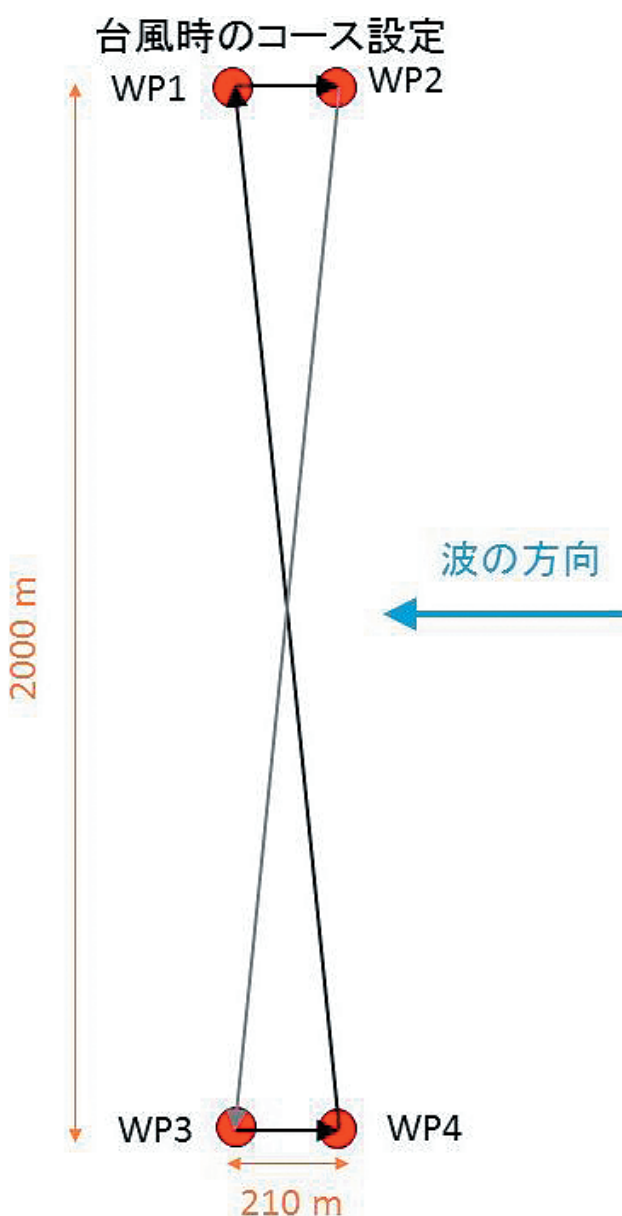


Fig. 15. An example of AOV circuit course setting for a typhoon.

図 15. 台風時の AOV 周回コース設定例。

6.4 黒潮の観測

2016 年 11 月 30 日、第十管区海上保安本部の AOV「きびなご1号」が種子島南東方海域の黒潮で 2 ノットを超える強い流れを観測した。AOV の運用は観測海域を設定し長期間観測を実施しており、通常黒潮のような 2 ノットを超える海流での観測は AOV の性能上想定していないが、AOV により黒潮を観測した大変貴重な記録となった (Fig. 16)。観測した流速データは 2016 年 12 月 1 日発行の海洋速報に掲載した。

7 おわりに

海上保安庁では、2016 年度から AOV の運用を開始し、機器や運用の改善など様々な試みを実施している。例えば、2016 年度は電力の問題があり、既存の電力容量 900 Wh では 2 ~ 3 日の曇天で電力不足に陥っていた。しかし、追加バッテリーを搭載し電力容量を 1,800 Wh にしたところ、9 月現在では天候に起因した電力不足は発生していない (Fig. 17)。また、中型測量船での投入及び回収作業方法も確立できた。今後も運用する中で改善すべき点が見つかると思うが、一つずつ順次解決していくことが肝要である。

謝 辞

2016 年度の AOV の投入・回収作業は、海上保

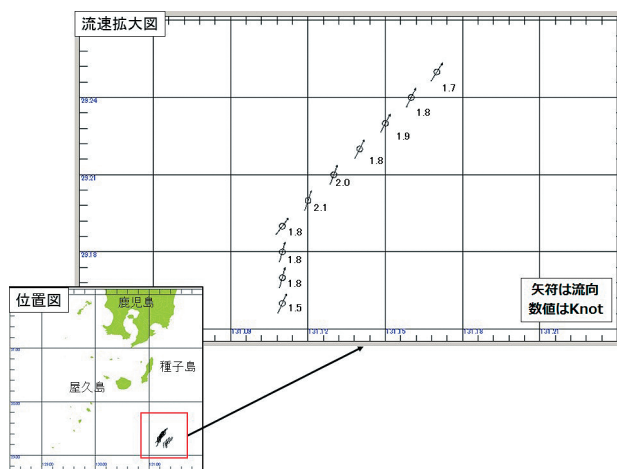


Fig. 16. Current velocity and direction of the Kuroshio observed by AOV.

図 16. 黒潮の流向・流速の観測結果。

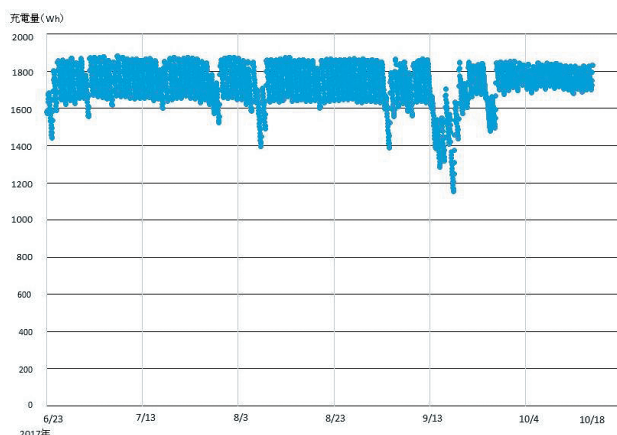


Fig. 17. Charged amount in the AOV battery observed in the west of Amami Oshima from June to October 2017.

図 17. 2017 年 6 月から 10 月に奄美大島西方で観測した AOV の充電状況.

安庁海洋情報部の測量船「昭洋」、2017 年度は測量船「明洋」、「海洋」で実施させていただきました。乗組員の皆様には、不測の事態にも柔軟かつ精力的に対応していただき感謝致します。また、匿名査読者からの有益で丁寧なコメントにより、本技術報告は大きく改善されました。記して謝意を表します。

文 献

舩岡茂 (2011) いま防汚塗料に求められる新たな機能と進化, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 46, 4, 117-118.

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・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.

要 旨

海上保安庁が 2016 年度より観測を開始した自律型海洋観測装置 (AOV) について, これまでの取り組みを紹介する。中型測量船での AOV の回収方法, 長期観測をするための塗装の効果, 潮位観測の実施方法の改良, 台風や黒潮の観測結果について報告する。