

AUV「ごんどう」の潜航調査で発生した”fault”の原因及び対策[†]

栗田洋和^{*1}, 瀬田英憲^{*2}, 南 宏樹^{*2}, 瀬尾徳常^{*2}, 井城秀一^{*2}, 梅田安則^{*3}

Probable causes for the most frequently occurring faults, and the solutions, for AUV *Gondou* surveys[†]

Hirokazu KURITA^{*1}, Hidenori SETA^{*2}, Hiroki MINAMI^{*2}, Noritsune SEO^{*2}, Hidekazu INOSHIRO^{*2}, and Yasunori UMEDA^{*3}

Abstract

This report describes the probable causes of the most frequently occurring faults, and the solutions, for the future of safe operation for the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) surveys. The Japan Coast Guard started operation of the AUV *Gondou* in April 2013, and have experienced various kinds of “faults” during surveys, with abnormal situation for the status of vehicle documented.

1 はじめに

海上保安庁は2013年4月から測量船「拓洋」を母船として自律型潜水調査機器（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）の運用を開始した。AUVは海底近傍まで潜航後、あらかじめプログラムされた経路を自律航走して調査を行う海洋調査機器である（栗田・他，2013）。

これまでの潜航調査で大きなトラブルはなかったがいくつかの fault が発生している。fault とは「AUV が何らかの異常を検出した際に示すシグナル」であり、運用中に AUV から音響通信及び無線通信により母船に送信され制御パソコンの画面に表示される。これまで潜航調査中に AUV が停止・浮上する fault が5つ発生しているので、それらの fault の発生原因及び対策について記載する。

2 fault の種類

これまでの調査で AUV が停止・浮上した fault は以下の5つである。（Table 1, 2）

(1) 前方監視装置（OAS：Obstacle Avoidance Sonar）に関する fault

OAS E-Stop Timeout

(2) ミッション時間に関する fault

Mission Timeout

(3) 測線からのずれに関する fault

Offline Distance High

(4) 潜航高度に関する fault

Low Altitude

(5) ロールに関する fault

Over Roll

以下これらの fault の詳細を説明する。なお時刻については UTC（協定世界時）を用いている。

[†] Received September 19, 2014; Accepted November 13, 2014

* 1 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 海洋調査課 大陸棚調査室 Continental Shelf Surveys Office, Hydrographic Surveys Division

* 3 第六管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 6th R. C. G. Hqs.

Table 1. Brief descriptions of “fault” occurred during AUV surveys.

表 1. AUV の潜航調査中に発生した fault のリスト.

フォルトの種類	フォルトの名前	説明
OASに関するフォルト	OAS E-Stop Timeout	OASが長い時間“緊急停止”状態になる。もしAUVの10m以内に障害物を検出すると、AUVが緊急停止（スラスタ停止 & 上昇）して、障害物が検出されなくなるまで緊急停止を維持する（緊急停止の最長時間はデフォルトで10分）。
ミッション時間に関するフォルト	Mission Timeout	制限時間内に次のラベルに到達しない。
測線からのずれに関するフォルト	Offline Distance High	AUVと測線の垂直距離が設定された最大垂直距離（Max Offline Dist）の制限を越える。
潜航高度に関するフォルト	Low Altitude	AUVの高度が設定された最低高度（Min Altitude）の制限を下回る。
ロールに関するフォルト	Over Roll	AUVのロールが設定値（デフォルトの設定は±20度以上を5秒間）を越える。

Table 2. The list of “fault” occurred during AUV surveys.

表 2. AUV の潜航調査中に発生した fault の発生状況.

年月日	AUV	水深(m)	高度(m)	フォルト
2013.7.24	ごんどう2	800~850	50	Mission Timeout
2013.7.25	ごんどう2	800~850	50	Offline Distance High
				Mission Timeout
				Over Roll
2013.7.26	ごんどう2	800~850	50	Offline Distance High
				Mission Timeout
2013.8.15	ごんどう2	500~560	100	Over Roll
2013.8.16	ごんどう2	580~700	100	OAS E-Stop Timeout
				Mission Timeout
				Offline Distance High
				Over Roll
2013.8.18	ごんどう2	600~700	100	Over Roll
2013.9.11	ごんどう2	260~580	50	Mission Timeout
				Offline Distance High
2013.9.12	ごんどう2	270~580	50	Low Altitude
2013.9.13	ごんどう2	290~580	50	Low Altitude
2014.4.24	ごんどう1	880~920	50	Over Roll
2014.4.25	ごんどう1	880~920	50	Over Roll
2014.6.25	ごんどう1	1120~1440	70	Low Altitude
				Over Roll
2014.6.26	ごんどう1	1100~1440	70	Over Roll
2014.6.30	ごんどう1	1330~1450	50	Low Altitude
2014.7.5	ごんどう2	1300~1720	70	Low Altitude
2014.7.6	ごんどう2	1430~1740	70	Low Altitude

2.1 OAS E-Stop Timeout

OASがAUVの前方10 m以内に障害物を検出するとAUVは緊急停止（E-Stop）し、その状態が10分間継続するとfaultが発生する。

なお、AUVが緊急停止するときのAUVと障害物までの距離（現在の設定値：10 m）、継続時間（現在の設定値：10分）はD-listと呼ばれる設定値リストで管理されており、必要に応じて変更することができる。

2.1.1 発生例

2013年8月16日のAUVによる潜航調査にお

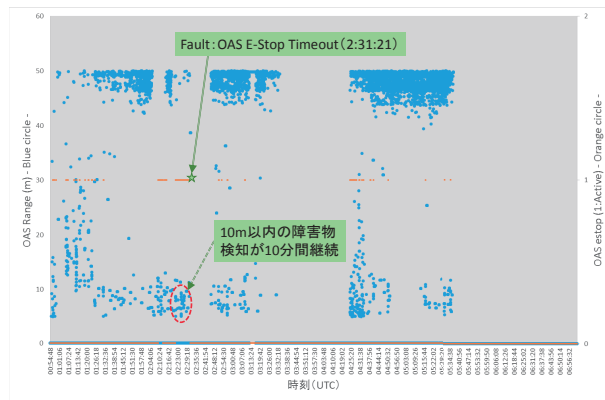


Fig. 1. OAS range (blue circle) and “OAS e-stop” feedback (orange circle) during the survey on 16th August 2013. The left vertical axis is the OAS range (m) and right vertical axis is “OAS e-stop” feedback (0 : normal status, 1 : “OAS e-stop” active). AUV kept to stop for 10 minutes by the “OAS e-stop” (red ellipse with a broken line). Green star shows the time when “OAS e-stop timeout” occurred (2 : 31 : 21).

図 1. 2013年8月16日のOASの取得値(青丸)と“OAS e-stop”のフィードバック(橙丸). 左の縦軸はOASの距離(m), 右の縦軸は“OAS e-stop”の状態(0:通常, 1:緊急停止)を示す. 赤破線の円は“OAS e-stop”が10分間継続した時間, 緑の星は“OAS e-stop timeout”のfaultが発生した時刻(2:31:21)に対応する.

いて緊急停止が多数発生した. 特に2:21から2:31にかけて緊急停止が10分間継続したため2:31:21にOAS E-Stop Timeoutのfaultが発生した(Fig. 1).

2.1.2 発生原因

8月16日の潜航調査終了後、AUVのログファイルに記録されているOASデータを確認したところ、OASの前方に障害物を頻繁に検出していた(Fig. 1). 実際に障害物が存在する場合はOASに記録される障害物とOASとの間の距離は、AUVが障害物に近づくと徐々に短くなるはずだが、このときの記録ではそのような傾向が見られないことから、これらは障害物を検知しているのではなくOASのノイズと考えられる. これらのノイズはOASからの距離が45~50 mの間と5~10 mの間で多く発生していた. AUVが

緊急停止する際の AUV と障害物までの距離の設定値を 10 m としているため、連続的に発生した 5 ~ 10 m の OAS のノイズにより AUV は障害物が AUV 本体近傍に存在すると勘違いしてしまい OAS E-stop timeout の fault が発生した。

2.1.3 対策

まずノイズの原因として、他の音響機器による音響的なノイズ及びスラスターの回転に伴う電気的なノイズが考えられたため、翌日の潜航調査の際に様々な音響機器を ON/OFF にし、また、スラスターの回転数を変えてノイズの発生を調べるテストを実施した (Table 3)。テストでは水深 100 m の海域において半径 20 m の円を描くように航行した。その時の OAS の記録を Fig. 2 に示す。OAS テストの間 (Fig. 2 の赤枠内)、サイドスキャンソナー (120 kHz) を発信しているときに、AUV の前方 40 m 程度の距離に多くノイズを検出していたことからサイドスキャンソナーが原因と考えた。しかしその後水深 100 m から潜航を行い、海底からの高度 100 m において速度 1.5 m/s でマルチビーム音響測深機及びサイドスキャンソナーを使用して調査を行っている間 (Fig. 2 の緑枠内) においては、OAS がノイズを検出することがほとんど無かったため、サイドスキャンソナーが直接の原因であるとは考えにくい結果であった。またスラスターの回転数を変えてもノイズが増減することはなかったため、スラスターの回転に伴う電気的なノイズも原因とは考えにくかった。

次に OAS センサーのノイズと考えられる原因として OAS センサーの振動や前方からの水流に

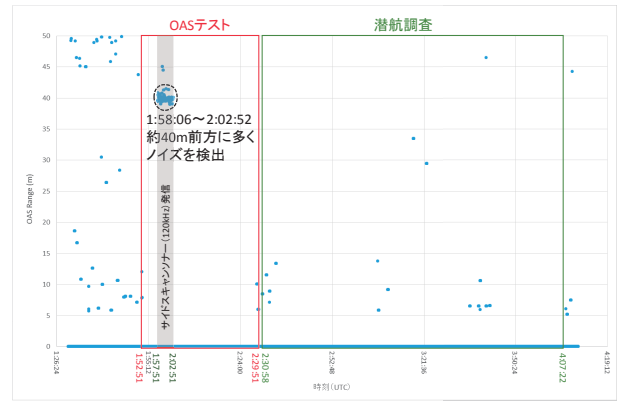


Fig. 2. OAS range (blue circle) during the survey on 17th August 2013. Red and green boxes show the phase of the OAS test and phase of underwater survey, respectively. Gray area shows the period when the side scan sonar (120 kHz) was active. OAS detected some noises at the distance of 40 m ahead of the AUV (black broken circle).

図 2. 2013 年 8 月 17 日の OAS の取得値 (青丸)。赤枠は OAS テストを実施した時間、緑枠は潜航調査を実施した時間を示す。灰色の場所はサイドスキャンソナー (120 kHz) を作動させた時間に対応している。AUV の約 40 m 前方にノイズを検出している部分を黒破線の円で示す。

よりノイズが発生しているのではないかと考えた。そこで OAS センサーの周囲にゴムラバーを巻き振動を軽減したり、センサーの全面にテープを張り水流の影響をなくしたりしたがノイズは消えなかった。

最終的には OAS センサー自体に問題があることが濃厚となり、製造メーカーによる調査・点検が行われた。最終的にセンサーの制御ソフトのファームウェアの更新を行ったところ問題は解消された。

2.2 Mission timeout

AUV の潜航から浮上までの行程を記載したプログラム (ミッションプラン) は複数のラベル (label) で構成されている。このラベルには調査測線、速力及び使用機器等の情報のほか、各測線を経過する制限時間が設定されており、この制限時間内に次のラベルに到達しない場合に発生する fault である。

Table 3. Parameters for noise test of OAS sensor.

表 3. OAS センサーのノイズテスト内容。

	時刻 (UTC)	AUV速度	使用音響機器
Test 1	1:52:51 ~ 1:57:51	1.5 m/s	マルチビーム音響測深機 (400kHz) 発信
Test 2	1:57:51 ~ 2:02:51	1.5 m/s	サイドスキャンソナー (120kHz) 発信
Test 3	2:02:51 ~ 2:07:51	1.5 m/s	USBL 音響測位装置 (17-30kHz) 発信
Test 4	2:07:51 ~ 2:12:51	0.0 m/s	
Test 5	2:12:51 ~ 2:15:51	1.0 m/s	
Test 6	2:15:51 ~ 2:18:51	1.5 m/s	
Test 7	2:18:51 ~ 2:21:51	2.0 m/s	
Test 8	2:21:51 ~ 2:24:51	2.5 m/s	
Test 9	2:24:51 ~ 2:29:51	1.5 m/s	「拓洋」ADCP 発信

なお、この制限時間はミッションプラン作成の専用ソフトウェア (CoMMI) により自動的に計算される。

2.2.1 発生例

2013年8月16日のAUVによる潜航調査において、測線入線から出線の制限時間が17分42秒であるところ、AUVが測線上を航走せず蛇行を繰り返し、制限時間をオーバーしてMission Timeoutのfaultが発生した (Fig. 3)。

そのほか、AUV潜航後にUSBL音響測位によるAUV位置補正のオフセット値を送信したところ、補正された位置の値分だけ航走距離が伸びたため、設定していた制限時間内に航走を終了できずにMission Timeoutのfaultが発生した。

2.2.2 発生原因

OASセンサーが前方10mから50mに障害物を検出するとAUVは障害物を回避する。その状況を何度も繰り返すことで、設定された制限時間

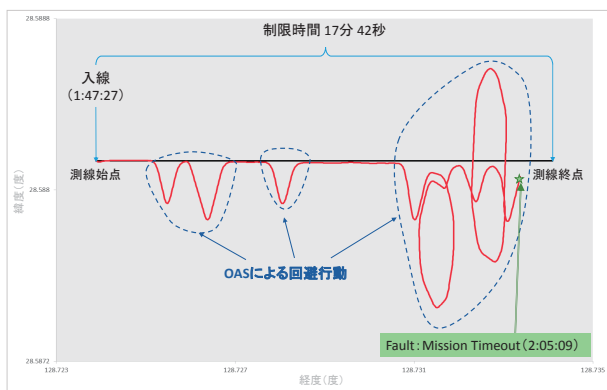


Fig. 3. Track line of the AUV survey from 1 : 47 : 27 to 2 : 05 : 09 on 16th August 2013 (red line) and the planned survey line (black line). The length of the survey line was 1,000 m and the cruising speed was 1.5 m/s. The time limit of the survey was 17min 42sec. Green star shows the position where “Mission Timeout” occurred.

図3. 2013年8月16日1:47:27から2:05:09のAUVの航跡(赤線)及び計画測線(黒線)。測線長は1,000m、速度は1.5m/s、計画測線の制限時間は17分42秒であった。緑の星印は“Mission timeout”の発生した場所を示す。

内に測線の調査を終了できずにMission Timeoutのfaultが発生した。OASセンサーが検出した障害物は、2.1.2同様、ノイズによるものであった。

2.2.3 対策

2.1.3同様、OASセンサーのファームウェアの更新を行い障害物回避による問題は解消した。

そのほか、USBL音響測位によるAUV位置補正のオフセット送信後に起こるMission Timeoutのfaultについては、ミッションプランの各測線の制限時間を十分に考慮し、AUVが測線を航走中にはオフセットを送信しない等の注意が必要である。

2.3 Offline distance High

AUVが測線を航走中に、AUVと測線の垂直距離が設定した値を超えると発生するfaultである。

AUVと測線の最大垂直距離はMax Offline Distとして設定され、現在の設定値は150mである。

2.3.1 発生例

2013年8月16日2:58にAUVが2本目の測線に入線した後、AUVが測線上を航走せず旋回を繰り返し測線から離れていった。3:12には測線からの垂直距離が151mとなり、設定値150mより離れたためOffline distance Highのfaultが発生した (Fig. 4)。

そのほか、AUV潜航後にUSBL (Ultra Short Base Line) 音響測位によるAUV位置補正のオフセット値を送信したところ、AUVの位置が急に飛び、測線からの垂直距離が設定値を超えたことからOffline distance Highのfaultが発生した。

2.3.2 発生原因

2.2.2同様、OASセンサーのノイズによりAUVが回避行動をとり、測線から大きく離れたことが原因である。

2.3.3 対策

2.1.3同様、OASセンサーのファームウェアの

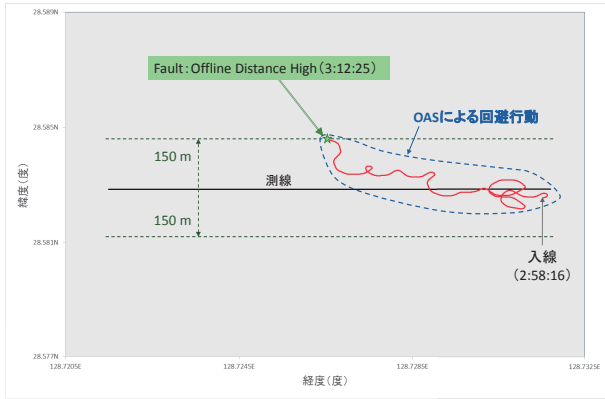


Fig. 4. Track line of the AUV survey from 2 : 58 : 16 to 3 : 12 : 25 on 16th August 2013 (red line) and the planned survey line (black line). The length of the survey line was 1,000 m and the cruising speed was 1.5 m/s. Green broken lines show the “Max Offline Distance” lines. Green star shows the position where “Offline Distance High” occurred.

図4. 2013年8月16日2:58:16から3:12:25のAUVの航跡(赤線)及び計画測線(黒線). 測線長は1,000mで、速度は1.5m/s、緑の破線は“Max Offline Distance”の距離を示す. 緑の星印は“Offline Distance High”の発生した場所に対応する.

更新を行い障害物回避による問題は解消した.

そのほか、USBL音響測位による位置補正のオフセット送信時に起こる Offline Distance High の fault については2.2.3同様、AUVが測線を航走中にはオフセットを送信しない等の注意が必要である.

2.4 Low Altitude

AUVの高度(つまりAUVと海底の距離)が設定値よりも小さくなったときに発生する fault である. AUVの最低高度はMin Altitudeとして設定されており、現在の設定値は25mである.

2.4.1 発生例

2013年9月12日のAUVによる潜航調査の際、進行方向に下り傾斜が急な海底において、測線出線(6:27)から次測線入線(6:29)までの回頭時にAUVの高度が設定した最低高度を下回る

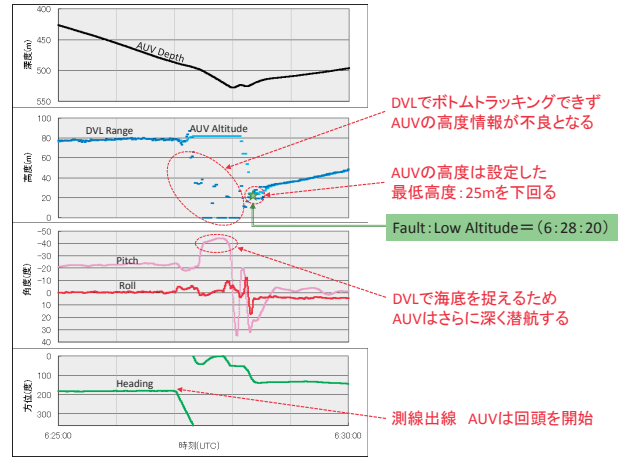


Fig. 5. Vertical positions and attitudes of the AUV during the survey from 6 : 25 : 00 to 6 : 30 : 00 on 12th September 2013. Black, light blue, blue, pink, red, and green lines show the values of depth, altitude, DVL range, pitch, roll, and heading, respectively. Green star shows the time when “Low Altitude” occurred (6 : 28 : 20).

図5. 2013年9月12日6:25:00から6:30:00のAUVの各種データの取得値(深度:黒線, 高度:水色線, DVLレンジ:青線, ピッチ:桃色線, ロール:赤線, ヘディング:緑線). 緑の星印は“Low Altitude”の発生した時刻(6:28:20)を示す.

22.5 m となり、6:28にLow Altitudeのfaultが発生した(Fig. 5).

2.4.2 発生原因

海底地形が急峻な調査海域ではAUVの回頭時にAUVの姿勢によっては対地航行速度測定器(DVL:Doppler Velocity Log)によるボトムトラッキングができないときがあり高度情報が不良となる. そのときAUVは海底を捉えるため大きくピッチを下げ海底に近づく方向に潜航した結果、海底に近づき過ぎてLow Altitudeのfaultが発生したものと考えられる(Fig. 5). Fig. 6にイメージ図を示す. 高度約80mの状態のAUVが、急勾配(水平距離10.3m, 垂直距離4.7m, 勾配45.6%)の場所で約180度の変針をした際(Fig. 6(a))に船体が右舷側に傾き、DVL(最高レンジ:~110m)のレンジをオーバーして海底を捉えることができず海底を見失った(Fig. 6(b)). AUVは海底を捉えるため船首を下げ(ピッチ角:-45度)

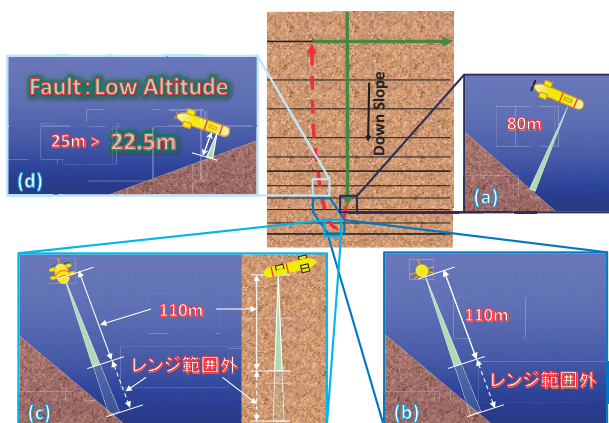


Fig. 6. Schematic images of the AUV survey during which “Low Altitude” occurred. Green line shows a planned survey line and red broken line shows a transit line. (a) At the end of the survey line, AUV altitude was ~ 80 m. (b) During the transit line, the DVL was not able to detect the seafloor due to the maximum detectable range (~ 110 m). (c) AUV started to descend for detection of the seafloor by the DVL. (d) Although the DVL detected the seafloor, the altitude of the AUV was 22.5 m which was smaller than “Min Altitude” value of 25 m. Then “Low Altitude” occurred.

図 6. AUV による調査中に “Low Altitude” が発生したときのイメージ図。緑線は測線，赤破線は回航中の測線をそれぞれ示す。(a) 測線を出線時に AUV の高度は 80 m であった。(b) 回航時，DVL の取得可能レンジを超えたため海底を捉えることができなくなった。(c) DVL が海底を捉えるために AUV が潜航を開始した。(d) DVL が海底を捉えたときには DVL の取得値は 22.5 m となっており，“Min Altitude” の限界値 (25 m) を下回っていたため “Low Altitude” が発生した。

潜航状態をとった (Fig. 6 (c))。その後 DVL が海底を捉えたところ，既に AUV が海底に近づき過ぎており高度が 22.5 m となっていた (Fig. 6 (d)) ため，Min Altitude の設定値 25 m 以下となり Low Altitude の fault が発生した。

2.4.3 対策

海底地形が急峻な調査海域においては，極力回頭を避けるような測線を計画することが一番であるが，回頭の行程において，急な回頭を避け緩やかな角度で回るように AUV が通過する点を何点

か追加する，または AUV の高度設定を高くする等の対策が有効である。

2.5 Over Roll

AUV のロール値が設定値以上で設定時間以上継続すると発生する fault である。AUV のロール値と継続時間は D-list と呼ばれる設定値リストで管理されており，必要に応じて変更することができる。デフォルトの設定値は ± 20 度を越えるロールが 5 秒間継続である。

2.5.1 発生例

2013 年 8 月 16 日の AUV による潜航調査において，海面への浮上中の変針時にロール値が ± 20 度以上となり，3:39 には -20 度以上が 5 秒以上継続し設定値を超えたため，Over Roll の fault が発生した (Fig. 7)。

その後，2014 年 6 月 26 日の AUV による潜航調査において，設定値をロール値： ± 20 度以上，継続時間：10 秒以上に変更した際も海面への浮上時において Over Roll の fault が発生した (Fig. 8)。

2.5.2 発生原因

当 fault は AUV が海面に浮上する間に発生しており，特に浮上開始直後に多く発生していることから，AUV が浮上姿勢に変わり（ピッチを大きく上げる），かつ旋回のために変針した際に AUV の姿勢が不安定となり，バランスの制御に時間を要した結果 Over Roll の fault が発生したと考えられる。AUV には正の浮力が働いているため，潜航（下降）スピードに比べ浮上（上昇）スピードが速いことが姿勢の不安定さの要因の一つと考えられ，浮上開始時に当 fault が多発する理由であると考えられる。

2.5.3 対策

ISE エンジニアから，当庁の AUV は軽量化のため，若干安定性が悪いとの指摘を受けており，浮上開始直後におけるロールの値が ± 20 度以上

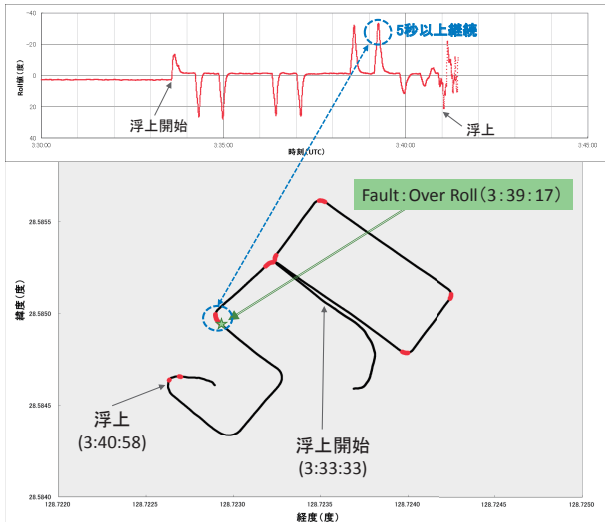


Fig. 7. AUV position during ascent from 3 : 33 : 33 to 3 : 40 : 58 on 16th August 2013. The position where the roll value was over ± 20 degrees is colored with red. The position where the roll value was over ± 20 degrees for more than 5 sec is outlined with blue broken line. Green star shows the position where “Over Roll” occurred. Time series of roll values during ascent is shown in upper box.

図7. 2013年8月16日3:33:33から3:40:58のAUV浮上時の航跡(黒線), ロール値 ± 20 度以上のAUVの航跡(赤線), ロール値 ± 20 度以上で5秒以上継続した部分(青破線), 緑の星印は“Over Roll”の発生した場所に対応する. 上部にAUVのロール値を示す.

の継続時間も概ね10数秒であることから, Over Rollのfaultの設定値をロール値: ± 20 度以上, 継続時間:20秒以上で設定したところ, 当faultは発生しなくなった.

また潜航中におけるAUVの適正な姿勢を保つためにAUV内のバランスウェイト等の配置を調整することも有効と考えられる.

謝 辞

AUV調査の実施に当たり, 測量船「拓洋」乗組員及び大陸棚調査室の皆様には大変お世話になりました. また, お忙しいところ原稿に適切な助言を頂いたことに対して, 匿名査読者に記して感謝いたします.

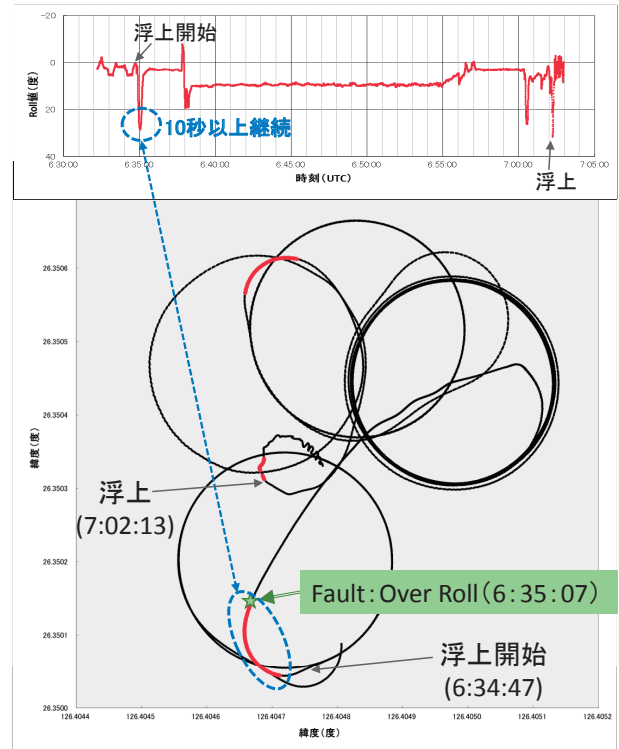


Fig. 8. AUV position during ascent from 6 : 34 : 47 to 7 : 02 : 13 on 16th August 2014. The position where the roll value was more than ± 20 degrees is colored with red. The position where the roll value was over ± 20 degrees for more than 5 seconds is outlined with blue broken line. Green star shows the position where “Over Roll” occurred. Time series of roll values during ascent is shown in upper box.

図8. 2014年6月26日6:34:47から7:02:13のAUV浮上時の航跡(黒線), ロール値 ± 20 度以上のAUVの航跡(赤線), ロール値 ± 20 度以上で10秒以上継続(青破線), 緑の星印は“Over Roll”の発生した場所を示す. 上部には, AUVのロール値の時系列を示す.

文 献

栗田洋和・瀬田英憲・梅田安則・南宏樹・井城秀一・大泊理八・橋詰未来(2013)自律型潜水調査機器「ごんどう」の運用, 海洋情報部研究報告, 51, 98-105.

要 旨

今までのAUV「ごんどう」の調査で発生した様々なfaultの原因及び対策を記載した. 今後の調査の安全な運用及び遂行に役立つことを望む.