

## AUV 搭載センサを用いた深度・音速計測に生じる偏差について<sup>†</sup>

長澤亮佑<sup>\*1</sup>, 住吉昌直<sup>\*2</sup>

Deviation in AUV-based depth and sound speed measurements<sup>†</sup>

Ryosuke NAGASAWA<sup>\*1</sup> and Masanao SUMIYOSHI<sup>\*2</sup>

### Abstract

The Japan Coast Guard AUV *Gondou* can profile in-situ depth and sound speed using onboard sensors. We compare the observed data from the onboard sensors and discuss deviations among them. The analysis covers the depth and sound speed deviations calculated as the difference in measurements between the CTD and other sensors. The data logs from multiple AUV dives show that both deviations indicate changes in values related to the behavior of the AUVs. Although we lack sufficient understanding of the sensor response characteristics to provide a reasonable explanation, it appears that the deviations in measurement are related to the AUV's pitch change, depth, or time duration of descending to/ascending from the bottom. The maximum orders of magnitude of the deviations are ~ 1 m in depth and ~ 10 m/s in sound speed. The results suggest that interpreting AUV-based oceanographic observations requires a good understanding of the responses of the vehicle inside, including the sensors themselves, to the behavior of the AUV.

### 1 はじめに

海上保安庁海洋情報部が運用する自律型潜水調査機器 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) 「ごんどう」は, CTD プロファイラを搭載し, 航行中における水温, 塩分, 深度及び音速の連続計測を行う。また, 機体内部には深度計及び音速計を備え, それぞれ深度及び音速を連続計測している。

AUV を用いた海洋観測は, 調査船を用いた鉛直プロファイル観測に比べて移動範囲の自由度があり, 海洋の任意の場所を連続観測できるという

利点をもつ。また測深機をはじめ多様な観測機器を機体に備えていることから, 海底地形などの他種観測データとの比較という観点でも有効に活用されている (Wynn et al., 2014)。しかし, 海洋観測データの品質管理のためには, センサの応答特性や装置の挙動に十分な注意が必要である。例えば調査船から CTD プロファイラを降下させて観測を行う場合, センサの応答遅延やヒステリシスといった特性のほか, 挙動によって生じる誤差に十分注意を払う必要がある。これは, センサの鉛直移動速度が速すぎた場合, センサ応答特性に

<sup>†</sup> Received August 30, 2023; Accepted October 20, 2023

\* 1 大洋調査課 Offshore Surveys Division

\* 2 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

よって水温や電気伝導度といった観測値が深度推定値との整合性を失う可能性があるためである。また、装置の挙動により周囲の海水に混合を生じる可能性にも注意を要する (McTaggart et al., 2010)。

AUV の場合は海面への投入から船上への揚収まで継続してデータを取得し続けるが、その間には海面から海底近傍までの降下に始まり、海底に追従した測線航走、海面までの上昇、海面での航走といったさまざまな挙動が含まれる。AUV の機体の挙動によって、海洋場に対する搭載機器の位置関係が様々に変化することにより機器間で計測値に差を生じる可能性が考えられる。

本稿は、AUV「ごんどう」の潜航時ログデータの解析により、AUV 搭載の CTD、音速計及び深度計を用いて計測された音速値及び深度値の相互の関係性を観察し、その傾向について考察するものである。また、機体の挙動による深度・音速計測への影響を観察するため、AUV の慣性航法装置により推定された機体の姿勢角や移動速度といった量にも着目する。なお、各観測量に内在する誤差を含めた値の傾向を調べるにあたり、本来であれば AUV を用いずに観測した参照データが別途与えられているべきである。しかし、同程度の頻度及び空間密度をもつデータは存在しないため、AUV 搭載センサ相互のトレンドを比較することで解析を行うこととした。

以降、本稿で用いる記号を次のように定める。まず、時刻  $t$  において CTD で観測された音速を  $Cs^{CTD}(t)$ 、深度を  $D^{CTD}(t)$  とし、AUV 搭載の音速計で観測された音速を  $Cs^{SVS}(t)$ 、AUV 搭載の深度計で観測された深度を  $D^{DS}(t)$  とする。また、CTD で計測した値と他センサで計測した値との間の差を記号  $\delta$  で表すこととし、次のように定義する。

$$\delta Cs(t) \equiv Cs^{CTD}(t) - Cs^{SVS}(t)$$

$$\delta D(t) \equiv D^{CTD}(t) - D^{DS}(t)$$

## 2 AUV 概要

### 2.1 搭載機器

本稿において取り扱う「ごんどう」は、カナダ・ISE 社製の AUV である。機体の全長は 4.8 m、水中航行時の巡航速力は 1.5 m/s (約 3 kt) であり、慣性航法装置として IXSEA 社 (現 exail 社) 製 PHINS を搭載する。機体内部には各種観測機器を搭載するペイロード区画を有する。この区画は開口部をもち、潜航中は外部の海水が自由に出入りする構造となっている。潜航深度の推定には、このペイロード区画に設置された水晶振動子式圧力深度計 Paroscientific 8CB を用いる。航行中は深度計による深度計測値を参照して、下降・上昇といった鉛直方向の挙動の管理がなされる。なお、海底の近傍を航行している際は、海底に対する高度及び移動速度の推定のためのドップラ式速度ログ (DVL) が併用され、より高精度に鉛直位置の管理が行われる。

「ごんどう」は CTD として Sea-Bird Electronics SBE 49 FastCAT を搭載する。これは大深度耐圧仕様の小型の CTD であり、電気伝導度、水温及び圧力の計測値に加え、それらを用いて推定された深度及び音速を出力する。機体外部から海水を取り入れる構造となっており、機体前方右舷側の外板に開けられた取水口とセンサとの間がチューブで接続されている。内蔵されたポンプで海水を吸入し、内部のセンサで電気伝導度及び水温の計測が行われる。圧力計測は歪みゲージ式圧力センサによって行われる (Sea-Bird Electronics, 2020)。計測された各種データをもとに深度及び音速の推定が自動的に行われ、推定値はすべて AUV の潜航ログデータに記録される。

また、「ごんどう」は音速計として AML Oceanographic Micro-SV を搭載する。これはマルチビーム音響測深機における表面音速計測用として設置されているものであり、AUV のペイロード区画内に入った海水の音速を音波によって計測している。各機器の設置位置の様子と模式図を Fig. 1 に示す。

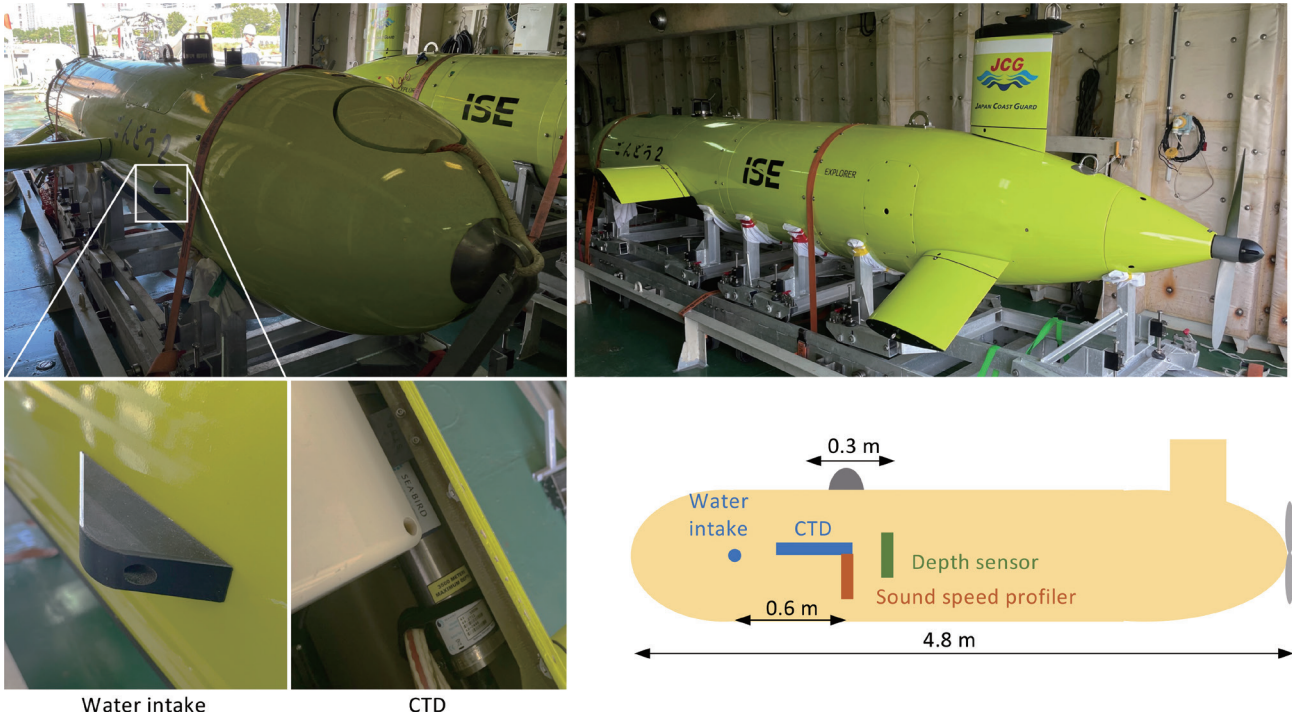


Fig. 1. The exterior of the AUV *Gondou* and the schematic diagram of the onboard oceanographic sensors.  
 図 1. AUV「ごんどう」の外観と海洋観測センサの搭載に関する模式図。

## 2.2 AUVの航行形態

「ごんどう」の潜航における挙動の流れを概観する。まず、海面への投入直前に、深度計のキャリブレーションを行う。これはできる限り正確な深度計測を行うために、現場の大気圧をもって深度 0 m とする操作である。投入後、母船から自律航走開始のコマンドを受け取ると、機体は降下を始め、段階的に目標深度を下げながら海底近傍へと潜航していく。この降下の際には機体のピッチ角は最大で  $-45^\circ$  まで傾き、速度は機首方向に約 3 kt、深度増加率はほぼ一定となる。この間は、深度計による深度値 ( $D^{DS}(t)$ ) が目標深度に一致するように挙動するが、DVLが高度・対地速度を安定的に計測できるほどに海底へ接近すると (概ね高度 200 m 以下)、DVLの高度計測値が目標高度に一致するような挙動へと移行する。このように高度を一定に保つように制御された状態で測線を航走する。測線の航走が終わり、調査が完了すると海面への上昇を始める。上昇時の最大ピッチ角は  $45^\circ$  で、潜航時と同様、浮上における深度減少率はほぼ一定となる。

なお、潜航時における機体の健全性の確認、及び浮上前における海面状態の最終確認等のために、潜航時・浮上時ともに水深 50 m で数分から数十分の間、等深度での旋回待機を行っている。そのため本稿で扱う AUV のログデータについても、深度やピッチ角に関係した指標についてはこの旋回待機動作の影響が現れていることに注意が必要である。

## 3 手法

### 3.1 使用データ

まず、2015 - 2017 年に実施された 26 潜航分の AUV 潜航ログを用い、AUV の挙動を観察した。各ダイブの概要を Table 1 に示す。深度値の時系列データ ( $D^{DS}(t)$ ) 及び高度をプロットすると Fig. 2 のとおりとなる。ここで、海面における AUV の航走や海面への投入・回収時のデータを除くため、深度計が 5 m 以上の値を示していた時間 ( $t \in \{t | D^{DS}(t) \geq 5.0 \text{ m}\}$ ) のみを描画の対象とした。調査海域の違いから、潜航深度は最大で約 1,900 m、最小で約 400 m と潜航ごとに異なる。



しかし、いずれの潜航についても、海面からの潜航時及び海面への浮上時の深度変化率は共通してほぼ一定であることが Fig. 2 から読み取れる。また、測線航行中はいずれも高度を一定に保つように航走するが、測線間の旋回動作や勾配への追従の遅れといった挙動の乱れ、もしくは海底面の細かな起伏等により、常に高度値が一定となるわけではない。

同様に、全 26 潜航分の音速計測差  $\delta Cs(t)$  及び深度計測差  $\delta D(t)$  の時系列プロットを Fig. 3 に示す。Table 1 及び Fig. 2 で示したように各潜航の最大深度や調査時間にはばらつきがあるが、 $\delta Cs(t)$  及び  $\delta D(t)$  にはある程度共通した特徴が現れている。 $\delta Cs(t)$  は潜航時に負の偏差が大きくなるが、潜るにつれてあるピークを境に値が減少し始め、海底に近づく頃には偏差がほぼ無くなり、0 付近ではほぼ一定となる。浮上時には逆に正の偏

差が大きくなり、海面付近でまた 0 付近に戻る。差のピーク値は潜航時、浮上時ともに、概ね 30–40 m であり、これは水深に依存せず同程度の大きさをもっているようである。他方、 $\delta D(t)$  は潜航時にのみピークをもち、浮上時に対応するピークが不明瞭である点で  $\delta Cs(t)$  と異なる。海底近傍では値が小さく安定している点は  $\delta Cs(t)$  と似ている。

以上のように、今回観察した 26 潜航のログデータはいずれも互いに共通した傾向をもっていることが分かる。そこで、以降の議論では深度及び調査高度の異なる代表例を選出することとし、Table 1 に示した潜航のうち 3 つのデータ（潜航 No. 2, No. 6, No. 14）についてのみ、さらなる解

Table 1. Overview of the AUV's dives from 2015 to 2017.

The maximum cruising depth, altitude during the survey line navigation, and the time duration of the dive are shown.

表 1. 2015 年から 2017 年までに実施した AUV の潜航の概要。最大深度、測線航行高度、潜航時間を示している。

AUV Dives				
No.	Date (yyyymmdd)	Depth	Altitude	Duration, $D \geq 5$ m
1	2015.06.15	1700-1900 m	50 m	345 min (5.8 hrs)
2	2015.06.20	800-1000 m	50 m	319 min (5.3 hrs)
3	2015.06.21	800-1000 m	70 m	316 min (5.3 hrs)
4	2015.07.15	1700-1900 m	50 m	362 min (6.0 hrs)
5	2015.07.16	1700-1900 m	50 m	373 min (6.2 hrs)
6	2015.07.28	400-600 m	70 m	367 min (6.1 hrs)
7	2015.11.08	1200-1400 m	50 m	361 min (6.0 hrs)
8	2016.04.24	700-800 m	100 m	117 min (2.0 hrs)
9	2016.05.01	1300-1800 m	100 m	312 min (5.2 hrs)
10	2016.05.09	1700-1900 m	100 m	319 min (5.3 hrs)
11	2016.05.12	1700-1900 m	100 m	342 min (5.7 hrs)
12	2016.05.13	1700-1900 m	100 m	338 min (5.6 hrs)
13	2016.05.14	1700-1900 m	100 m	408 min (6.8 hrs)
14	2016.06.18	1700-1900 m	100 m	369 min (6.2 hrs)
15	2016.06.19	1700-1900 m	100 m	367 min (6.1 hrs)
16	2016.06.22	1700-1900 m	100 m	396 min (6.6 hrs)
17	2016.06.26	1700-1900 m	100 m	374 min (6.2 hrs)
18	2016.06.27	1700-1900 m	100 m	372 min (6.2 hrs)
19	2016.06.29	1700-1900 m	100 m	420 min (7.0 hrs)
20	2017.05.08	500-700 m	100 m	371 min (6.2 hrs)
21	2017.06.09	1500-1800 m	100 m	335 min (5.6 hrs)
22	2017.08.19	1500-1800 m	100 m	369 min (6.2 hrs)
23	2017.08.24	1700-1900 m	100 m	326 min (5.4 hrs)
24	2017.08.28	1700-1900 m	100 m	364 min (6.1 hrs)
25	2017.09.03	1700-1900 m	100 m	321 min (5.4 hrs)
26	2017.09.04	1700-1900 m	100 m	321 min (5.4 hrs)

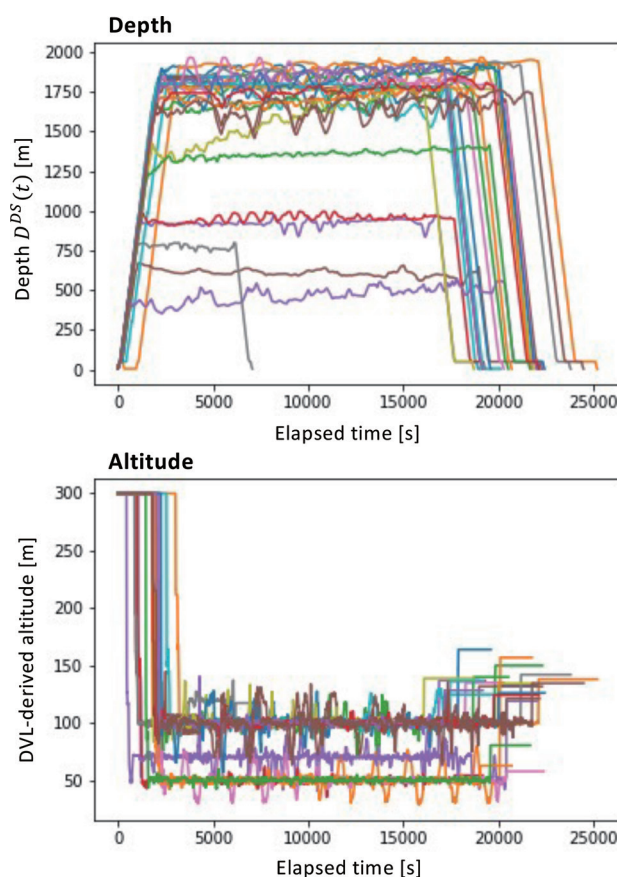


Fig. 2. Time series of the depth derived from the depth sensor and the altitude derived from the DVL. The 26 dives listed in Table 1 are shown in different colors.

図 2. 深度センサ由来の深度値と、DVL 由来の高度値の時系列図。Table 1 に示した 26 潜航を異なる色で表している。

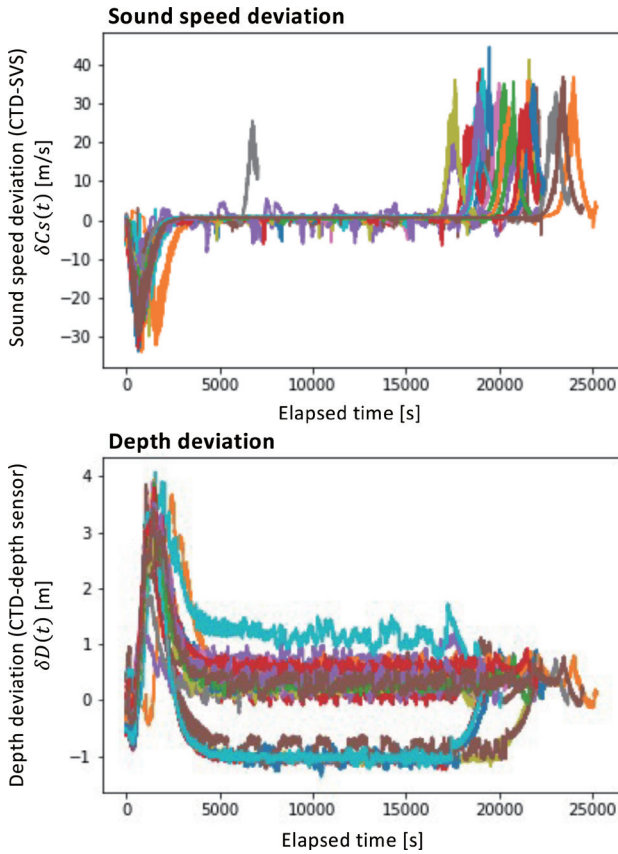


Fig. 3. Time series of the sound speed and the depth deviations. These deviations are calculated as the CTD-derived values minus the measurements of the sound speed sensor and the depth sensor, respectively. The 26 dives listed in Table 1 are shown in different colors.

図3. 音速偏差及び深度偏差の時系列図。偏差はCTDによる計測値から音速計もしくは深度計による計測値を引いた差として定義した。Table 1に示した26潜航を異なる色で表している。

析を行うこととした。

### 3.2 解析手法

$\delta Cs(t)$  及び  $\delta D(t)$  に影響を与える要素を特定するため、AUVの潜航ログに記録された各種データ間で種々の散布図を描くことにより、相関の有無を調べた。比較対象とするデータ項目は、深度 ( $D^{DS}(t)$  及び  $D^{CTD}(t)$ )、音速 ( $Cs^{SVS}(t)$  及び  $Cs^{CTD}(t)$ ) のほか、AUVの挙動との対応性を調べるため、慣性航法装置によって推定されたピッチ角を用いた。

## 4 描図結果

### 4.1 $\delta Cs$ と $\delta D$ の時系列変化

前章で代表データとして選出した3つの潜航について、深度  $D^{CTD}(t)$  及び  $D^{DS}(t)$ 、音速  $Cs^{CTD}(t)$  及び  $Cs^{SVS}(t)$ 、偏差  $\delta D(t)$  及び  $\delta Cs(t)$  並びに航行速度及びピッチ角を時系列でプロットした結果を Fig. 4 に示す。海域の水深及び調査高度はいずれも異なるが、Fig. 3 で示したように、 $\delta Cs(t)$  と  $\delta D(t)$  はそれぞれ、すべての潜航に共通するような推移を見せている。まず、 $\delta D(t)$  は潜航開始直後にやや負の方向に振れた後、正の方向に振れ始め、潜航の途中で大きな正のピークを示す。Fig. 4 における  $\delta D(t)$  の時系列図でいえば、いずれの潜航ともデータの開始直後に  $-0.5$  m 程度落ち込んだ後、直ちに増加に転じ、潜航 No. 2 では  $2.8$  m、No. 6 では  $1.1$  m、No. 14 では  $3.7$  m 程度でピークに達している。海底近傍に達し潜航動作が終わった頃、すなわちピッチ角が  $0$  付近に戻る頃には  $\delta D$  は  $0$  付近へと戻り、それ以降はわずかに増減するものの、浮上まで明確な傾向はなく推移する。 $\delta Cs(t)$  は、潜航時に負のピークと浮上時に正のピークが現れるのが特徴的である。ピークの高さは潜航時、浮上時ともに  $20-40$  m/s 程度である。なお、Fig. 4 の左上に示した深度値について浮上の直前で一時的に一定値となっているが、これは2.2節で述べた浮上前の旋回待機によるものである。

$\delta Cs(t)$  と  $\delta D(t)$  の関係性を Fig. 5 に示す。 $\delta Cs(t)$  と  $\delta D(t)$  の双方が大きな偏差をもっているのが潜航中のデータである。図中に矢印で示す向きに時間が経過しており、途中までは第4象限内を半円を描くように推移するが、その後は横軸に沿うように原点方向へ戻るように変化する。このことから、音速の偏差及び深度の偏差はほぼ同時に大きくなるが、音速の偏差のほうが先に小さくなるのが分かる。この傾向は Fig. 4 から読み取ることができ、潜航時の偏差のピークは  $\delta Cs(t)$  に比べて  $\delta D(t)$  のほうがロングテールとなっている。浮上時には  $\delta D(t)$  があまり大きく変化しないことから、図中ではほぼ縦軸に沿ったプロットとして現れている。

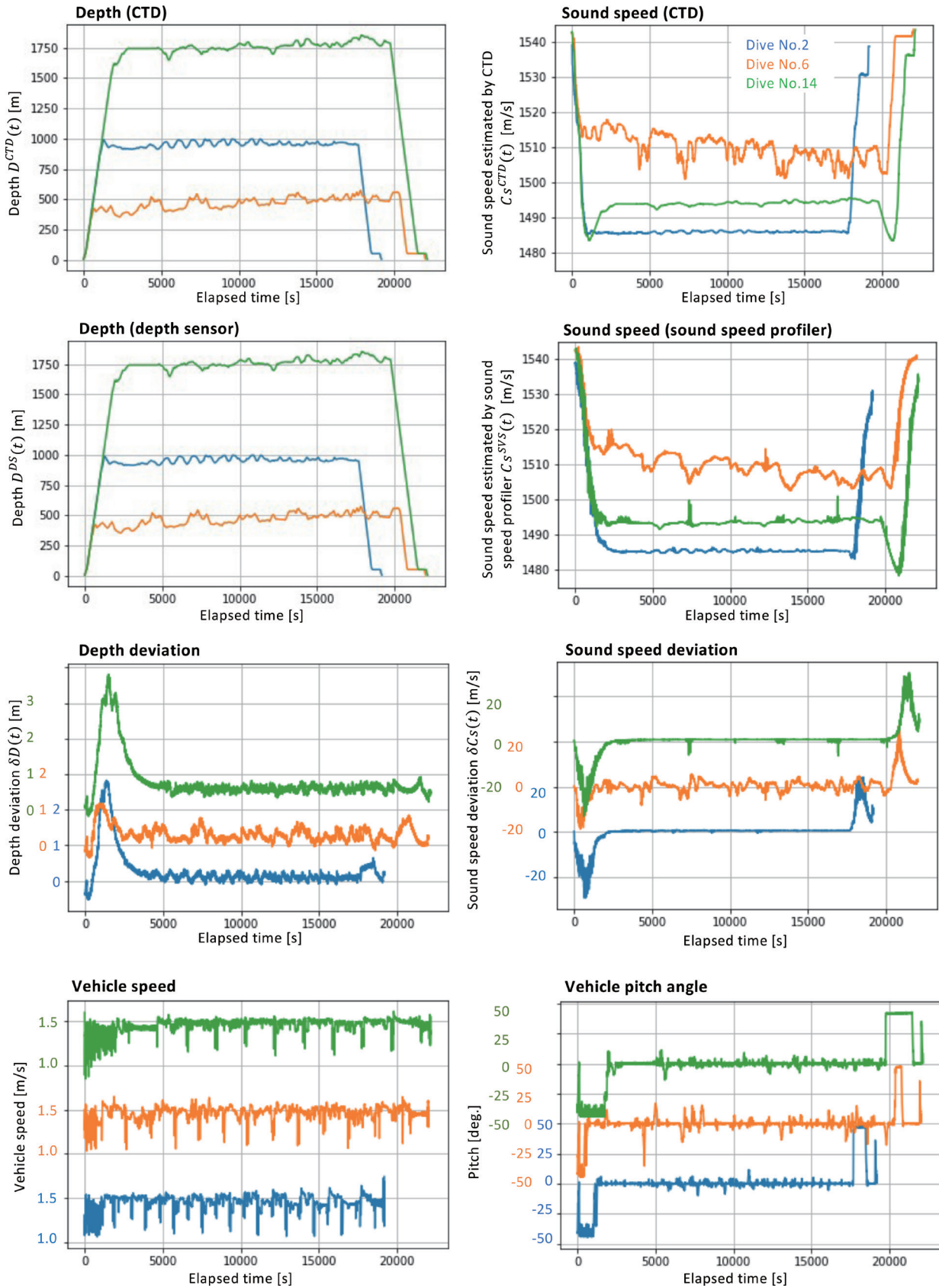


Fig. 4. Time series of the depth, sound speed, depth deviation, sound speed deviation, vehicle cruising speed, and pitch angle for the three dives hatched in Table 1.

図 4. 表 1 中に網掛けで示した 3 潜航についての、深度、音速、深度偏差、音速偏差、AUV の航行速度及びピッチ角の時系列図。



#### 4.2 $D^{DS}$ に対する $\delta Cs$ , $\delta D$ の振る舞い

深度計による深度計測値  $D^{DS}(t)$  と、 $\delta Cs(t)$  及び  $\delta D(t)$  との対応を示す散布図が Fig. 6 である。深度と  $\delta Cs$  の対応及び深度と  $\delta D$  の対応のいずれも、すべての潜航に共通するような値の推移が見て取れる。 $\delta Cs$  及び  $\delta D$  とともに、偏差の変化のタイミングは深度とある程度対応しているようである。潜航 No. 2 は No. 14 のグラフを途中の深度で打ち切ったような形状をしており、これは No. 6 も同様である。

また、Fig. 6 から、潜航 No. 2 及び No. 14 については特に、 $\delta D$  の偏差の大きさと潜航深度との間に正の相関があるようにも見える。 $D^{DS}(t)$  と  $\delta D(t)$  の散布図において、潜航開始から海底に到

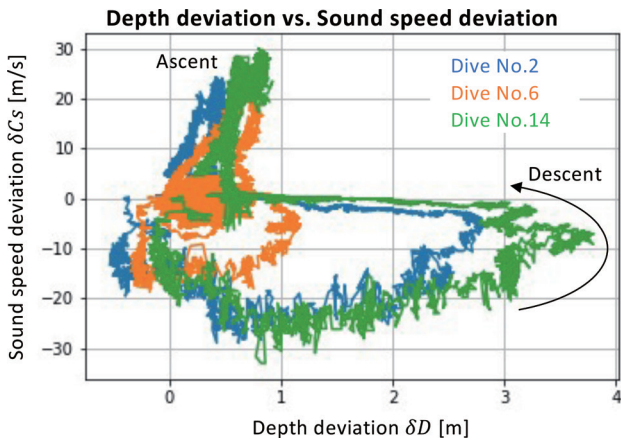
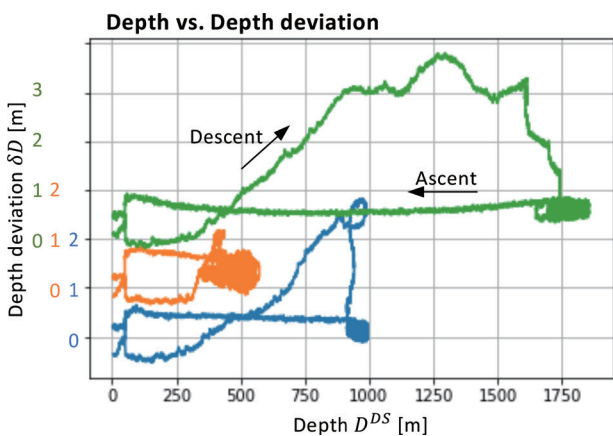


Fig. 5. Scatter plot showing the relationship between the sound speed deviation and the depth deviation.  
 図5. 深度変化と音速変化の関係を示す散布図。



達するまでの間に対応するデータのみを切り出し、 $D^{DS}(t)$  と  $\delta D(t)$  の相関係数を計算した結果を Fig. 7 に示す。ここで、データの切り出しにあたっては機体のピッチ角に着目し、ピッチ角が  $-45^\circ$  以上、 $-40^\circ$  以下の場合のみを抜き出している。

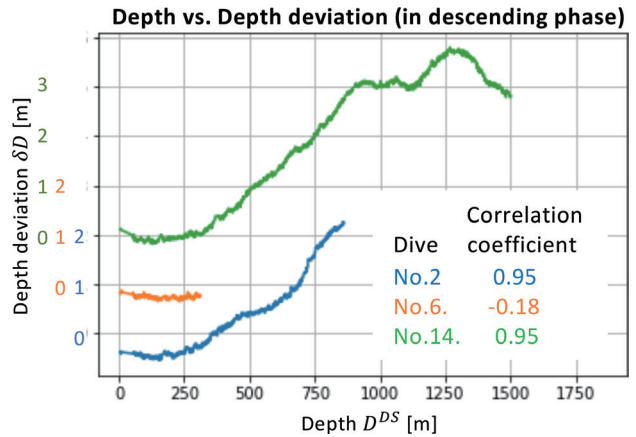


Fig. 7. Scatter plot showing the relationship between the depth and the depth deviation (Fig. 6 left), isolated only for the pitch angle between  $-45^\circ$  and  $-40^\circ$ , and the correlation coefficient between the depth and the depth deviation for each dive in the data. This corresponds to the AUV behavior of descending from the surface toward the seafloor.

図7. 深度計で計測された深度と深度偏差の関係を示す散布図 (図6左) のうち、ピッチ角  $-45^\circ$  以上  $-40^\circ$  以下のデータのみを示したものと、そのデータにおける潜航ごとの深度と深度偏差の相関係数。これはAUVが海面から海底に向けて降下している動作に相当する。

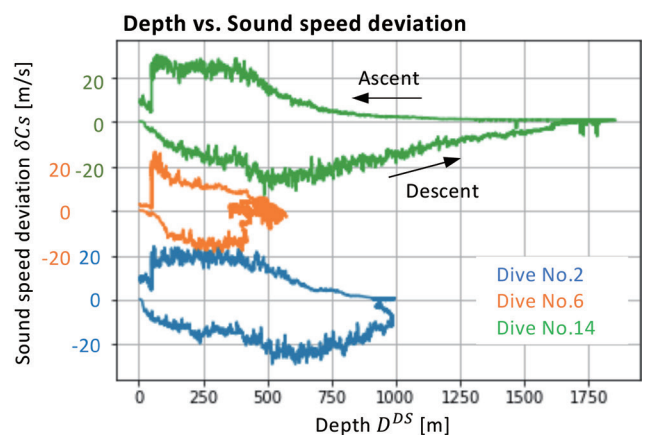


Fig. 6. Scatter plot showing the relationship between the depth measured by the depth sensor and the depth/sound speed deviations.

図6. 深度計で測定された深度と深度偏差・音速偏差との関係を示す散布図。

この部分のデータについて、 $D^{DS}(t)$  と  $\delta D(t)$  の相関係数は潜航 No. 2 及び No. 14 では 0.95, No. 6 では  $-0.18$  であり、潜航 No. 6 を除いて概ね正の一次相関様の関係性が認められた。

#### 4.3 $D^{DS}$ に対する $C_s^{CTD}$ , $C_s^{SVS}$ の振る舞い

$C_s(t)$  は最大で 30 m/s ときわめて大きく、また Fig. 6 で深度依存性と思われる振る舞いが認められたため、音速値  $C_s^{CTD}$  及び  $C_s^{SVS}$  それぞれが深度に対してどのような傾向を示すかを調べた。 $C_s^{CTD}$  及び  $C_s^{SVS}$  の、 $D^{DS}$  に対する散布図を Fig. 8 に示す。

$C_s^{CTD}$  と  $C_s^{SVS}$  の変化の様子は明らかに異なる。Fig. 4 に示した両者の時系列変化では、潜航 No. 14 について  $C_s^{SVS}$  には  $C_s^{CTD}$  にある潜航直後の約 1485 m/s までの落ちこみが記録されていないほか、いずれの潜航についても値の細かな増減の様子が一致していない。Fig. 8 に示した深度値に対する振る舞いでは、 $C_s^{CTD}$  は潜航と浮上で互いに整合的な値となっている一方、 $C_s^{SVS}$  は潜航と浮上では約 30 m/s に及ぶ顕著な系統的な差を伴い、また短期的にも値の細かな振動がみられる。ただし、このような値の顕著な差は、測線航走中にはあまり生じないようである。Fig. 4 (特に、No. 2 及び No. 14) に示したとおり  $\delta C_s$  は潜航・浮上時を除いた音速の時間変化が小さい場合にはきわめて小さく、これは Fig. 8 においても海域内最深地付近 (すなわち測線上) での音速値にほぼ差が見

られないことからわかる。 $C_s^{SVS}$  の細かな振動も下降・上昇中に特に顕著に現れており、測線航走中は比較的安定している。これらのことから、 $C_s^{SVS}$  は  $C_s^{CTD}$  に比べ、機体の挙動による影響を強く受けやすいものと想像される。

#### 4.4 ピッチ角に対する $\delta C_s$ , $\delta D$ の振る舞い

慣性航法装置のジャイロスコープにより計測された AUV のピッチ角と、 $\delta C_s(t)$  及び  $\delta D(t)$  との散布図を Fig. 9 に示す。ピッチ角と  $\delta C_s(t)$ 、ピッチ角と  $\delta D(t)$  のそれぞれの上に単純な相関関係を読み取ることは困難であるが、値の推移にはすべての潜航に共通した要素がみられる。ここで、ピッチ角の時系列変化は Fig. 4 に示すとおりであった。これをもとに、Fig. 9 の散布図上で潜航中の各挙動を対応させると、Fig. 9 下部に示すように AUV の動作とグラフ内の点の移動がある程度対応していることが読み取れる。

ピッチ角と  $\delta C_s(t)$  の散布図においては、潜航動作が第 3 象限、浮上動作が第 1 象限にそれぞれ分布している。潜航開始時のピッチ角の負方向への変化と  $\delta C_s$  減少のタイミングは不明瞭であるが、海底近傍への降下中に  $\delta C_s$  が負方向に最大となることがわかる。また、降下が完了して機体が水平になる (ピッチ角が 0 付近に戻る) より前に、 $\delta C_s$  が 0 付近へ戻っていることが確認できる。浮上時には、機体が上向き (ピッチ角が正) となった後、上昇している際に  $\delta C_s$  が正の方向に最大

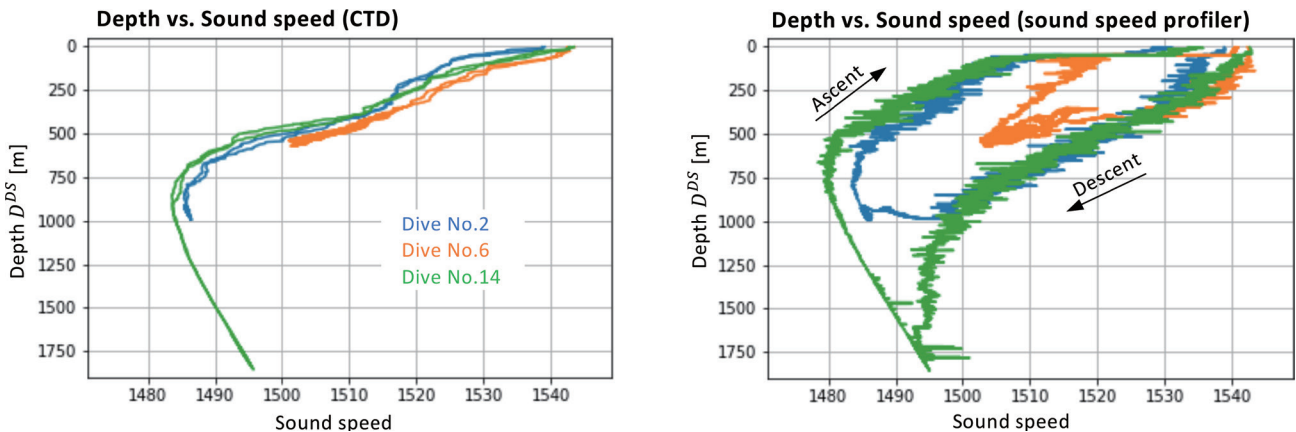


Fig. 8. Depth dependence of sound speed derived from the CTD and the sound speed profiler.

図 8. CTD と音速計それぞれにより得られた音速値の深度依存性。



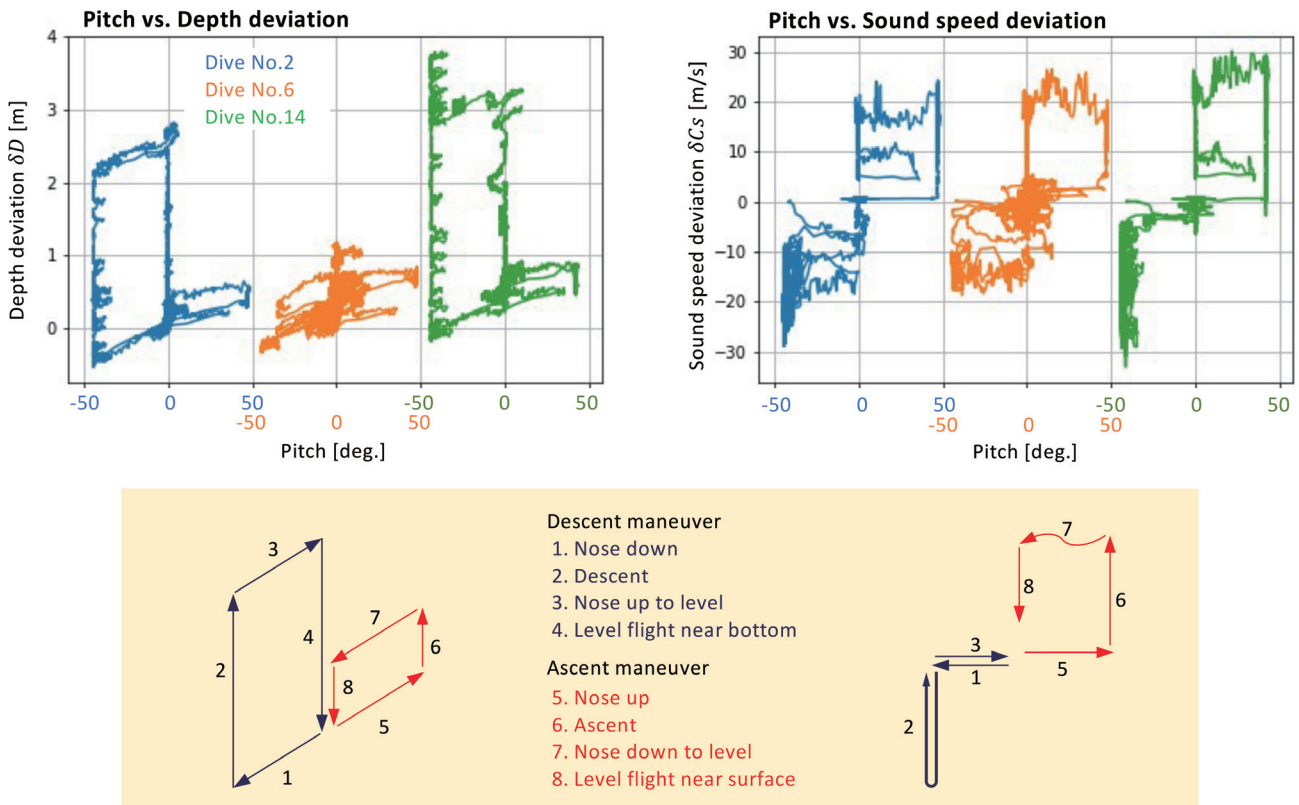


Fig. 9. (Top) Scatter plot showing the relationship between the pitch angle and the depth/sound speed deviations. (Bottom) The trends that can be read from these scatter plots in relation to the individual behaviors of the AUV in the dive.

図9. AUVのピッチ角と深度・音速偏差の関係を示す散布図（上図）と、そこから読み取れる値の推移とAUVの潜航における挙動との対応についての概念図（下図）。

となる。途中でピッチ角が0付近に戻る（図中の“7”の動作）のは2.2節で述べた水深50mでの旋回待機と対応している。その後、水平状態で航走している間に $\delta C_s$ が減少する。潜航時は降下中に $\delta C_s$ が0付近に戻ることがある一方、浮上時には上昇から水平航走に移行するまで $\delta C_s$ は大きな値をもったままである点が異なる。

ピッチ角と $\delta D(t)$ の散布図においては、ピッチ角と $\delta D$ の変化に一部正の一次相関があるように読み取れる。図中の“1”、“3”、“5”、“7”に対応する機首角度変化時にはいずれも $\delta D$ の変化を伴っており、さらにそれらの傾きは凡そ共通している（ピッチ角変化+45°に対して $\delta D$ 変化+0.5m程度）。ここで、一例として図中の“1”すなわち潜航時の機首下げ動作に相当する部分におけるピッチ角と $\delta D$ の相関係数を計算すると、潜航No.2では0.82、No.6では0.32、No.14では0.72であ

り（Fig. 10）、概ね正の一次相関が認められた。また、 $\delta C_s$ とは異なり、潜航時に降下が終わるまで $\delta D$ は増大を続ける。降下後、機首が水平になる（ピッチ角が0に戻る）まで $\delta D$ は増大し、海底付近での水平航行（図中の“4”の動作）中に偏差が0に戻る。また、Fig. 4の $\delta D$ の時系列プロットにおいてAUVの上昇時にピークが見られないことと対応して、ピッチ角が正のときは $\delta D$ があまり大きく変化しない。

## 5 考察

### 5.1 深度偏差 $\delta D$ のピッチ角・深度依存性

深度値については、CTDと深度計との間に計測原理の違いはないことから、機器間の鉛直位置関係の変化が偏差 $\delta D$ にあらわれている可能性がある。Fig. 2で示したとおり、26回の潜航すべてにおいて測線航走中は $\delta D$ は小さく、 $D^{CTD}$ と $D^{DS}$

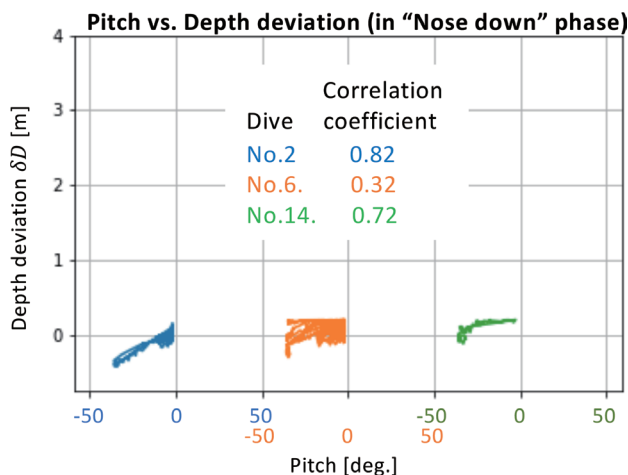


Fig. 10. Scatter plot showing the relationship between the pitch angle and the depth deviation (upper left of Fig. 9), isolated only for pitch angles between  $-36^\circ$  and  $-2^\circ$  and depth deviations of 0.2 m or less, and the correlation coefficient between pitch angle and depth deviation for each dive. The data correspond to the nose down behavior of the AUV ("1" in the bottom image of Fig. 9).

図 10. AUV のピッチ角と深度偏差の関係を示す散布図 (図 9 左上) のうち、ピッチ角  $-36^\circ$  以上  $-2^\circ$  以下かつ深度偏差 0.2 m 以下のデータのみを示したものと、そのデータにおける潜航ごとのピッチ角と深度偏差の相関係数。これは AUV の機首下げ動作 (図 9 下図中の "1") に相当する。

は概ね整合的である。すなわちいずれのセンサも計測値はある程度の妥当性があり、潜航時に生じる偏差は AUV の挙動による要素が大きいものと考えられる。

Fig. 1 に示したように CTD は深度計よりもわずかに前方に搭載されているため、機首が下がれば CTD がより大きな水圧を感知して  $\delta D$  が増加し、反対に機首が上がれば  $\delta D$  が減少するという負の相関が期待される。CTD と深度計の取付位置は、Fig. 1 に示すように前後方向に約 0.3 m 異なる。AUV の潜航・浮上時の最大ピッチ角は  $45^\circ$  であるから、これにより機体が水平のときと比較して最大 0.2 m 程度の深度計測差が生じると予想できる。ところが実際にはそのような単純な負の相関は見られず、Fig. 9 及び 10 に示したように

ピッチ角と  $\delta D$  は正の一次相関がうかがえるような推移を見せ、すなわち機首下げと  $\delta D$  の減少が対応し、機首上げと  $\delta D$  の増加が対応しているように見てとれる。これは解析対象とした 3 つの潜航すべてに共通した傾向であるため、機器の特性や AUV の挙動に由来する現象として合理的な説明を与える余地があるものと考えられるが、現時点においてこの現象を解釈する手がかりはない。

次に、ピッチ角一定での潜航中及び浮上中のデータについて考察する。Fig. 6 に示すとおり、潜航時の少なくとも水深 100 m から 1000 m ほどの区間については、深度  $D^{DS}$  の増加に応じて偏差  $\delta D$  が単調に増加している。すなわち、この区間では  $D^{DS}$  に比べ  $D^{CTD}$  のほうが時間当たりの増加率がつねに大きくなっている。また、浮上時については  $\delta D$  に潜航時ほどの顕著な変化は見られず、すなわち  $D^{CTD}$  と  $D^{DS}$  それぞれの減少率には大きな差が生じないこともわかる。ここで、潜航・浮上時の AUV に加わる圧力変化と、CTD 及び深度計が内蔵する圧力センサの計測値に想定される関係性を Fig. 11 に示す。まず、AUV 周囲の圧力は概ね深度と線形の関係にあるため、潜航・浮上時は Fig. 11(a) のように一次関数様に推移する。他方、 $\delta D$  データから示唆される CTD 及び深度計の圧力計測値の推移については Fig. 11(b) が一例として考えられる。潜航時に CTD と深度計とで圧力計測値に異なるトレンドを生じる要因の特定は現時点では不可能であるが、考えられるシナリオとして、両機器の圧力センサが異なる応答特性をもつ可能性や、AUV 機体内の圧力分布に偏りを伴う可能性がある。CTD と深度計の搭載位置は前後方向に異なるため、機首が下がる潜航中には常に CTD の方が深い位置にある。そのため、両センサ間に一定の圧力入力差があると仮定することは自然である。潜航・浮上時は水平航行時と比べて両センサの位置が鉛直方向に最大 0.2 m 程度ずれることとなるが、これは水中では約 2 kPa の圧力差に相当する。潜航・浮上時にはこの圧力入力差が時間的にほぼ一定値として発生しているはずであるが、一方でセンサ出力値が Fig. 11(b)

様の傾きの変化をもつためには、センサの応答特性がCTDと深度計とで異なる必要がある。また、両センサはAUVのペイロード区画内に搭載されており、AUVの挙動によって内部の圧力分布に偏りが生じるとすれば、センサの応答特性に差がなくとも、搭載位置によって異なる圧力が計測されることとなる。潜航時と浮上時でトレンドに差が生じることについては、センサへの圧力入力値が増大する過程と減少する過程では異なる応答特性をもつ可能性や、潜航と浮上で機体内の圧力分布が異なる偏りをもつ可能性が考えられる。圧力

センサの応答特性には、入力値に対する出力値の非線形性や、入力値の変化の過程によって出力値が変化するヒステリシスがあることが知られている (Gassmann, 2014 など)。センサ特性と圧力分布のいずれのシナリオに依るとしても、結果を説明するために置いた仮定の妥当性について現時点で評価することはできない。機首の上下に対する  $\delta D$  の一次相関様の傾向とともに、深度計測値のAUVの挙動への依存性については、今後さらなる検証を要する。

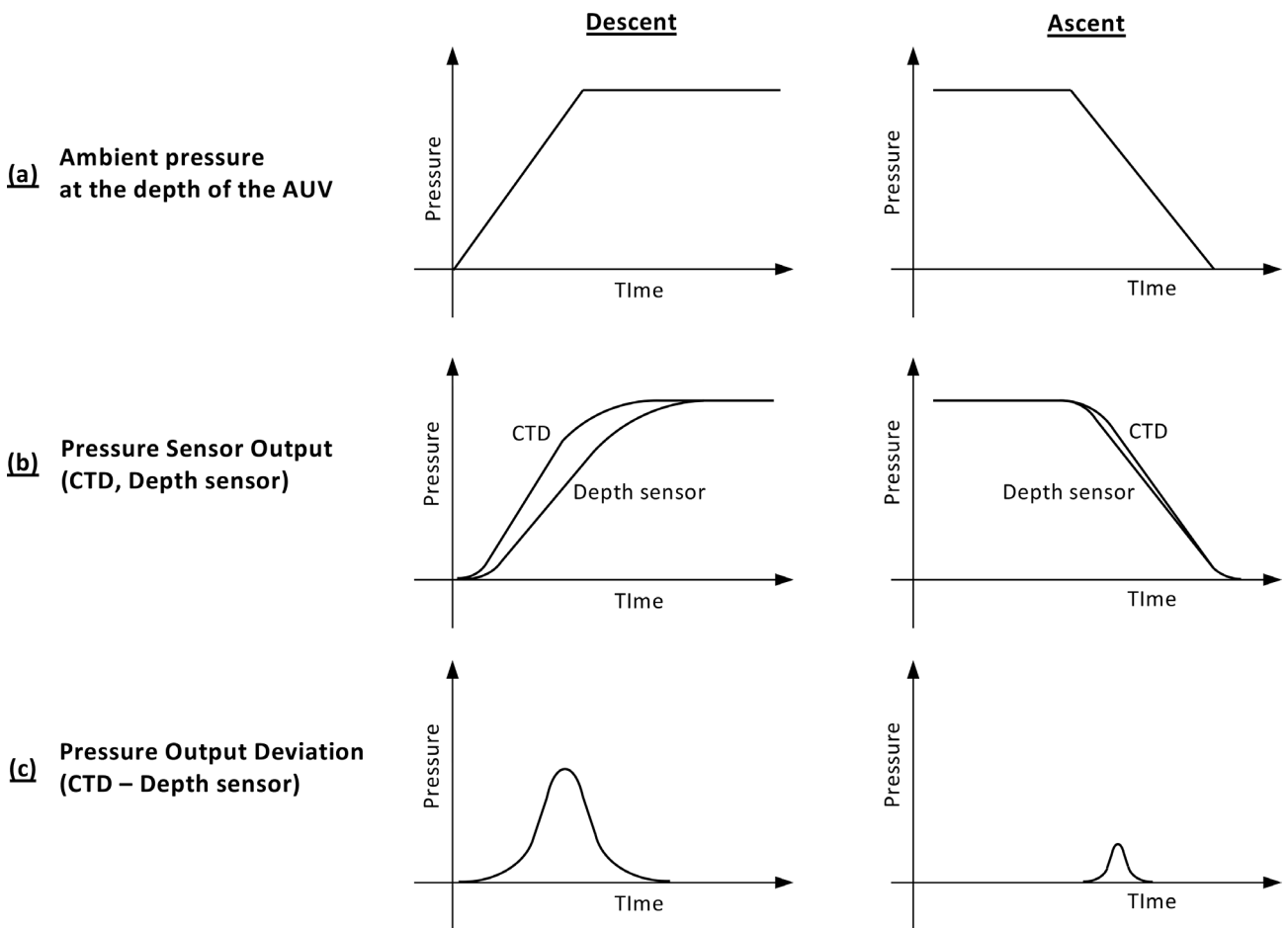


Fig. 11. An example of time-series changes in the input and outputs of the pressure sensors installed in the CTD and the depth sensor. (a) Ambient pressure at the depth of the AUV, which is expected to show approximately linear trends because the AUV is at constant pitch angles when descending or ascending. (b) An example of the time-series changes in the output value of each sensor. (c) The difference in pressure outputs between the two values in (b).

図 11. CTD 及び深度センサに内蔵されている圧力センサの出力値として想定される時系列変化の例。(a) AUV の航行深度における圧力。AUV の降下・上昇時はピッチ角一定で航行することから圧力は一定の割合で増加・減少すると考えられる。(b) 各センサの出力値に想定される時系列変化の例。(c) (b) に示した出力値間の差の時系列変化。



## 5.2 音速値 $C_s^{SVS}$ のピッチ角依存性と $C_s^{CTD}$ の妥当性

Fig. 8 で示したとおり、音速計由来の音速値  $C_s^{SVS}$  には AUV の挙動に依存した値の変化が疑われる。 $C_s^{CTD}$  は潜航時と浮上時で概ね整合的なプロファイルを示しているのに対し、 $C_s^{SVS}$  には降下中と上昇中では最大約 30 m/s にも及ぶ顕著な系統的差があり、さらに最大 10 m/s 程度の短周期の振動も伴っており値が安定しない。一方で、測線航走中など姿勢が安定し音速の時間変化が小さい状況においては  $\delta C_s$  は 0 に近いいため、 $C_s^{CTD}$  と  $C_s^{SVS}$  は互いに整合的であることがわかる。すなわち、いずれのセンサも計測値の妥当性は確保されており、機器自体が問題をもっているとは考えづらい。すなわち、 $C_s^{SVS}$  は  $C_s^{CTD}$  に比べ顕著に挙動依存性が高い。 $\delta C_s$  のピッチ角依存性を示した Fig. 9 をみても、 $\delta C_s$  の変化、つまり  $-C_s^{SVS}$  の変化は AUV の挙動変化に対し何らかの傾向を伴っているものと思われる。

CTD は機外から一定のペースで海水を取り入れて計測する一方、音速計は AUV のペイロード区画内に設置されており、機体外殻内に自然に入り込んだ海水に対して音速計測を行う。そのため、AUV の機体の構造や挙動によって海水の出入りが遅れるなどした場合、機外とは異なる水塊を内部に保持したまま航走し、計測値に大きな誤差を生じるといったことが想像される。この仮定が正しい場合、 $-C_s^{SVS}$  のピッチ角依存性から鑑みるに機体の潜航・浮上によってこの水塊の保持の様子が変化することが考えられる。

ただし、本稿の解析ではピッチ角の変化と、AUV の鉛直移動速度の影響を完全に分離できていない。これは、Fig. 4 で示しているように AUV の速力は潜航中約 1.5 m/s でほぼ一定であり、鉛直移動速度の変化とピッチ角の変化の区別がつかないためである。そのため、本稿で確認された  $C_s^{SVS}$  の挙動依存性がピッチ角のみで説明されるものなのか、鉛直移動速度が関係しているのかについては、さらなる検証が必要である。

機体の内部と外部で著しく異なる音速値が計測

されるというこの事実は、多くの教訓を含んでいる。例えば、マルチビーム音響測深機の表面音速値として仮に CTD の音速出力値を採用した場合、CTD の設置状況や海水ポンプの作動状況によっては、ソーナー表面と著しく異なる音速が適用され、ビームフォーミングに顕著な誤差を生じかねない。また、音速の鉛直プロファイルを作成しようとする場合、表面音速計の出力値では挙動による誤差が許容範囲を超え、信用性の担保ができないプロファイルが作成される可能性がある。

## 5.3 音速偏差 $\delta C$ のピーク幅の時間依存性

$C_s^{SVS}$  は機体の挙動依存性をもつことが考えられる一方、Figs. 4, 6 から読み取れるように、深度に応じた変化も示している。すなわち、 $\delta C_s$  は降下中にピークを迎え、降下が終了するよりも早く 0 付近へと戻る。さらに、その傾向は潜航を問わず凡そ共通しており、例えば Fig. 6 の  $\delta C_s$  や Fig. 8 の  $C_s^{SVS}$  は 3 潜航とも概ね共通した値変化を見せている。本稿で扱った潜航では降下・上昇時の深度と経過時間を区別することはできないため、深度に関係した効果であるか、経過時間に依存した効果であるか不明である。前節で考察した機体内部への海水の出入りが降下・上昇の継続によって解消するなどの仮説を立てることはできるが、この現象を説明する有力なシナリオは本稿の議論のみでは見出すことはできなかった。

## 6 まとめ

本稿で示したとおり、深度計測と音速計測はともに、機体の姿勢が安定している測線調査中であれば機器間の出力値は概ね整合的であった。他方、海底への潜航中や海面への浮上中には複雑な値の変化を示し、潜航深度や調査高度によらない共通した傾向こそ見られたものの、明快な説明を与えることは本稿の解析のみでは困難であった。深度計測については CTD と深度計はともにその場での計測であるが、音速計測の場合は観測対象とする海水の所在が機体の内側と外側で分かれており、この効果を見捨てることはできない。深度の

偏差は、センサの取付位置の違いと応答特性によって発現すると考えることが合理的な説明であるように思われる。音速の偏差は、音速計の計測値の挙動依存性による寄与が大きく、機体内部への水の出入りの特性による影響を想起する結果である。いずれの偏差についても合理的な説明を与えることは現段階では困難であるが、データが示すとおり、AUVの海洋観測データの取り扱いには慎重になるべきである。今後、AUV以外の機器を用いた参照データ取得による比較や、個々のセンサの応答特性に着目した上での解析など、高度化が待たれる。

### 謝 辞

AUVの導入から今日に至るまでAUVの運用方法について絶え間ない検討を重ね、豊富なデータ取得を実現して下さった、測量船「拓洋」船長ほか乗員各位並びに旧海洋調査課大陸棚調査室の歴代AUV担当職員各位に対し、深く謝意を表す。

そして、本稿をまとめるにあたり、論点の明確化と内容の充実化に関わる大変有益なコメントをくださった匿名の査読者に対し、ここに深く謝意を表す。

### 文 献

- Gassmann, E. (2014) Pressure-sensor fundamentals: Interpreting accuracy and error, CEP. June 2014, 37-45.
- McTaggart, K. E., G. C. Johnson, M. C. Johnson, F. M. Delahoyde, and J. H. Swift (2010) Notes on CTD/O2 data acquisition and processing using Sea-Bird hardware and software (as available), in The GO-SHIP repeat hydrography manual: A Collection of expert reports and guidelines, IOCCP Report No. 14, ICPO Publication Series No. 134, Version 1.
- Sea-Bird Electronics (2020) SBE 49 FastCAT CTD Sensor User Manual, Sea-Bird Electronics, Bellevue, WA.

- Wynn, R. B., V. A. I. Huvenne, T. P. Le Bas, B. J. Murton, D. P. Connelly, B. J. Bett, H. A. Ruhl, K. J. Morris, J. Peakall, D. R. Parsons, E. J. Summer, S. E. Darby, R. M. Dorrell, and J. E. Hunt (2014) Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, Mar. Geol., 352, 451-468.

### 要 旨

海上保安庁が運用するAUV「ごんどう」の搭載センサによる深度・音速観測データについて、センサ間での値の差を分析した。CTDと深度計の計測差及びCTDと音速計の計測差のいずれも、複数の潜航記録に共通してAUVの挙動に関連する値の変化を示した。測定値間の差は、AUVのピッチ角、深度または降下・上昇の継続時間等に関連していると推察される。最大オーダは深度差で $\sim 1$  m、音速差で $\sim 10$  m/sであり、AUVによる海洋観測データの解釈には機体外部の物理量変化に対する機体内部の応答特性やセンサの応答特性の理解が必要であることを示唆する結果である。