

AUV「ごんどう」を用いた高分解能海底地形調査 ～データ処理方法の概要及びその実例～[†]

瀬尾徳常*, 南 宏樹*

High-resolution bathymetric survey acquired with autonomous underwater vehicle *Gondou*

～Example of data processing and its result～[†]

Noritsune SEO* and Hiroki MINAMI*

Abstract

Hydrographic and Oceanographic Department of Japan Coast Guard conducted bathymetric survey using multibeam echo sounder deployed on autonomous underwater vehicle (AUV) *Gondou* off Yaizu in Suruga Bay, Japan. This technical report describes data acquisition, data processing including correction of navigation drift and the result. We compared the bathymetry data acquired with AUV *Gondou* and S/V *Takuyo* to verify the difference of resolution. High-resolution bathymetry by AUV *Gondou* was able to detect the small seafloor features which were not resolvable by S/V *Takuyo*. Two quality checks for AUV gridded data were conducted by investigating standard deviation of depth and by calculating the depth difference between main scheme line and crossline. The standard deviation of depth was less than 0.1 m for most of the grid nodes. The depth difference between main scheme lines and crossline was 0.04 m in total. These results for quality check showed that AUV *Gondou* acquired data with acceptable quality in this survey.

1 はじめに

海上保安庁海洋情報部では海洋の総合的管理に必要な海底地形等の基盤データを整備する目的で2013年4月から自律型潜水調査機器(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)の運用を開始した。AUVは海底に近づいて調査を行うため、測量船に比べて詳細な海底地形を取得することが可能であり、近年様々な分野で活用されている。

AUVは分解能の高い地形を取得できるが、

AUVが取得するデータは測量船で取得するデータと異なりデータ処理の過程で位置補正が必要となる。これはAUVが海中に潜航して調査を行うため、電波が大きく減衰する海中ではGPSやGNSS等の電波航法を用いることができず、慣性航法装置(INS: Inertial Navigation System)を用いて位置を推定するが、このINSを用いた位置推定は位置ずれが生じるからである。現在、海洋情報部では位置補正を含めたデータ処理方法を

[†] Received September 19, 2014; Accepted November 10, 2014

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

検討しているところであり、本報告ではこれまでに確立した海底地形データの処理方法及び得られた結果を報告することを目的とする。データのクオリティーチェックも二つの方法で行ったので報告する。

2 調査の概要

本章では調査海域及び調査機器の概要を示す。

2.1 調査海域

駿河湾の焼津沖（水深 800 ~ 900 m）にて調査を実施した (Fig. 1)。AUV「ごんどう」を用いた調査は 2014 年 4 月 27 日 02:00 ~ 03:12 (UTC) にかけて、また測量船「拓洋」を用いた調査は 2013 年 7 月 24 日 04:10 ~ 04:20 (UTC) にかけて実施した。

2.2 調査機器

AUV「ごんどう」

AUV「ごんどう」(Fig. 2) を用いて地形データを取得した。マルチビーム音響測深機のシステムの概要を Table 1 に示す。AUV の運用等の概要については栗田・他 (2013) を参照されたい。

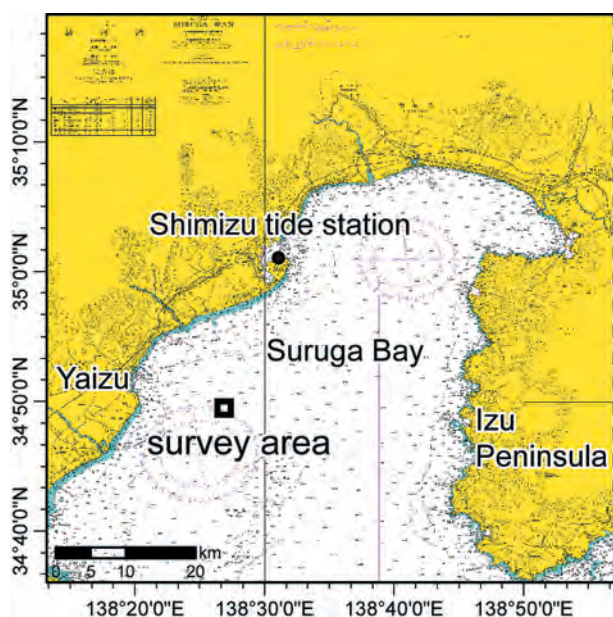


Fig. 1. Survey area (Background nautical chart: W1075 SURUGA WAN).

図 1. 調査海域 (背景図の海図: W1075 駿河湾)。



Fig. 2. Overview of AUV Gondou.

図 2. AUV「ごんどう」の外観。

Table 1. Sounding system equipped for AUV Gondou.

表 1. AUV「ごんどう」の測深システム。

Item	Device	Manufacture / Model	Accuracy
attitude/ position	inertial navigation system	IXSEA / PHINS	(With DVL)
	doppler velocity log	Teledyne RDI / WHN300 (300 kHz)	position : 0.1 m of travel distance
	depth sensor	Paroscientific / Series 8CB	(Without DVL)
	positioning antenna (on surface)	Ashtech / DG14	position : 0.6 Nm/hr depth : 0.01 %
sounding	multibeam echo sounder	R2Sonic / Sonic2022 (200-400 kHz)	—
	surface sound speed sensor	AML Oceanographic / Micro SV	sound speed : 0.05 m/s

AUV は海底からの高度 50 m を維持するように速力 3 ノット (1.5 m/s) で測線を航行した。測線 1 本の長さは約 800 m, 測線数は本線 6 本, 照査線 1 本の計 7 本である。照査線とは本線に直交する測線のことでデータのクオリティーチェックに用いる。本線の測線間隔は、測線間で測深データに十分なオーバーラップがあるよう 100 m に設定した。7 本の測線に要した時間は約 1 時間であった。

測量船「拓洋」

測量船「拓洋」を用いて地形データを取得した。「拓洋」のマルチビーム音響測深機のシステムの概要を Table 2 に示す。測量船「拓洋」は速力 10

Table 2. Sounding system equipped for S/V Takuyo.

表 2. 測量船「拓洋」の測深システム。

Item	Device	Manufacture / Model	Accuracy
attitude/ position	motion reference unit	Kongsberg Seatex / MRU5	heading : 0.05°
	positioning antenna	AeroAntenna / AT575-75	pitch & roll : 0.02°
	positioning (DGPS system)	Hemisphere / MBX-4	position : 0.7 m (DGPS)
	processing system	Kongsberg Seatex / Seapath200	
sounding	multibeam echo sounder	Kongsberg Maritime / EM122 (12 kHz, beam angle 2°x2°)	—
	surface sound speed sensor	AML Oceanographic / Smart SV	sound speed 0.05 m/s
	sound speed profile sensor	The Tsurumi-Seiki / XCTD-1	temperature 0.02 °C conductivity 0.03

ノットで測線を航行した。

3 データの収録及び処理

本章では AUV「ごんどう」及び測量船「拓洋」のデータ収録及びデータ処理について示す。

3.1 AUV「ごんどう」

データ収録

測深データは AUV 独自の収録システムによって収録され、マルチビーム音響測深機 Sonic2022 のデータ (*.raw 形式) と位置及び動揺のデータ (*.csv 形式) が別ファイルに記録される。データ処理にはこれらを統合したファイル (*.gsf 形式) を作成して用いる。Sonic2022 のデータ収録時の主な設定パラメーターを Table 3 に示す。

データ処理

データ処理には MB-System Ver.5.4.2176 (Caress and Chayes, 2014) 及び CARIS HIPS and SIPS version 8.1 を用いた。

各種補正に関しては、ビームフォーミングに必要な表層音速補正はデータ収録時にリアルタイムで行った。センサー間のオフセット補正・動揺補正・潮汐補正は MB-System を用いてポストプロセスで行った。潮汐補正には調査海域から約 20 km 離れた清水検潮所（気象庁所管）において取得された潮位データを用いた。音速プロファイル補正は行っていない。この理由及び影響については考察で述べる。ノイズ除去はフィルター等を使

Table 3. Parameters for data acquisition with Sonic2022 on AUV *Gondou*.

表 3. データ収録時における AUV「ごんどう」の Sonic2022 の設定パラメーター。

parameter	value
frequency	400 kHz
sector coverage	120 deg.
transmit power	221 dB
gain	1 dB
pulse width	60 μ s
minimum depth gate	20 m
maximum depth gate	70 m
range	120 m

わず手動で行った。

位置補正には MB-System の mbnadjust (エムビーナブアジャスト) と呼ばれる位置補正ツールを使用した。この mbnadjust による位置補正の方法を説明すると、まずノイズ除去後の 1 本の測線のデータから等深線を作成する。次に隣接する別の 1 本の測線のデータからも等深線を作成する。そしてお互いの等深線が合致するように片方の等深線を動かしながら測線の位置を補正していく (Fig. 3)。特徴的な地形 (高まり・窪地・断層等) が存在すると等深線を合致させる作業が容易になり、より確からしい補正が行える。mbnadjust を用いた位置補正は①相対位置の補正、②絶対位置の補正の順序で行った。①相対位置の補正とは AUV のデータのみを使う補正であり、隣接する測線間の等深線を比較することで測線間のずれを補正するものである。適切な補正を行わないと、本来存在しないはずの断層が現れたり、高まりや窪地が二重に現れることになる。②絶対位置の補正とは AUV のデータと測量船のデータを使う補正であり、測量船のデータを正 (リファレンス) と仮定して、相対位置を補正した後の AUV の全データを、測量船のデータに合致するように移動

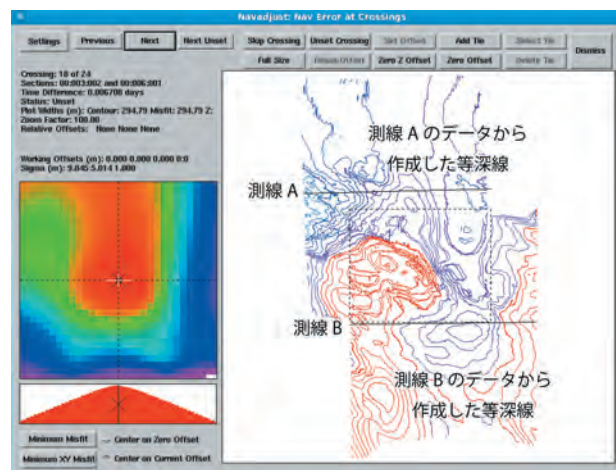


Fig. 3. Example of “mbnadjust” tool on MB-System.

図 3. MB-System の “mbnadjust” ツールの画面例。

右下の画面には測線 A と測線 B という隣接する 2 本の測線 (黒線) から作成された等深線 (色付き線) が表示されており、この等深線を手動及び自動で動かしながら互いの等深線が合致するように位置を補正していく。

させて絶対的な位置ずれを補正するものである。ここでは AUV のデータにしか現れない小さな地形を使うのではなく、測量船のデータにも現れるような大きな地形を使うことになる。ここでも特徴的な地形（高まり・窪地・断層等）が存在するとより確からしい補正が行える。

上述の相対位置及び絶対位置を補正した後の *.gsf ファイルを CARIS HIPS and SIPS version 8.1 に読み込み、スワスの角度による重み付け方法（CARIS では swath angle surface と呼ばれる方法）によりグリiddingした。グリッド間隔は 1 m とした。これは AUV は海底からの高度 50 m で調査しており、ビーム角 1° の場合には AUV 直下のビームのフットプリントは 0.9 m になることから決めたものである。

3.2 測量船「拓洋」

データ収録

マルチビーム音響測深機 EM122 のデータ収録には Kongsberg 社製のデータ収録ソフト SIS (Seafloor Information System) version 3.8.3 を用いた。データは *.all 形式で出力された。EM122 のデータ収録時の主な設定パラメーターを Table 4 に示す。

データ処理

データ処理には CARIS HIPS and SIPS version 8.1 を用いた。各種補正に関しては、表層音速補正・音速プロファイル補正・センサー間のオフセッ

Table 4. Parameters for data acquisition with EM122 on S/V Takuyo.

表 4. データ収録時における測量船「拓洋」の EM122 の設定パラメーター。

parameter	set value
coverage angle	130 deg.
angular coverage mode	AUTO
beam spacing	HIDENS EQDIST
dual swath mode	DYNAMIC
ping mode	AUTO
pulse length	~5000 μ s
FM disable	OFF

ト補正・動揺補正・喫水補正はデータ収録時に SIS においてリアルタイムで行った。潮汐補正のみ CARIS を用いてポストプロセスで行った。表層音速補正については、測量船「拓洋」のマルチビーム音響測深機の表層音速度計が故障して音速度の計測ができなかったため、代わりに測量船の船底部で計測する水温から計算した音速度を SIS に入力して補正を行った。潮汐補正には清水検潮所（気象庁所管）において取得された潮位データを用いた。ノイズ除去はフィルター等を使わずに手動で行った。ノイズ除去後のデータをスワスの角度による重み付け方法によりグリiddingした（CARIS では swath angle surface と呼ばれる方法）。グリッド間隔は 30 m とした。これは調査海域の水深が 900 m であり、ビーム角 2° の場合、測量船直下のビームのフットプリントは 31 m になることから決めたものである。

4 結果

本章では、AUV で取得した海底地形図を測量船で取得した海底地形図と比較することで、AUV の地形の検出能力を確かめる。また処理後のグリッドデータのクオリティーチェックを二つの方法で行った。一つ目は水深値の標準偏差の検証である。二つ目は測線の本線と照査線の水深値の差の検証である。

4.1 地形の検出能力

AUV「ごんどう」及び測量船「拓洋」で取得した地形図を Fig. 4 に示す。いずれの地形図も範囲及びカラースケールは同じである。

AUV で取得した地形図は、測量船で取得した地形図では捉えることのできなかった海底の微細な構造を捉えている。例えば高まりに着目すると、測量船で取得した地形図では高まりが存在することが分かるのみで表面形態については何も分からないが、AUV で取得した地形図からは高まりの頂部に北西-南東方向のリニアメントが存在することが分かる。また北西側の水深が浅くなっている部分に着目すると、測量船で取得した地形図で

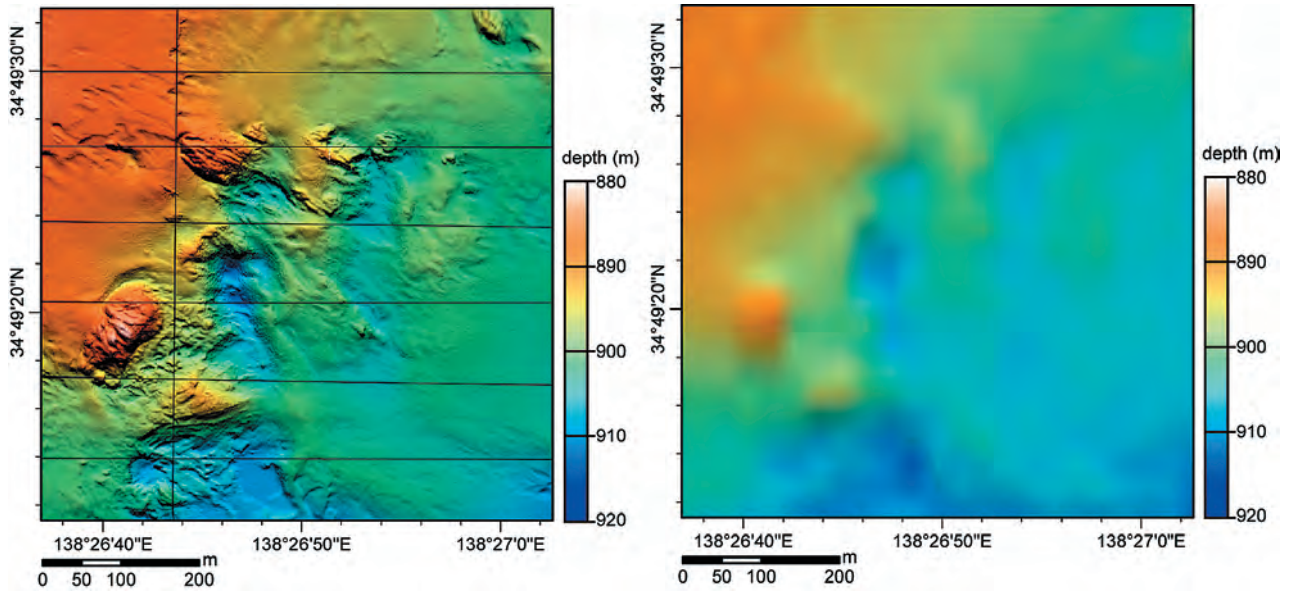


Fig. 4. Bathymetric map acquired with AUV *Gondou* (left) and S/V *Takuyo* (right). Illuminated from north at 45 degrees above horizon, Datum: WGS 84, Projection: UTM-54N. Black line indicates track line.

図 4. AUV「ごんどう」(左図) 及び測量船「拓洋」(右図) で取得した海底地形図。

両図とも陰影の方向は北から、測地系は WGS-84, 投影法は UTM-54N である。黒線は測線を示す。

は一様に滑らかな海底に見えるが、AUV で取得した地形図からは削られたような地形が複数存在することが分かる。このように従来の測量船で取得した地形図からは平坦な地形とされている場所でも、AUV で取得した分解能の高い地形図で見ると実際は起伏に富んだ複雑な地形であることを示す結果となった。

4.2 クォリティーチェック

水深値の標準偏差の検証

AUV のグリッドデータの各格子点 (“ノード”とも呼ぶ) における水深値の標準偏差を検証した。これはグリiddingを行う際に、各格子点周辺の数個~数十個の測深点の水深値を重み付けして各格子点の水深値を決めるわけであるが、各格子点に寄与した測深点の水深値のばらつき (標準偏差) を調べることでデータのクォリティーを検証するものである。標準偏差が小さければ、各格子点の水深値が精度良く決められているとみなせる。

Fig. 5 に検証の結果を示す。水深値の標準偏差は多くの場所で 0.1 m 以下 (薄紫色の部分) に収まっていることから、各格子点の水深値は精度

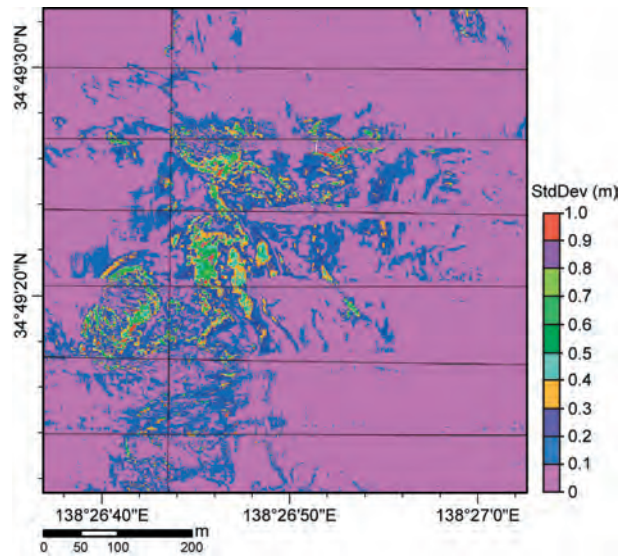


Fig. 5. Standard deviation of depth for grid node. Black line indicates track line.

図 5. AUV「ごんどう」で取得したデータの各格子点における水深値の標準偏差。図の範囲は Fig. 4 と同じ。黒線は測線を示す。

良く求まっていると言える。また Fig. 4 の地形図と Fig. 5 を併せて見ると、高まりや窪地の斜面等の地形の起伏が大きい場所では標準偏差が大きく (0.3 ~ 1.0 m) なっていることが分かる。

本線と照査線の水深差の検証

AUVのグリッドデータの本線と照査線の水深差を検証した。これは従来の測量船を用いた調査でも行われているクオリティーチェックであり、測深システムにロール・ピッチ・ヘディング等のバイアスやオフセットのエラーが存在する場合には本線と照査線間の水深差としてそれらのエラーが顕在化することが多い。具体的には本線と照査線で各グリッドを作成して、本線と照査線が重なる部分で各グリッドの水深差を検証する。グリッドの間隔は1 mとした。

Fig. 6に検証の結果を示す。全体的に水深差は多くの場所で0 m（黄緑色の部分）に近い値を示している。また特徴として地形の起伏の大きい場所（Fig. 6 (c), (d)）は水深差が大きくなり、起伏の小さい場所（Fig. 6 (a), (f)）は水深差が小さい傾向が見られる。Table 5にFig. 6の各図で求めた水深差の平均値と標準偏差を示す。前述のとおり地形の起伏の大きい場所は水深差の平均値が大きくなり（Fig. 6 (c) 及び (d)）、0.10～0.16 mとなっている。一方、起伏の小さい場所は水深差の平均値は小さく（Fig. 6 (a) 及び (f)）、0.04 mである。全体で見ると本線と照査線の水深差の平均値は0.03 mとなり、十分に小さいと考えられることから、マルチビーム音響測深機の測深システムに大きなバイアスやオフセットのエラーはないと考えられる。

起伏の影響に関してはマルチビーム音響測深機は平坦面に比べて起伏の大きな場所では水深の精度が劣る。これはAUVに限ったことではなく、従来の測量船による調査でも見られる傾向である。ただAUVは海底からの高度を一定に保とう

Table 5. Mean and standard deviation of depth difference between the main scheme lines and the crossline for Fig. 6 (a) to (f).

表 5. 図6の各図(a)～(f)の水深差の平均値と標準偏差。

Number in Fig. 6	mean (m)	standard deviation (m)
Fig. 6 (a)	-0.04	0.16
Fig. 6 (b)	-0.03	0.23
Fig. 6 (c)	0.16	0.40
Fig. 6 (d)	0.10	0.32
Fig. 6 (e)	-0.05	0.27
Fig. 6 (f)	0.04	0.19
Total	0.03	0.26

とするため、起伏の大きい場所ではピッチの変動が大きくなりAUVが前傾又は後傾の姿勢となる。そのような姿勢では、海底が平らでAUVが傾いていない状態に比べて水深の精度が落ちている可能性がある。

5 考察

本章では音速プロファイル補正及びAUVデータの位置補正について考察する。

5.1 音速プロファイル補正

AUVのデータにはビームのレイトレーシングに必要な音速プロファイル補正を行わなかった。理由は隣接測線間の測深点の重なり具合を調べたときに音速プロファイル補正を行った場合より行わなかった場合の方がきれいに重なっていたからである（Fig. 7）。隣接測線間の測深点の整合性を重視したわけである。

音速プロファイル補正を行わない影響については、音速プロファイル補正は日射や混合等の影響で水塊構造が鉛直方向に大きく変化する海面付近では音速も鉛直方向に変化するため、そのような環境でビーム（音波）の屈折を正確にトレースするために行うわけであるが、AUVが潜航調査を行った水深800～900 mまで深くなると音速は約1480 m/sとほぼ一定になり、海面付近と異なり音速の変化は非常に小さい（Fig. 8）。そのため音速プロファイル補正を行わなくても大きな影響はなかったと考える。音速プロファイル補正を行った場合に測深点が隣接測線間でうまく重ならなくなる理由については不明であり、原因の解明が今後の課題である。

5.2 位置補正

絶対位置の補正及び相対位置の補正を行ったとしても不確かさは残存する。絶対位置の補正では測量船のデータを正と仮定してAUVのデータをずらしたわけであるが、そもそも測量船のデータには水平位置の不確かさが存在する。CARISを用いて測量船のデータの水平方向の総伝搬不確か

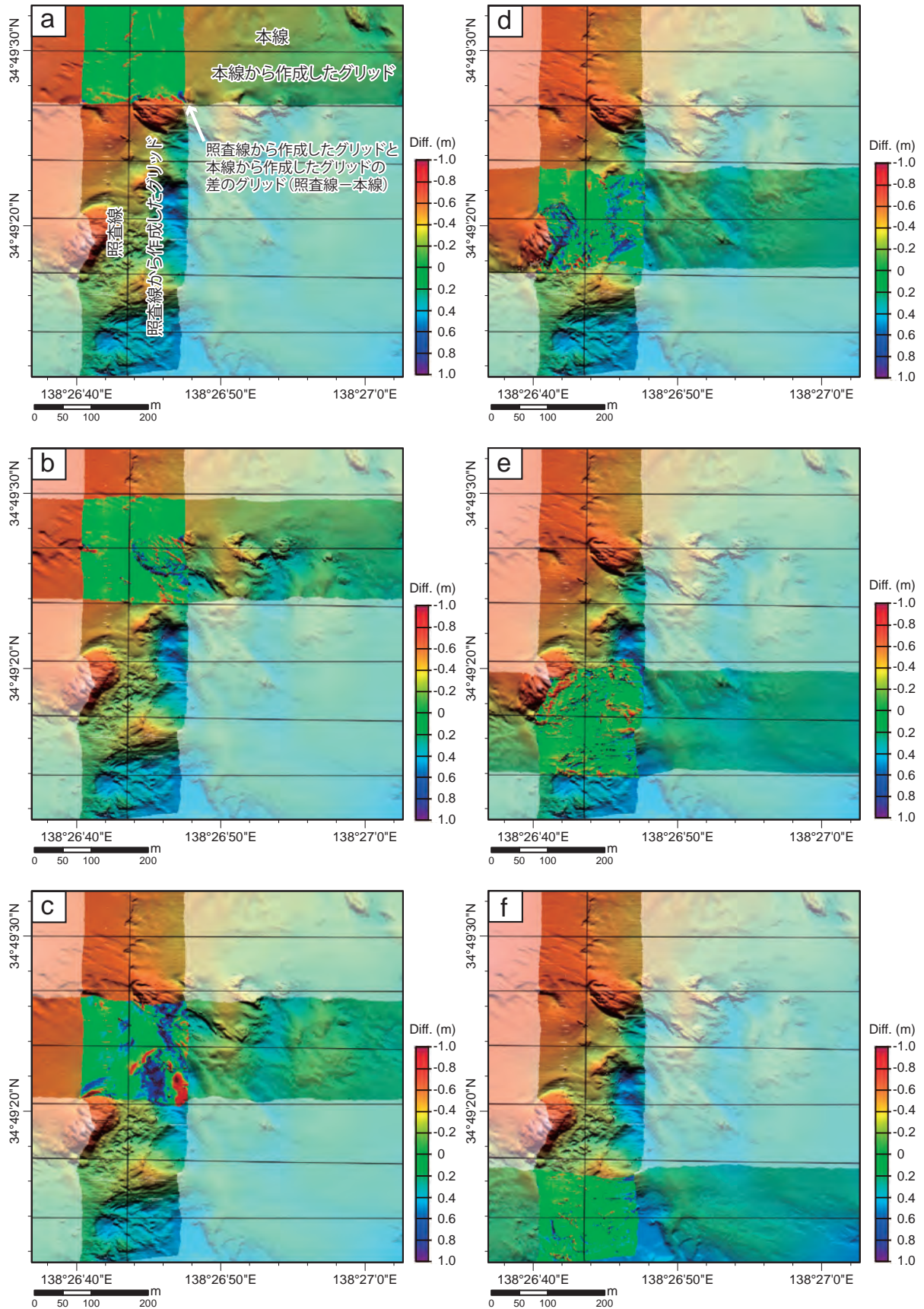


Fig. 6. Depth difference for grid node between main scheme line and crossline.

図6. AUV「ごんどう」で取得したデータの本線と照査線の各格子点の水深差. 図の範囲は Fig. 4 と同じ. 黒線は測線を示す.

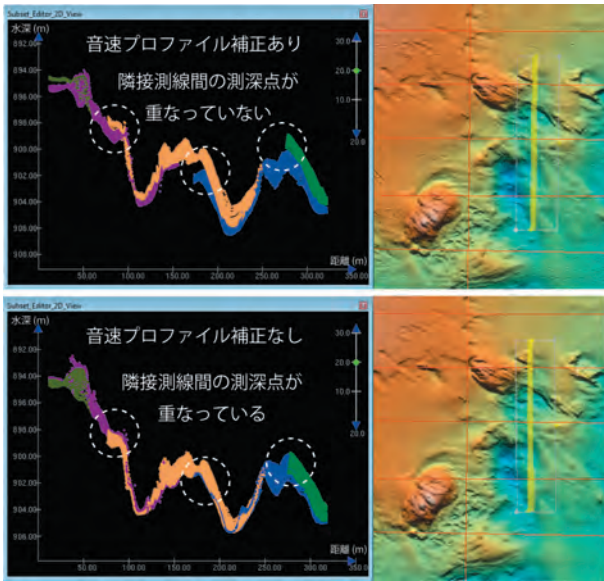


Fig. 7. Sounding overlap between track lines with (upper) and without (lower) sound speed correction.

図 7. AUV「ごんどう」で取得したデータに音速プロファイル補正を行った場合（上図）と行わなかった場合（下図）の測深点の重なり。右画面の黄色のハッチで示した部分の測深点が左画面に表示されている。右画面の赤線は測線を示す。左画面の測深点は測線ごとに色分けされている。

さ (Total Propagated Uncertainty) を各測深点において計算すると本海域の測量船「拓洋」の測深システムの場合、最大 10 m 程度の不確かさとなる。絶対位置の補正に測量船のデータを用いる場合はこの程度の不確かさが含まれることに留意する必要がある。また絶対位置の補正に測量船のデータではなく USBL (Ultra Short Base Line) 方式で取得した測位データを用いる場合は、例えば IXSEA 社製 (現 IXBLUE 社) の GAPS ではカタログに記載されている測位精度 (つまり位置精度) は「スラントレンジの 0.2%」であることから水深 1000 m では 2 m となる。こちらの方が位置精度は若干良いものの、調査中に信頼できる USBL のデータが十分に取得できていることが補正を行う上での条件となる。どちらの手法を用いても当該海域では数 m 程の不確かさが絶対位置の補正には存在すると言える。

相対位置の補正にも水平方向の不確かさが存在

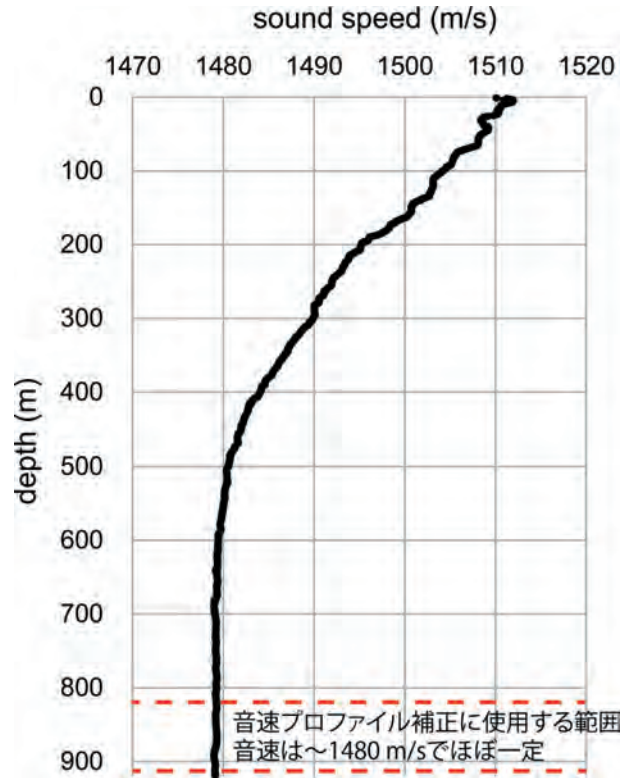


Fig. 8. Sound speed profile near the survey area on 27th April 2014.

図 8. 2014 年 4 月 27 日 (AUV の調査日) に取得した調査海域の音速プロファイル。

する。位置補正には MB-System の mbnadjust ツールを用いたわけであるが、このツールでは前述のとおり、隣接測線間で各測線の等深線が合致するように処理者が目で見えて等深線をずらしながら補正を行うため、結果が主観的にならざるをえず、処理者が異なると結果が異なる可能性がある。位置補正を手動ではなく自動で行うこともできるが、筆者の経験上、自動だけで行うと誤って大きく間違った補正をすることがある。当面の対策としては補正を行うにあたり「どの地形を用いて位置補正を行ったか」「何 m 間隔の等深線を描いて位置補正に用いたか」等々をデータ処理の報告書の中に記述することで客観性を保つことが重要と考える。

6 結論

本報告では AUV「ごんどう」のマルチビーム音響測深機で取得した海底地形データのデータ取

録及びデータ処理の概要について述べた。また駿河湾の焼津沖で取得したデータを測量船「拓洋」に搭載のマルチビーム音響測深機で取得したデータと比較した。測量船「拓洋」では捉えられない微細な海底の地形をAUV「ごんどう」は捉えており、AUVの分解能の高さを示す結果となった。またAUVのデータのクオリティーチェックを二つの方法で行った。一つ目は各格子点の水深値の標準偏差を検証する方法で、多くの格子点で水深値の標準偏差が0.1 m以下となり、各格子点の水深値が精度良く決定されていると言える。二つ目は本線と照査線の水深差の平均値を検証する方法で、水深差の平均値は全体で0.04 mと十分に小さい値となり、精度良くデータを取得できていると言える。今後の課題としてはデータ処理の段階における音速プロファイル補正と位置補正が挙げられる。音速プロファイル補正を行った場合より、行わなかった場合の方が隣接測線間の測深点の重なり具合が良いという現象が起きたため、原因の解明が必要である。位置補正は現在、自動ではなく手動で行っているためデータ処理者によって結果が異なる可能性があり、客観性を持たせるためにデータ処理報告書等に「どのように位置補正を行ったか」を詳細に記述する必要があると考える。

謝 辞

調査にあたり測量船「拓洋」の杉山船長並びに乗組員の皆様方には困難なAUVの運用を遂行して頂いたことに対してこの場を借りてAUV班一同心より感謝申し上げます。また査読者の方から頂いたコメントは非常に有益であり、今後のデータ処理及びデータの検証の参考にさせていただきます。この場を借りて御礼申し上げます。

文 献

Caress, D. W. and D. N. Chayes (2014) MBSsystem Ver.5.4.2176.

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

海上保安庁海洋情報部所属の自律型潜水調査機器 (AUV) 「ごんどう」を用いて駿河湾焼津沖で海底地形調査を実施した。本報告ではデータ収録, 位置補正を含めたデータ処理及びその結果について紹介する。AUV「ごんどう」で取得した海底地形と測量船「拓洋」で取得した海底地形を比較した結果, AUV「ごんどう」は測量船「拓洋」が捉えることのできない微細な海底の地形を捉えることができた。またAUVのデータのクオリティーチェックを二つの方法で実施した。一つは各格子点の水深値の標準偏差を検証するものであり, 標準偏差は多くの場所で0.1 m以下であった。もう一つは本線と照査線との水深差を検証するものであり, 調査範囲の水深差の平均値は0.04 mであった。これらクオリティーチェックの結果からAUV「ごんどう」は本調査において十分良い精度でデータが取得できていると言える。