

日本沿岸域における楕円体基準水深測量の標準手順確立に向けて (2) : 日本海 (山口県西方) の水深データを用いた精度検証[†]

塩澤舞香^{*1}, 住吉昌直^{*2}, 伊能康平^{*1}, 鐘尾 誠^{*1}, 山野寛之^{*1}, 杉山伸二^{*1}, 長野勝行^{*1},
瀬尾徳常^{*1}, 齊藤康仁^{*1}, 小池未空時^{*1}, 吉澤 信^{*1}, 豊鷺見淳史^{*1}, 高橋信介^{*1}, 栗田洋和^{*3},
小川 遥^{*2}, 安原 徹^{*4}

Developing the standard operating procedures of ellipsoidally referenced surveys at coastal waters in Japan (2):
Accuracy verification of bathymetric data in the Japan Sea (west of Yamaguchi prefecture)[†]

Maika SHIOZAWA^{*1}, Masanao SUMIYOSHI^{*2}, Kohei INO^{*1}, Makoto KANEO^{*1},
Hiroyuki YAMANO^{*1}, Shinji SUGIYAMA^{*1}, Katsuyuki NAGANO^{*1}, Noritsune SEO^{*1},
Koji SAITO^{*1}, Mikuto KOIKE^{*1}, Makoto YOSHIKAWA^{*1}, Atsushi TOYOZUMI^{*1},
Shinsuke TAKAHASHI^{*1}, Hirokazu KURITA^{*3}, Haruka OGAWA^{*2}, and Toru YASUHARA^{*4}

Abstract

In recent years, ellipsoidally referenced surveys (ERS) have been proposed as a new hydrographic survey method, which in principle does not require tide observations during the bathymetric surveys. In this paper, following Okubo et al. (2022), in which trial bathymetric data processing was conducted in the Tokyo Bay, the vertical datum modeling method and validity of ERS depths were verified in the Japan Sea (west of Yamaguchi Prefecture) in order to establish a bathymetric data processing procedure in ERS. As a result of the verification, the depths obtained by the ERS were sufficiently appropriate for hydrographic survey, and therein a basic bathymetric data processing procedure in ERS was established. This means that, technically, it is possible to derive bathymetric depths by ERS processing provided that a vertical datum model in a surveying area is available.

1 はじめに

現在, 新たな水深測量の方法として楕円体基準水深測量が提唱されており, 日本でも導入のため

の検証が進められている (大久保・他, 2022). 楕円体基準水深測量は, 潮高改正を要する従来の水深測量とは異なり, Fig. 1 及び次式に示すとおり

[†] Received September 6, 2022; Accepted November 1, 2022

* 1 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

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

* 3 技術・国際課 Technology Planning and International Affairs Division

* 4 第七管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 7th Regional Coast Guard Headquarters

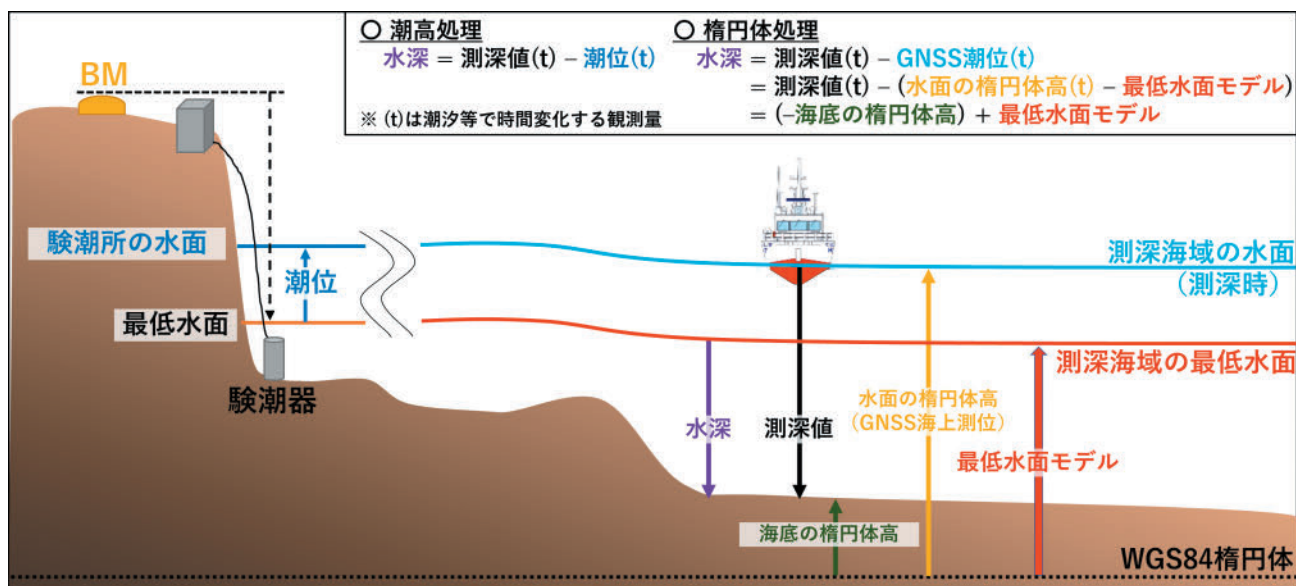


Fig. 1. Overview of the ellipsoidally referenced surveys (ERS).

図 1. 楕円体基準水深測量の概要.

り、測深作業による潮高改正前の水深（測深値）と測深作業と同時刻のGNSS海上測位による楕円体基準の水面の高さ（水面の楕円体高）から、海底の楕円体高を直接測定し、楕円体基準の最低水面（以下、最低水面モデルという。）を加えることにより、最低水面基準の水深へと変換する方法である（日本水路協会，2001-2003；小田巻・中村，2003；大久保・他，2022）。

$$\begin{aligned} \text{水深} &= \text{測深値}^{(t)} - \text{GNSS 潮位}^{(t)} \\ &= \text{測深値}^{(t)} - (\text{水面の楕円体高}^{(t)} \\ &\quad - \text{最低水面モデル}) \\ &= (-\text{海底の楕円体高}) + \text{最低水面モデル} \end{aligned}$$

ここで右上に記された (t) は、潮汐等によって時間変化する物理量を表し、GNSS 潮位は、水面の楕円体高と最低水面モデルから求めた潮位を表す。

楕円体基準水深測量では験潮作業が原理的に不要となるため、再現性のある水深を迅速に得られるというメリットがあるが、本方法を実施するためには最低水面モデルが必要となる。

大久保・他（2022）では、日本における楕円体基準水深測量の標準手順の確立を目指し、東京湾を例に、最低水面モデルを用いた楕円体基準の測深データ処理（以下、楕円体処理という。）が試

行的に行われた。その結果、空間傾斜を考慮して作成した最低水面モデルは十分に使用可能であり、楕円体処理による水深と潮高改正を要する従来処理（以下、潮高処理という。）により得られた水深の差が、海上保安庁の定める特級精度の基準（海上保安庁，2009）内におさまる、楕円体処理により基本的には妥当な水深が得られることが示された。また、楕円体処理による水深の方が、潮高処理による水深に比べて系統的に 0.05-0.10 m 浅くなる傾向が見られ、この小さな水深差の要因が楕円体処理と潮高処理のどちらにも存在していることが言及された。一方で、東京湾での検証では、水深差の原因を追求するにあたり考慮すべき要因が数多く存在し、踏み込んだ示唆や更なる改善に向けた議論までは至らなかった。

楕円体処理の信頼性を確たるものにするためには、まずは、大久保・他（2022）と同様の検証方法を用いて、東京湾とは別の海域で、他の測深システム（他の測量船、測深機等）を用いた場合の検証結果を蓄積する必要がある。更に、測深データ処理手順の妥当性をはじめとする踏み込んだ示唆等を得るためには、最低水面モデルや潮高改正により生じる水深差を極力排除できる海域で検証を行い、楕円体処理と潮高処理の各処理による

水深の誤差要因の影響を明らかにしたうえで、検証結果を注意深く議論する必要がある。

本研究では、大久保・他 (2022) を基本として、東京湾に比べて平均水面及びジオイドの空間傾斜、地盤変動並びに潮汐振幅の小さい日本海側を対象とし、異なる測深システムを用いて楕円体処理の水深の精度検証を行った。また、検証結果を用いて踏み込んだ示唆等を議論するため、楕円体・潮高の各処理による水深の誤差要因の違いについて、体系的に整理した。

2 楕円体基準のデータ処理

2.1 使用データと調査海域

本研究では、第七管区海上保安本部の測量船「はやしお」のマルチビーム測深機 (吉澤・他, 2018) で取得した測深データを使用した。Fig. 2 に示すように、調査海域は山口県西方の日本海沿岸で、南風泊 (はえどまり) 験潮所から約 22 km 離れている。測深作業は、令和 4 (2022) 年 4 月 7 日と 7 月 1 日に実施し、比較検証できるように同じ海域を 2 回測深した。測深日の気象・海象条件は、4 月 7 日は南西の風 8 m/s 以上、波高 1 m、7 月 1 日は風速 0 m/s、波高 0 m であった。また、測深中の船の動揺は、4 月 7 日には最大ロール値 15 度を記録したが、7 月 1 日には最大でも 5 度であった。

測深機は R2Sonic 社製 Sonic2024、測位・動揺検出器は Applanix 社製 POS/MV Wave Master V5、水中音速度計は AML Oceanographic 社製 Smart X SVP、表層音速度計は AML Oceanographic 社製 Micro X SV、測深データ収録は HYPACK 社製 HYPACK2019 (Q3 を適用) を使用した。また、調査海域付近には常設験潮所がなく、験潮器の設置も困難であったため、潮高処理の潮位データとしては、南風泊験潮所の実測値を補間した値を使用した (2.4 節を参照)。

2.2 最低水面モデルの作成

最低水面モデルの対象区域は、測深データを取得した現場海域周辺に加えて、隣接する関門海峡

も試行的に含むよう設定した。狭水道で潮汐振幅の空間変化の激しい関門海峡において十分な空間解像度の最低水面モデルを作成するため、最低水面モデルの空間解像度は、緯度 6 秒×経度 6 秒とし、東京湾の場合 (緯度 1 分×経度 1.5 分) より細かく設定した。以下では、本研究における最低水面モデルの具体的な作成方法を示す。

(1) 平均水面高度の算出

平均水面の楕円体高を求めるために、対象区域の平均水面のジオイド (東京湾平均海面が基準。ただし、離島等を除く。) からの高さ (以下、平均水面高度という。) を算出した。平均水面高度は、周辺の常設験潮所 (現場海域至近の南風泊、潮位年報に掲載されている常設験潮所のうち日本海沿岸で現場海域に最も近い須佐及び博多) の値を基に決定した。須佐と博多の値は、潮位年報 2016 年版から 2020 年版 (海岸昇降検知センター, 2017, 2019, 2020a, 2020b, 2022) に記載された 5 年分の年平均潮位データの平均値と観測基準面のジオイドからの高さの平均値の和として求めた。南風泊の値は、地方整備局から受領した 2016 年から 2020 年までの 5 年分の年平均潮位データの平均値及び港湾工事用基準面変更報告書の験潮基準面の高さから算出した。それぞれ、須佐で 0.26 m、博多で 0.27 m、南風泊で 0.26 m であった (Fig. 3)。大久保・他 (2022) では、常設験潮所に囲まれた区域を対象とし、常設験潮所の平均水面高度から TIN を作成していたが、本研究では、対象区域付近に常設験潮所が少なく、上記 3 か所の常設験潮所の数値にほぼ差が見られなかったため、対象区域の平均水面高度は一律 0.26 m とした。

なお、関門海峡においては、潮汐・潮流等の影響により、平均水面高度も複雑に空間変化している可能性はあるものの、本研究では関門海峡の測深データは含まれず検証結果には影響しないため、一律の値を使用した。

(2) ジオイド・モデルの選定及び点検

ジオイド高の空間モデル (以下、ジオイド・モデルという。) は「日本のジオイド 2011 (Ver.

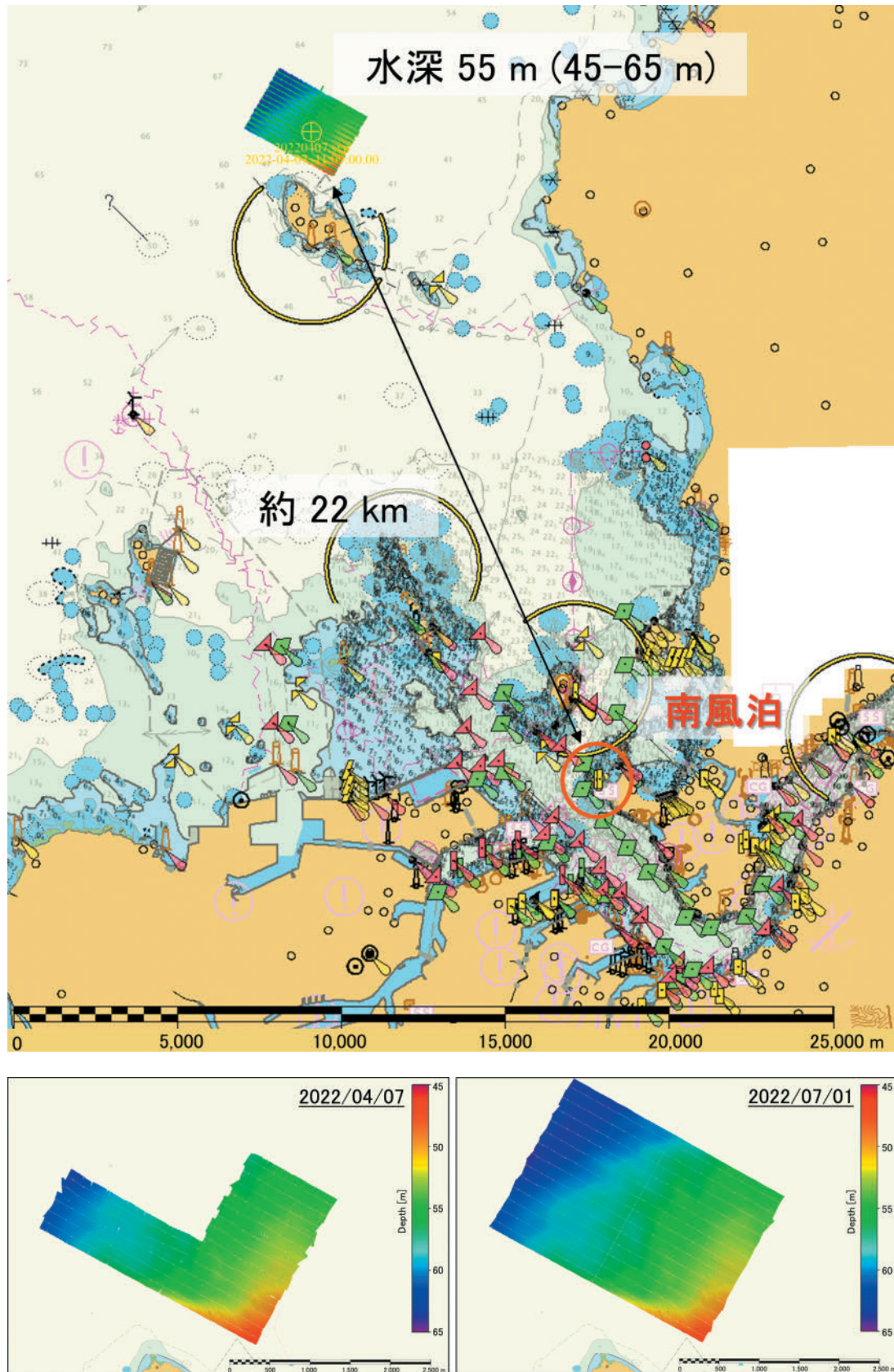


Fig. 2. Location map of the surveyed areas and the Haedomari tide station. The lower left and right panels show an overview of bathymetric data obtained in April and July, respectively.

図2. 調査実施海域と南風泊験潮所の位置. 左下図と右下図は、それぞれ4月と7月に取得した海底地形データの概要を示す.

2.1)」(小板橋・他, 2018)を使用し, 国土地理院の測量計算サイト内, 「ジオイド高計算ページ」において, モデルの作成範囲域内の緯度経度を入力した csv データを読み込ませることで作成した。データの間隔は, 最低水面モデルと同じ緯度 6 秒×経度 6 秒とした。

なお, 本海域におけるジオイド・モデルの妥当性の確認のために, 国土地理院のウェブサイト「基準点成果等閲覧サービス」に記載されている下関の電子基準点(基準点コード: EL05030779303, 標高区分: 水準測量による)の楕円体高(75.52 m)から電子基準点のジオイドからの高さ(43.117 m)を引いて求めたジオイド

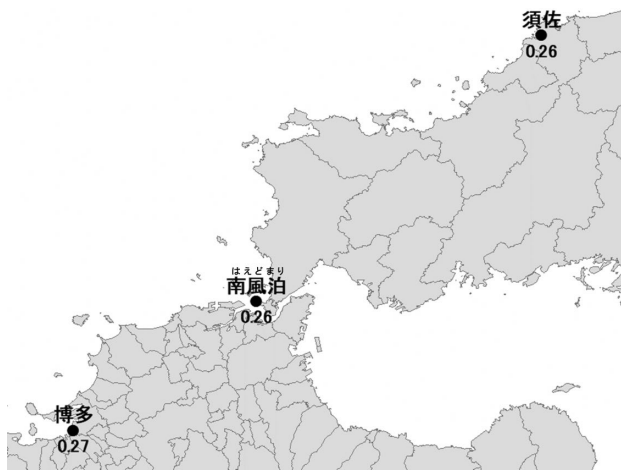


Fig. 3. Mean sea level heights of geoid reference for the permanent tide stations [m].
 図 3. 常設験潮所の平均水面高度 [m].

高の実測値(32.40 m)と, 同一場所のジオイド・モデルの値(32.42 m)を比較した。ジオイド・モデルの値との残差は+0.02 mと十分に小さく, 本海域におけるジオイド・モデルの精度について問題はないと考えられる。

(3) 平均水面モデルの作成

対象区域の平均水面の楕円体高(以下, 平均水面モデルという.)は, 上記(1)の平均水面高度に(2)のジオイド・モデルを足し合わせることで求めた(Fig. 4)。

(4) 最低水面モデルの作成

最低水面モデルは, 上記(3)で求めた平均水面モデルから Z_0 を引くことで求めた(Fig. 5)。本研究における Z_0 の値は, 海上保安庁の平均水面, 最高水面及び最低水面一覧表(海上保安庁, 2022; 以下, 平均水面等一覧表という.)に掲載されている「付図 7 関門海峡東部 Z_0 区分図」, 「付図 8 関門海峡西部 Z_0 区分図」及び「付図 9 響灘及び付近 Z_0 区分図」を使用した。 Z_0 区分図に記載のない範囲については, 平均水面等一覧表に記載の Z_0 の値を元に決定した。

なお, 平均水面等一覧表に記載されている吉母(よしも)の値 0.71 m は, 大正 6 年の調査結果から算出されたものであり(海上保安庁, 1992), 周囲の Z_0 と比べると値に差があり, 値の決定から今日まで点検が行われた記録が確認されなかったため, モデルの作成には吉母の値は使用せず,

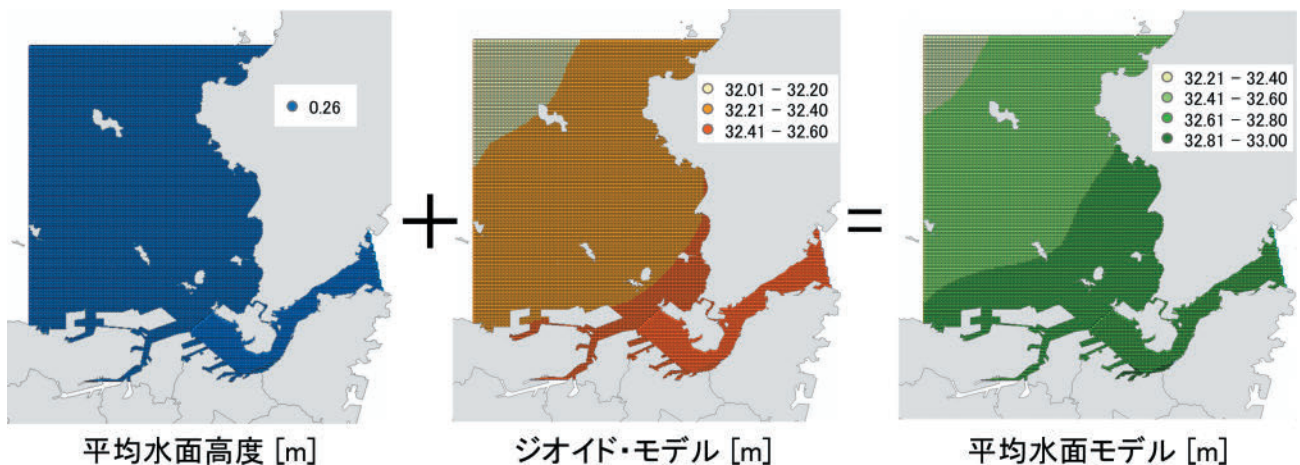


Fig. 4. Calculation of the ellipsoidally referenced mean sea levels [m].
 図 4. 平均水面モデル [m] の算出。

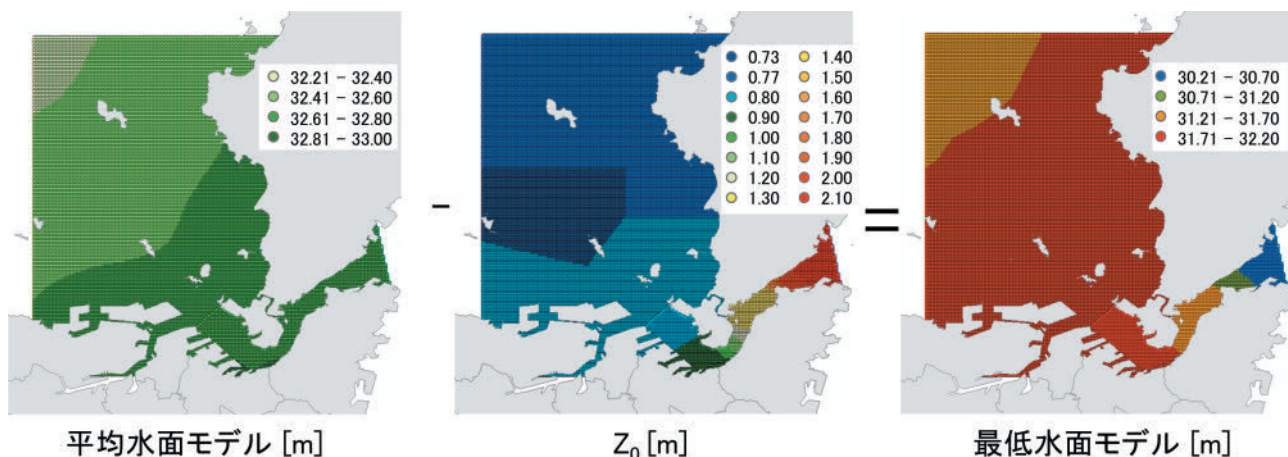


Fig. 5. Calculation of the vertical datum model [m].

図 5. 最低水面モデル [m] の算出.

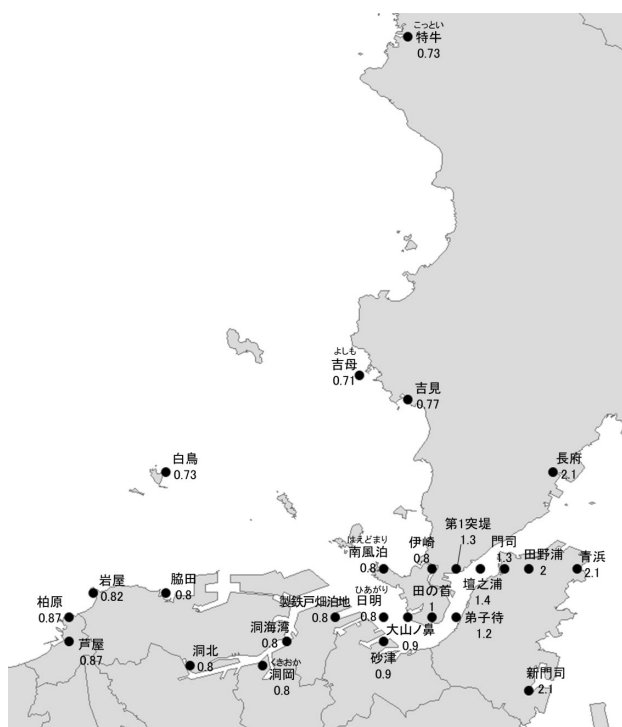


Fig. 6. Z_0 values of the notice [m].

図 6. 平均水面、最高水面及び最低水面一覧表に記載されている Z_0 の値 [m].

測量区域の Z_0 には吉母から約 3.5 km 南東に位置する吉見の値 0.77 m を使用した (Fig. 6).

2.3 キネマティック処理

POS/MV の測位・動揺の統合キネマティック処理では、Applanix 社製 POSpac MMS 6.2 を使用し、スマートベース処理を採用した。本処理手

順の詳細については、住吉・他 (2019) 及び大久保・他 (2022) も併せて参照されたい。

Fig. 7 は、測量船の航跡と使用した電子基準点の配置を示す。電子基準点データは、「下関」「豊北」「山陽」「北九州 2」「福岡」の 5 点の RINEX データ (30 秒値) を国土地理院の「電子基準点データ提供サービス」からダウンロードして使用した。Table 1 には、電子基準点の測地成果を示す。電子基準点の測地成果は、国土地理院の「基準点成果等閲覧サービス」に元期から今期へのセミ・ダイナミック補正 (国土地理院の「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」) を適用した値 (Table 1) を使用した。なお、「北九州 1」は SmartBase Quality Check において電子基準点データの楕円体高に +4 m 程度の誤差が確認されたため、本処理においては使用しなかった (Fig. 7)。

電子基準点の測地成果を POSpac に取り込む際の Coordinate Manager の Frame 設定では、測地成果 2011 に合わせ (ただし、セミ・ダイナミック補正済みであることも考慮)、Frame は ITRF08、Epoch は 2022 年 5 月 24 日、Ellipsoid は GRS_1980 を使用し、セミ・ダイナミック補正を適用済みのため Use Plate Model Velocity は未選択とした。

本処理では GNSS 衛星は GPS 衛星のみを使用し、GPS 衛星軌道データは精密暦を使用した。少なくとも測量開始 2 時間前から測量終了 15 分

Table 1. Coordinates of the GNSS-based control points used in kinematic processing.

表 1. キネマティック処理で使用した電子基準点の座標値.

	電子基準点観測番号	基準点名	基準点成果等閲覧サービス				基準点成果 (SemiDynaEXE Ver.1.0.1 適用後)				差分 (元期-今期)						
			北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (元期)	北緯 [DMS]	東経 [DMS]	楕円体高 [m]	測地成果年 (今期)	北緯(差) [m]	東経(差) [m]	楕円体高(差) [m]				
1	940079	下関	33 59	47.6070	130 54	49.0508	75.520	2011	33 59	47.5994	130 54	49.0746	75.525	2022	0.234	0.482	-0.005
2	950408	豊北	34 17	40.5927	130 56	35.3084	126.840	2011	34 17	40.5854	130 56	35.3331	126.841	2022	0.225	0.500	-0.001
3	021039	山陽	34 01	13.8887	131 06	46.9311	47.760	2011	34 01	13.8820	131 06	46.9541	47.771	2022	0.208	0.468	-0.011
4	021060	北九州1	33 55	46.9988	130 43	20.6801	36.520	2011	33 55	46.9914	130 43	20.7040	36.532	2022	0.230	0.482	-0.012
5	021061	北九州2	33 52	01.2407	130 58	16.0290	42.950	2011	33 52	01.2338	130 58	16.0517	42.931	2022	0.214	0.460	0.019
6	021062	福岡	33 40	59.0572	130 17	48.8474	53.260	2011	33 40	59.0487	130 17	48.8722	53.233	2022	0.264	0.495	0.027

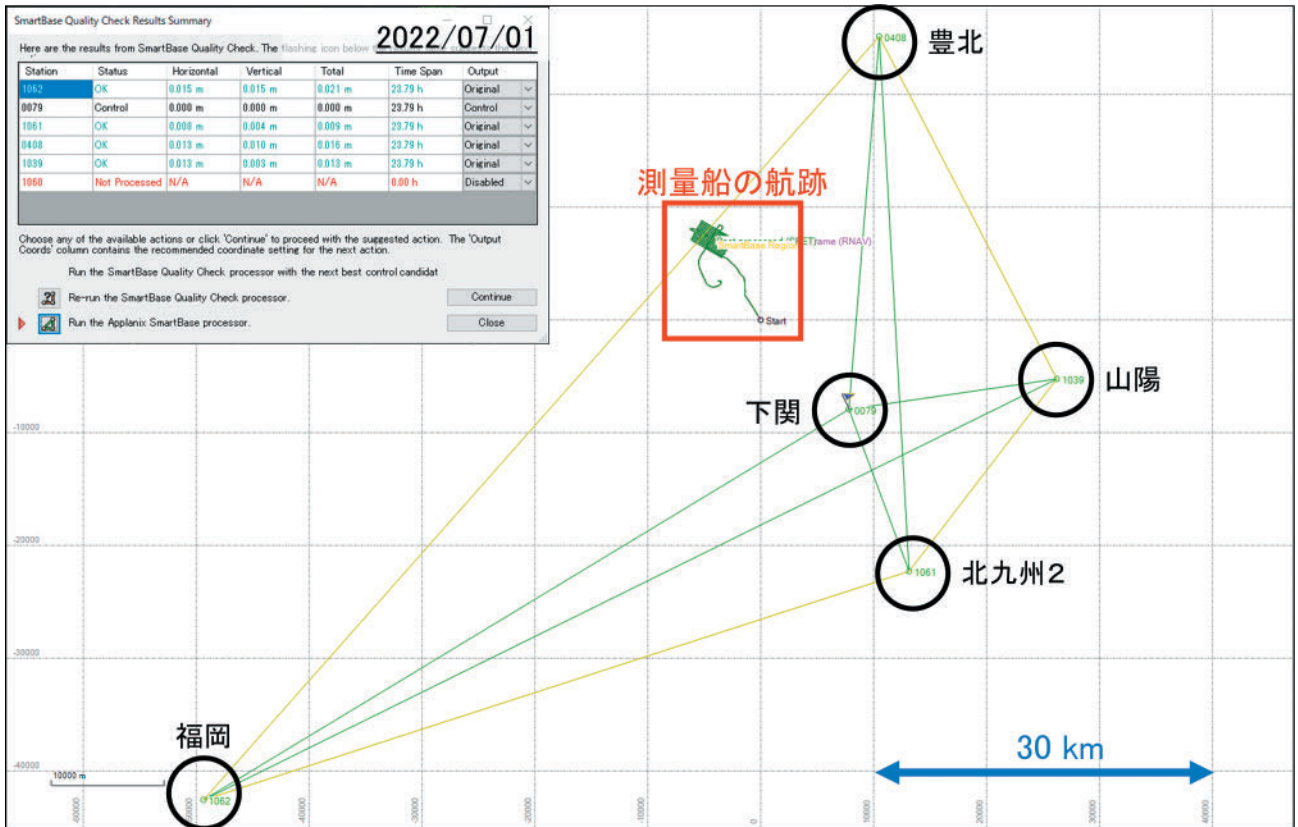


Fig. 7. Screenshots of kinematic processing of positioning and motion data in POSpac MMS 6.2. The points in black circle indicate the GNSS-based control stations used for the processing. The area enclosed by the red square indicates the track line of the survey vessel.

図 7. 測位・動揺データのキネマティック処理画面 (POSPac MMS 6.2). 黒丸で囲まれた点は処理に使用した電子基準点を示す. 赤い四角で囲まれた部分は測量船の航跡を示す.

後までの軌道データが必要となるため、当日 UTC に加えて前日 UTC の GPS 精密暦を、国土地理院の「電子基準点データ提供サービス」からダウンロードして使用した。ただし、本処理の SmartBase Quality Check においては、例外的に GPS 及び GLONASS の放送暦を使用した。

続いて、本処理により得られた高精度の測位・動揺データの妥当性を点検した。測位・動揺データの統合処理する過程で計算される、POS/MV 原点（本システムでは、IMU 参照点）から Primary GNSS アンテナまでのレバーアームオフセット値を Table 2 に示す。測量データセット毎

Table 2. XYZ distances from the reference point of the lever arm offset to the primary GNSS antenna, which were converged in each kinematic processing, and differences from their initial values.

表2. 各キネマティック処理において収束したレバーアームオフセット原点からプライマリ GNSS アンテナまでのXYZ距離とその初期値からの差分.

Ref to PriGNSS レバーアームオフセット	初期値 (I) [m]	2022/4/7		2022/7/1	
		POSPac計算値 (F) [m]	差分 (F-I) [m]	POSPac計算値 (F) [m]	差分 (F-I) [m]
X (Forward)	0.975	1.008	0.033	1.004	0.029
Y (Starboard)	-0.685	-0.686	-0.001	-0.726	-0.041
Z (Downward)	-2.942	-2.946	-0.004	-2.940	0.002

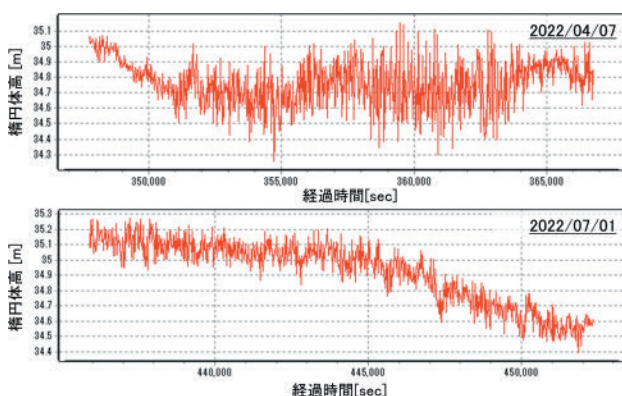


Fig. 8. Time series data of ellipsoidal height obtained by kinematic processing. The upper and lower figures show the ellipsoidal height in April and July, respectively.

図8. キネマティック処理で得られた楕円体高の時系列データ. 上図と下図は、それぞれ4月と7月の楕円体高を示す.

の最終値には0.04 m以内と十分な再現性があることが確かめられた. また、本処理により得られた POS/MV 原点の楕円体高の時系列データを Fig. 8 に示す. 波浪等による短周期のヒープに加えて、潮位変化等による長周期の変動が連続的に見られるため、妥当な結果が得られたと言える. これらから POSPac 処理が適切であったことが示唆される.

2.4 測深データ処理

測深データの処理フローを Fig. 9 に示す. 本研究では、比較検証のため、楕円体処理に加えて、潮高処理も行った. データ処理ソフトウェアは

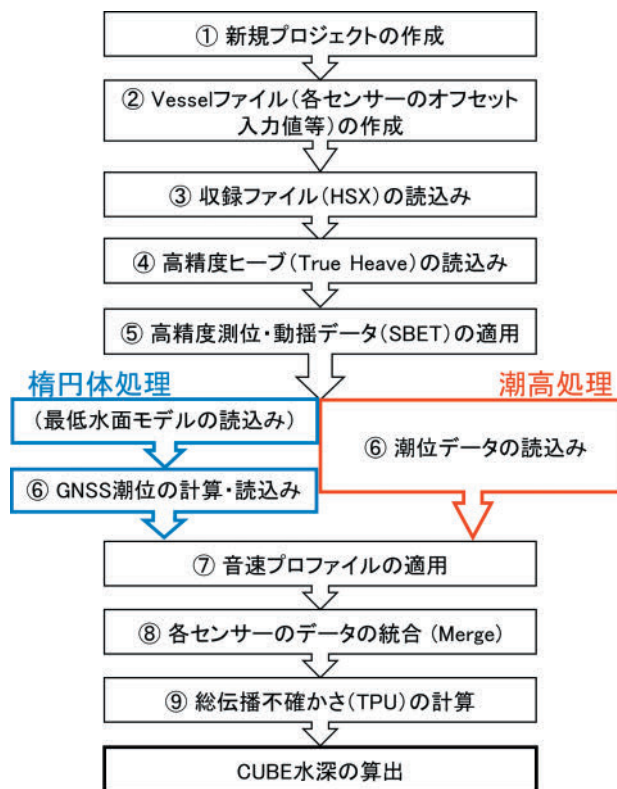


Fig. 9. Bathymetric data processing workflow in ERS and tidal data processing.

図9. 楕円体処理と潮高処理における測深データ処理フロー.

Teledyne Geospatial 社 製 CARIS HIPS and SIPS 10.4 を使用した. 本処理手順の詳細については、大久保・他 (2022) を参照されたい.

潮高処理における現場海域の潮位データ $Tide(t)$ は、南風泊の観測潮位データ $Tide'(t)$ から、次の式により補間推定した.

$$\begin{aligned}
 Tide(t) &= \frac{Z_0}{Z_0'} (Tide'(t) - Z_0') + Z_0 = \frac{Z_0}{Z_0'} Tide'(t) \\
 &= \frac{Z_0}{0.80} Tide'(t)
 \end{aligned}$$

ここで、 Z_0 は現場海域の Z_0 、 Z_0' は験潮所の Z_0 を示す. 南風泊の Z_0 は、 $Z_0' = 0.80$ m であり、楕円体処理と潮高処理における基準面を統一するために、現場海域の Z_0 は吉見の $Z_0 = 0.77$ m を採用した. 異なる Z_0 を仮定した場合の7月1日の潮位データを Fig. 10 に示す. なお、測深時間帯は赤い四角の区域である.

ここで、現場海域での潮位データの推定が妥当

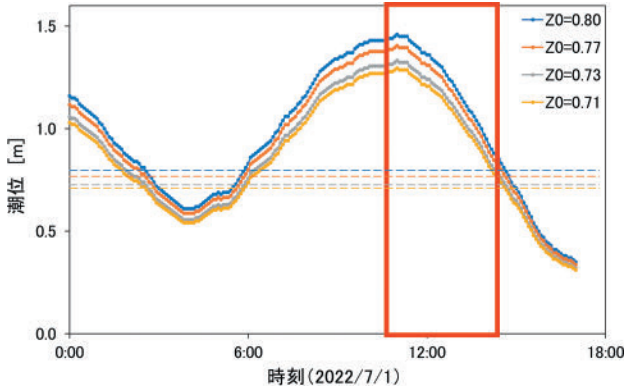


Fig. 10. Tide level data of surveyed area ($Z_0=0.77$) estimated from observed tide levels at Haedomari ($Z_0=0.80$) and from other assumed Z_0 's. The red square indicates the bathymetric survey period.

図 10. 南風泊の観測潮位 ($Z_0=0.80$) から推定した現場の潮位データ ($Z_0=0.77$) と他の Z_0 を仮定した場合の潮位データ. 赤い四角の区域は測深時間帯を表す.

か検証するため、7月1日の測深データに対して、 $Z_0=0.71$ m, 0.73 m, 0.77 m, 0.80 mとした場合の潮位データで潮高処理を行うことにより、照査線を基準とした主測線の水深誤差（以下、水深の内部誤差という。）を各 Z_0 に対して評価した。ここでの Z_0 は、平均水面等一覧表に記載されている、測深海域周辺の Z_0 の値を使用した (Fig. 6)。なお、本検証においては、音速プロファイルによる水深誤差をはじめとするスワス端付近の精度の低い測深データの影響を最小限に留めるため、Fig. 11 のように、スワス角 ± 45 度以内の測深データのみを使用して水深の内部誤差を計算した。Fig. 12 に示すように、各 Z_0 の潮位データにより潮高処理した水深の内部誤差は $Z_0=0.77$ m 付近で零になることが分かった。このことは、 $Z_0=0.77$ m とした場合に測深の時間によらず同一の水深が得られたことを示す。他方で、 $Z_0=0.77$ m 以外とした場合は得られる水深が測深の時間に応じて変化している。これは、例えば $Z_0=0.80$ m とした場合は Z_0 の潮位データの推定が過剰であり、高潮時ほど、現場海域の実際の潮位よりも大きな値が推定されたことを示す。したがって、現場海域の Z_0 としては、水深の内部誤差が

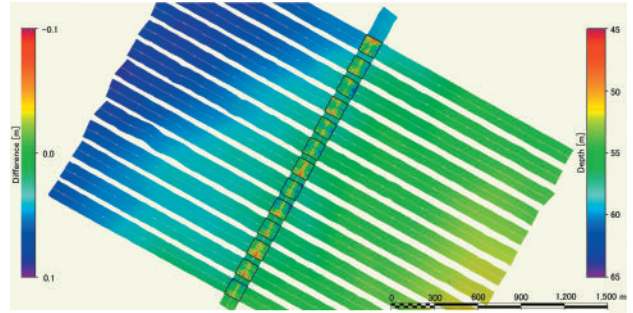


Fig. 11. Bathymetric data (swath angle ± 45 degrees only) reduced by tide level data at the survey area ($Z_0=0.77$) and its internal error (bathymetric difference of the main survey lines to the cross line).

図 11. 現場の潮位データ ($Z_0=0.77$) により潮高処理した海底地形データ (スワス角 ± 45 度のみ) とその内部誤差 (照査線に対する主測線の水深差分).

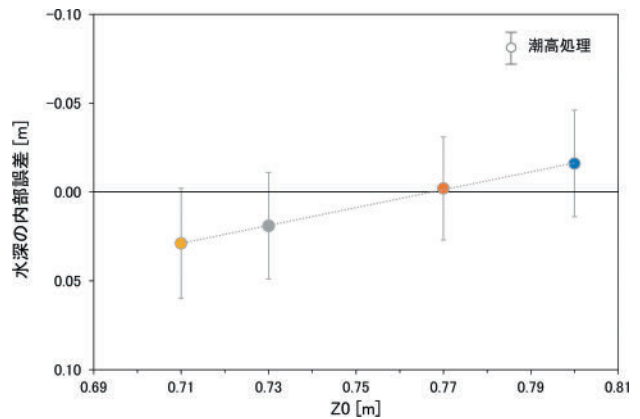


Fig. 12. Internal errors of bathymetry reduced by each tide level (bathymetric difference of the main survey lines to the cross line).

図 12. 各潮位データにより潮高処理した水深の内部誤差 (照査線に対する主測線の水深差分).

零に近い $Z_0=0.77$ m が妥当であると考えられる。

3 検証結果

前章で述べた処理によって得られた楕円体処理水深や GNSS 潮位の妥当性を評価するため、精度検証を行った。

3.1 楕円体処理水深の精度検証

3.1.1 潮高処理水深との比較検証

4月の潮高処理水深を基準とした、4月及び7

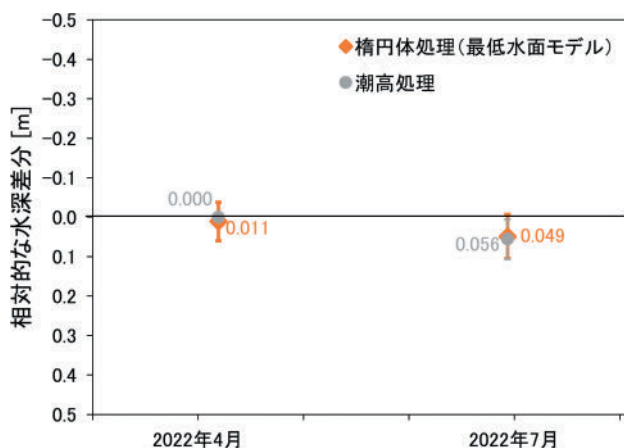


Fig. 13. Relative bathymetric differences based on the bathymetry taken in April and reduced by the tide level. Numerical labels indicate each median of relative bathymetric differences in ERS and tidal data processing, and error bars indicate its standard deviation.

図 13. 4月の潮高処理水深を基準とした相対的な水深差分。数値ラベルは橢円体処理及び潮高処理それぞれの相対的な水深差分の中央値を表し、誤差棒はその標準偏差を表す。

月の橢円体処理及び潮高処理それぞれの相対的な水深差分を Fig. 13 に示す。いずれの月においても、橢円体処理水深と潮高処理水深との差は水深精度の最も厳しい特級精度の基準（海上保安庁，2009；水深 55 m における誤差の限度は 0.48 m）よりも 1 桁以上小さく，4 月は橢円体処理水深の方が潮高処理水深よりも 0.011 m 深く，7 月は橢円体処理水深の方が潮高処理水深よりも 0.007 m 浅かった。4 月と 7 月を同処理で比較すると，潮高処理水深では 7 月の方が 4 月よりも 0.056 m 深く，橢円体処理水深では 7 月の方が 4 月よりも 0.038 m 深くなり，橢円体処理の方が水深差は小さかった。

3.1.2 照査線を用いた水深の内部誤差の検証

7 月の測深データを使用して橢円体処理と潮高処理それぞれの方法で得た水深について，水深の内部誤差を Table 3 に示す。橢円体処理については -0.008 m，潮高処理については -0.002 m の内部誤差となり，いずれも 0.01 m 未満と，特級精度の基準（0.48 m）よりも 1 桁以上小さかった。

Table 3. Internal errors of each bathymetry by ERS and tidal data processing (bathymetric difference of the main survey lines to the cross line).

表 3. 橢円体・潮高の各処理における水深の内部誤差（各照査線に対する主測線の水深誤差）。

データ処理方法	水深の内部誤差 [m]	標準偏差 [m]
橢円体処理(最低水面モデル)	-0.008	± 0.069
潮高処理	-0.002	± 0.029

標準偏差については，橢円体処理は ± 0.069 m，潮高処理は ± 0.029 m であり，橢円体処理の方がやや大きなばらつきが見られた。

3.2 GNSS 潮位の精度検証

GNSS 潮位（100 Hz 値）と，験潮所において取得した水位データから求めた潮位（5 分値；以下，験潮潮位という。）の経時変化を Fig. 14 に示す。Fig. 14 において，潮位が表示されていない箇所は，測量船の回頭中などの測深データを取得していなかった時である。験潮潮位が正しいと仮定した場合の GNSS 潮位の系統誤差は $0 - \pm 0.10$ m 程度で，験潮潮位とよく一致していた。4 月と 7 月を比較すると，7 月の方がよく一致していた。一方で，験潮潮位よりも GNSS 潮位の方が値の変動が大きく， $\pm 0.05 - 0.10$ m 程度の偶然誤差が見られた。

4 考察

潮高処理水深と橢円体処理水深の比較検証結果から，水深の誤差の限度と比較しても 1 桁以上小さい良好な水準で，妥当な橢円体処理水深が得られることが示された。また，潮高処理水深よりも橢円体処理水深の方が 4 月と 7 月の水深差が小さく，現場海域の GNSS 潮位を使用する橢円体処理水深の方がより安定した水深値を得られる可能性も示唆された。大久保・他（2022）で報告のあった第三管区海上保安本部の測量船「はましお」のマルチビーム測深機による東京湾での検証結果に続き，第七管区海上保安本部の測量船「はやしお」の異なるマルチビーム測深機による日本

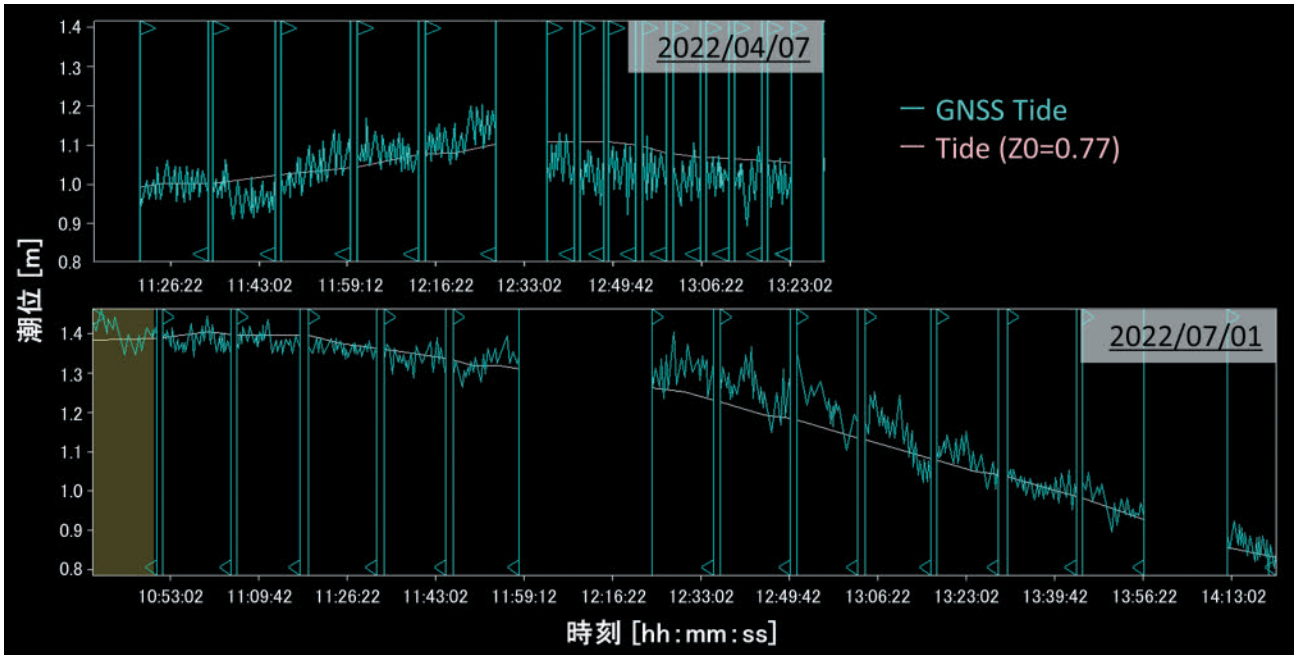


Fig. 14. GNSS tide by the survey vessel and tide level by the tide station. The upper and lower figures show time series for April and July, respectively.

図 14. 船上 GNSS 潮位と験潮潮位の比較. 上図と下図は、それぞれ 4 月と 7 月の時系列データを示す.

海（山口県西方）での結果においても、楕円体処理が有効に機能することが確かめられた。

照査線を用いた水深の内部誤差の検証結果から、楕円体処理水深は、平均的には、潮高処理水深と同等の再現性の高い水深が得られることが確認された。他方で、潮高処理水深に比べてばらつきがやや大きくなることが確認されたが、このばらつきは、験潮潮位が正しいと仮定した場合の GNSS 潮位の系統誤差とほぼ同等であることから、主に GNSS の鉛直方向の測位精度によるものであると考えられる。

GNSS 潮位は験潮潮位と少なくとも系統誤差 ± 0.10 m の範囲内でよく一致していた。特に 7 月の方が系統誤差・偶然誤差ともに小さかった理由としては、7 月は海況が良好であったことが挙げられる。海況が荒れると、波やうねりによる船体の動揺の影響で GNSS 測位精度が悪化するため、4 月は比較的差が大きくなったと考えられる。また、GNSS 潮位には $\pm 0.05 - 0.10$ m 程度の偶然誤差が見られた。これは、GNSS の鉛直方向の測位誤差や船体の動揺に起因するヒープ残差等によるものと考えられる。この偶然誤差は、CUBE 処理

のような統計的な水深データ処理等により軽減されるため、最終的に算出される水深の値には大きく影響しないと考えられる。以上のことから、楕円体処理水深を求める際に使用した GNSS 潮位は、十分妥当であったと言える。

潮高処理においては、測深海域における潮位の推定精度が大きな誤差要因となり得る。潮位は最低水面からの値であるため、現場潮位と験潮潮位の振幅が異なる場合、Fig. 10 の潮位データが示すように、平均的な潮位の時には現場潮位と験潮潮位のおよそ振幅差分 ($14:00$ 時点の $Z_0 = 0.80$ m と $Z_0 = 0.77$ m の差分: 0.036 m)、高潮時には振幅差のおよそ 2 倍 ($11:00$ 時点の $Z_0 = 0.80$ m と $Z_0 = 0.77$ m の差分: 0.055 m)、潮高改正量に差が生じる可能性がある。そのため、楕円体処理水深と潮高処理水深を比較検証する際は、留意する必要がある。

楕円体処理と潮高処理それぞれにおいて想定される誤差要因について、大久保・他 (2022) で報告されたものも含めて Table 4 に整理した。各処理における誤差要因は、測深に関するものと、最低水面モデル・潮汐に関するものに大きく分類さ

Table 4. Depth error factors caused by differences between ERS and tidal data processing.

表 4. 楕円体・潮高の各処理の違いにより生じる水深の誤差要因。

	楕円体処理	潮高処理
測深に関する誤差要因	<ul style="list-style-type: none"> ○ GNSS測位精度 (電子基準点までの距離、それらの配置による影響等) ○ 各機器のレバーアームオフセット高さの精度 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 喫水の読取り精度 ○ 積載量・船速の変化による喫水変化
最低水面モデル・潮汐に関する誤差要因	<ul style="list-style-type: none"> ○ 使用する基準面データ(平均水面高度Z0等)の精度 ○ 基準面データの空間補間の精度 (験潮所までの距離、験潮所の配置、複雑な海象による影響等) ○ ジオイド・モデルの精度 ○ 元期から平均水面の算出時までの観測基準面の地盤の上下変動 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 測深海域における潮位の推定精度 (験潮所と測深海域の潮位の違い: 潮高比、潮時差による影響等) ○ 平均水面算出時から測深時までの観測基準面の地盤の上下変動

れる。本研究の対象海域である日本海（山口県西方）は、平均水面高度や Z_0 等の空間変化、ジオイド傾斜、地盤の上下変動いずれの影響も小さいため、Table 4 で示した最低水面モデルに関する誤差が最小限に抑えられている。よって本研究では、実質的には楕円体処理の測深に関する誤差を検証していると言え、楕円体処理水深が妥当であるということは、測深データ処理手順が正しいことを示している。つまり、楕円体基準水深測量における測深データ処理手順については確立したと言える。楕円体基準水深測量の実用化に向けて次に鍵となってくるのは、楕円体基準水深測量で使用可能な品質水準の最低水面モデルを整備することである。

本研究の対象海域である日本海（山口県西方）では、平均水面高度や Z_0 等の基準面データを注意深く精査することで、水深の誤差の限度よりも1桁以上小さい良好な水準の楕円体処理水深を算出するのに十分な最低水面モデルを作成することができた。また、大久保・他（2022）の対象海域である東京湾は、地盤の上下変動による影響が小さい（観測基準面の元期から平均水面算出時（2015–2019年）までの地盤の上下変動量が0.03m程度）海域ではあるものの、基準面データの空間変化やジオイド傾斜が比較的大きい海域であるため、基準面データを注意深く精査することに加えて、東京湾を囲うように配置された常設験潮

所による信頼性の高い空間補間を基準面データに適用し、同様に配置された陸上基準点により作成されたジオイド・モデルを使用することで、水深誤差の限度以内の良好な水準の楕円体処理水深を算出するのに十分な最低水面モデルを作成することができた。このように、東京湾や日本海（山口県西方）では、楕円体基準水深測量で使用可能な品質水準の最低水面モデルが作成可能であることが示された。つまり、最低水面モデルの基本的な作成方法が確立したと言える。

今後の課題は、特殊な海域においても、品質の確保された最低水面モデルが作成可能であることを示すことである。特殊な海域としては例えば、外洋域等の常設験潮所に囲まれていない海域のうち平均水面高度やジオイドの空間変化の大きい海域、地盤の上下変動の大きい海域、狭水道のような潮位の空間変化の大きい海域が挙げられる。

特殊な海域において、品質の確保された最低水面モデルを作成可能とするための道筋を、以下に示す。まず、ある特性を有する海域で、これまでに確立した基本的な作成方法を適用することにより最低水面モデルを算出し、楕円体基準水深測量で実用可能な品質水準を満たしているか評価する。ここで算出された最低水面モデルが品質水準を満たしていた場合、このような特性を有する海域においては、基本的な作成方法が適用可能であると言える。他方で、もし品質水準を満たさなかった場合、海域特性に応じた各誤差要因の影響を考慮して作成方法を改善することにより、このような特性を有する海域での最低水面モデルの作成方法の確立を目指す。

特殊な海域の最低水面モデル作成における具体的な改善手段として現時点で想定されるものを、以下に挙げる。外洋域等で常設験潮所に囲まれておらず平均水面高度の空間変化の大きい海域では、平均水面高度の空間補間方法の改良に加えて、補助データ（GNSS 波浪計、AOV や測量船の GNSS 測位、衛星海面高度計による海面力学高度、潮汐モデル等）の活用検討が有効であると考えられる。外洋域等で常設験潮所に囲まれてお

らずジオイド傾斜の大きい海域では、日本のジオイド 2011 (Ver. 2.1) でカバーされていない海域における世界モデルの使用検討の他に、将来の日本沿岸域がより広くカバーされた高精度ジオイド・モデルの使用検討が効果的であると考えられる。地盤の上下変動の大きい海域では、セミ・ダイナミック補正により観測基準面の元期から平均水面算出時までの地盤の上下変動量を補正することで改善が期待される。狭水道のような潮位の空間変化の大きい海域では、平均水面高度や Z_0 等の空間補間方法の改良が有効であると考えられる。

以上のようなアプローチを基本として行うことで、特殊な海域においても品質の確保された最低水面モデルが作成可能となり、結果として、日本沿岸域の任意の海域における楕円体基準水深測量の実用化が達成可能となる。

5 結論

本研究では、大久保・他 (2022) に続き、楕円体基準水深測量の手順確立を目指し、楕円体処理により求めた水深の妥当性について検証した。今回は、日本海の山口県西方の海域を異なる海況で 2 回測量し、特級水域の精度を優に満たす楕円体処理水深が安定的に得られた。このことから、楕円体処理の基本的な測深データ処理手順が確立されたといえる。本手順の確立により、技術的には最低水面モデルさえあれば、楕円体処理により水深が導出可能となった。日本沿岸域の任意の海域における楕円体基準水深測量の実用化に向けて、東京湾や日本海（山口県西方）と同様の海域のみならず、外洋域等の常設験潮所に囲まれていない海域のうち平均水面高度やジオイドの空間変化の大きい海域等においても最低水面モデルを作成可能とすることが今後の課題である。

謝 辞

本稿の作成にあたり有益なご助言をいただいた査読者及び編集者の方に感謝の意を示す。

文 献

- 海岸昇降検知センター (2017) 潮位年報 平成 28 年.
- 海岸昇降検知センター (2019) 潮位年報 平成 29 年.
- 海岸昇降検知センター (2020a) 潮位年報 平成 30 年.
- 海岸昇降検知センター (2020b) 潮位年報 平成 31 年 (令和元年).
- 海岸昇降検知センター (2022) 潮位年報 令和 2 年.
- 海上保安庁 (1992) 日本沿岸潮汐調和定数表, 書誌 742.
- 海上保安庁 (2009) 海上保安庁告示 (平成 14 年 4 月 1 日第 102 号, 平成 21 年 3 月 31 日第 110 号により一部改正), 海上保安庁, 東京.
- 海上保安庁 (2022) 平均水面, 最高水面及び最低水面一覧表, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/TIDE/datum/index.html>, Accessed 20 July 2022.
- 国土地理院, 基準点成果等閲覧サービス, <https://sokuseikagis1.gsi.go.jp/top.html>, Accessed 20 July 2022.
- 国土地理院, Web 版 SemiDynaEXE, <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html>, Accessed 20 July 2022.
- 国土地理院, 測量計算サイト (ジオイド高計算), https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/geoid/calcgh/calc_f.html, Accessed 20 July 2022.
- 国土地理院, 電子基準点データ提供サービス, <https://terras.gsi.go.jp/>, Accessed 20 July 2022.
- 小坂橋 勝・小島秀基・根本 悟・宮原伐折羅・平岡喜文・矢萩智裕 (2018) ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver. 2) の構築, 国土地理院時報, 130, 1-7.
- 日本水路協会 (2001) K-GPS を用いた水路測量の効率化の研究, 日本水路協会, 東京.
- 日本水路協会 (2002) K-GPS を用いた水路測量

- の効率化の研究その2, 日本水路協会, 東京.
日本水路協会 (2003) K-GPS を用いた水路測量
の効率化の研究その3, 日本水路協会, 東京.
小田 卷 実・中村啓美 (2003) 新しい統一水深
データベースの考え方と「ダイナミック」電
子海図表示の試み, 海洋情報部技報, 21,
15.
大久保匡騎・住吉昌直・伊能康平・小林研太・土
屋主税・野澤理香・栗田洋和・小川 遥・長
野勝行・山野寛之・吉澤 信・熊谷卓也・安
原 徹 (2022) 日本沿岸域における楕円体高
基準水深測量の標準手順確立に向けて: 測深
データ処理の試行と水深データの検証, 海洋
情報部研究報告, 60, 16-28.
住吉昌直, 松本良浩, 吉澤 信, 安原 徹 (2019)
マルチビーム測深における高精度後処理測
位・動揺データの有用性, 海洋情報部研究報
告, 62, 62-74.
吉澤 信, 松本良浩, 住吉昌直, 南 宏樹 (2018)
マルチビーム測深機デュアルヘッドシステム
の導入について, 海洋情報部研究報告, 56,
9-23.

要 旨

近年, 新たな水深測量の方法として, 測深中の
験潮が原則として不要となる楕円体基準水深測量
が提唱されている. 本稿では, 東京湾で試行を
行った大久保・他 (2022) に続き, 楕円体基準水
深測量の処理手順の確立を目的として, 日本海
(山口県西方) において, 最低水面モデルの作成
や水深の妥当性の検証を行った. 検証の結果, 本
稿で示した手順により得られた水深は潮高改正を
要する従来の処理で得られた水深と比較しても十
分妥当であり, 楕円体処理の基本的な測深デー
タ処理手順が確立された. このことから, 技術的
には, 最低水面モデルがあれば, 楕円体処理により
水深を導出可能になったといえる.