

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 (3) : 験潮との差異の要因分析と最低水面モデル構築への示唆[†]

林王弘道^{*1}, 佐藤勝彦^{*2}, 瀬尾徳常^{*2}, 南部正裕^{*2}

Developing the standard operating procedures of ellipsoidally referenced surveys at coastal waters in Japan (3):
Analysis of the difference from tide gauges and implication for the construction of a vertical datum model[†]

Hiromichi RINNO^{*1}, Katsuhiko SATO^{*2}, Noritsune SEO^{*2}, and Masahiro NAMBU^{*2}

Abstract

In this paper, following Okubo et al. (2022) and Shiozawa et al. (2023), we proceeded with verification and analysis toward the practical application of ellipsoidally referenced surveys. We analyzed the factors behind the actual differences in the results between ellipsoidally referenced surveys and conventional surveys, then considered the necessity for countermeasures. The results suggested that the ellipsoidally referenced surveys can reach the required accuracy along the coast of Japan. For further improvements of the accuracy of vertical datum models, it will be necessary to take into account the characteristics of each region. It is also preferable to use tide records directly referenced to the Earth's ellipsoid through GNSS measurements, rather than through Tokyo Peil.

1 はじめに

2000 年代以降、陸上では GNSS 測位による測量や施工管理が普及し既に主流となっているが、海域においては、水平方向の GNSS 測位は十分活用されているものの、鉛直方向についてはまだ十分な活用はされていない。この技術的な要因は、船舶が海という液体に浮かんで常に動揺してことに加え、補正するための電子基準点が陸域にあるため適切な配置を得られない場合があること等が影響していたと思われる。

しかし近年、船舶での GNSS 測位に関するハードウェアとソフトウェアも成熟し、海域での鉛直方向についても十分な精度が得られるように

なった。また 2018 年の準天頂衛星システム「みちびき」の実用化も追い風になっている。

海面は、潮汐や波浪等により常に動いており、測量や作業を行う船舶はその変動する海面に浮かんでいるため、高さや深さを正確に求めるためにはこの変動を除去する必要がある。この高さ方向の変動を除去し、測定値を適切な基準面からの高さ・深さに改正することを潮高改正という。従来は、験潮所において海面と基準面との高さ関係を求めており、これを験潮所による潮高改正と呼ぶ。従来の験潮所による潮高改正の場合、観測した潮位を海図の基準面に関連付ける処理が必要なため、一部の常設験潮所を除きリアルタイムに潮

[†] Received September 5, 2024; Accepted November 13, 2024

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

* 2 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

高改正を行うことができなかったが、船舶のGNSS測位で求めた鉛直位置（以下、GNSS Tideという）による潮高改正はほぼリアルタイムの実施が可能となる。測量や作業に要する時間は、やり直しを含め、コストに直結するため、経済的にもリアルタイムの潮高改正の需要は非常に高い。そのため国土交通省港湾局は令和4年度から港湾工事における衛星測位の活用を検討しており、海洋情報部も積極的に協力し実用化を進めている。

本稿では、令和5年度に実施した試行について紹介するとともに、大久保・他（2022）と塩澤・他（2023）において提案されたGNSS Tideによる潮高改正を行う上で必要となる地球楕円体基準の鉛直基準面「最低水面モデル」の作成方法及び楕円体基準水深測量と従来方法との結果の差異について考察し、対策等、実用に向けた注意点の洗い出しを行う。

1.1 令和5年度の試行

これまでの楕円体基準水深測量の研究（大久保・他，2022；塩澤・他，2023）により、得られる水深の精度が確認され、データの処理方法についてある程度確立されたが、検証海域が限られていたこと、これまでの最低水面モデルの作成に地殻変動が加味されておらず、地殻変動が大きい地域では改良の余地があること、また実際に測量と資料整理にあたる職員の慣熟が充分とは言えない状況であったことから、令和5年度に全ての管区において、楕円体基準水深測量の試行を行った。GNSS記録が残っている過去の水路測量について、楕円体基準で再解析し、潮高改正量や得られた水深について従来方法による成果と比較し検証を行った。調査海域はFig. 1のとおり。

2 試行の方法

2.1 最低水面モデルの作成

基準面は従来、海上保安庁が場所毎に定め「平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」（以下、一覧表という）として公示しているが、楕円体基準水深測量では地球楕円体基準の鉛直基準面「最

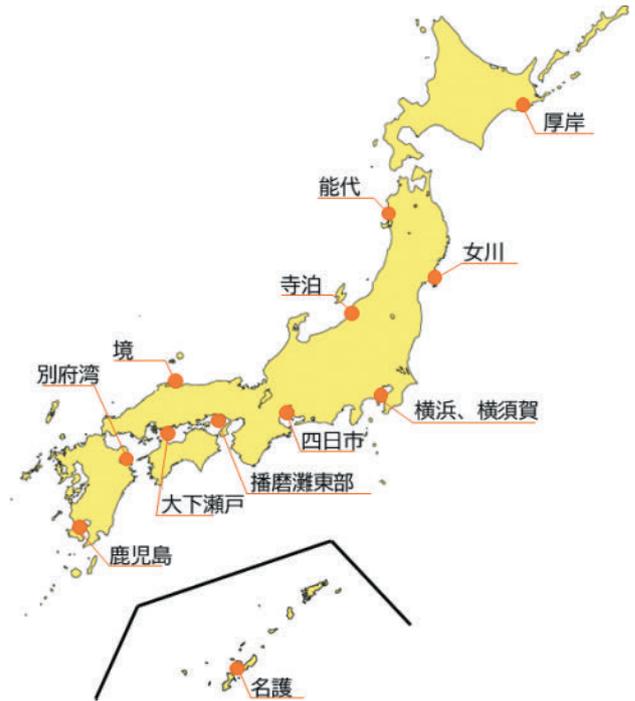


Fig. 1. Sea areas tested in 2023.

図1. 令和5年度に検証を実施した海域。

低水面モデル」が必要となる。

令和5年度の試行に使用した最低水面モデルはそれぞれの測量区域毎に沿岸調査課で作成した。

平均水面は2016～2020年で作成した（女川のみ2017～2020年）。海岸昇降検知センターに掲載されている各験潮所の年平均潮位と観測基準面の標高（東京湾平均海面（T.P.）からの高さ）を活用した。測地成果の2011年から2016～2020年までの鉛直方向の変動量を、近隣の電子基準点のF5解（村松・他，2021）の年平均値の推移から求め、地殻変動の補正量とした。これらによりその験潮所におけるT.P.基準の5ヶ年平均水面を算出した。

T.P.は一部の離島を除き「日本のジオイド」と同一の重力ポテンシャルにあると見なせるため、ジオイド高（ジオイドの地球楕円体からの高さ）計算（国土地理院）によって、T.P.からの高さは地球楕円体と高さの関連付けを行うことができる。こうしてその験潮所における平均水面の地球楕円体からの高さを決定した。

験潮所1点での平均水面を面的に展開するにあたっては、海面と「日本のジオイド」は局所的に

平行であるとの仮定の下、「日本のジオイド 2011 (Ver.2.1)」(国土地理院)を使用した。

最低水面は、平均水面から Z_0 だけ下げて作成した。 Z_0 は一覧表の値を使用した。測量区域内で Z_0 が1つしか定義されていない海域ではその値をそのまま使用した。一覧表において Z_0 区分図により面的に定義されている播磨灘東部については、 Z_0 区分図どおりの離散的な Z_0 と、それを滑らかにした値の両方で最低水面モデルを作成した。

使用する常設験潮所に電子基準点が設置されている四管区の鬼崎、九管区の柏崎、十一管区的那覇については、その電子基準点のデータを活用し、直接験潮記録を楕円体と関連付けた。

2.2 使用機器と処理

使用した験潮所、測量船及び搭載機器等については Table 1 のとおりである。測深データは HYPACK2019, 2020 または 2021 を使用し収録を行った。

後処理キネマティック処理の基準局の座標については国土地理院が公開するセミダイナミック補正プログラムを使用し今期座標への補正を行った。

水深及び潮高改正のデータ処理には CARIS HIPS and SIPS 10.4 または 11.4 を使用した。なお、処理のフローについては Fig. 2 のとおり。

通常の水路測量であるため、照査線での比較を行った。照査線での比較とは、取得した水深の位置や深さを検査するため、同一測量中に同じ地点を、基本の測深線とそれに直交する照査線で測深し、それぞれで得た水深を比較(クロスチェック)するものである。測深線や照査線は測量を行う船舶の経路を指す。

3 結果

3.1 照査線での比較

照査線での比較の結果は Table 2 のとおり。

楕円体基準水深測量で得た水深についての照査線での差の平均や差の標準偏差は、従来の験潮所

Table 1. Equipment used in the 2023 test, distinguished by the sea area used.

表 1. 令和 5 年度検証時の海域毎の使用機器。

管区	海域	従来の潮高改正に 使用した験潮所	モデル作成に 使用した験潮所	測量船	測深機	測位・動揺計
一管区	厚岸港	厚岸漁港(北海道開発局)	厚岸漁港(北海道開発局)	用船	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
二管区	女川湾	女川港 臨時	鮎川(気象庁)	用船	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
二管区	能代港	能代港 臨時	能代港(東北地方整備局)	用船	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
三管区	京浜港横浜区第5区及 び横須賀港第4区	横須賀(海上保安庁)	横浜(海上保安庁) 横須賀(海上保安庁)	はましお	SeaBat T50-R DH	POS/MV Wave Master
四管区	伊勢湾北部	四日市港(四日市港管理組合)	名古屋(気象庁) 鬼崎(国土地理院) 鳥羽(気象庁)	いせしお	R2Sonic2024 DH	POS/MV Wave Master
五管区	播磨灘東部	東二見(兵庫県) 高砂(兵庫県)	東二見(兵庫県) 高砂(兵庫県)	うずしお	R2Sonic2024 DH	POS/MV Wave Master
六管区	大下瀬戸	木江(広島県)	呉(海上保安庁) 松山(気象庁) 福山港(広島県) 観音寺港(香川県)	くるしま	R2Sonic2024 DH	POS/MV Wave Master
七管区	別府湾	大分(海上保安庁)	大分(海上保安庁)	はやしお	R2Sonic2024 DH	POS/MV Wave Master
八管区	境港第3区	大根島 臨時	境港(気象庁)	用船	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
九管区	寺泊港	寺泊 臨時	柏崎(国土地理院) 新潟西港(北陸地方整備局)	用船	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
十管区	鹿児島港谷山区谷山2 区	鹿児島(気象庁)	鹿児島(気象庁)	いそしお搭載艇	R2Sonic2022	POS/MV Wave Master
十一管区	名護漁港	名護漁港 臨時 副標読み取り	那覇(気象庁)	おきしお	R2Sonic2024 DH	POS/MV Wave Master

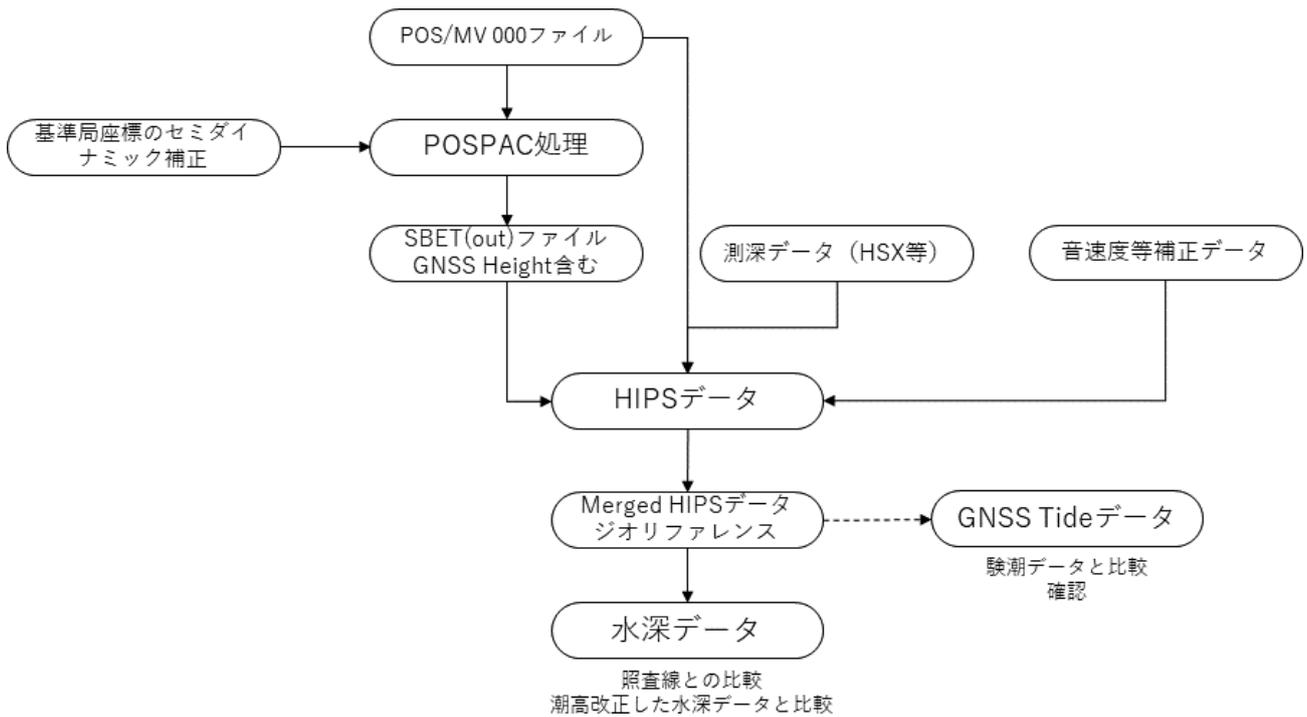


Fig. 2. Bathymetric data processing workflow.
 図 2. 水深データの処理フロー.

Table 2. Mean and standard deviation of the bathymetric differences between the main survey line and the cross line.
 表 2. 照査線での差の平均と差の標準偏差

管区	海域	験潮による潮高改正		楕円体基準	
		差の平均	差の標準偏差	差の平均	差の標準偏差
一管区	厚岸港	0.05m	0.04m	-0.01m	0.04m
二管区	女川湾	0.03m	0.14m	0.02m	0.12m
二管区	能代港	0.00m	0.04m	0.00m	0.04m
三管区	京浜港横浜区第5区及び横須賀港第4区	0.04m	0.06m	0.04m	0.06m
四管区	伊勢湾北部	0.02m	0.04m	0.04m	0.05m
五管区	播磨灘東部/高砂	0.00m	0.04m	0.00m	0.04m
	播磨灘東部/二見	0.04m	0.13m		
六管区	大下瀬戸	0.04m	0.12m	0.04m	0.12m
七管区	別府湾	0.00m	0.01m	0.00m	0.02m
八管区	堺港第3区	0.02m	0.03m	-0.02m	0.04m
九管区	寺泊港	-0.05m	0.03m	0.02m	0.10m
十管区	鹿児島港谷山区谷山2区	0.00m	0.09m	-0.04m	0.16m
十一管区	名護漁港	-0.03m	0.15m	0.08m	0.05m

による潮高改正で得た水深のそれと比べ、大きな差は無かった。

3.2 験潮所の潮位と GNSS Tide の比較

験潮所の潮位と GNSS Tide は、いずれの海域でもほぼ追従しており、GNSS 測位は船舶の位置の潮汐による上下動を適切に捉えていた。例として横須賀の時系列グラフを Fig. 3 に示す。GNSS

Tide については周期数分、振幅 10 cm 前後の振動あるいはバラつきが見られた。

3.3 潮高改正量

潮高改正量について、水路測量に使用した験潮所の値と、令和 5 年度の試行で使用した GNSS Tide との比較結果は Table 3 のとおり。「差の平均」の絶対値が大きかった事例については、考えられるその要因についても記載した。表中の差の平均は、験潮所の潮位に対する GNSS Tide の高さである。値が負のとき、GNSS Tide が低いことを示す。それぞれの最低水面を基準にした値について比較している。

4 考察

4.1 令和 5 年度検証について

4.1.1 照査線

楕円体基準水深測量で得た水深についての照査線での差の平均や差の標準偏差は、従来の験潮所による潮高改正で得た水深のそれと比べ、大きな差は無く、水路測量で求められる最も厳しい特級

GNSS Tideと験潮データの比較（2022年5月12日）

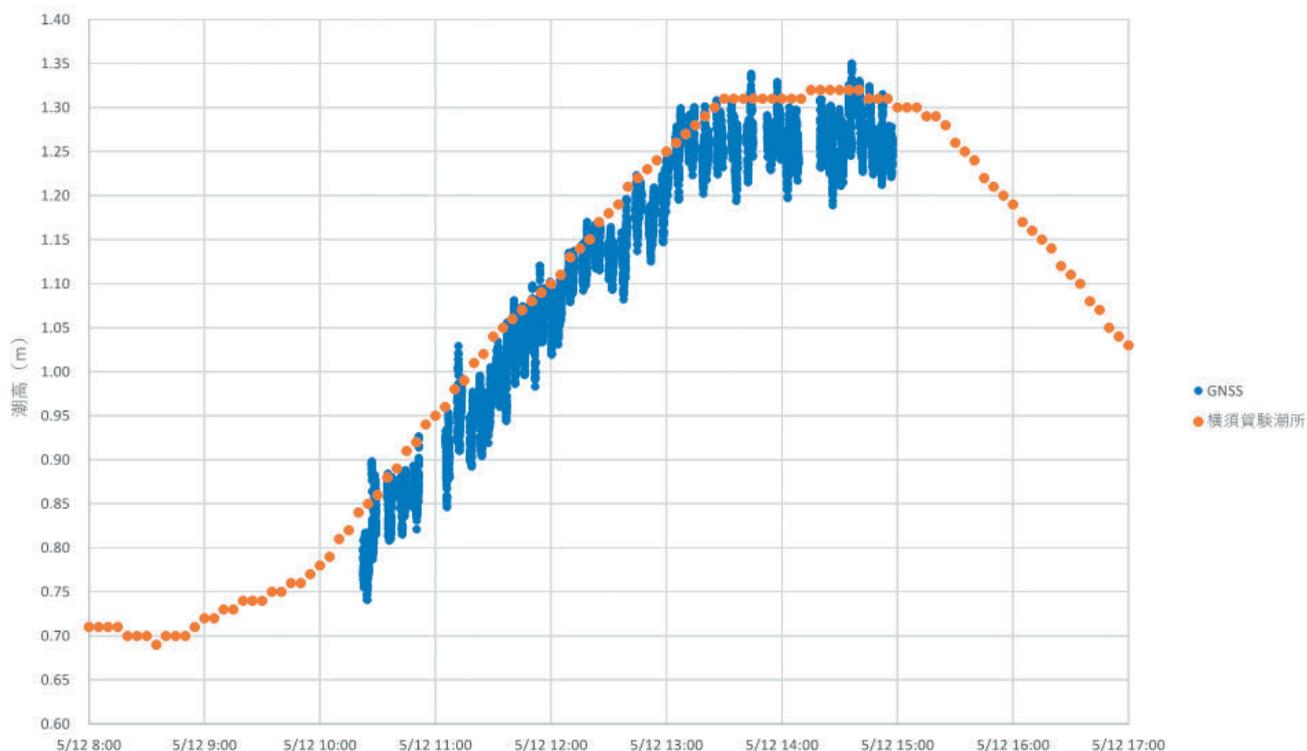


Fig. 3. Tidal height measured at the tide gauge and vessel's height observed by GNSS (GNSS Tide) at Yokosuka.
 図3. 横須賀における験潮所で観測された潮位とGNSS測位で得られた鉛直位置 (GNSS Tide).

Table 3. Mean and standard deviation of the differences between GNSS Tide and measured tide at tide gauge.
 表3. GNSSで得られた鉛直位置と験潮所で観測された潮位との差の平均と差の標準偏差

管区	海域	GNSS Tideと験潮との 潮高改正量の差		備考	差が大きかった考えられる要因
		差の平均*	差の標準偏差		
一管区	厚岸港	-0.04m	0.06m		
二管区	女川湾	0.21m	0.03m		地殻変動の補正が上手くいっていない可能性
二管区	能代港	0.05m	0.02m		
三管区	京浜港横浜区第5区及び 横須賀港第4区	-0.05m	0.04m		
四管区	伊勢湾北部	-0.13m	0.04m		モデル作成に四日市港験潮所を使用していない
五管区	播磨灘東部	0.10m	0.07m	Z0区分=0.80m	
		0.06m	0.06m	Z0シームレス	
		0.01m	0.04m	Z0区分=0.90m	
		-0.09m	0.03m	Z0シームレス	
六管区	大下瀬戸	-0.14m	0.04m		モデル作成に木江験潮所を使用していない
七管区	別府湾	-0.14m	0.03m		大分験潮所の平均水面の上昇
八管区	境港第3区	0.18m	0.03m		境験潮所と測量海域との差か
九管区	寺泊港	0.15m	0.04m		地殻変動の補正が上手くいっていない可能性
十管区	鹿児島港谷山区谷山2区	0.22m	0.03m		験潮所の標高に疑問
十一管区	名護漁港	-0.07m	0.07m		

*験潮に対するGNSS Tideの高さ。値が負のとき、GNSS Tideが低い。

での高さの不確かさの限度を下回っており、GNSS から得られる船舶の鉛直位置の変化は海面の鉛直変化を的確に反映していると思われる (Table 2).

楕円体基準水深測量の二管区女川湾, 六管区大下瀬戸, 十管区鹿児島港にて 0.10 m を超える差の標準偏差が見られた. 照査線での比較では海底地形に急な勾配がある場合や異物がある場合に差の標準偏差が大きくなり易い. これは水深の処理に起因する傾向であり, 従来方法でも同様に大きな差の標準偏差が算出されている.

十一管区名護漁港では, 従来方法で比較的大きな差の標準偏差が見られたが, この測量時の験潮は目視による副標読み取りであり, 誤差が大きかったものと思われる. 楕円体基準で差がやや大きかったが, 離島であり周辺の電子基準点がまばらであることが影響している可能性がある.

九管区寺泊港では, 楕円体基準での差の標準偏差が, 従来方法に比べやや大きかった. この原因は不明である.

4.1.2 GNSS Tide

GNSS Tide に見られる周期数分, 振幅 10 cm 前後の振動あるいはばらつき (Fig. 4) は, この横須賀に限らず, 他の海域や塩澤・他 (2023) での比較でも見られたものである. 陸上で行われた GNSS 測量でも多少見られる振動やばらつきに, 海上の船体の上下動が加わったものと考えられる. 周期が短いと言っても 1 分を超えるような上下動は船体の動揺検出器では対応されない. 一方, 常設験潮所の潮位は, 当然 GNSS 測量の誤差は入らず, 海面の周期数分程度の振動は導水管によって軽減されている.

一管区厚岸港については, 大きな屋根のついた施設付近を測深した際に, GNSS 衛星の受信状況が悪く精度不足となる事態が起きた. そうした大きな構造物付近の作業の場合, 作業時の GNSS 衛星の配置に配慮する必要がある.

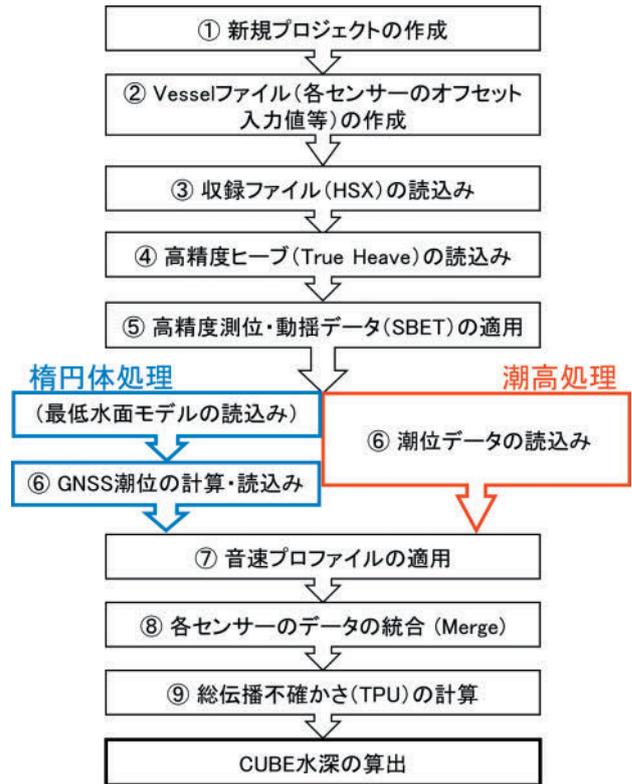


Fig. 4. Data processing workflows for bathymetry data processing using the ellipsoidally referenced surveys and conventional surveys (adapted from Shiozawa et al., 2023).

図 4. 楕円体基準水深測量と従来の水深測量のデータ処理フロー. 塩澤・他 (2023) より再掲.

4.1.3 潮高改正量

潮高改正量について (Table 3), 差の標準偏差は概ね良好であったが, 差の平均の絶対値が若干大きい海域があった. 原因は主に次に述べる一覧表の最低水面と最低水面モデルとの差異によるものと考えられる.

GNSS Tide は, 新しい年代の平均水面で作成した最低水面を基準としているため, 地盤の変化が無ければ, 海面上昇により従来の験潮所の潮位に比べ低くなる (表で負の値). 一管区厚岸港, 三管区横須賀港, 四管区伊勢湾北部, 七管区別府湾, 十一管区名護漁港については, 一覧表記載の最低水面の採用年月も古く (Table 4), 平均水面の変動の方向と整合が取れている.

二管区能代港については, 海面上昇以上に地盤が隆起しており, 観測基準面上の平均水面が下がっており, Table 3 で差の平均が正の値になっ

Table 4. Month Chart Datum Level was adopted, variation in mean sea level, and month of benchmark revision.

表 4. 最低水面の採用年月と平均水面の変動, 取付水準点の改測年月

管区	海域	最低水面 採用年月 (一覧表)	採用時から 2016-2020の 平均水面の変動 (観測基準面上)	常設験潮所の 取付水準点	取付水準点の 改測(改算)年月 (測地成果2011)	近隣の 電子基準点
一管区	厚岸港	H7.6	0.09m	交8354	H23.5	950125
二管区	女川湾	R3.10	0.00m	附1	H29.1	960550
二管区	能代港	S62.9	-0.07m	交1	H23.12	950184
三管区	京浜港横浜区第5区 及び横須賀港第4区	H19.4	0.06m	10840	H23.7	93067
四管区	伊勢湾北部	H6.12	-0.04m	不明		950309
五管区	播磨灘東部	H25.11	0.03m	435	H24.3	950354
		H30.12	0.02m	430	H19.11	950354
六管区	大下瀬戸	R4.3	0.00m	なし		
七管区	別府湾	H5.10	0.09m	5369	H22.4	950473
八管区	境港第3区	H27.11		交1120	不明	960656
九管区	寺泊港	H27.9	-0.03m	4447	不明	950237
十管区	鹿児島港 谷山区谷山2区	H26.5	0.06m	2469	H18.10	960721
十一管区	名護漁港	S55.12	0.16m	交9631	H5.11	02P212 那覇P点

ていることと整合が取れている。

二管区女川湾について、差の平均が 0.21 m と大きな値であったが、東北地方太平洋沖地震後の余効変動が大きい地域であり、標高の取り扱いや地殻変動の補正が上手くいかなかったと考えられる。後日、幾つか考えられる補正を行ったが差を十分埋めることはできなかった。

四管区伊勢湾北部については、従来の潮高改正で基準としている一覧表の値は四日市港験潮所の平成 6 年時の観測値を根拠としているが、最低水面モデルは名古屋験潮所と鬼崎験潮場の 2016 ~ 2020 年の観測値を元に作成したため、その違いが影響したと考えられる。

六管区大下瀬戸については、当初、周辺 4ヶ所の常設験潮所(呉, 松山, 福山港, 観音寺港)の資料を用いて最低水面モデルを作成したところ、差の平均で -0.14 m とやや大きな差があった。後日、木江験潮所とその地での GNSS 測量結果を使用して最低水面モデルを作成し直したところ、差の平均は -0.02 m, 差の標準偏差は 0.05 m に改善した。

八管区境港第 3 区については、測量の区域は中海の中で潮高改正もその付近に設置した臨時験潮所を使用したのに対し、最低水面モデルは中海と日本海とつなぐ狭水道の日本海側に位置する境港験潮所を元に作成したため、十分に中海を再現できていなかった可能性が高い。中海における潮汐観測と GNSS 測量の組み合わせは限られており、十分な検証ができなかった。

十管区鹿児島港については、最低水面モデル作成に使用した鹿児島験潮所の標高について、海岸昇降検知センター(2019)では「観測年月 H24.2 観測基準面の標高 -1.946 m」、海岸昇降検知センター(2020)では「観測年月 R2.9 観測基準面の標高 -2.018 m」と大きく変わっており、何らかの誤りが入っている可能性が考えられる。また、測量区域と鹿児島験潮所の位置が離れている影響も考えられる。測量区域と験潮所の位置の影響については 4.3 節で考察する。

本検証用の最低水面モデル作成にあたって、F5 解による年代の補正は測地成果の年である 2011 年からの変動量を求めて使用したが、その

常設験潮所の取付水準点の成果の改測年月や、水準測量の実施年月も考慮するべきであった。成果の改測年月が不明な水準点も存在しており、十分適切な補正だったとは言い切れない。各海域の最低水面採用時の平均水面から最低水面モデル作成に使用した平均水面までの変動と、各験潮所の取付水準点と改測年月を Table 4 にまとめた。

4.1.4 令和5年度検証の成果

令和5年度には様々な海域について試行し検証を行ったが、いずれの海域でも GNSS 測位によって適切な潮高改正が可能であった。一部の海域で潮高改正量について従来方法とやや大きな差異が見られたが、主に最低水面モデルの作成方法に起因するものであり、対応可能な差異である。これにより日本周辺で適切に GNSS 信号を受信できる環境であれば、十分、楕円体基準水深測量が導入可能であると目される。

4.2 従来水深測量と楕円体基準水深測量との差異

従来験潮所による潮高改正による水深測量と楕円体基準水深測量との違いは塩澤・他 (2023) で提示されたフロー図 (Fig. 4) のとおり、潮高改正の違いだけである。測深値は共通であるため、検証にあたっては、験潮所の潮位と GNSS Tide について注目すれば良い。

差異の要因は、塩澤・他 (2023) にて「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」(Table 5) としてまとめられている。

「測深に関する誤差要因」として書かれている「各機器のレバーアームオフセットの高さの精度」とは、具体的には測深器と GNSS アンテナの高さ関係である。これはそれぞれの船舶や機器の設置状況に依存するため、船舶に取り付ける際または観測前後に適切に高さ関係を確認し、値を管理する必要がある。

一方、従来手法で影響を与えていた「喫水の読取り精度」「積載量・船速の変化による喫水変化」については、楕円体基準水深測量においては考慮

Table 5. Depth difference factors between bathymetry for the ellipsoidally referenced surveys and conventional surveys (adapted from Shiozawa et al., 2023).

表 5. 楕円体基準水深測量と従来の水深測量で得られる水深の誤差の要因。塩澤・他 (2023) より再掲。

	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、Z_0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

する必要が無くなる。

「最低水面モデル・潮汐に関する誤差要因」として書かれた内容を整理すると、①測深位置の海面と験潮所の海面との違い (相対的)、②一覧表に書かれた最低水面と最低水面モデルとの違い (絶対的) にまとめられる。これらについて考察する。

4.3 測深位置の海面と験潮所の海面の違い

4.3.1 従来最低水面

最低水面モデルとの比較のため、まず従来最低水面について簡単に解説する。

水路測量では一覧表に記載された最低水面を使用する。一覧表では地名または港名毎に最低水面の高さが基本水準標等下の高さで決められている。つまりその港内は1つの値である (Fig. 5)。

明示こそされていないが、その1点の値を水平に延長して使っている。この水平とは、潮汐や波浪を打ち消した平均的な海面と見なせる。現実の海面は潮汐や波浪により一瞬たりも停止していないため、平均的な海面を定義することは難しいが、定常的な流れが存在しない海域では局所的には重力の等ポテンシャル面と平行と見なすのが適

地名 又は 港名	基本水準標等		最低水面							最高水面 平均 水面 上 m	
	所	在	緯度 N	経度 E	観測 年	観測 年	基本水準 標高下 m	平均 水面下 (20) m	IP下 m		楕円 体高 m
明石	明石観測所そばにある標(金属標)頂	34-39	135-0	平30-11		3.15	0.70			36.42	0.70
	国土地理院測(44号)頂	34-39	134-59	昭54-08		3.74	0.70	0.47			0.70
淡路島											
岩屋	高津野東岸(100mの陸上)にある標(金属標)頂	34-35-28.4	135-1-0.0	平18-12	平31-03	2.17	0.70			36.34	0.70
野島江崎		34-36	134-59				0.70				0.70
淡路島											
室津		34-33	134-52				0.80				0.80
江井	観測所東方にある標(金属標)頂	34-27-58.2	134-49-41.8	昭04-12		2.36	0.80			36.44	0.80
越志	港内にある標(金属標)頂	34-24-53	134-46-48	昭03-10		1.90	0.80			36.35	0.80
湊		34-20	134-44				0.90				0.90
引田		34-14	134-24				1.00				1.00
小豆島											
坂平	荒島北岸にある標(十字)	34-26	134-20	昭44-04		2.80	1.00			1.00	1.00
大郡		34-33	134-17				1.00				1.00
家島		34-41	134-32				0.90				0.90
真摺											
二見	第二見観測所付近にある標(金属標)頂	34-41	134-53	平25-11	昭04-07	2.09	0.80			36.15	0.80
別府		34-43	134-51	昭45-11			0.80				0.80
高砂	高津野観測所そばにある標頂	34-44	134-48	平30-12	昭02-07	4.07	0.90			36.08	0.90
	国土地理院測(43号)頂	34-46	134-50	平07-04		7.25	0.90	0.48			0.90

Fig. 5. List of Mean Sea Level, High Water Datum Level and Chart Datum Level (excerpt from the Japan Coast Guard website).

図 5. 平均水面、最高水面及び最低水面一覧表（海上保安庁 Web サイトから抜粋）。

当であろう。つまり、直接水準測量で同じ高さとなる面、国土地理院の「日本のジオイド」と平行と考えられる。

従来の水路測量において潮高改正は、その港内のある点で潮汐観測を行い、その値を使用している。ここでも港内は一律に扱っている。

一覧表には約 900 の地名または港名が記載されており、ピンポイントで同一の地名または港名が無い場合は、付近の値を使用している。これは自然科学的な要請というより、海図や水路測量の需要という社会的な要請や歴史的な経緯による面が強い。しかし、無視できないような差が確認された場合は、新たに地名または港名を追加して別途最低水面を定めるようにしており、70 年以上運用されたことにより、一部の離島を除き最低水面や潮高改正をその地名や港名で一律で扱っても問題が起きない程度には細かく定められていると言える。

4.3.2 潮汐の位置による違い

潮汐は空間的にも波として伝搬するものであるため、離れた位置の潮汐には違いがある。験潮所は常設であっても臨時であっても海岸線付近で行うため、測深を行う船の位置とはどうしても距離が生じる。距離が離れば離れる程、また潮汐の振幅が大きい海域や大きい時期である程、潮汐観測地点の潮汐と測深位置の潮汐の差は大きくなる

ことが予想される。この位置による潮汐の違いは、港湾の地域や形状によって大きく異なるため、単純な距離による閾値を決めることはできない。例えば本州北西岸などであれば、元々の潮汐の振幅が小さいため、差も限定的であり問題になることは少ないが、瀬戸内海や九州西岸などは潮汐の振幅が大きいので、験潮所の位置は測量海域からよく吟味する必要がある。

異なる地点の潮汐の違いについて一概に述べることは難しいが、一覧表や「書誌第 781 号 潮汐表」（以下、潮汐表という）により、空間的な潮汐の変化を断片的ながら知ることができる。

一覧表では、各地点について Z_0 が記載されている。 Z_0 は過去の潮汐観測の主要 4 分潮の振幅の和から定められているため、各地の潮汐の振幅の規模を知ることができる。

海上保安庁が発行する潮汐表の巻末には、標準港に対する補助港の潮時差や潮高比が掲載されている。潮時差と潮高比は、高潮（満潮）や低潮（干潮）といったピークの時刻と振幅が、標準港に対してどの程度異なっているかという値である。なお、潮高比は 0.01 の桁で記載されているが、潮時差については 5 分単位で丸められている。ほとんどの場所で隣り合う地点の潮時差は 10 分以内であり、潮高比も 0.80 ~ 1.20 を外れることはまれである。なお、一覧表に記載されている地名または港名は、潮汐表では標準港と補助港で概ね網羅されている。

一覧表や潮汐表に書かれた港や地点は、験潮所を設置した海岸であり、沖の海岸線から離れた位置については何も言っていない。岸壁から離れた測深位置のまさにその位置に験潮器を設置することは難しく、直接比較することは困難であるが、これまでの楕円体基準水深測量の検証や自律型海洋観測装置 (AOV) の観測結果を見る限り、得られた GNSS 測位による鉛直方向の変動は、潮汐と同様の周期と振幅を持っており、それをその位置の潮汐である、と見なすことは妥当であろう。

4.3.3 波浪や副振動の位置による違い

海面の上下動には、潮汐以外に波浪や副振動がある。これらの上下動も位置によって異なる。

波浪のような周期の短い（おおよそ 30 秒未満）動揺は、船舶側では、取り付けられた動揺検出器により除去できる。常設験潮所では、導水管で繋がった験潮井戸で観測していることも多く、その場合、短い周期の振動は導水管によって除去される。岸壁等に設置された臨時験潮所の場合は、データを平滑化することで、波浪の影響を除去できる。

副振動とは、波浪や潮汐以外の振動一般の総称である。概ね波浪より周期が長いため動揺検出器では対応されない。副振動は地域性が強く、振幅の大きな副振動が生じやすい海域や湾が存在する。

4.3.4 対策の必要性

4.3.2 と 4.3.3 で議論した位置による潮汐や副振動の差異は、原理的に必然の差異である。この差異は地形や時間帯、そのときの海象によって異なり、一定の方向性や目安を持たない。従来の験潮所による潮高改正は、他に方法が無かったため岸壁等の海岸線付近で行っているものであり、理想的には測量するまさにその位置の潮汐で潮高改正する方が真に求めたい水深となる。そのため、楕円体基準水深測量を導入するに当たっては修正する必要のない差異である。

4.4 一覧表の最低水面と最低水面モデルとの差異

4.4.1 従来の最低水面の決定と更新

最低水面モデルとの差を検討するのに先立ち、一覧表の最低水面について、その決定と更新の方法について記述する。

海上保安庁は、水路業務法施行令（平成 13 年政令第 433 号）及び平成 14 年海上保安庁告示第 103 号（海上保安庁，2009）に基づき、海図等水路図誌の高さの基準面（平均水面、最高水面、最低水面）をインターネットで一覧表として公示している。

場所毎に、陸上に設置されている標からの高さで、平均水面、最高水面、最低水面を定めているが、位置は地名または港名と標の緯度経度のみ示しており、厳密な適用範囲は定めていない。

その地で行った潮汐観測から、平均水面を定め、解析して潮汐調和定数を求め、平均水面から潮汐調和定数の主要 4 分潮の振幅の和だけ下げた面を最低水面と定めてきた。

常設験潮所の観測記録を年単位で平均すると潮汐の振動が打ち消されたその地の平均的な海面の高さが得られるが、気圧や気温、海流等によって年毎の違いがある。海上保安庁では、平均水面は複数年、通常 5 ヶ年の平均で算出している。臨時験潮所の場合は 1 年を超えるような長期の記録を得ることが難しいため、付近の季節変動が同等とみなせるような常設験潮所との比較により、平均水面を算出する。

付近の地形がかなり大きく変わらない限り、潮汐の振動の様相は数十年経っても変わらないことが知られているが、平均水面の高さは長期的に変化しており、日本各地の常設験潮所の記録でも 1980 年代以降上昇傾向が見られる（国土地理院海岸昇降検知センター（2024）「日本列島沿岸の年平均潮位グラフ」）。また、一覧表で基点として記載している標も潮汐観測している常設験潮所も陸上の構造物であるため、その地の地殻変動の影響を受ける。

海図の高さや深さは、主に海面に浮かぶ船舶のための値であるため、海面が長期的に変動したのであれば、それに合わせて更新する必要がある。この点は陸上の標高と異なる点である。一覧表では、採用調査年月と最近調査年月を記載しており、水路測量の際、調査年月から 3 年以上経過した最低水面については、点検して使用することとしている（水路測量業務準則施行細則；海上保安庁，2024）。点検では、最新の平均水面を算出して、一覧表の値とどれだけ変化しているかを確認する。

平均水面、最高水面及び最低水面は、基準であり、長期間に渡る港湾工事にも利用されているた

め、頻繁に変えることは適当ではなく、0.10 m 以上の差が生じた際に変更を検討し、関係者と調整の上で変更することとしている。逆を言えば、最近調査年月時点で0.10 m 未満の差がありうる。近年、日本沿岸の海面は年に約 3.5 mm のペースで上昇（気象庁「日本沿岸の海面水位の長期変化傾向」）しているため、大まかに言って約 30 年に 1 度更新することになる。水路測量の機会が多い港湾は頻繁に点検されるが、全国一斉に調査を行っている訳ではないため、何十年も前に決定し点検されないまま記載されている値も少なくない。

日本沿岸では 1980 年代以降、海面が上昇する傾向であるため、船舶の座礁や底触といったリスクに対する懸念は少ないが、下を船舶が航行するような橋が存在する場合は注意が必要である。

また、地殻変動により地盤が上昇している地域も頻繁な点検と更新が求められる。現に東北地方太平洋沖地震の余効変動や、火山活動により急速に上昇した 1990 年代の神津島という実例が存在する。

なお、潮汐の振幅は、海面や地盤が上昇あるいは下降してもほぼ変化しないため、 Z_0 を変更することはごくまれである。

4.4.2 最低水面モデルの年代

これまでの楕円体基準水深測量の検証（大久保・他、2022；塩澤・他、2023）及び令和 5 年度の検証では、2016～2020 年の観測記録から平均水面を作成した（令和 5 年度検証の女川のみ 2017～2020 年）。当庁以外の験潮所については、主に海岸昇降検知センターが発行している潮位年報平成 28 年、平成 29 年、平成 30 年、平成 31 年、令和 2 年の値を使用している（海岸昇降検知センター、2017；2019；2020ab；2022）。

従来の一覧表ではそれぞれの地でそれぞれの地の事情に応じて最低水面を決定・更新しているが、最低水面モデルは面的に作成するので周辺との連続性をとるためにも同じ年代で作成することが望ましい。また、将来、海面の長期的変動に合わせて更新するにあたって、一律の年代に揃え

ていた方が、管理や運用が容易になる。

4.4.3 年代の差異

最低水面モデルがごく近年の平均水面から作られているのに対して、一覧表の最低水面の元となる観測年は場所毎に大きく異なり、たとえ最近点検された地であっても前述のとおり 0.10 m 未満の差がありうる。点検や更新がされていない地では、それ以上の差も考えられる。これら差の有無は一覧表の採用調査年月と最近調査年月からある程度推測することができる。

ほとんどの場合、最低水面モデルの方が新しい水面を参照しており、近年、海面上昇の傾向があることから、得られる水深は、従来の水深測量に比べ、楕円体基準水深測量の方が深く出る。頻繁に最低水面が点検されている海域でも最大 0.09 m 深くなり、あまり点検されていない海域だとそれ以上の差が生じる可能性がある。この差異は、4.3 節で議論した位置による潮汐の差異と異なり、傾向が明確であるため、分析は比較的容易である。

より新しい実際の状況に近くなることから、楕円体基準水深測量の実用の際に、この差異について対策をとる必要はないと考えられる。ただし、現状、海面上昇が続いているため、最低水面モデル導入後は、更新の方針を定め、年代を適切に管理し、最低水面モデルを適切に更新していく必要がある。

4.4.4 標高と地球楕円体からの高さ

これまでの研究（大久保・他、2022；塩澤・他、2023）では、最低水面モデルの作成にあたって東京湾平均海面（T.P.）からの高さ（以下、標高という）を活用する手法が提示されていた。これは多くの常設験潮所で国土地理院の水準点との高さの関連付けが行われており、その値の収集が容易であったことも要因の 1 つだろう。

この観測基準面の標高は、ある時点で常設験潮所の固定点から国土地理院の水準点までを直接水準測量によって関連付けたものであるが、この作

業はそれぞれの常設験潮所の管理機関が行っており、いつ時点のどの基準点成果を使用したのか、今期と元期の取り扱いといった詳細を精査し、どのような補正が正しいのか判断することは非常に難しくかつ手間を要する。特にセミダイナミック補正はパラメータが毎年更新されているため、遡って検証することが難しい。

また、水準点が験潮所から遠く、場所によっては数 km 離れているものや、水準点の成果が非常に古いものもあり、常設験潮所の観測基準面の標高の精度は場所によって大きく異なる。

4.4.5 今後の最低水面モデルの作成

楕円体基準水深測量は、令和7年度からの実施に向けて準備を進めているところである。

常設験潮所の標高は、4.4.4 節で述べたとおり誤差要因が多く、精度の管理や検証が非常に困難であった。常設験潮所の固定点で GNSS 測量を行い、その常設験潮所の観測基準面と地球楕円体との高さを直接関連付けた方が、誤差要因は明らかに減少する。特に、常設験潮所に併設された電子基準点（P 点）は連続的に観測されており、地球楕円体との関連付けや最低水面モデル作成の基軸として非常に有用である。電子基準点が付近に存在しない常設験潮所の場合は、臨時の GNSS 測量で地球楕円体からの高さを決定することになり、そのときの電離層や大気の状態による誤差等が懸念されるが、こうした誤差は GNSS 測量の普及と共に補正方法が確立されており、水準点までの直接水準測量に比べ、安定した関連付けを行うことができるだろう。

海上保安庁では平成 29 年以降、一覧表の掲載されている標について GNSS 測量を行い、非常時の標の再建のため、最低水面の地球楕円体からの高さの決定を進めているが、このデータは最低水面モデル作成の際にも非常に参考となっている。

こうしたことから、令和5年度途中からの最低水面モデルの作成では、標高を経由するよりも、実際に GNSS 測量により求めた地球楕円体からの高さを優先して利用している。

5 まとめ

これまでの研究と検証を通じて、楕円体基準水深測量が、日本沿岸において十分な精度を得られることがわかった。

最低水面モデルについては、既存の標高の値で作成する場合の難点が明らかになり、常設験潮所と電子基準点の位置関係や、水準測量や GNSS 測量の実施時期、地殻変動の傾向等が各地で異なるため、全国一律に機械的に作成することは難しく、1つ1つ地域の特性を見る必要があることが明らかとなった。今回、様々な海域について多数の知見が得られたため、実用に供する最低水面モデルの作成の際には、より適切に作成できると思われる。

現在、最低水面モデルは、全国一斉の導入ではなく、港湾毎に順次導入していくことを検討している。これは、多くの港湾において一覧表の最低水面が港湾管理用基準面として使用されており、調整なしに最低水面モデルを導入することができないためであるが、1つ1つの海域を吟味して最低水面モデルを作成する体制をとることができるとも言える。

また、2025年4月には国土地理院の高精度な重力ジオイド「ジオイド2024 日本とその周辺」の公開が予定されているが、「日本ジオイド2011」に比べ精度が向上するとともに適用範囲が特に海域で広がっており、最低水面モデル作成にも非常に有用であることが期待される。

本研究が、今後の楕円体基準水深測量の導入及び各地の最低水面モデル作成の一助となれば幸いである。

謝 辞

令和5年度の検証に携わった各管区本部の海洋調査課及び海洋情報調査課の方々、これまでの研究に携わった沿岸調査課及び技術・国際課の方々、及び査読者を始めとした本稿の作成にあたり助言頂いた方々に感謝の意を表します。

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.
- 海岸昇降検知センター (2024) 日本列島沿岸の年平均潮位 (1984 年以降) のグラフ, <https://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/annualgra.html>, Accessed 13 Nov 2024.
- 海上保安庁 (2001) 水路業務法施行令 (平成 13 年 12 月 28 日政令第 433 号)
- 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 号一部改正)
- 海上保安庁 (2002) 海上保安庁告示 (平成 14 年 4 月 1 日第 103 号)
- 海上保安庁 (2024) 水路測量業務準則施行細則 (令和 6 年 8 月 5 日 保海沿 72 号)
- 海上保安庁 (2024) 平均水面, 最高水面及び最低水面一覧表, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/TIDE/datum/index.html>, Accessed 5 Nov 2024.
- 気象庁 (2024) 日本沿岸の海面水位の長期変化傾向, https://data.jma.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html, Accessed 13 Nov 2024.
- 国土地理院, 基準点成果等閲覧サービス, <https://sokuseikagisl.gsi.go.jp/top.html>, Accessed 30 Aug 2024.
- 国土地理院, セミダイナミック補正, <https://gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna.html>, Accessed 30 Aug 2024.
- 国土地理院, ジオイド高計算, https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/geoid/calcgh/calc_f.html, Accessed 30 Aug 2024.
- 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 30 Aug 2024.
- 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 遙・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.
- 塩澤舞香, 住吉昌直, 伊能康平, 鐘尾 誠, 山野寛之, 杉山伸二, 長野勝行, 瀬尾徳常, 齊藤康仁, 小池未空時, 吉澤 信, 豊鷺見淳史, 高橋信介, 栗田洋和, 小川 遙, 安原 徹 (2023) 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, 海洋情報部研究報告, 61, 48-61.
- 村松弘規・高松直史・阿部聡・古屋智秋・加藤知瑛・大野圭太郎・畑中雄樹・攪上泰亮・大橋和幸 (2021) 新しい GEONET 解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5 解・R5 解) の公開, 国土地理院時報, 134, 19-32.

要 旨

本稿では, 大久保・他 (2022) 及び塩澤・他 (2023) に続き, 楕円体基準水深測量の実用化に向けて, 検証と分析を進めた. 楕円体基準水深測量と従来の験潮所による潮高改正とで実際に生じた結果の差異について, 要因を分析し, 対策の必要性を考察した. 検証の結果, 楕円体基準水深測量が, 日本沿岸において十分な精度を得られることがわかった. 今後の最低水面モデルの作成においては, 1つ1つ地域の特性を吟味し, 験潮記録は標高を経由するのではなく, GNSS 測量により直接, 地球楕円体と関連付けて使用することが望ましい.