

GNSS鉛直測位による港湾工事における測深作業の効率化（その2） ～深浅測量及び浚渫工・床掘工等への適用～

辰巳大介*・宮田正史**・須山翔太***・早川武尊***・末廣文一***・川原洋****・瀬水幸治*****

要 旨

GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測により、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理の効率化と、地震・津波等の災害発生時における深浅測量・海上工事の迅速な実施が期待できる。しかし、最低水面の楕円体高が不明なため、GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測が海上工事では実用化されていない。

近年、国土地理院により沿岸部を含む全国の航空重力測量が実施されて、新しいジオイド・モデル「ジオイド2024日本とその周辺」が構築された。このジオイド・モデルは、これまでに使われて来たジオイド・モデルよりも沿岸部の精度が向上しており、これを活用して海上保安庁により最低水面の楕円体高の算出が進められて来たことから、本研究は、GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入することを目的として、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理の現場で実証試験を行った。深浅測量に関しては、合計8ヶ所の現場でマルチビーム測深を実施した。また、施工管理・出来形管理に関しては、床掘工・浚渫工・地盤改良工・基礎捨石工の4つの工種を対象に、合計10ヶ所の現場で、作業船の高さ（鉛直位置）の計測を実施した。現地試験の結果から、潮位観測を利用する従来の潮位補正とGNSS測位を利用する潮位補正の間で、水深の計測結果及び作業船の高さ（鉛直位置）の計測結果について、差の平均値が概ね0.1m以内に収まることを確認した。深さの測定の不確かさの限度や出来形管理基準の測定単位・許容範囲を考慮すると、GNSS測位による潮位補正が、深浅測量及び施工管理・出来形管理として一定の精度を有しているものと評価できた。

キーワード：GNSS測位、港湾工事、深浅測量、最低水面モデル、潮位補正

* 国土技術政策総合研究所 港湾情報化支援センター 港湾業務情報化研究室長

** 国土技術政策総合研究所 研究総務官（（併任）港湾局 研究調整・社会実装推進官）

*** 港湾局 参事官（技術監理・情報化）室

**** 港湾局 海岸・防災課 災害対策室（前 港湾局 技術企画課 技術監理室）

***** 関東地方整備局 港湾空港部 港湾事業企画課（前 港湾局 参事官（港湾情報化）室）

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景と目的	1
1.2 既往研究	3
2. 深浅測量への適用	3
2.1 深浅測量を対象とした現地試験の概要	3
2.2 釜石港における現地試験	6
2.3 中城湾港における現地試験	9
2.4 敦賀港における現地試験	12
2.5 境港における現地試験	14
2.6 備讃瀬戸航路における現地試験	16
2.7 中山水道航路における現地試験	20
2.8 竹富南航路における現地試験	23
2.9 深浅測量を対象とした現地試験の結果のまとめ	26
3. 浚渫工・床掘工等への適用	28
3.1 浚渫工・床掘工等を対象とした現地試験の概要	28
3.2 横浜港における現地試験（床掘工）	29
3.3 広島港における現地試験（床掘工）	31
3.4 大阪港における現地試験（浚渫工）	33
3.5 八代港における現地試験（地盤改良工）	35
3.6 函館港における現地試験（地盤改良工）	37
3.7 室津港における現地試験（基礎捨石工）	39
3.8 和歌山下津港における現地試験（床掘工）	41
3.9 徳山下松港における現地試験（浚渫工）	44
3.10 中城湾港における現地試験（浚渫工）	47
3.11 関門航路における現地試験（浚渫工）	50
3.12 浚渫工・床掘工等を対象とした現地試験の結果のまとめ	53
4. おわりに	55
4.1 主要な結論	55
4.2 今後の課題	55
参考文献	55
付録 「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」の概要	57

1. はじめに

1.1 背景と目的

(1) 背景

我が国では少子高齢化による将来的な労働力不足が懸念されており、持続的な経済成長を実現するためには、労働力不足を上回る生産性向上が必要と考えられる。建設分野においては、2016年度から国土交通省が中心となり、i-Constructionと呼ばれる生産性向上の取り組みが進められ、2024年4月にはi-Construction 2.0「建設現場のオートメーション化」が作成・公開された¹⁾。i-Construction 2.0では、施工管理のオートメーション化が目標の一つに位置付けられており、衛星測位技術による建設機械の位置の管理及び国家座標に準拠した施工履歴データの活用が求められている。

衛星測位技術に関しては、全球測位衛星システム（Global Navigation Satellite System, 以下「GNSS」という。）で利用できる人工衛星がより一層充実化して来ている。GNSSとは、みちびき（日本）、GPS（米国）、GLONASS（ロシア）、Galileo（EU）等の衛星測位システムの総称である。例えば、我が国の準天頂衛星システム「みちびき」は2018年11月に4機体制の運用を開始し、2024年12月に決定された宇宙基本計画工程表²⁾では、2026年度から7機体制の運用を行うことが目標とされている。

さらに、GNSS測位による精度の高い標高決定を可能とするため、国土地理院では、2019年度からの5年間で全国の重力データを航空重力測量により詳細に取得して来た。これまで使われて来たジオイド・モデル（ジオイド2011）は、重力データに基づく重力ジオイドと、橢円体高及び標高を計測して得られる実測ジオイドを合わせ込んで作成されているため、水準測量の距離に応じて累積する誤差や地殻変動の影響等が課題であった。また、山岳部や沿岸部における重力測量の結果が不足していた。しかし、山岳部や沿岸部を含む全国の航空重力測量を実施したことにより、実測ジオイドを使用せず、重力データのみから精度の高いジオイド・モデル「ジオイド2024日本とその周辺」を構築することができた。国土地理院では、「ジオイド2024日本とその周辺」の構築と合わせて、衛星測位を基盤とする標高の仕組みへ移行することを決定し、2025年4月に標高成果を改定して、測地成果2024として公表した³⁾。

(2) 課題

衛星測位技術の発達・普及により、陸上工事ではGNSS測位の利用が進んでいる。3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）⁴⁾では、RTK-GNSSに対応したGNSSローバー（移動局となるGNSS受信機）による単点観測で、土工等の起工測量及び出来形管理を実施する手法が規定されている。

一方、海上工事でもGNSS測位は利用されているが、GNSS測位は水平位置の計測のみに用いられ、GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測は実用化されていない。

GNSS測位による鉛直位置の計測が陸上工事では利用されているのに、海上工事では利用されていない要因の一つが、標高と水深の基準面の違いによるものと考えられる。GNSS測位では、地球橢円体からの高さ（以下「橢円体高」という。）が計測される。陸上工事では、GNSS測位で地表面の橢円体高が計測されるので、計測地点のジオイドの橢円体高（以下「ジオイド高」という。）を引くと、直ちに標高が得られる。標高の基準がジオイドであり、ジオイドの空間分布であるジオイド・モデルは、国土地理院により構築・公開されている（参考：図-1）。

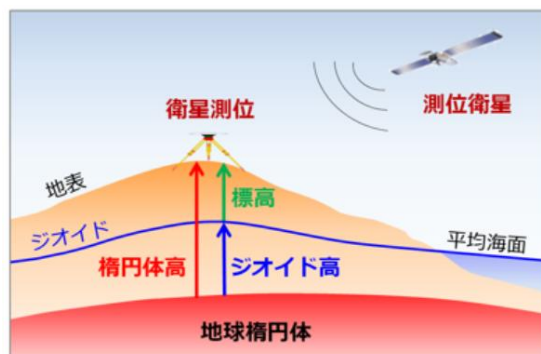


図-1 橢円体高と標高の関係の模式図⁵⁾

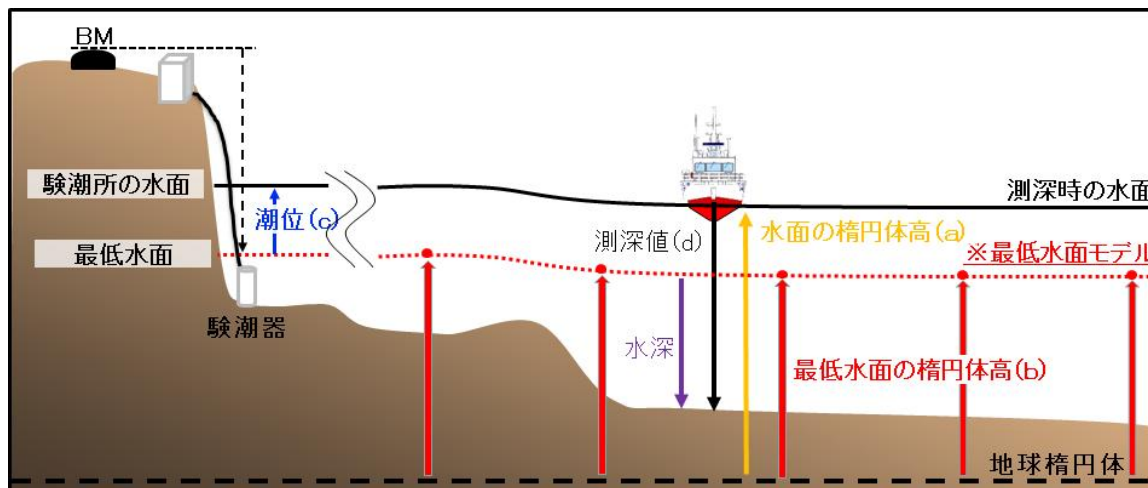


図-2 楕円体高と水深の関係の模式図（塩澤ら⁶⁾を加工）

海上工事では、マルチビーム音響測深機等により船体から海底面までの深さ（図-2の「d」）が計測され、また、GNSS測位により計測時の水面の楕円体高（同図の「a」）が計測される。

水深の基準は最低水面であるため、計測された測深値から計測時の潮位を引いて、最低水面基準の水深へ変換している。この変換は「潮高改正」または「潮位補正」と呼ばれるが、本資料では「潮位補正」へ表記を統一する。現行の潮位補正は、常設検潮所または簡易検潮器における海面の変動（同図の「c」）と測深した位置における海面の変動が同じであると仮定して、式(1)により潮位補正を行っている⁷⁾。

$$\text{水深} = \text{測深値(d)} - \text{計測時の潮位(c)} \quad \text{式(1)}$$

GNSS測位では、式(2)のとおり、計測時の水面の楕円体高と最低水面の楕円体高（同図の「b」）の差から潮位を算出し、計測された測深値を最低水面基準の水深へ変換することが可能である。

$$\text{水深} = \text{測深値(d)} - (\text{計測時の水面の楕円体高(a)} - \text{最低水面の楕円体高(b)}) \quad \text{式(2)}$$

しかし、これまでは、最低水面の楕円体高の平面的な分布を表す最低水面モデルを精度良く構築することが困難であり、最低水面の楕円体高が不明であるため、海上工事では、GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測は実用化されて来なかった。

(3) 目的

GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入することにより、次に示す2つの効果が期待できる。

第1の効果は、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理の効率化である。GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測が導入されると、深浅測量や海上工事のためだけに簡易検潮器を設置して潮位観測を実施する作業が不要になる。また、潮位変動の大きい港湾等では、潮位観測の実施場所と深浅測量・海上工事の実施場所の海面変動が必ずしも一致しない。GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測により、深浅測量・海上工事の実施場所における海面変動をより正確に把握できる可能性がある。なお、常設検潮所における潮位観測は、長期的な海面変動等の把握のため、GNSS測位の導入後も継続して実施する必要がある。

第2の効果は、地震・津波等の災害発生時における、深浅測量・海上工事の迅速な実施である。最低水面を定めるために全国に設置されている基本水準標は、地震に伴う地殻変動によって、位置や高さが変わる可能性がある。また、常設検潮所における潮位観測も、地震や津波の影響によって実施できなくなる可能性が考えられる。従来の潮位補正の方法では、地震・津波等の災害発生時に、基本水準標の再設置・再測量や常設検潮所の復旧・臨時の潮位観測が必要になる場合があ

った。GNSS 測位による水深（鉛直位置）の計測の導入により、災害発生時も継続して潮位補正を実施でき、最低水面基準の水深を計測できるため、迅速な深浅測量・海上工事が可能になる。

本研究は、GNSS 測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入することを目的として、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理の現場で実証試験を行うものである。現地試験では、潮位観測を利用する従来の潮位補正（以下「従来潮位補正」という。）と GNSS 測位を利用する潮位補正の 2 つの手法を比較し、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理へ GNSS 測位を導入した場合の精度検証を実施する。

なお、潮位を観測する施設は、設置機関によって「検潮所」・「験潮所」・「験潮場」等の表記・呼称があるが、本資料では「検潮所」に統一する。

1.2 既往研究

海上保安庁では、GNSS測位による水路測量の実用化に向けて、各種の先行研究が実施されている。

例えば、松本ら⁸⁾は、諸外国における最低水面モデルの構築状況を整理している。また、大久保ら⁹⁾は、東京湾を対象に最低水面モデルを試行的に作成し、従来の潮位補正とGNSS測位による潮位補正の精度比較を実施している。塩澤ら⁶⁾は、山口県西方の日本海を対象に、大久保らと同様の検討を実施している。さらに、林王ら¹⁰⁾は、全ての管区海上保安本部の管内において1つ以上の海域で最低水面モデルを試行的に作成し、従来の潮位補正とGNSS測位による潮位補正の精度比較を行い、最低水面モデルの実用的な構築手法を提案している。

一般社団法人 日本埋立浚渫協会でも、GNSS測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入するための実験的な検討が進められている。例えば、渡瀬¹¹⁾は、作業船の鉛直位置のGNSS測位に対する基線長の影響、GNSS計測装置のメーカーの差異の影響、浮体動揺の影響の3点を検討するため、現地試験を実施している。

なお、本資料の前報となる廣瀬ら¹²⁾では、鹿島港・四日市港・横浜港を対象に最低水面モデルを試行的に作成した。また、横浜港の海上地盤改良工において、GNSS測位によるCDM船の鉛直位置の計測を実施した。本研究は、全国の港湾において、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の複数の工種の施工管理・出来形管理へGNSS測位を導入した場合の精度検証を実施する。

2. 深浅測量への適用

2.1 深浅測量を対象とした現地試験の概要

GNSS 測位による潮位補正が深浅測量へ適用できるか確かめるため、深浅測量の現地試験を行い、従来潮位補正と比較した。現地試験は、2023 年度に 5 ヶ所（釜石港・中城湾港・敦賀港・境港・備讃瀬戸航路）、2024 年度に 3 ヶ所（中山水道航路・備讃瀬戸航路・竹富南航路）で実施した。

(1) 2023 年度の現地試験

2023 年度は、潮位変動等の現地条件が異なる 5 ヶ所を選定した。釜石港は、ジオイドが東側に大きく傾斜している（ジオイドの傾斜角は 0.06 度）。中城湾港は、離島に位置するため、標高の基準が日本水準原点ではなく、個別に標高の基準を定めている。敦賀港は、敦賀湾が入り組んだ形状をしているため、副振動が発生しやすい。境港は、常設検潮所が近傍に設置されていない。備讃瀬戸航路は、 Z_0 が細かく区分されている。なお、 Z_0 とは最低水面から平均水面までの高さであり、海上保安庁が、平均水面、最高水面及び最低水面一覧表¹³⁾として決定・告示するものである。

a) 臨時検潮所による潮位観測

2023 年度の現地試験では、ジオイドの傾斜や副振動等の影響を検討するため、臨時検潮所を設置して潮位観測を実施した。

臨時検潮所による潮位観測の概要を、図-3～図-5 に示す。潮位観測は水圧式潮位計（圧力センサー）で行い、圧力センサー付き塩ビ管及び副標を取り付けた単管パイプを、岸壁に一時的に取り付けた。また、潮位観測地点の近傍にベンチマークを設置し、GNSS スタティック測量（3 級水準測量）により、ベンチマークの楕円体高を計測した。圧力センサーの高

さは、ベンチマークから水準測量を行って計測した。圧力センサーの計測間隔は1秒、計測単位は1cmである。

水圧式潮位計（圧力センサー）の記録値と副標による海水面の読み値の関係を調べるため、各臨時検潮所において、観測期間中に同時検潮を実施した。同時検潮で得られた副標の読み値を目的変数、圧力センサーの記録値を説明変数として線形回帰を行い、各臨時検潮所の縮率・切片・相関係数を算出した。

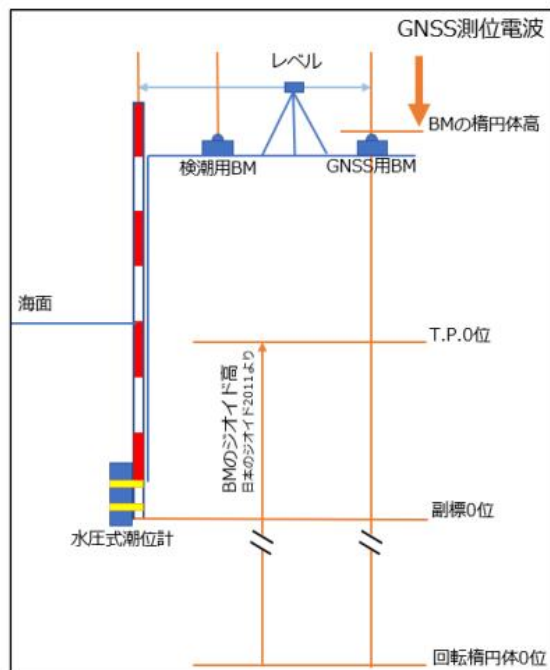


図-3 水圧式潮位計（圧力センサー）による潮位観測の概要

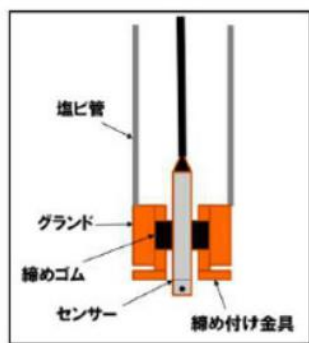


図-4 圧力センサー付き塩ビ管の外観



図-5 水圧式潮位計の設置状況（敦賀港）

b) マルチビーム測深及び衛星測位

マルチビーム測深は、マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）⁷⁾に基づいて実施した。また、衛星測位は、ネットワーク型RTK-GNSS（VRS方式）で実施した。現地試験で使用したマルチビーム音響測深機及びRTK-GNSS計測装置の計測性能を、表-1に示す。

表-1 マルチビーム音響測深機及びRTK-GNSS計測装置の計測性能（2023年度）

	項目	性能
マルチビーム測深	最大スワス角度	150度（等間隔）／165度（等角度）
	ビーム幅	0.5×1度
	ビーム数	512本
	レンジ解像度	0.6cm
GNSS測位	水平精度RMS	±(8mm + 0.5ppm)
	鉛直精度RMS	±(15mm + 0.5ppm)

(2) 2024年度の現地試験

2024年度は、直轄の港湾事務所が港湾業務艇により開発保全航路の水路測量を実施することを想定して、中山水道航路・備讃瀬戸航路・竹富南航路の3地点において現地試験を実施した。

2023年度は1種類のマルチビーム音響測深機とGNSS計測装置しか使用しなかったが、2024年度は異なる3つのメーカーのマルチビーム音響測深機とGNSS計測装置を使用した。マルチビーム音響測深機は、メーカーごとに異なる独自のデータ収録ソフトウェアを使用しており、本研究では、3社それぞれのデータ収録ソフトウェアにおいて最低水面モデルを読み込み、GNSS測位による潮位補正を実施できるか検証した。衛星測位は、ネットワーク型RTK-GNSS（VRS方式）で実施した。

さらに2024年度は、GNSS測位による潮位補正について、リアルタイム処理と後処理の2つの手法を比較した。後処理では、リアルタイム処理では実施しない、後処理キネマティック解析（Post-Processing Kinematic, 以下「PPK」という。）及び手作業によるノイズ除去を実施した。

現地試験で使用したマルチビーム音響測深機及びRTK-GNSS計測装置の計測性能を、表-2及び表-3に示す。

なお、2024年度は、臨時検潮所による潮位観測は実施しなかった。

表-2 マルチビーム音響測深機の計測性能（2024年度）

項目	A社	B社	C社
最大スワス角度	160度	150度（等間隔） 165度（等角度）	140度
ビーム幅	0.9×0.9度	0.5×1度	1×1度
ビーム数	256本	512本	400本
レンジ解像度	1.25cm	0.6cm	1.5cm

表-3 RTK-GNSS計測装置の計測性能（2024年度）

項目	D社	E社	F社
水平精度RMS	±(8mm + 1ppm)	±(8mm + 0.5ppm)	±(10mm + 1ppm)
鉛直精度RMS	±(15mm + 1ppm)	±(15mm + 0.5ppm)	±(20mm + 2ppm)

(3) 最低水面モデル

本研究で使用した最低水面モデルは、次に示す手順で作成した（参考：図-6及び図-7）。

始めに、平均水面の標高（図-6の①）を算出する。常設検潮所でGNSS測量を行い、常設検潮所における平均水面の橢円体高を計測する。平均水面の橢円体高から常設検潮所のジオイド高を引くことにより、平均水面の標高が算出される。常設検潮所のジオイド高は、ジオイド・モデルの橢円体高を利用する。平均水面の標高は、港湾区域内で一定と仮定する。

次に、港湾区域内の全域において、平均水面の橢円体高を算出する。平均水面の橢円体高は、平均水面の標高にジオイド高（図-6の②）を加えることにより算出される。ジオイド高はジオイド・モデルの橢円体高を利用する。ジオイド・モデルの橢円体高は、緯度間隔1分、経度間隔1.5分（約2km間隔）で作成されているため、平均水面の橢円体高も約2km間隔で算出される。ジオイド・モデルの橢円体高を、緯度間隔1分、経度間隔1.5分よりも細かな間隔が必要な場合は、式(3)～式(5)のとおり双一次補間計算を行う¹⁴⁾。ここで、 Z は緯度 φ 、経度 λ の地点のジオイド高を表す。また、緯度方向の格子番号が i 、経度方向の格子番号が j の格子点におけるジオイド高を Z_{ij} 、緯度を φ_i 、経度を λ_j とする。

$$Z = (1 - t) * (1 - u) * Z_{i,j} + (1 - t) * u * Z_{i,j+1} + t * (1 - u) * Z_{i+1,j} + t * u * Z_{i+1,j+1} \quad \text{式(3)}$$

$$t = \frac{\varphi - \varphi_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} \quad \text{式(4)}$$

$$u = \frac{\lambda - \lambda_j}{\lambda_{j+1} - \lambda_j} \quad \text{式(5)}$$

最後に、平均水面の楕円体高から Z_0 （図-6 の③）を引くことにより、最低水面の楕円体高（図-6 の④）を算出する。 Z_0 は、平均水面、最高水面及び最低水面一覧表¹³⁾で決定・告示されている数値を利用する。別に Z_0 区分図が作成されていない限り、港湾区域内では Z_0 は単一の数値である。

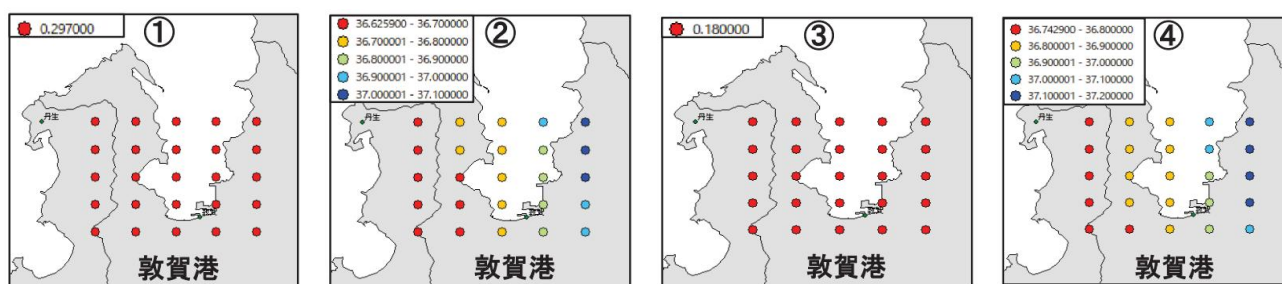


図-6 最低水面モデルの作成手順（敦賀港）

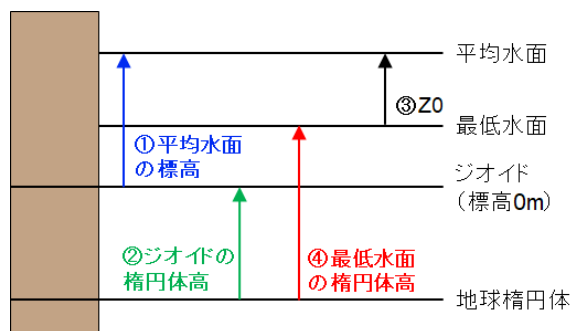


図-7 最低水面モデルの作成に関する高さの整理

以上を整理すると、最低水面モデルの算出過程は、式(6)のとおりである。式(6)中の丸囲みの数字は、図-7 の番号に対応している。平均水面の標高と、別に Z_0 区分図が作成されていない限り Z_0 は、港湾区域内で一定であるが、ジオイド高が計測地点ごとに異なるため、式(6)により最低水面の楕円体高の空間分布を算出することが必要である。

$$\text{最低水面の楕円体高(④)} = \text{平均水面の標高(①)} + \text{ジオイド高(②)} - Z_0(\text{③}) \quad \text{式(6)}$$

なお、本研究で使用した最低水面モデルは、本研究のために海上保安庁が作成した試行版である。水路測量で使用する正式な最低水面モデルとは、作成手順が一部異なる点に注意する必要がある。

また、各港湾で使用した最低水面モデルの詳細については、2.2 節以降で港湾ごとに説明する。

2.2 釜石港における現地試験

(1) 現地試験場所の概況

釜石湾は、ジオイドが東側に下がる方向へ0.06度と大きく傾斜している。また、常設検潮所は湾奥に位置している。このため、測量範囲は、水深の浅い西側と水深の深い東側の2ヶ所に設定し、臨時検潮所は、釜石湾の北側・西側・南側の3ヶ所に設けた。測量範囲と臨時検潮所の位置を、図-8に示す。

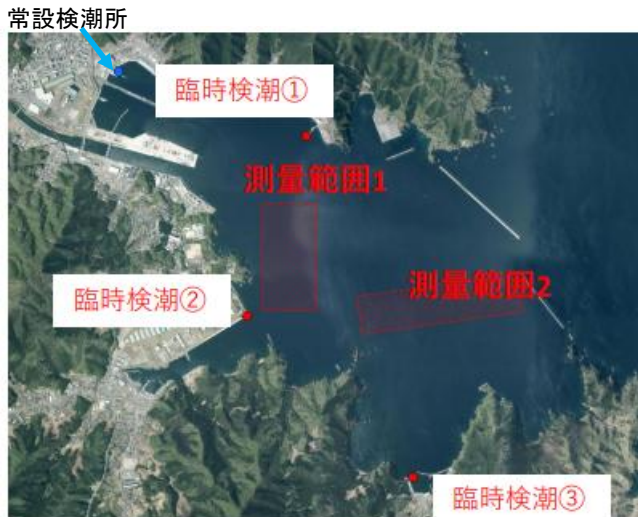


図-8 釜石港の測量範囲と臨時検潮所（Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Communityを加工）

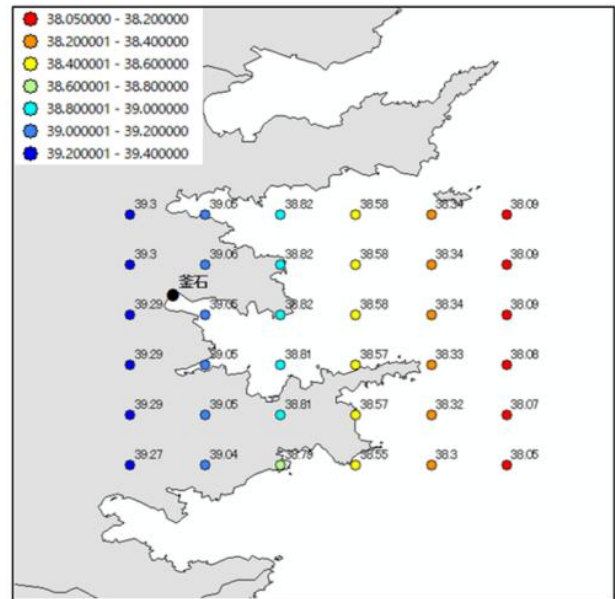


図-9 釜石港の最低水面モデル

(2) 最低水面モデル

釜石港の最低水面モデルを図-9に示す。平均水面の標高は0.029m、 Z_0 は0.86m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。

(3) 臨時検潮所による潮位観測

2024年1月16日～1月19日に、3ヶ所の臨時検潮所を設置した。観測期間中の2時間に5分間隔で同時検潮を実施し、水圧式検潮器の記録値から副標の読み値を算出するための線形回帰分析を行った。3ヶ所の臨時検潮所における同時検潮の結果を、図-10に示す。横軸は水圧式検潮器の記録値、縦軸は副標の読み値を表す。また、線形回帰分析の結果は表-4のとおりである。なお、釜石港以外の地点については、同時検潮の結果の詳細な記載は省略する。

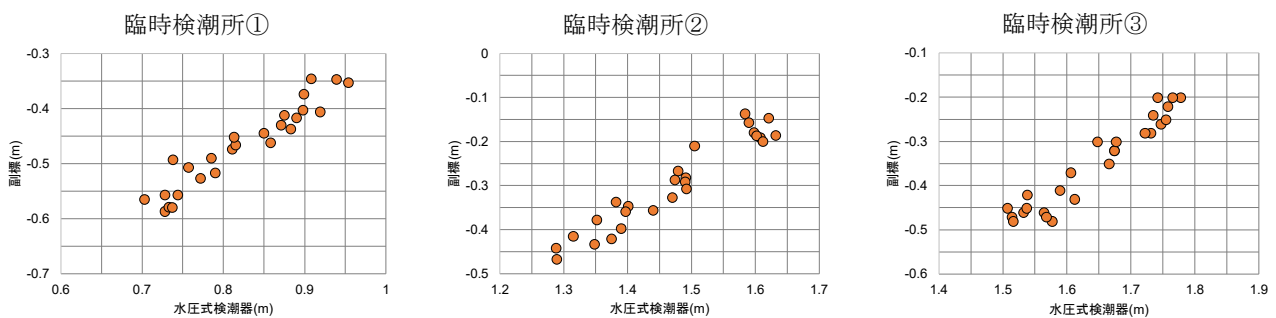


図-10 臨時検潮所における同時検潮の結果（釜石港）

表-4 同時検潮の線形回帰分析の結果（釜石港）

場所	縮率	切片	相関係数
臨時検潮所①	0.9425	-1.2442	0.9089
臨時検潮所②	0.8912	-1.6066	0.9245
臨時検潮所③	1.0475	-2.0714	0.9223

図-11は、2024年1月18日の常設検潮所と臨時検潮所（3ヶ所）における潮位観測結果を、最低水面基準で表したものである。3ヶ所の臨時検潮所における潮位は、いずれも常設検潮所の潮位よりも0.2～0.3m低い結果となった。同時検潮の線形回帰分析の相関係数は0.9以上であり、潮位差の発生した原因は不明である。

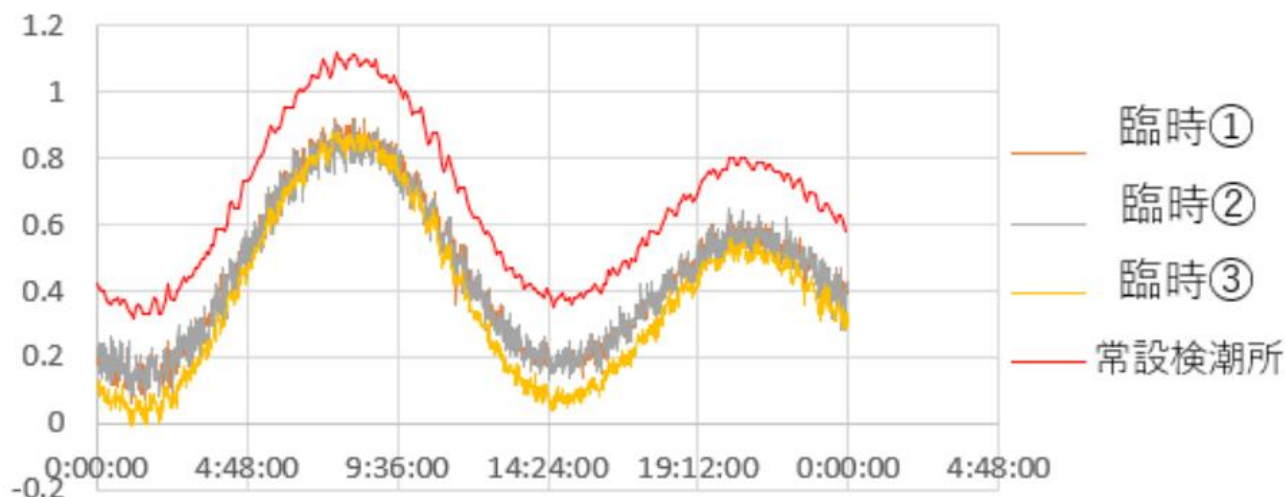


図-11 釜石港の潮位観測結果

(4) マルチビーム測深

2024年1月18日に、釜石港でマルチビーム測深を実施した。釜石港の測線計画を図-12に示す。測量範囲は2ヶ所あり、西側の測量範囲1は広さが1km×0.5km、水深が約25mである。東側の測量範囲2は広さが1.5km×0.35km、水深が約45mである。スワス幅を45度、オーバーラップ率を30%に設定するため、測線間隔は測量範囲1で40m、測量範囲2で75mとした。ただし、測量範囲2は西側の水深が浅いため、西側の0.5kmの範囲は測線間隔25mの補助測線を設けた。

GNSS測位によるマルチビーム測深の結果を、図-13に示す。従来潮位補正との比較は、測量範囲1と測量範囲2のそれぞれで平坦な海底面と傾斜のある海底面を1ヶ所ずつ選んで実施した。従来潮位補正との比較を行った海域は広さが約0.2km×0.2kmであり、図-13の赤枠で示すとおりである。

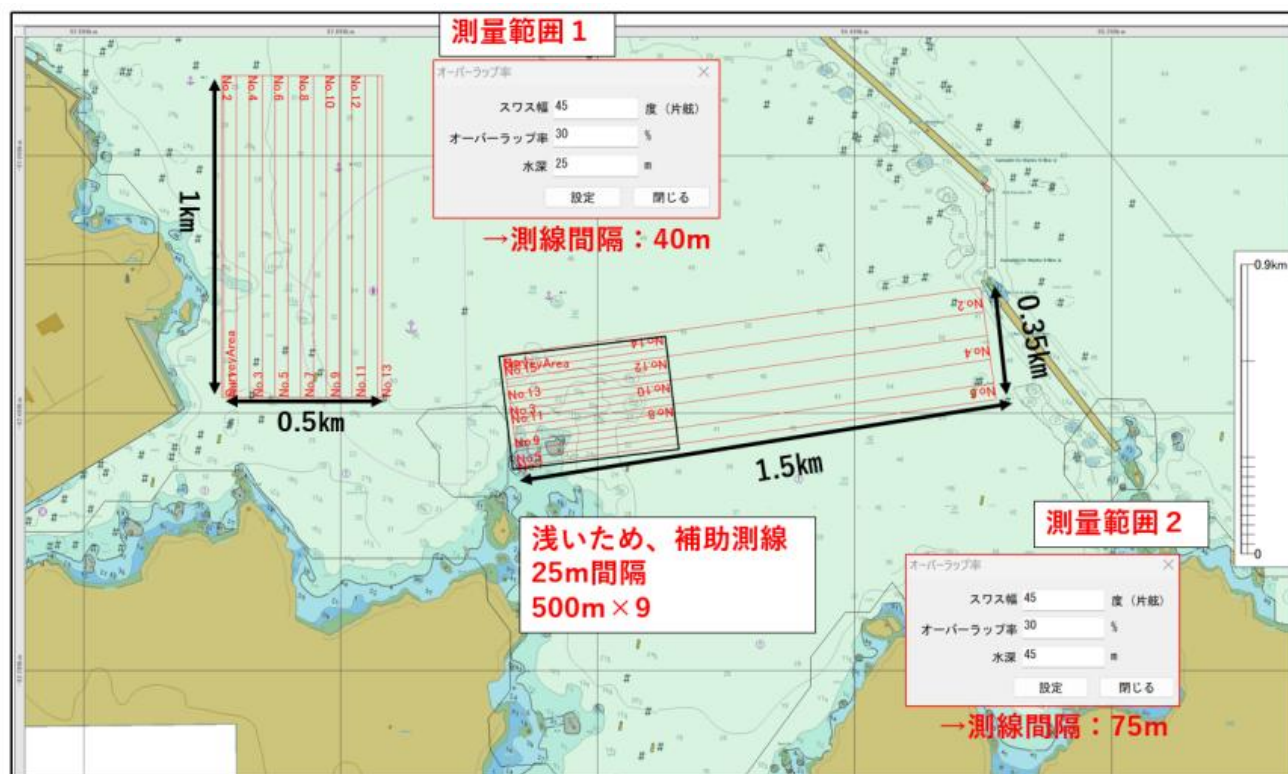


図-12 釜石港の測線計画（海上保安庁航海用電子海図JP54TFJN・JP54TPC7を加工）

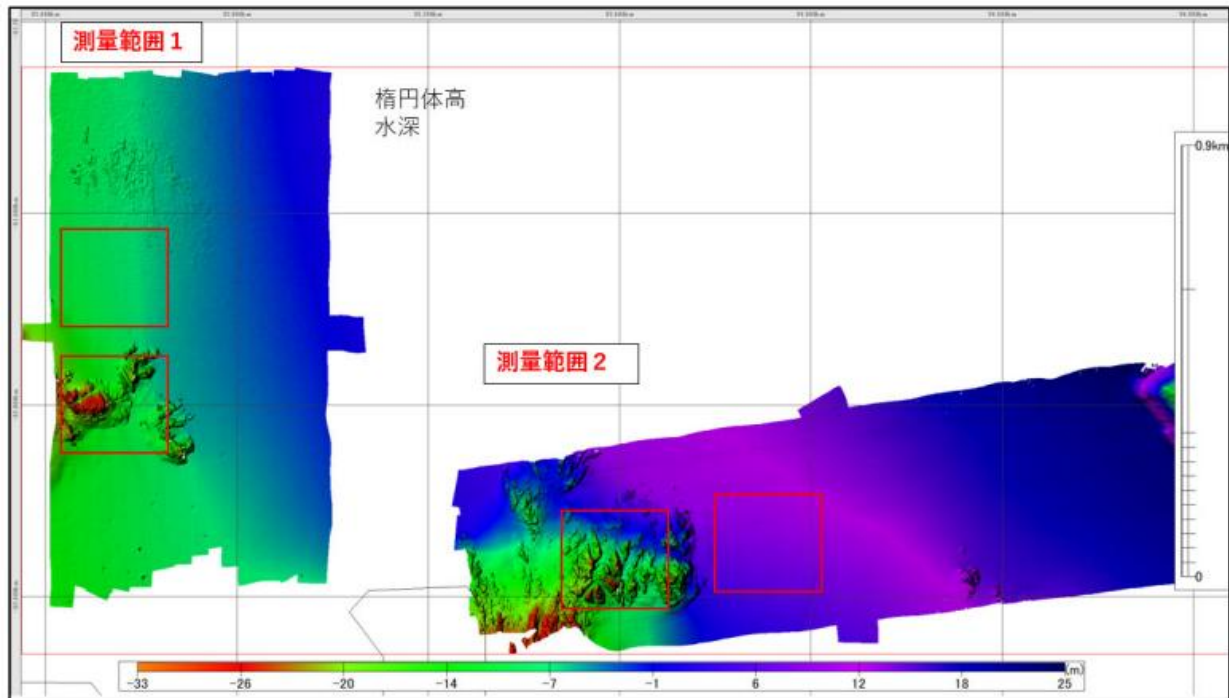


図-13 釜石港のマルチビーム測深の結果

表-5 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1平坦	範囲1傾斜	範囲2平坦	範囲2傾斜
格子数	40401	36367	40401	40392
常設検潮	-0.001m (0.037m)	0.014m (0.146m)	-0.001m (0.024m)	0.049m (0.246m)
臨時検潮1	0.221m (0.038m)	0.232m (0.146m)	0.196m (0.024m)	0.252m (0.245m)
臨時検潮2	0.247m (0.038m)	0.255m (0.147m)	0.205m (0.026m)	0.256m (0.245m)
臨時検潮3	0.262m (0.038m)	0.282m (0.147m)	0.293m (0.024m)	0.345m (0.246m)

GNSS測位と従来潮位補正の比較結果を、表-5に示す。表中の数字はGNSS測位と従来潮位補正の差であり、負の数字はGNSS測位が従来潮位補正よりも水深が深いことを表す。また、カッコ内の数字は、GNSS測位と従来潮位補正の差の標準偏差を表す。水深の計測結果は1m四方の格子で1点取得されており、比較対象の海域の広さが約0.2km×0.2kmであるため、データ数（格子数）は約4万個である。なお、従来潮位補正の潮位観測結果は、常設検潮所と臨時検潮所（3ヶ所）の4種類ある。

(5) 考察

表-5において、平坦な海底面と傾斜のある海底面の計測結果を比較すると、傾斜のある海底面の方が、GNSS測位と従来潮位補正の差が拡大する傾向が見られる。また、常設検潮所と臨時検潮所の計測結果を比較すると、臨時検潮所におけるGNSS測位と従来潮位補正の差は、常設検潮所における差よりも0.2m～0.3m大きい。潮位観測結果（図-11）が示すとおり、臨時検潮所における潮位観測結果は、常設検潮所における潮位観測結果よりも0.2m～0.3m低くなっている。計測時の潮位が過小に評価されているため、従来潮位補正では式(1)のとおり水深が実際よりも深く評価され、GNSS測位と従来の潮位補正の差が臨時検潮所で大きくなったものと考えられる。

2.3 中城湾港における現地試験

(1) 現地試験場所の概況

中城湾港は離島に位置するため、標高の基準を東京湾平均海面に設定することが困難であり、中城湾平均海面を標高の基準として使用している。測量範囲は、沖縄検潮所の近傍と沖縄検潮所から西側に離れた海域の計2ヶ所に設定した。臨

時検潮所は、沖縄検潮所から離れた西側の測量範囲に1地点設けた。測量範囲と臨時検潮所の位置を、図-14に示す。

(2) 最低水面モデル

中城湾港の最低水面モデルを図-15に示す。平均水面の標高は0.136m, Z_0 は1.20m, 格子間隔は緯度方向1分, 経度方向1.5分である。

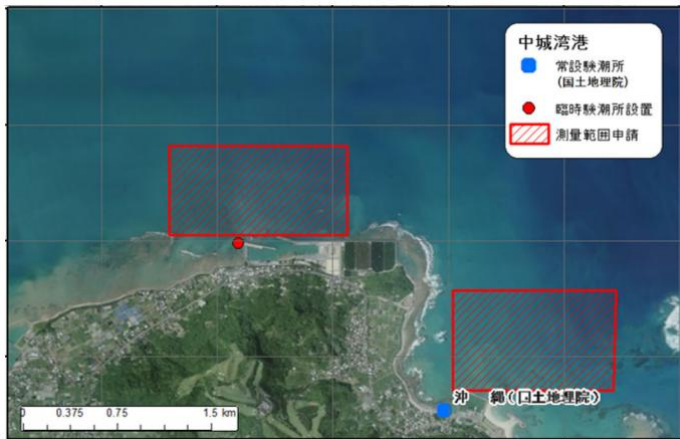


図-14 中城湾港の測量範囲と臨時検潮所（Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Communityを加工）

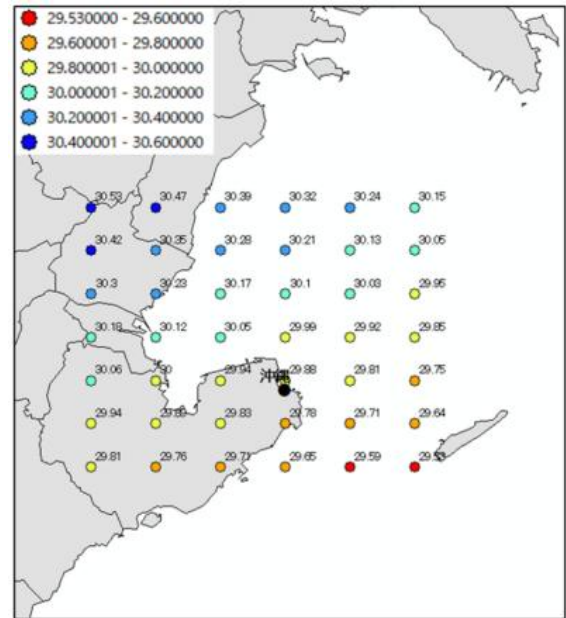


図-15 中城湾港の最低水面モデル

(3) 臨時検潮所による潮位観測

2024年1月16日～1月21日に、臨時検潮所を設置した。観測期間中の6時間に5分間隔で同時検潮を実施し、水圧式検潮器の記録値から副標の読み値を算出するための線形回帰分析を行った。図-16は、2024年1月18日～1月19日の常設検潮所と臨時検潮所における潮位観測結果を、最低水面基準で表したものである。

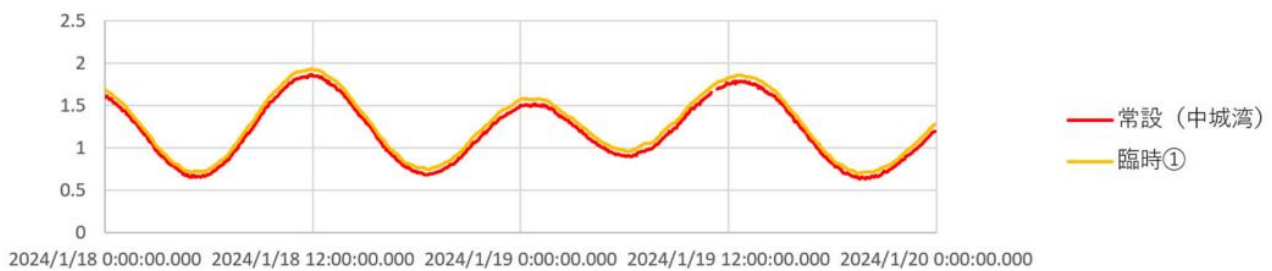


図-16 中城湾港の潮位観測結果

(4) マルチビーム測深

2024年1月18日～1月19日に、中城湾港でマルチビーム測深を実施した。中城湾港の測線計画を図-17に示す。測量範囲は2ヶ所あり、西側の測量範囲1は広さが1km×0.5km, 水深が約15mである。東側の測量範囲2は広さが1km×0.65km, 水深が約10mである。スワス幅を45度, オーバーラップ率を30%に設定するため, 測線間隔は測量範囲1で25m, 測量範囲2で20mとした。ただし, 測量範囲の一部は水深が浅いため, 測量範囲1の一部に測線間隔12.5mの補助測線, 測量範囲2の一部に測線間隔10mの補助測線をそれぞれ設けた。

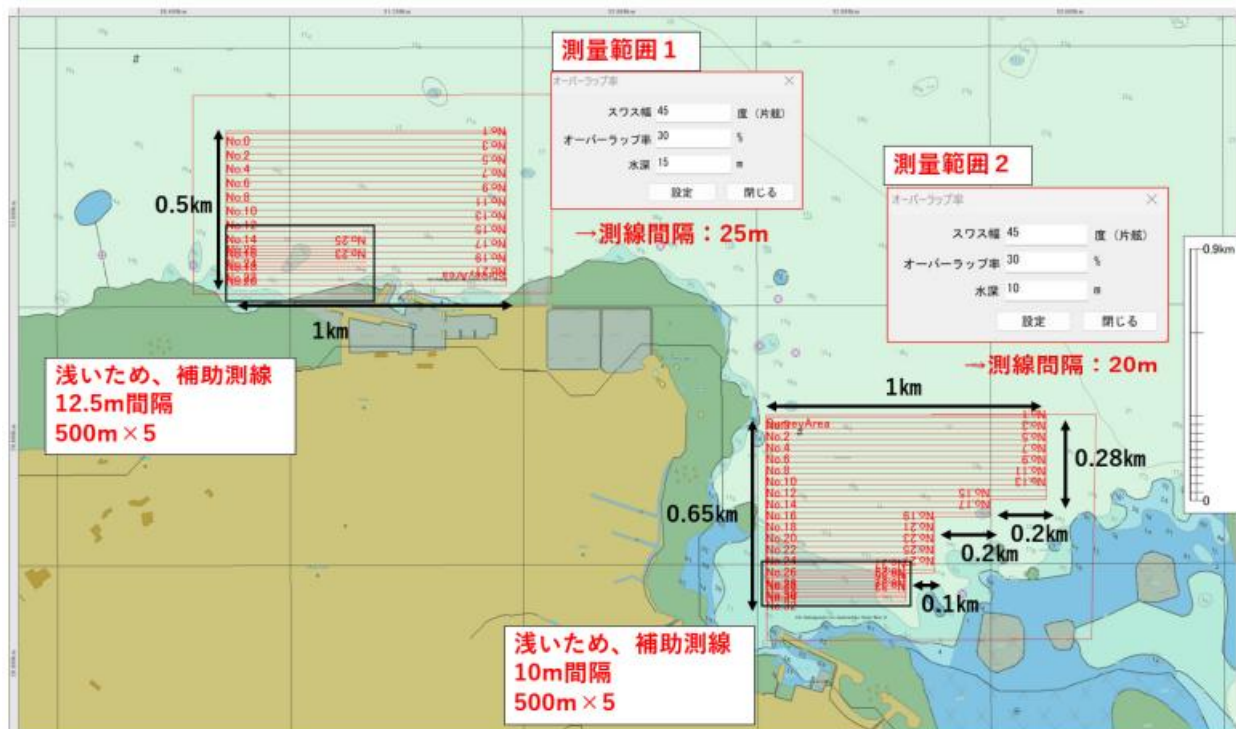


図-17 中城湾港の測線計画（海上保安庁航海用電子海図 JP54DJNV を加工）

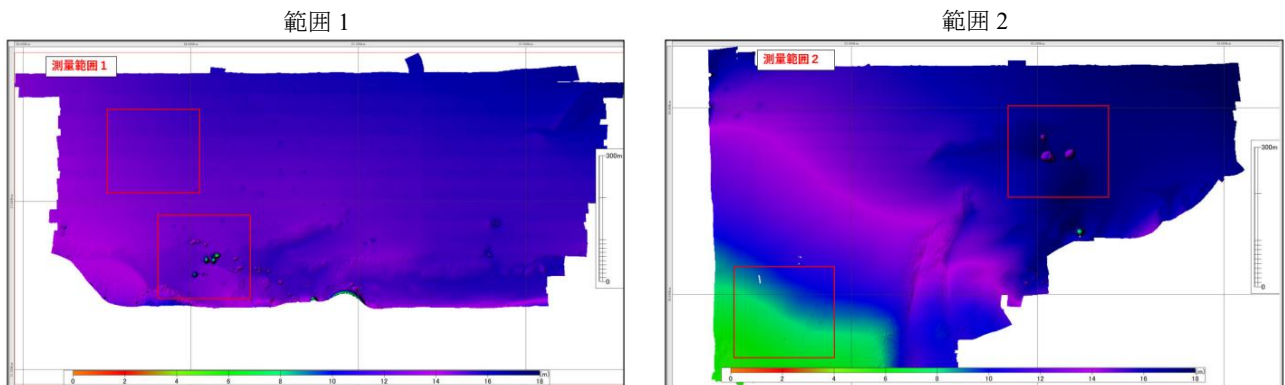


図-18 中城湾港のマルチビーム測深の結果

GNSS 測位によるマルチビーム測深の結果を、図-18 に示す。従来潮位補正との比較は、測量範囲 1 と測量範囲 2 のそれぞれで平坦な海底面と傾斜のある海底面を 1 ヶ所ずつ選んで実施した。従来潮位補正との比較を行った海域は広さが約 0.2km×0.2km であり、図中の赤枠で示すとおりである。

GNSS 測位と従来潮位補正の比較結果を、表-6 に示す。表中の数字は GNSS 測位と従来潮位補正の差であり、負の数字は GNSS 測位が従来潮位補正よりも水深が深いことを表す。また、カッコ内の数字は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の標準偏差を表す。従来潮位補正に使用した潮位観測結果は、常設検潮所と臨時検潮所の 2 種類ある。

表-6 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1平坦	範囲1傾斜	範囲2平坦	範囲2傾斜
格子数	40401	40401	40401	40401
常設検潮	-0.114m (0.030m)	-0.102m (0.137m)	-0.174m (0.026m)	-0.140m (0.026m)
臨時検潮	-0.192m (0.032m)	-0.184m (0.137m)	-0.249m (0.025m)	-0.217m (0.026m)

(5) 考察

表-6 が示すとおり、常設検潮所の従来潮位補正と GNSS 測位の間には、 -0.17m ～ -0.10m の差がある。また、常設検潮所と臨時検潮所の計測結果を比較すると、臨時検潮所における GNSS 測位と従来潮位補正の差は、常設検潮所における差よりも 0.07m ～ 0.08m 大きい。なお、平坦な海底面と傾斜のある海底面の間では、GNSS 測位と従来潮位補正の差に顕著な違いは見られない。

従来潮位補正よりも GNSS 測位の水深が深くなった要因として、潮位観測で利用した最低水面と GNSS 測位で利用した最低水面の高さが一致していない可能性が考えられる。GNSS 測位で利用した最低水面が、近年の平均水面の上昇を反映して潮位観測で利用した最低水面よりも高い位置にあれば、GNSS 測位による水深の方が深くなる可能性がある。

2.4 敦賀港における現地試験

(1) 現地試験場所の概況

敦賀港が位置する敦賀湾は入り組んだ地形をしており、湾全体の南北方向（30km）と湾奥の東西方向（2km）で振動モードが異なるため、副振動が発生しやすい。測量範囲は、湾奥の東側と西側にそれぞれ1ヶ所設定した。また、測量範囲の近傍に計3ヶ所の臨時検潮所を設けた。測量範囲と臨時検潮所の位置を、図-19 に示す。

(2) 最低水面モデル

敦賀港の最低水面モデルを図-20に示す。平均水面の標高は0.297m、 Z_0 は0.18m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。



図-19 敦賀港の測量範囲と臨時検潮所（Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Communityを加工）

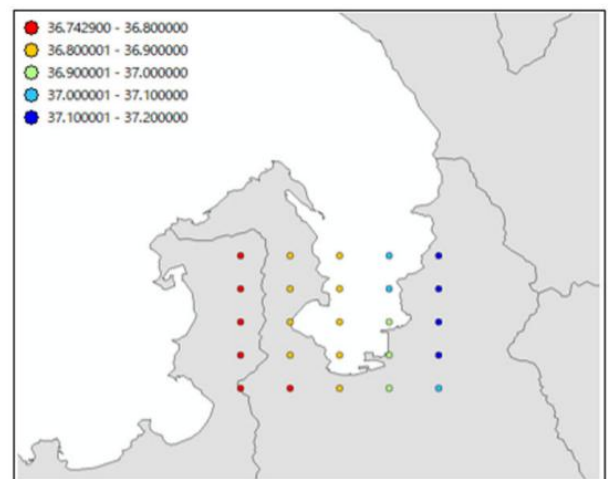


図-20 敦賀港の最低水面モデル

(3) 臨時検潮所における潮位観測

2024年1月26日～1月31日に、臨時検潮所を設置した。観測期間中の6時間に5分間隔で同時検潮を実施し、水圧式検潮器の記録値から副標の読み値を算出するための線形回帰分析を行った。図-21は、2024年1月26日～1月31日の常設検潮所と臨時検潮所における潮位観測結果を、最低水面基準で表したものである。

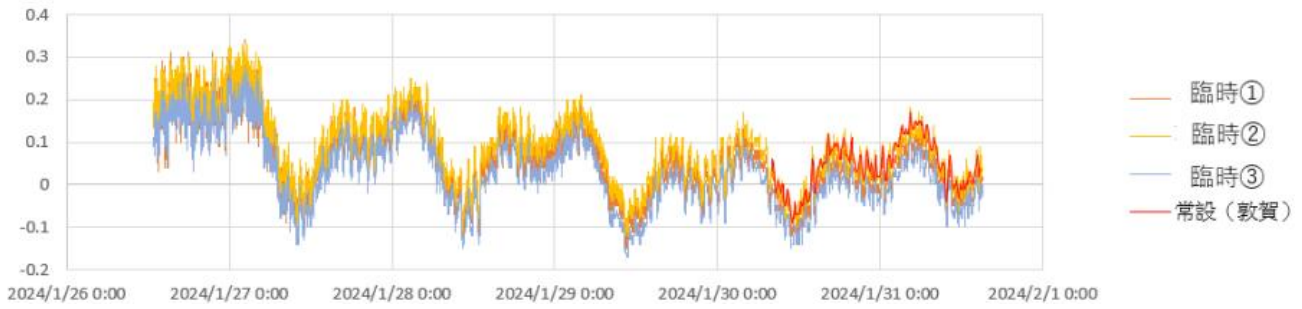


図-21 敦賀港の潮位観測結果

(4) マルチビーム測深

2024年1月30日～1月31日に、敦賀港でマルチビーム測深を実施した。敦賀港の測線計画を図-22に示す。測量範囲は2ヶ所あり、東側の測量範囲1は広さが0.75km×0.68km、水深が約12mである。西側の測量範囲2は広さが1km×0.54km、水深が約17mである。スワス幅を45度、オーバーラップ率を20%に設定するため、測線間隔は測量範囲1で20m、測量範囲2で30mとした。



図-22 敦賀港の測線計画（海上保安庁航海用電子海図 JP54P6S0 を加工）

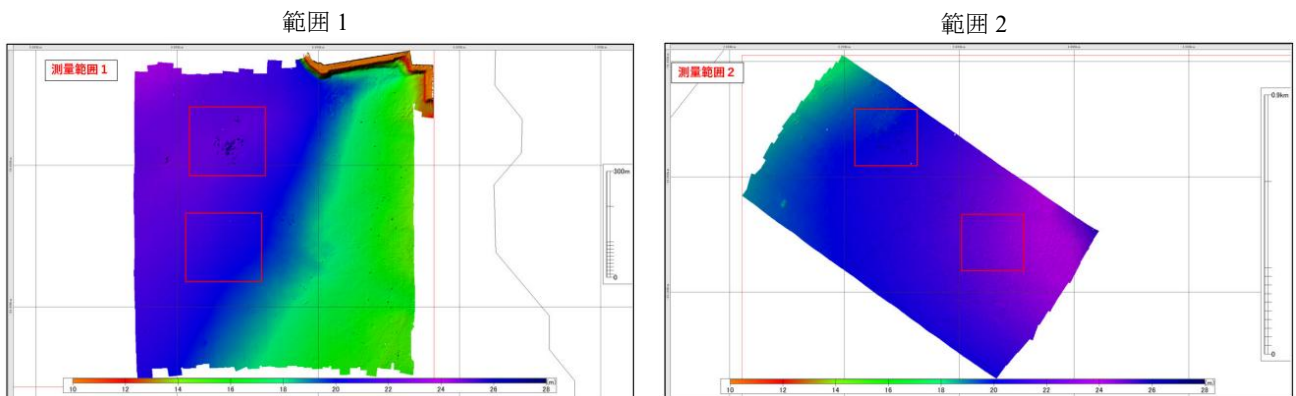


図-23 敦賀港のマルチビーム測深の結果

表-7 GNSS 測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1平坦	範囲1傾斜	範囲2平坦	範囲2傾斜
格子数	40400	40400	40401	40397
常設検潮	0.064m (0.021m)	0.061m (0.020m)	0.038m (0.012m)	0.050m (0.011m)
臨時検潮1	0.063m (0.020m)	0.058m (0.022m)	0.048m (0.011m)	0.059m (0.011m)
臨時検潮2	0.094m (0.022m)	0.089m (0.021m)	0.077m (0.011m)	0.084m (0.013m)
臨時検潮3	0.127m (0.022m)	0.122m (0.021m)	0.104m (0.012m)	0.112m (0.013m)

GNSS 測位によるマルチビーム測深の結果を、図-23 に示す。従来潮位補正との比較は、測量範囲1と測量範囲2のそれぞれで平坦な海底面と傾斜のある海底面を1ヶ所ずつ選んで実施した。従来潮位補正との比較を行った海域は広さが約0.2km×0.2kmであり、図中の赤枠で示すとおりである。

GNSS 測位と従来潮位補正の比較結果を、表-7 に示す。表中の数字はGNSS 測位と従来潮位補正の差であり、負の数字はGNSS 測位が従来潮位補正よりも水深が深いことを表す。また、カッコ内の数字は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の標準偏差を表す。従来潮位補正に使用した潮位観測結果は、常設検潮所と臨時検潮所（3ヶ所）の計4種類ある。

(5) 考察

表-7 が示すとおり、平坦な海底面と傾斜のある海底面の間では、従来潮位補正とGNSS 測位の差に顕著な違いは見られない。また、常設検潮所と臨時検潮所の計測結果を比較すると、臨時検潮所2及び3における従来潮位補正とGNSS 測位の差は、常設検潮所における差よりも0.03m～0.06m大きい。ただし、臨時検潮所1においては、従来潮位補正とGNSS 測位の差は、常設検潮所における差と同程度である。

2.5 境港における現地試験

(1) 現地試験場所の概況

境港は、港から少し離れた位置に常設検潮所が設置されている。測量範囲は、沖防波堤の内側と外側の海域にそれぞれ設定した。臨時検潮所は、常設検潮所よりも測量範囲に近い場所に1ヶ所設けた。測量範囲と臨時検潮所の位置を、図-24 に示す。

(2) 最低水面モデル

境港の最低水面モデルを図-25 に示す。平均水面の標高は0.330m、 Z_0 は0.17m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。



図-24 境港の測量範囲と臨時検潮所（Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community を加工）

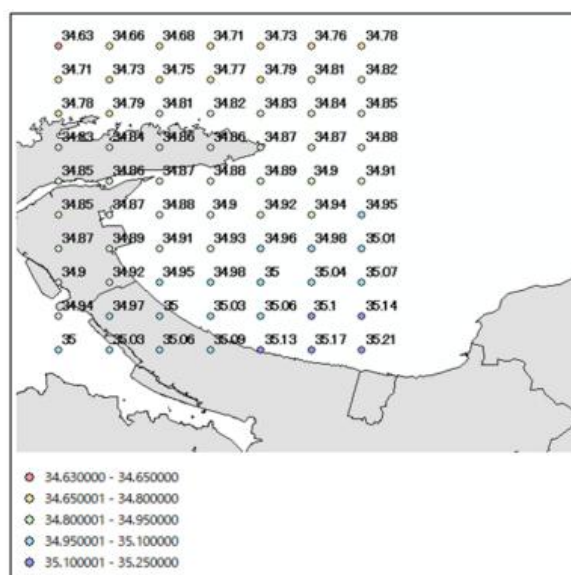


図-25 境港の最低水面モデル



図-26 境港の潮位観測結果

(3) 臨時検潮所における潮位観測

2024年1月29日～2月1日に、臨時検潮所を設置した。観測期間中の6時間に5分間隔で同時検潮を実施し、水圧式検潮器の記録値から副標の読み値を算出するための線形回帰分析を行った。図-26は、2024年1月29日～2月1日の常設検潮所と臨時検潮所における潮位観測結果を、最低水面基準で表したものである。

(4) マルチビーム測深

2024年1月30日～1月31日に、境港でマルチビーム測深を実施した。境港の測線計画を図-27に示す。測量範囲は2ヶ所あり、港外の測量範囲1は広さが1km×0.5km、水深が約10mである。港内の測量範囲2は広さが1km×0.5km、水深が約10mである。スワス幅を45度、オーバーラップ率を30%に設定するため、測線間隔は15mとした。

GNSS測位によるマルチビーム測深の結果を、図-28に示す。従来潮位補正との比較は、測量範囲1と測量範囲2のそれぞれで平坦な海底面と傾斜のある海底面を1ヶ所ずつ選んで実施した。従来潮位補正との比較を行った海域は広さが約0.2km×0.2kmであり、図中の赤枠で示すとおりである。

GNSS測位と従来潮位補正の比較結果を、表-8に示す。表中の数字はGNSS測位と従来潮位補正の差であり、負の数字はGNSS測位が従来潮位補正よりも水深が深いことを表す。また、カッコ内の数字は、GNSS測位と従来潮位補正の差の標準偏差を表す。従来潮位補正に使用した潮位観測結果は、常設検潮所と臨時検潮所の2種類ある。

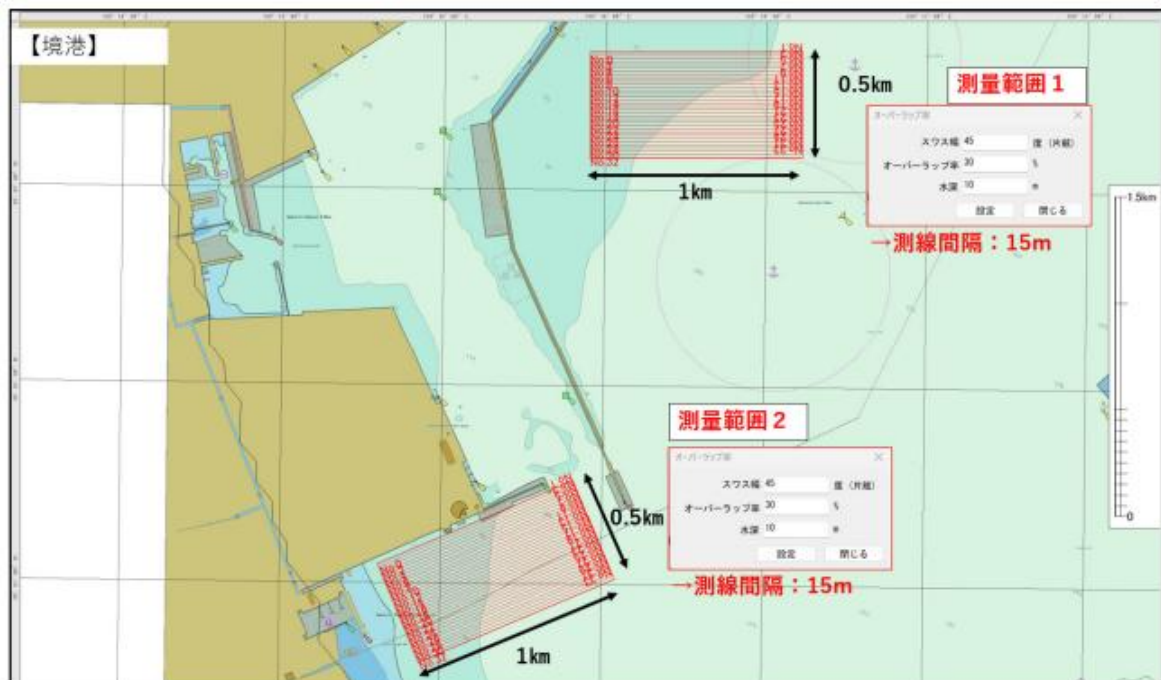


図-27 境港の測線計画（海上保安庁航海用電子海図 JP54P6RK 及び JP54P6RL を加工）

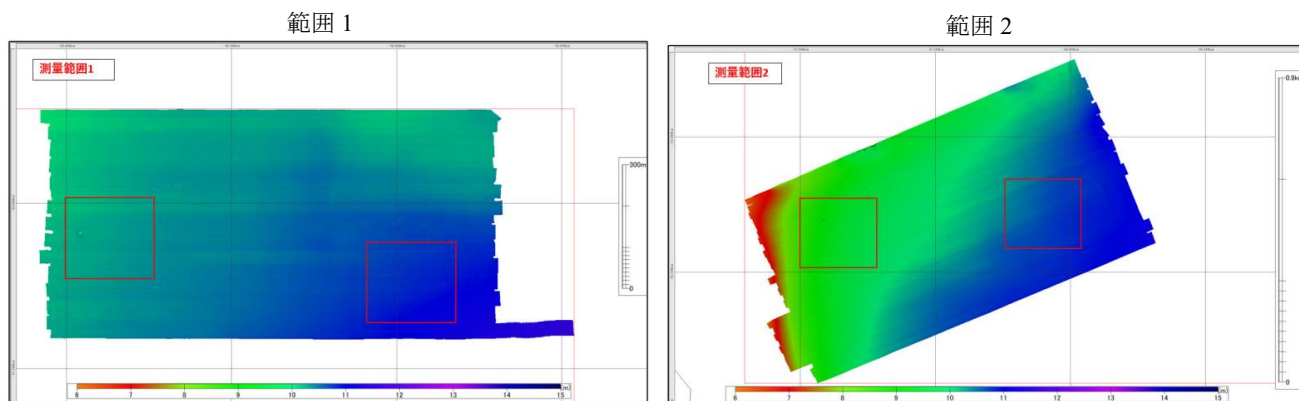


図-28 境港のマルチビーム測深の結果

表-8 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1平坦	範囲1傾斜	範囲2平坦	範囲2傾斜
格子数	40401	40401	40401	40401
常設検潮	-0.009m (0.024m)	-0.015m (0.037m)	0.003m (0.025m)	-0.010m (0.016m)
臨時検潮	0.052m (0.022m)	0.049m (0.026m)	0.048m (0.019m)	0.045m (0.019m)

(5) 考察

表-8 が示すとおり，平坦な海底面と傾斜のある海底面の間では，従来潮位補正と GNSS 測位の差に顕著な違いは見られない。また，常設検潮所と臨時検潮所の計測結果を比較すると，臨時検潮所における従来潮位補正と GNSS 測位の差は，常設検潮所における差よりも 0.03m～0.05m 大きい。

2.6 備讃瀬戸航路における現地試験

備讃瀬戸航路では，2023 年度と 2024 年度の 2 回現地試験を実施した。

(1) 2023 年度の現地試験

a) 現地試験場所の概況

備讃瀬戸航路は，東西方向に複数の Z_0 区分帯が設定されている。図-29 に示すとおり， Z_0 が 1.7m と 1.8m の海域をまたぐように，北側と南側の 2 ヶ所に測量範囲を設定した。また，臨時検潮所は， Z_0 が 1.7m と 1.8m の海域にそれぞれ 1 ヶ所設けた。

b) 最低水面モデル

備讃瀬戸航路の最低水面モデルを図-30 に示す。平均水面の標高は 0.177m， Z_0 は Z_0 区分図に従い 1.7m または 1.8m，格子間隔は緯度方向 0.1 分，経度方向 0.15 分である。

c) 臨時検潮所における潮位観測

2024 年 1 月 15 日～1 月 18 日に，臨時検潮所を設置した。観測期間中の 6 時間に 5 分間隔で同時検潮を実施し，水圧式検潮器の記録値から副標の読み値を算出するための線形回帰分析を行った。図-31 は，2024 年 1 月 15 日～1 月 18 日の常設検潮所と臨時検潮所における潮位観測結果を，最低水面基準で表したものである。

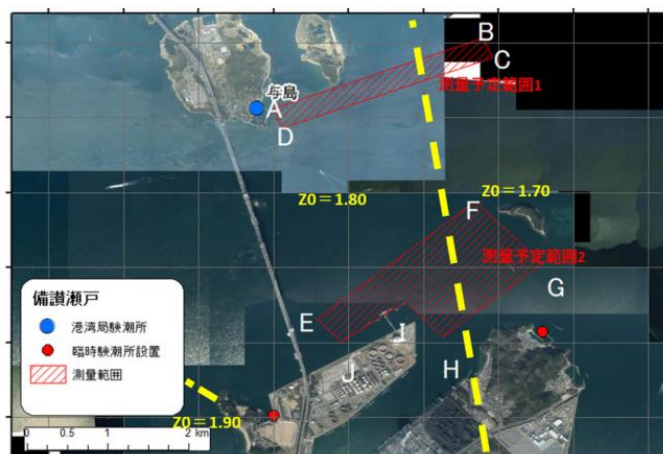


図-29 備讃瀬戸航路の測量範囲と臨時検潮所 (Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community を加工)

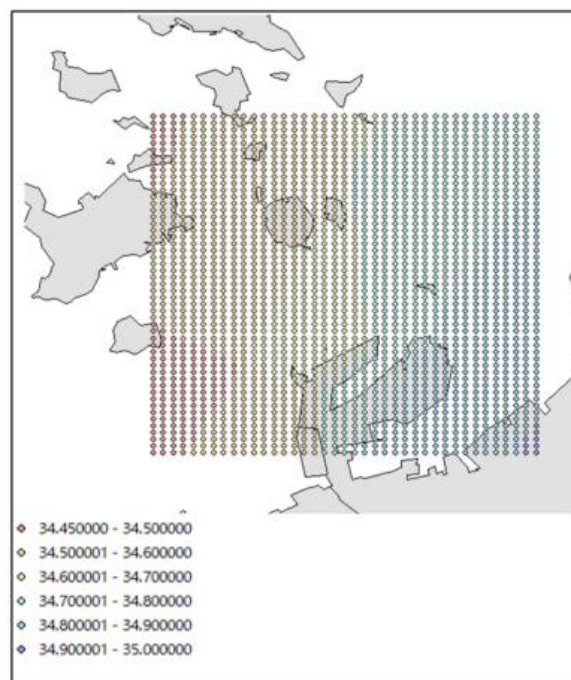


図-30 備讃瀬戸航路の最低水面モデル (2023 年度)

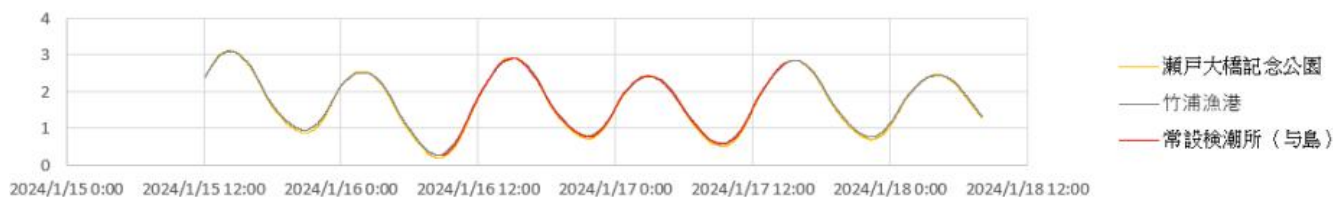


図-31 備讃瀬戸航路の潮位観測結果

d) マルチビーム測深

2024 年 1 月 16 日～1 月 17 日に、備讃瀬戸航路でマルチビーム測深を実施した。備讃瀬戸航路の測線計画を図-32 に示す。測量範囲は 2 ヶ所あり、北側の測量範囲 1 は広さが $1.8\text{km} \times 0.15\text{km}$ 、水深が約 30m である。南側の測量範囲 2 は広さが $2\text{km} \times 0.34\text{km}$ 、水深が約 30m である。スワ幅を 45 度、オーバーラップ率を 30% に設定するため、測線間隔は 50m とした。ただし、一部水深が浅い場所があるため、測量範囲 1 では測線間隔 25m の補助測線を、また、測量範囲 2 では測線間隔 20m の補助測線を、水深が浅い場所に設定した。

GNSS 測位によるマルチビーム測深の結果を、図-33 に示す。従来潮位補正との比較は、測量範囲 1 と測量範囲 2 のそれぞれで平坦な海底面と傾斜のある海底面を 1 ヶ所ずつ選んで実施した。従来潮位補正との比較を行った海域は広さが約 $0.2\text{km} \times 0.2\text{km}$ であり、図中の赤枠で示すとおりである。

GNSS 測位と従来潮位補正の比較結果を、表-9 に示す。表中の数字は GNSS 測位と従来潮位補正の差であり、負の数字は GNSS 測位が従来潮位補正よりも水深が深いことを表す。また、カッコ内の数字は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の標準偏差を表す。従来潮位補正に使用した潮位観測結果は、常設検潮所と臨時検潮所 (2 ヶ所) の計 3 種類ある。

e) 考察

表-9 が示すとおり、従来潮位補正と GNSS 測位の差は、平坦な海底面よりも傾斜のある海底面の方が大きくなる傾向が見られる。ただし、平坦な海底面の海域は Z_0 が 1.7m の海域に位置し、傾斜のある海底面の海域は Z_0 が 1.8m の海域に位置するため、従来潮位補正と GNSS 測位の差が、平面と傾斜の差によるものか Z_0 の区分帯によるものかは不明である。また、従来潮位補正と GNSS 測位の差について、常設検潮所と臨時検潮所の間で顕著な違いは見られない。

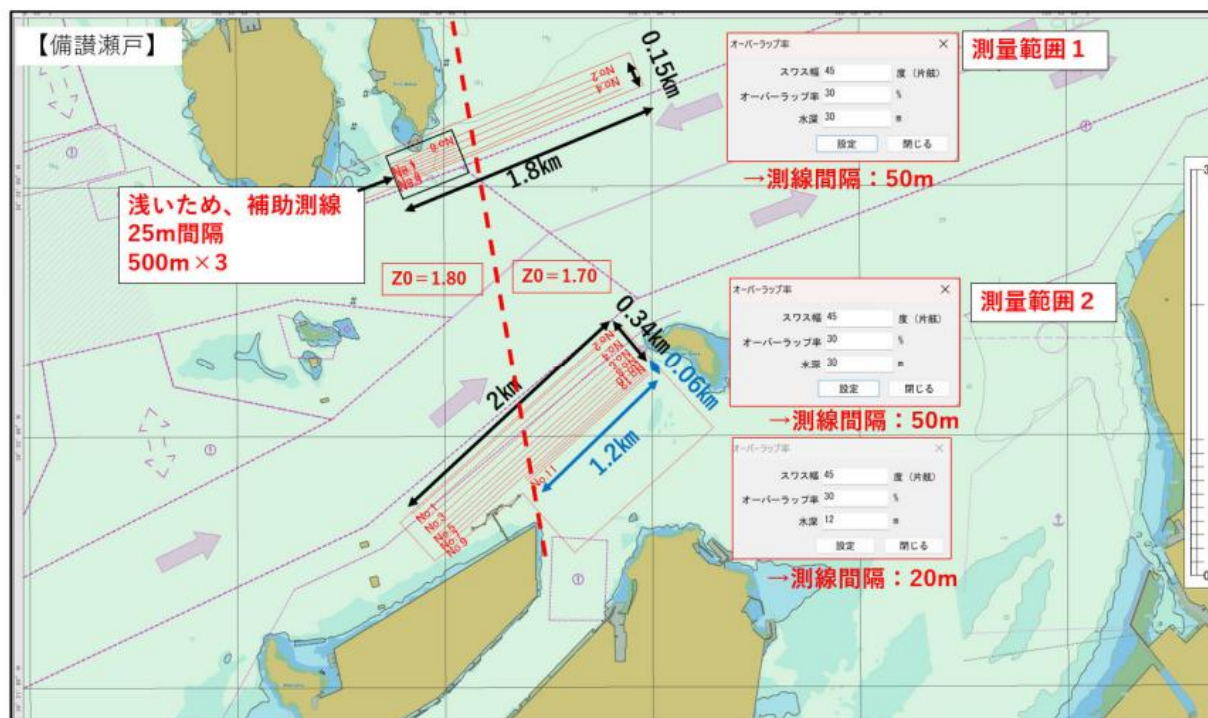


図-32 備讃瀬戸航路の測線計画（2023 年度）（海上保安庁航海用電子海図 JP54NM17 を加工）

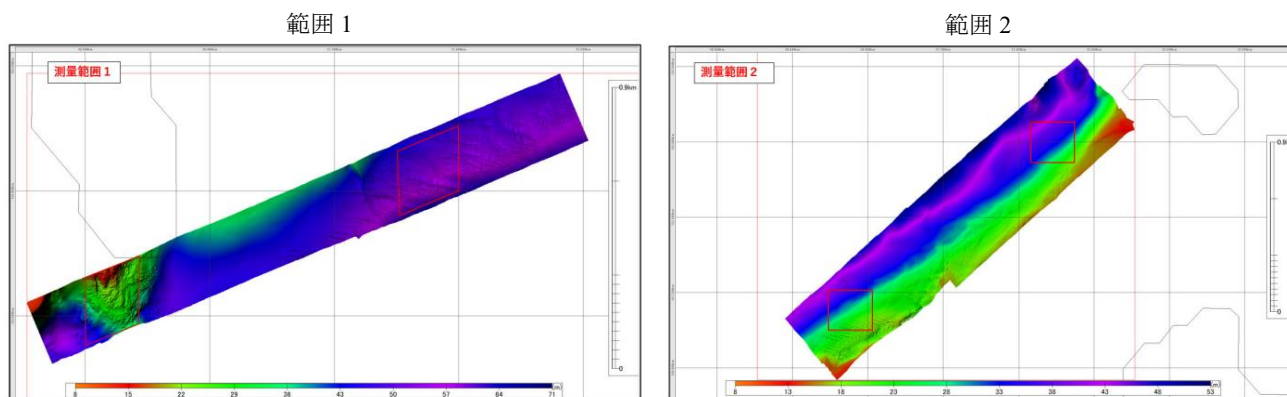


図-33 備讃瀬戸航路のマルチビーム測深の結果（2023 年度）

表-9 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1平坦	範囲1傾斜	範囲2平坦	範囲2傾斜
格子数	40179	40301	40401	40401
常設検潮	0.039m (0.032m)	0.109m (0.035m)	-0.033m (0.025m)	-0.108m (0.020m)
臨時検潮1	0.086m (0.038m)	0.160m (0.032m)	0.024m (0.026m)	-0.052m (0.019m)
臨時検潮2	0.008m (0.032m)	0.066m (0.038m)	-0.056m (0.025m)	-0.137m (0.025m)

(2) 2024 年度の現地試験

a) 最低水面モデル

備讃瀬戸航路の最低水面モデルを図-34 に示す。平均水面の標高は 0.200m, Z_0 は Z_0 区分図に従い 1.7m または 1.8m, 格子間隔は緯度方向 0.1 分, 経度方向 0.15 分である。

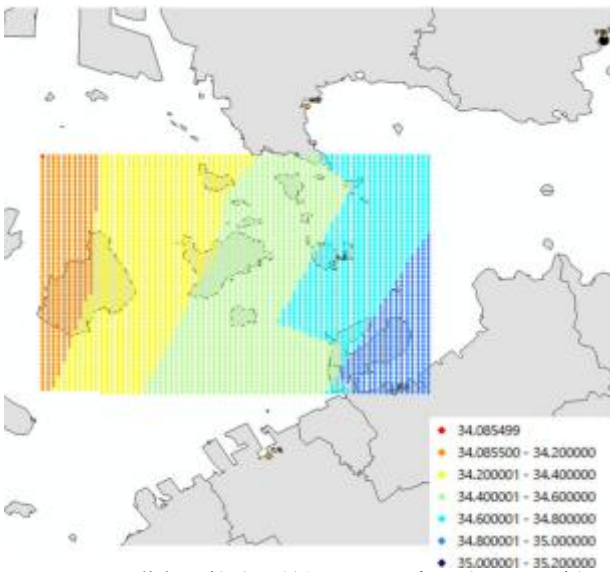


図-34 備讃瀬戸航路の最低水面モデル（2024年度）

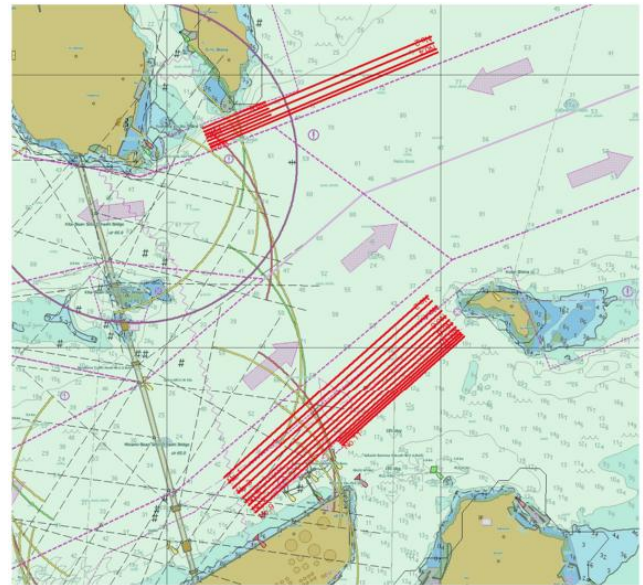


図-35 備讃瀬戸航路の測線計画（2024年度）（海上保安庁航海用電子海図 JP54NM17 を加工）

b) マルチビーム測深

2025年2月13日～2月14日に、備讃瀬戸航路でマルチビーム測深を実施した。備讃瀬戸航路の測線計画を図-35に示す。測量範囲は、備讃瀬戸航路の北側と南側の2ヶ所に設定した。

GNSS測位と従来潮位補正の差を、図-36及び図-37に示す。図-36がGNSS測位（リアルタイム処理）、図-37がGNSS測位（後処理）である。

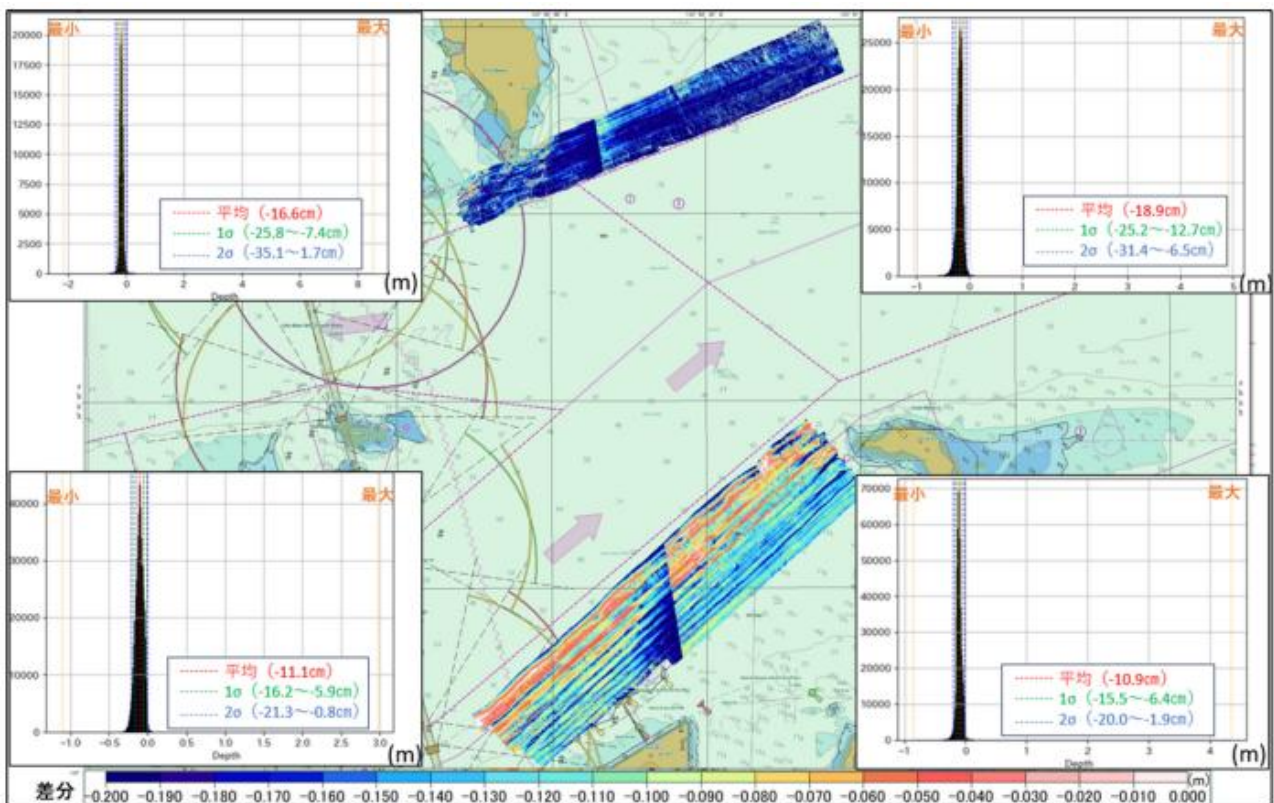


図-36 GNSS測位（リアルタイム処理）と従来潮位補正の差（備讃瀬戸航路）（海上保安庁航海用電子海図 JP54NM17 を加工）

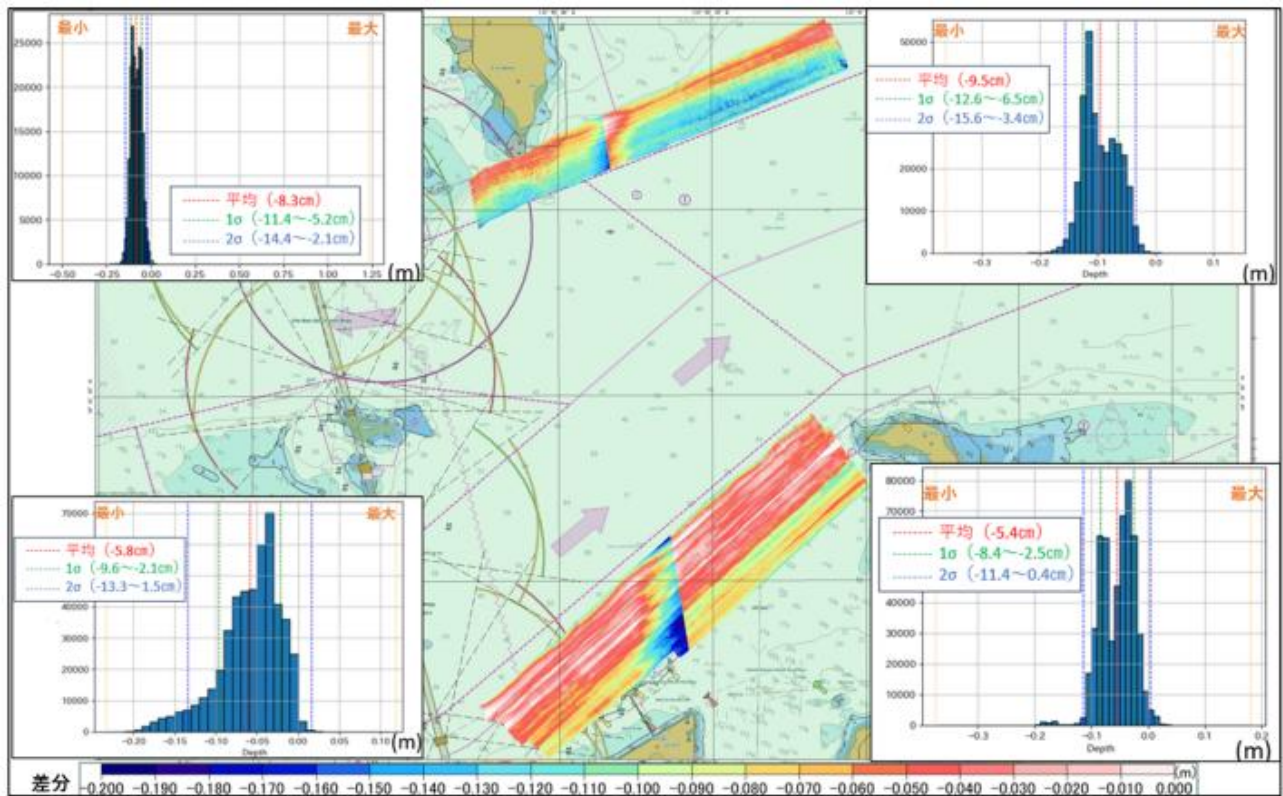


図-37 GNSS 測位（後処理）と従来潮位補正の差（備讃瀬戸航路）（海上保安庁航海用電子海図 JP54NM17 を加工）

表-10 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1西側	範囲1東側	範囲2西側	範囲2東側
リアルタイム	-0.16m (0.09m)	-0.18m (0.06m)	-0.11m (0.05m)	-0.10m (0.04m)
格子数	222847	310742	483402	512045
後処理	-0.08m (0.03m)	-0.09m (0.03m)	-0.05m (0.03m)	-0.05m (0.02m)
格子数	217431	303583	483324	511773

図-36 及び図-37 で示す差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。また、測量範囲は、 Z_0 が1.7mの海域（東側）と1.8mの海域（西側）があるので、測量範囲1の東側と西側、また、測量範囲2の東側と西側のそれぞれについて、差のヒストグラムを作成した。

表-10 は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の平均値を整理したものであり、カッコ内の数字は差の標準偏差を表す。GNSS 測位と従来潮位補正の差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。また、測量範囲内の1m四方の格子数も記載している。後処理は手作業でノイズ除去を実施するため、リアルタイム処理よりも集計対象の格子数が少ない場合がある。

c) 考察

図-36 及び図-37 が示すとおり、差の大きい青色の部分は、 Z_0 が1.7mから1.8mに変わる境界線付近に見られる。また、表-10 が示すとおり、GNSS 測位と従来潮位補正の差は、後処理よりもリアルタイム処理の方が大きくなる傾向がある。

2.7 中山水道航路における現地試験

(1) 現地試験場所の概況及び最低水面モデル

中山水道航路が位置する伊勢湾は、複数の Z_0 区分帯が設置されている。測量範囲と最寄りの常設検潮所（三河検潮所）の位置を図-38 に示す。

中山水道航路の最低水面モデルを図-39 に示す。中山水道航路が位置する伊勢湾には複数の常設検潮所が設置されてい

るため、各検潮所において平均水面の標高を算出し、伊勢湾の平均水面の標高を TIN 補間で算出した。平均水面の標高は単一の数値ではなく、0.20m～0.24m である。Z₀は Z₀区分図に従い、1.20m・1.30m・1.35m・1.40m である。格子間隔は緯度方向 0.1 分、経度方向 0.15 分である。



図-38 中山水道航路の測量範囲と常設検潮所（海上保安庁航海用電子海図 JP44NVQ2 及び JP44NVQ4 を加工）

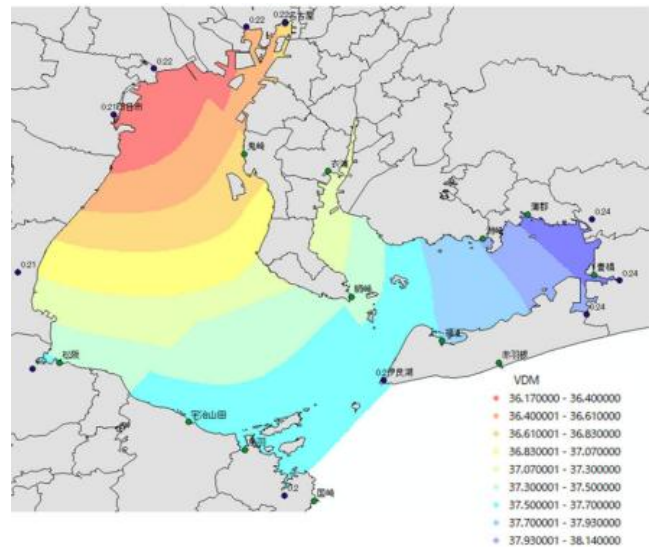


図-39 中山水道航路の最低水面モデル

(2) マルチビーム測深

2025 年 4 月 22 日に、中山水道航路でマルチビーム測深を実施した。中山水道航路の測線計画を図-40 に示す。測量範囲は広さが 1.1km×1.0km、水深が 10m～20m である。スワ幅は 120 度～140 度、オーバーラップ率は 50%，測線間隔は 35m～45m で、測線本数を 24 本とした。



図-40 中山水道航路の測線計画（海上保安庁航海用電子海図 JP44NVQ2 及び JP44NVQ4 を加工）

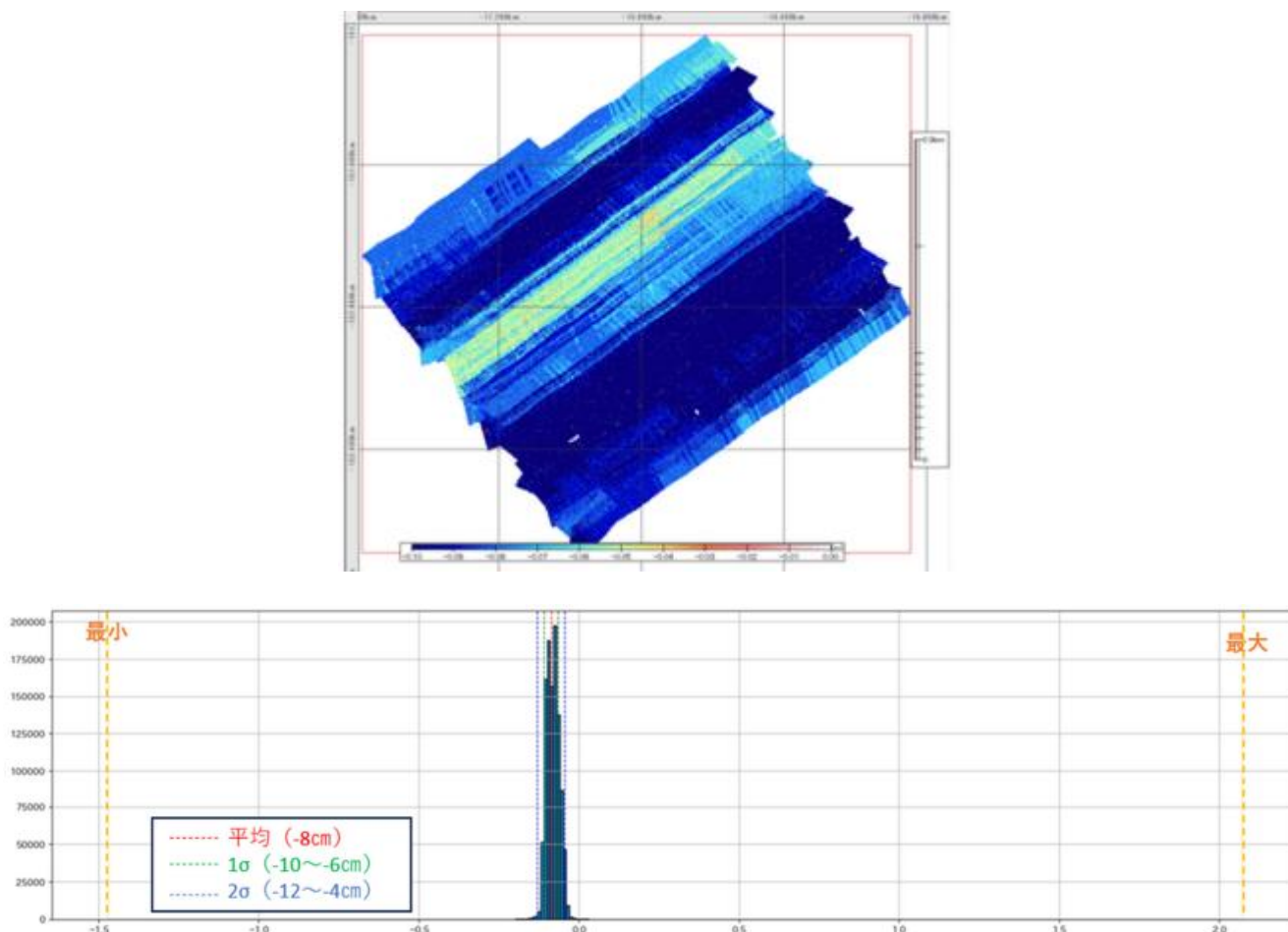


図-41 GNSS 測位（後処理）と従来潮位補正の差（中山水道航路）

表-11 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

項目		数値
後処理	差	-0.08m
	標準偏差	0.02m
	格子数	1161975

GNSS 測位と従来潮位補正の差を、図-41 に示す。差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。

表-11 は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の平均値及び差の標準偏差を整理したものである。GNSS 測位と従来潮位補正の差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。また、測量範囲内の集計対象となる、1m 四方の格子数も記載している。

なお、GNSS 測位を利用した潮位補正のリアルタイム処理は、マルチビーム測深の結果にサイドローブの影響と考えられる顕著なノイズが見られたため、本資料では結果の記載を省略する。

(3) 考察

図-40 及び図-41 が示すとおり、GNSS 測位と従来潮位補正の差は、特定の測線に沿って小さくなる傾向が見られる。また、測量範囲は北東から南西に向かって水深が深くなる海底地形であるが、GNSS 測位と従来潮位補正の差は、水深の大小とは関係していないものと考えられる。

2.8 竹富南航路における現地試験

(1) 現地試験場所の概況及び最低水面モデル

竹富南航路は離島に位置するため、標高の基準を東京湾平均海面に設定することが困難であり、石垣港平均海面を標高の基準として使用している。竹富南航路の最低水面モデルを図-42 に示す。平均水面の標高は 0.147m, Z_0 は 1.07m, 格子間隔は緯度方向 1 分, 経度方向 1.5 分である。

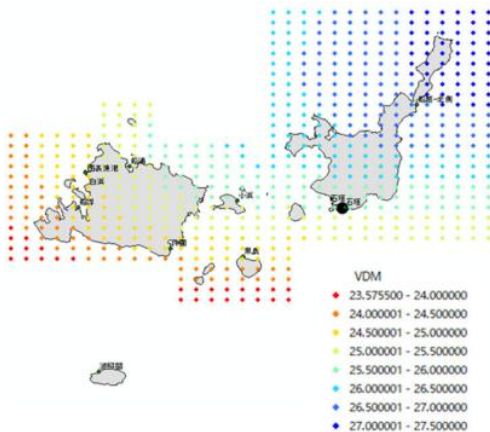


図-42 竹富南航路の最低水面モデル

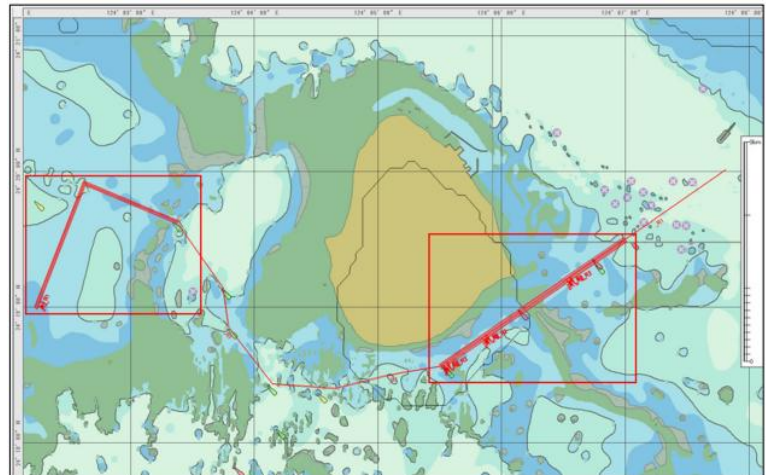


図-43 竹富南航路の測線計画（海上保安庁航海用電子海図 JP44B5JG 及び JP44BFC0 を加工）

(2) マルチビーム測深

2025 年 4 月 28 日及び 4 月 30 日に、竹富南航路でマルチビーム測深を実施した。竹富南航路の測線計画を図-43 に示す。測量範囲は竹富島の東側に 1 ヶ所、西側に 2 ヶ所設定した。図-43 では、西側の赤枠の中で測線が L 字に屈曲しているが、直線部がそれぞれ測量範囲 2 及び測量範囲 3 に相当する。東側の測量範囲 1 は、航路幅が 70m 程度あり、測線間隔 10m で測線本数を 9 本に設定した。西側の測量範囲 2 及び測量範囲 3 は、航路幅が 50m 程度あり、測線間隔 10m で測線本数を 6 本に設定した。

GNSS 測位と従来潮位補正の差を、図-44 及び図-45 に示す。図-44 が GNSS 測位（リアルタイム処理）、図-45 が GNSS 測位（後処理）である。差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。

表-12 は、GNSS 測位と従来潮位補正の差の平均値を整理したものであり、カッコ内の数字は差の標準偏差を表す。GNSS 測位と従来潮位補正の差が負の数字の時、GNSS 測位は従来潮位補正よりも水深が深い。また、測量範囲内の 1m 四方の格子数も記載している。

(3) 考察

表-12 が示すとおり、GNSS 測位と従来潮位補正の差は、リアルタイム処理よりも後処理の方が大きくなる傾向がある。

表-12 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果

	範囲1	範囲2	範囲3
リアルタイム	-0.07m (0.04m)	-0.02m (0.07m)	-0.01m (0.05m)
格子数	122604	93420	46861
後処理	-0.09m (0.02m)	-0.09m (0.02m)	-0.06m (0.03m)
格子数	122693	93499	46924

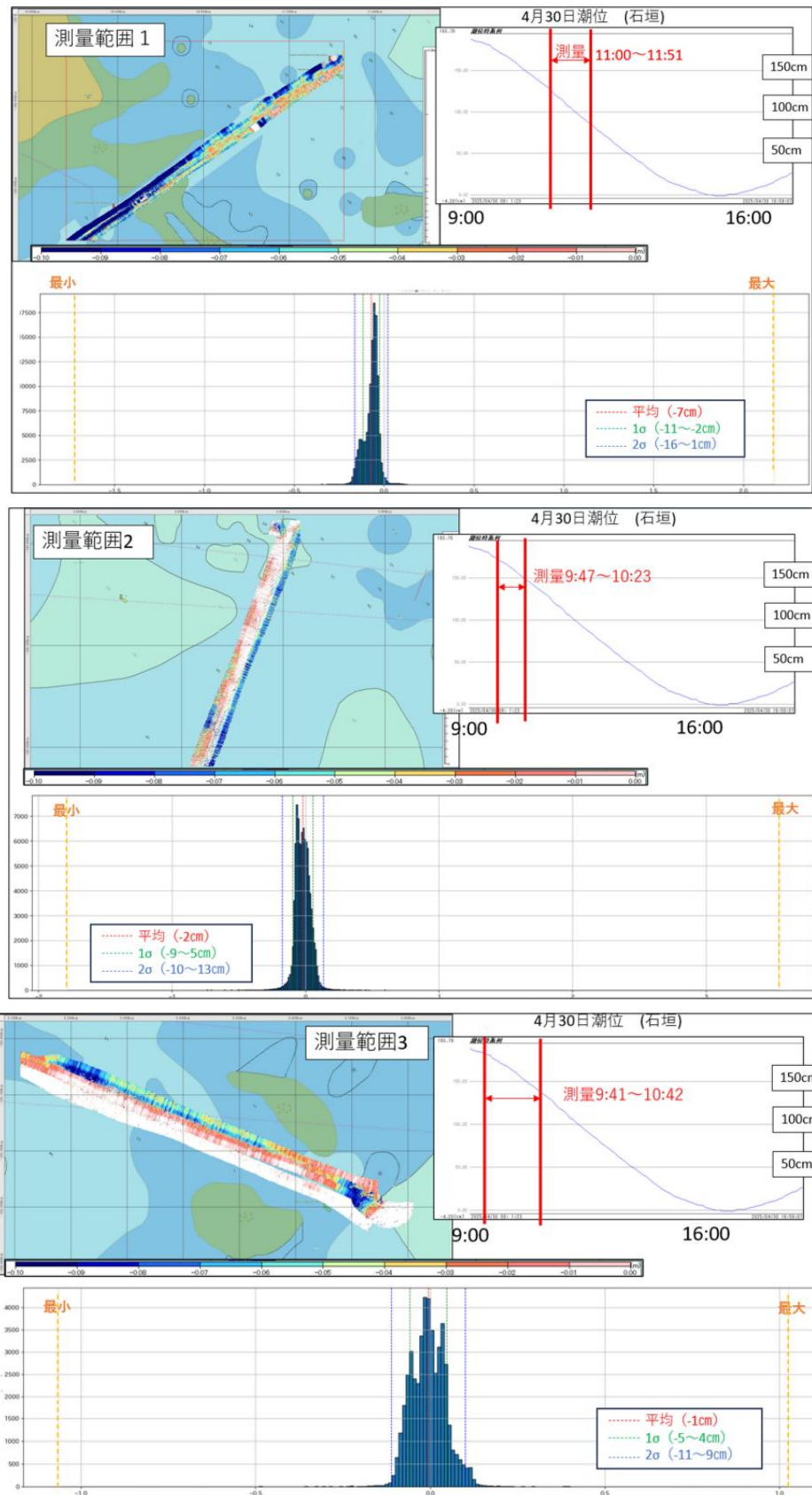


図-44 GNSS 測位（リアルタイム処理）と従来潮位補正の差（竹富南航路）（海上保安庁航海用電子海図 JP44B5JG 及び JP44BFC0 を加工）

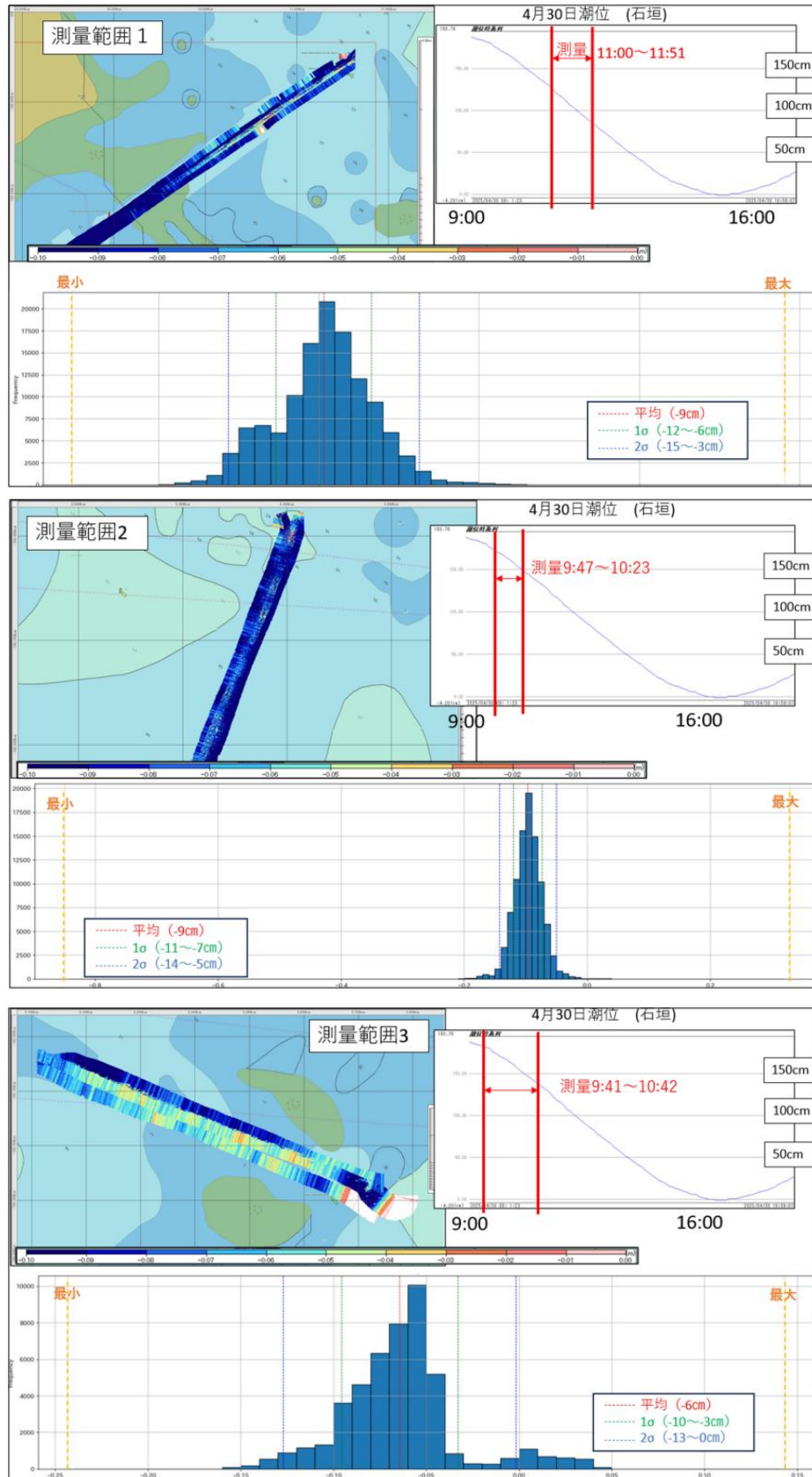


図-45 GNSS 測位（後処理）と従来潮位補正の差（竹富南航路）（海上保安庁航海用電子海図 JP44B5JG 及び JP44BFC0 を加工）

2.9 深浅測量を対象とした現地試験の結果のまとめ

深浅測量を対象とした現地試験の結果のまとめを、表-13及び表-14に示す。表-13が2023年度、表-14が2024年度の結果である。それぞれの表は、測量範囲に含まれる集計対象の1m四方の格子数、GNSS測位と従来潮位補正の差の平均値、差の標準偏差を集計したものである。差の平均値は、正の数字の時、GNSS測位が従来潮位補正よりも浅く、負の数字の時、GNSS測位が従来潮位補正よりも深いことを表している。

なお、表-13 については、常設検潮所における潮位観測を利用した潮位補正の結果のみを示しており、臨時検潮所の結果は記載を省略した。また、表-14 については、各セルの上段に GNSS 測位（リアルタイム処理）の結果、下段に GNSS 測位（後処理）の結果を表示している。中山水道航路は、マルチビーム測深の結果にサイドロープの影響と考えられる顕著なノイズが見られたため、GNSS 測位（リアルタイム処理）の結果の記載を省略し、「－」を記載した。

表-13 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果のまとめ（2023年度）

地点	測量範囲	格子数	差の平均(m)	差の標準偏差(m)
釜石	範囲1平坦	40401	－0.001	0.037
	範囲1傾斜	36367	0.014	0.146
	範囲2平坦	40401	－0.001	0.024
	範囲2傾斜	40392	0.049	0.246
中城湾	範囲1平坦	40401	－0.114	0.030
	範囲1傾斜	40401	－0.102	0.137
	範囲2平坦	40401	－0.174	0.026
	範囲2傾斜	40401	－0.140	0.026
敦賀	範囲1平坦	40400	0.064	0.021
	範囲1傾斜	40400	0.061	0.020
	範囲2平坦	40401	0.038	0.012
	範囲2傾斜	40397	0.050	0.011
境港	範囲1平坦	40401	－0.009	0.024
	範囲1傾斜	40401	－0.015	0.037
	範囲2平坦	40401	0.003	0.025
	範囲2傾斜	40401	－0.010	0.016
備讃瀬戸	範囲1平坦	40179	0.039	0.032
	範囲1傾斜	40301	0.109	0.035
	範囲2平坦	40401	－0.033	0.025
	範囲2傾斜	40401	－0.108	0.020

表-14 GNSS測位と従来潮位補正の比較結果のまとめ（2024年度）

地点	測量範囲	格子数	差の平均(m)	差の標準偏差(m)
備讃瀬戸	範囲1西	222847	－0.16	0.09
		217431	－0.08	0.03
	範囲1東	310742	－0.18	0.06
		303583	－0.09	0.03
	範囲2西	483402	－0.11	0.05
		483324	－0.05	0.03
	範囲2東	512045	－0.10	0.04
		511773	－0.05	0.02
中山水道		－	－	－
		1161975	－0.08	0.02
竹富南	範囲1	122604	－0.07	0.04
		122693	－0.09	0.02
	範囲2	93420	－0.02	0.07
		93499	－0.09	0.02
	範囲3	46861	－0.01	0.05
		46924	－0.06	0.03

表-13を見ると、釜石港・境港・備讃瀬戸航路では、GNSS測位と従来潮位補正の差は、平坦な海底面よりも傾斜のある海底面の方が大きい。また、2023年度の平坦な海底面と2024年度の結果を比較すると、GNSS測位と従来潮位補正の差は2024年度の方が大きい。2024年度は、平坦な場所も傾斜のある場所も存在する広い海底面を計測対象としているためと考えられる。さらに、表-14が示すとおり、GNSS測位と従来潮位補正の差は、備讃瀬戸航路では後処理よりもリアルタイム処理の方が大きい。竹富南航路では逆の結果となっている。本研究の結果だけでは、リアルタイム処理と後処理の精度の違いは不明である。

2023年度の中城湾港の結果を除けば、潮位観測を利用した従来の潮位補正とGNSS測位のマルチビーム測深の差は、概ね0.1m以内に収まっている。水路測量における測定又は調査の方法に関する告示（平成14年海上保安庁告示第102号）では、深さの測定の不確かさの限度を式(7)のとおり規定している¹⁵⁾。式(7)で、 d は水深（単位m）であり、最も高い精度を求められる特級の海域では、 a が0.25m、 b が0.0075と設定されている。

$$\sqrt{a^2 + (bd)^2} \quad \text{式(7)}$$

式(7)に規定されるとおり、深さの測定の不確かさの限度は、水深5mで0.25m、水深20mで0.29mである。従って、GNSS測位と従来潮位補正の差が概ね0.1m以内に収まっていることは、GNSS測位による潮位補正が、深淺測量として一定の精度を有しているものと評価できる。

GNSS測位と従来潮位補正の差の要因としては、次の3つの要因が考えられる。

第1の要因は、潮位補正に使用したGNSS測位や潮位観測の計測誤差である。本研究で使用したRTK-GNSS測位では、マルチパス・受信機ノイズ等が誤差要因として考えられ、また、基線長の長さ・衛星配置等が計測精度に影響を与える¹⁶⁾。潮位観測の誤差要因は観測機器によって異なるが、フロート式の場合はフロートの腐食浸水・ワイヤー劣化・導水管の目詰まり等、また、水圧式の場合はセンサー劣化・通気パイプの目詰まり等が考えられる¹⁷⁾。さらに、副標を用いた同時検潮においては、線形回帰分析に起因する誤差も存在する。なお、本研究ではGNSS測位と従来潮位補正で同一のマルチビーム測深結果を使用したため、マルチビーム測深の計測誤差は、GNSS測位と従来潮位補正の差には影響しない。

第2の要因は、GNSS測位と従来潮位補正の間で、平均水面の算出に使用した潮位観測の期間が必ずしも一致しないことである。表-15は、従来潮位補正とGNSS測位（最低水面モデル）において、平均水面の算出に使用した検潮所及び潮位観測期間を整理したものである。また、従来潮位補正とGNSS測位の平均水面の高さの差を最右列に示す。平均水面の高さの差が正の場合、GNSS測位の平均水面が従来潮位補正の平均水面よりも高いことを表す。表-15が示すとおり、GNSS測位で使用した最低水面モデルは2017年～2021年の潮位観測から平均水面を算出しているが、従来潮位補正は2017年～2021年より前の潮位観測から平均水面を算出している場合もある。従来潮位補正の平均水面は地球温暖化に伴う近年の海面上昇を反映できていない可能性があり、GNSS測位と従来潮位補正で平均水面の高さが一致しないことが差の要因として考えられる。

表-15 従来潮位補正とGNSS測位において平均水面の算出に使用した検潮所及び潮位観測期間・平均水面の高さの差

現地試験場所	従来潮位補正		GNSS測位（最低水面モデル）		平均水面の高さの差(m)
	使用した検潮所	潮位観測期間	使用した検潮所	潮位観測期間	
釜石	釜石	2018年	釜石	2017年～2021年	0.059
中城湾	沖縄（津波古）	1979年～1983年	沖縄	2017年～2021年	0.083
敦賀	舞鶴及び臨時検潮所	2009年～2013年	敦賀	2017年～2022年 (欠測：2020年)	0.047
境港	境	2010年～2014年	境	2017年～2021年	0.050
備讃瀬戸航路 (2023年度)	与島	2013年～2017年	与島	2017年～2021年	-0.012
備讃瀬戸航路 (2024年度)	与島	2013年～2017年	与島	2017年～2021年	0.011
中山水道航路	三河	1973年決定 (詳細不明)	三河	2017年～2021年	-0.030
竹富南航路	石垣	2016年～2020年	石垣	2017年～2021年	0.003

第3の要因は、GNSS 測位はマルチビーム測深を実施している地点の海面変動を潮位補正に利用しているが、従来潮位補正では検潮所における海面変動を潮位補正に利用している点である。例えば、マルチビーム測深の実施場所と検潮所が離れている場合、入り組んだ形状の湾で副振動が発生する場合など、マルチビーム測深の実施場所と検潮所の海面変動が一致しないことが差の要因として考えられる。

ただし、本研究では、それぞれの現地試験における GNSS 測位と従来潮位補正の差が、上記要因のいずれによるものかを個別に特定することはできなかった。また、本研究では、GNSS 測位と従来潮位補正の差の平均値に着目して検討を行ったが、GNSS 測位と従来潮位補正の差が局所的に大きくなっている可能性がある。GNSS 測位と従来潮位補正の間で局所的に大きな差が生じる場合、どのようなデータ処理をする必要があるかについて、深浅測量の実務の観点から予め検討する必要がある。

3. 浚渫工・床掘工等への適用

3.1 浚渫工・床掘工等を対象とした現地試験の概要

(1) 現地試験の概要

海上工事では、海中で作業するクレーンのバケット等を船上の作業員が直接目視することができないため、クレーンのバケット等の位置を表示する施工管理システムが従前から使用されて来た。施工管理システムでは、作業船の水平位置を GNSS 測位で計測し、クレーンのバケットの位置はクレーンのアーム長・旋回角・起伏角・ロープの繰り出し長等から算出している。さらに、2024年4月からは、基礎工を対象に機械均しで使用する均し機械の施工履歴データ、また、床掘工を対象にグラブ浚渫船のバケットの施工履歴データを利用して、出来形管理まで行うことが可能になった^{18,19)}。ここで施工履歴データとは、均し機械の底面やバケットの刃先の3次元座標の時刻歴データのことである。

しかし、施工管理システムや施工履歴データで必要となる作業船の鉛直位置の計測には、1章に記載のとおり、GNSS 測位による潮位補正ではなく、潮位観測を利用した潮位補正が用いられている。

本研究では、作業船の施工管理システムや施工履歴データへGNSS測位が適用できるか確かめるため、浚渫工・床掘工等の現地試験を行い、従来潮位補正と比較した。現地試験を実施した工種・施工場所・実施期間の一覧を、表-16に示す。

表-16 浚渫工・床掘工等の現地試験

工種	場所	現地試験実施期間
床掘工	横浜港	2024年1月20日～2月2日
	広島港	2024年6月14日～6月28日
	和歌山下津港	2025年2月27日～3月14日
浚渫工	大阪港	2024年4月15日～4月29日
	徳山下松港	2024年11月27日～12月12日
	中城湾港	2024年12月23日～2025年1月12日
	関門航路	2025年5月12日～5月15日
地盤改良工	八代港	2024年2月19日～3月11日
	函館港	2024年9月21日～10月8日
基礎捨石工	室津港	2024年3月15日～3月29日

(2) 2023年度の現地試験

2023年度は、床掘工（横浜港、広島港）、浚渫工（大阪港）、地盤改良工（八代港、函館港）、基礎捨石工（室津港）の4工種を対象に現地試験を実施した。

現地試験では、慣性GNSSジャイロ1台を工事で使用する作業船に設置し、GNSS測位及び船体の動揺計測を実施した。慣性GNSSジャイロの計測性能を、表-17に示す。慣性GNSSジャイロのサンプリングレートは50Hzであるが、計測結果の出力は1Hz（1秒間に1回）に設定した。また、RTK-GNSS測位について、横浜港と大阪港は海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用した。広島港・八代港・函館港・室津港では、VRS方式を利用した。補正情報の受信間隔は1秒である。

表-17 慣性GNSSジャイロの計測性能

項目	性能
水平精度RMS	±(8mm + 1ppm)
鉛直精度RMS	±(15mm + 1ppm)
ロール・ピッチ	0.02度
真方位	0.03度 (ベースライン2m)
ヒーブ	2cmもしくは2%

2023年度は、バケットの刃先位置等の施工部位ではなく、作業船のデッキ面の高さを対象として、潮位観測を利用する従来の潮位補正とGNSS測位を比較した。作業船のデッキ面から水面の高さを計測するため、乾舷計として超音波式水位計を設置した。乾舷計は作業船に設置されていない場合もあり、また、設置されている場合でも乾舷計の計測結果を外部にデータ出力することが難しいため、超音波式水位計を採用した。超音波式水位計のサンプリングレートは、1分間に1回である。

また、従来潮位補正を実施するため、施工場所近傍において水圧式潮位計（圧力センサー）による潮位観測を実施した。臨時検潮所における潮位観測の詳細は、2.1節（1）と同じである。臨時検潮所を設置したため、従来潮位補正で使用した平均水面の高さは、GNSS測位で使用した平均水面の高さと同一である。

さらに、作業船に設置した慣性GNSSジャイロと比較するため、施工場所近傍の陸上にGNSS受信アンテナを設置し、陸上固定点のGNSS測位を実施した。

なお、浚渫工・床掘工等の現地試験で使用した最低水面モデルの作成方法は、深淺測量の現地試験で使用した最低水面モデルの作成方法と同様であり、その詳細は2.1節（3）に記載のとおりである。

(3) 2024年度の現地試験

2024年度は、床掘工（和歌山下津港）、浚渫工（徳山下松港、中城湾港、関門航路）の2工種を対象に現地試験を実施した。使用した作業船は、和歌山下津港・徳山下松港・中城湾港がグラブ浚渫船、関門航路がドラグサクション船である。グラブ浚渫船を使用した現地試験では、2023年度と異なり、バケットの刃先位置を対象として、従来潮位補正とGNSS測位を比較した。一方、ドラグサクション船を使用した現地試験では、2023年度と同様に、作業船のデッキ面の高さを対象として、従来潮位補正とGNSS測位を比較した。

また、2024年度は、慣性GNSSジャイロは使用せず、代わりにRTK-GNSS計測装置を3台作業船へ設置した。RTK-GNSS計測装置を3台使用することにより、船体の傾斜を考慮してクレーン旋回中心部の高さを算出した。RTK-GNSS計測装置の設置位置やクレーン旋回中心部の高さの算出方法の詳細は、3.8節以降で現地試験ごとに記載する。使用したRTK-GNSS計測装置の計測性能を、表-18に示す。RTK-GNSS測位について、関門航路は海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用した。和歌山下津港・徳山下松港・中城湾港では、VRS方式を利用した。補正情報の受信間隔は1秒である。GNSS測位は10Hzで行い、FIX解を抽出して、1秒・10秒・30秒・1分平均値を算出した。また、1分平均値から、2分・5分・10分の後方移動平均値を算出した。

なお、2024年度は、2023年度と異なり、水圧式潮位計による潮位観測と陸上固定点のGNSS測位は実施しなかった。

表-18 RTK-GNSS計測装置の計測性能

項目	性能
水平精度RMS	±(8mm + 0.5ppm)
鉛直精度RMS	±(15mm + 0.5ppm)

3.2 横浜港における現地試験（床掘工）

(1) 現地試験場所の概況

横浜港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-46に示す。横浜港のRTK-GNSS測位は、海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用した。横浜GPS基準局からの距離は、施工場所が1.91km、陸上固定点が3.59kmである。



図-46 横浜港の現地試験場所と臨時検潮所（地理院タイ
ル（国土地理院）を加工）

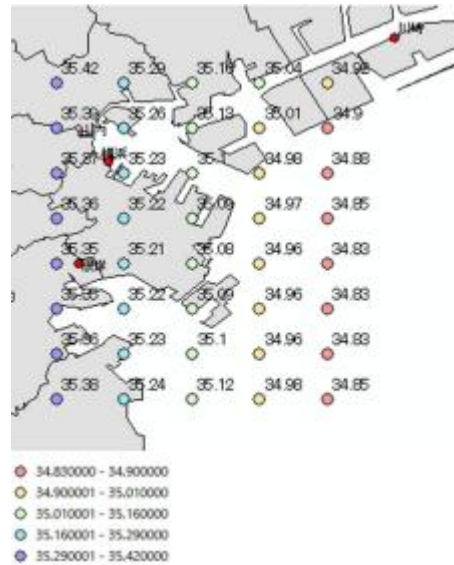


図-47 横浜港の最低水面モデル

(2) 最低水面モデル

横浜港の最低水面モデルを図-47に示す。平均水面の標高は0.141m、 Z_0 は1.15m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。最低水面モデルの平均水面は、横浜検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである。

(3) 現地試験で使用した作業船

横浜港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-48に示す。

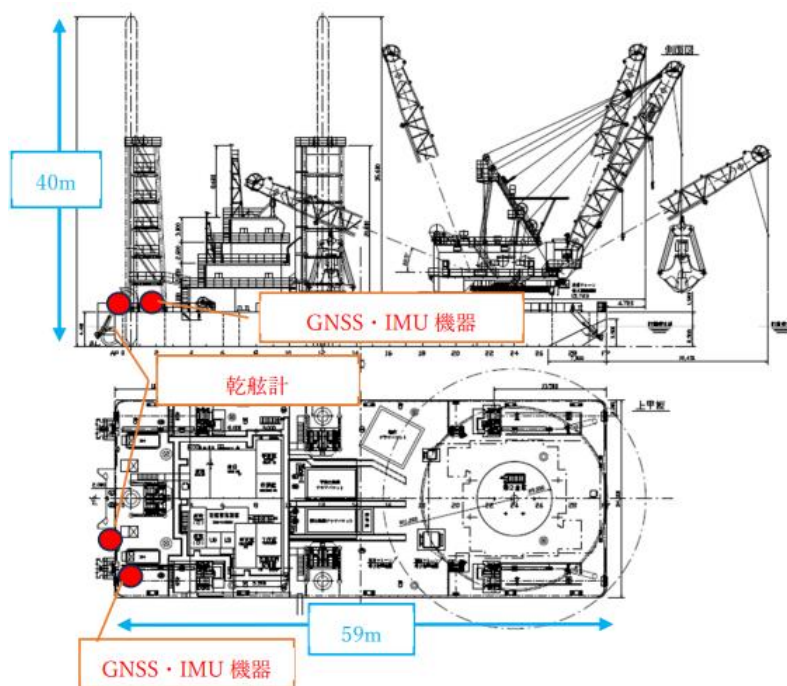


図-48 横浜港の現地試験で使用した作業船

(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年1月20日～2月2日）の差の平均値と標準偏差を、表-19に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-19には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、1月24日の時系列データを図-49に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-19 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	0.008	0.077
陸上固定点	-0.014	0.013

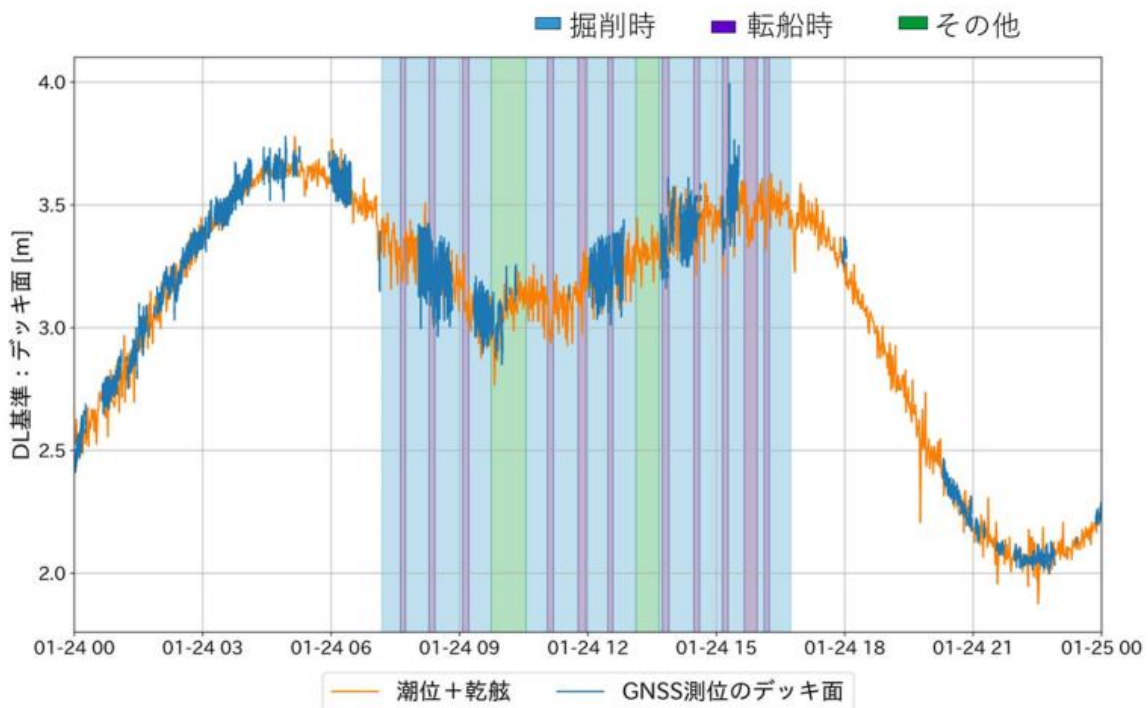


図-49 デッキ面高の計測結果（2024年1月24日）

(5) 考察

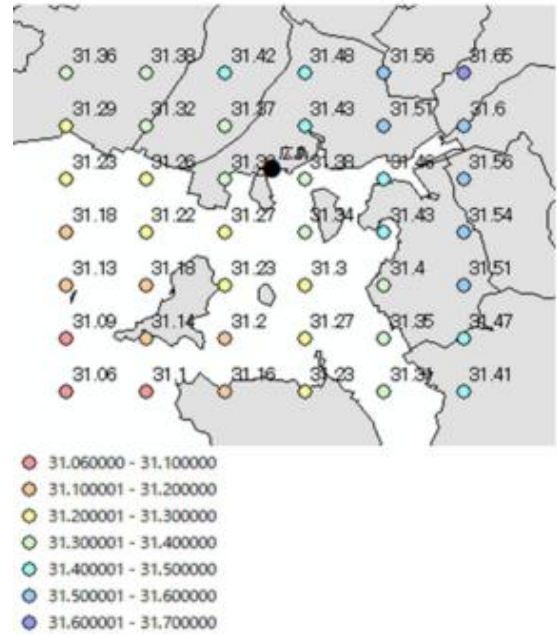
GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると0.008mであり、GNSS測位と従来潮位補正は概ね一致していると評価できる。

ただし、図-49が示すとおり、GNSS測位（青線）は、衛星ステータスがFIX解にならない等の理由により、欠測が多かった。FIX解になることが少なかった要因は、GNSS受信アンテナを煙突の近傍に設置したため、鋼構造物である煙突の影響を受けやすかったためと考えられる。また、GNSS測位（青線）は、0.1m程度の振幅の振動が見られた。振動は日中に発生していること、また、陸上固定点には振動が見られなかったことから、GNSS測位の振動の要因は、浚渫作業中の船体の動揺によるものと考えられる。

3.3 広島港における現地試験（床掘工）

(1) 現地試験場所の概況

広島港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-50に示す。

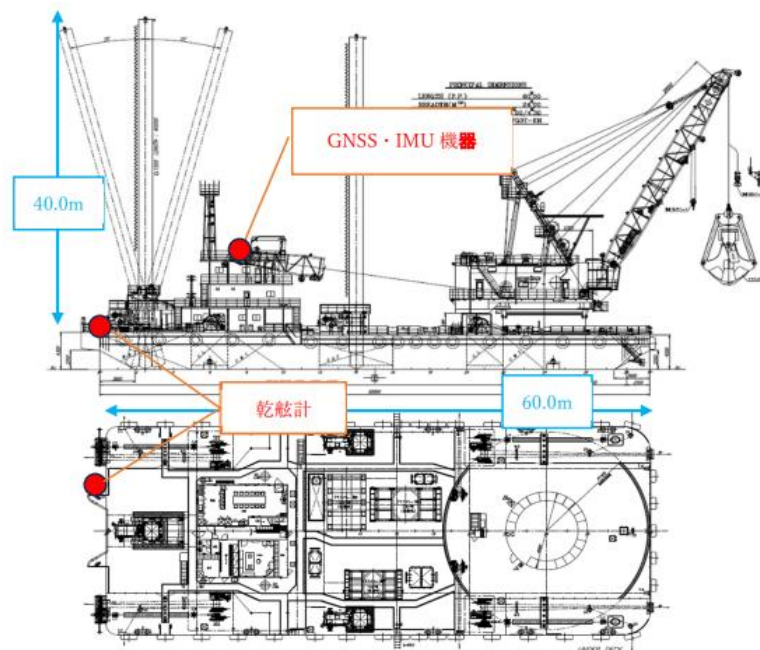


(2) 最低水面モデル

広島港の最低水面モデルを図-51に示す。平均水面の標高は0.249m、 Z_0 は2.00m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。最低水面モデルの平均水面は、広島検潮所における2017年～2022年（欠測：2018年）の潮位観測から算出したものである。

(3) 現地試験で使用した作業船

広島港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-52に示す。



(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年6月14日～6月28日）の差の平均値と標準偏差を、表-20に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-20には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、6月24日の時系列データを図-53に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-20 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	-0.112	0.085
陸上固定点	0.033	0.030

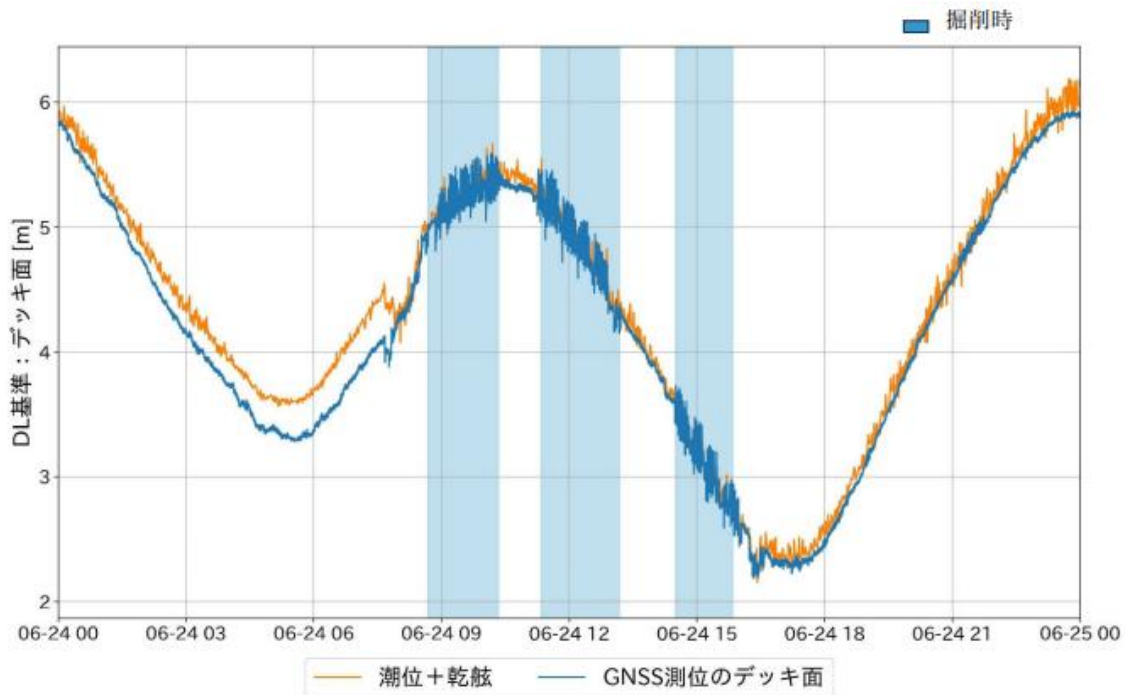


図-53 デッキ面高の計測結果（2024年6月24日）

(5) 考察

GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると-0.112mであった。図-53が示すとおり、GNSS測位（青線）は、0.1m～0.2m程度の振幅の振動が見られた。振動は日中に発生していること、また、陸上固定点には振動が見られなかったことから、GNSS測位の振動の要因は、浚渫作業中の船体の動揺によるものと考えられる。ただし、浚渫作業を実施していない6時前後に、従来の潮位補正とGNSS測位に乖離が見られた。作業時間外に発生した、従来の潮位補正とGNSS測位の乖離の要因は不明である。

3.4 大阪港における現地試験（浚渫工）

(1) 現地試験場所の概況

大阪港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-54に示す。

大阪港のRTK-GNSS測位は、海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用した。神戸GPS基準局からの距離は、施工場所が14.82km、陸上固定点が14.34kmである。

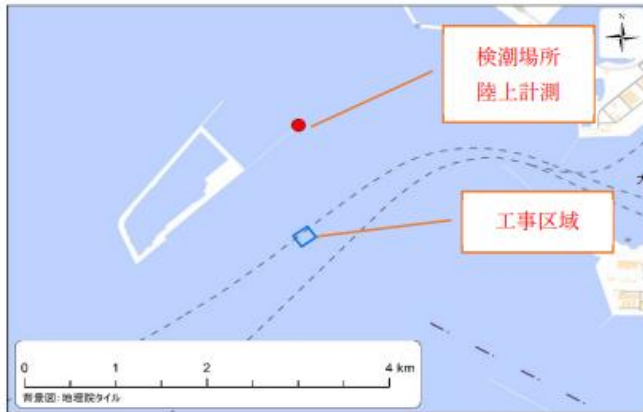


図-54 大阪港の現地試験場所と臨時検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

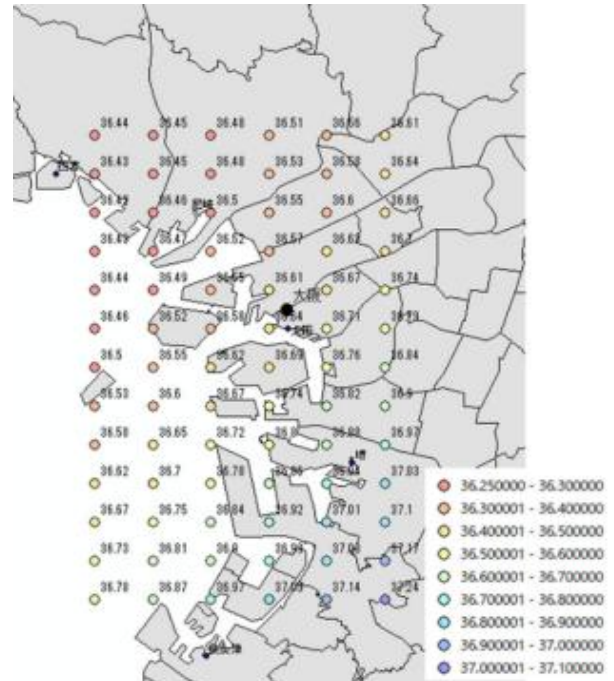


図-55 大阪港の最低水面モデル

(2) 最低水面モデル

大阪港の最低水面モデルを図-55に示す。平均水面の標高は0.223m、 Z_0 は0.95m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。最低水面モデルの平均水面は、大阪検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである。

(3) 現地試験で使用した作業船

大阪港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-56に示す。

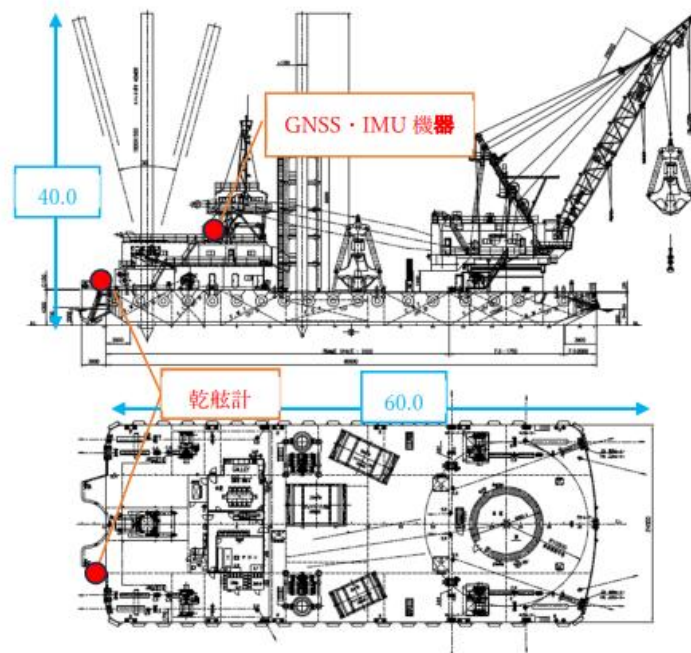


図-56 大阪港の現地試験で使用した作業船

(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年4月15日～4月29日）の差の平均値と標準偏差を、表-21に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-21には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、4月23日の時系列データを図-57に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-21 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	0.014	0.096
陸上固定点	0.007	0.015

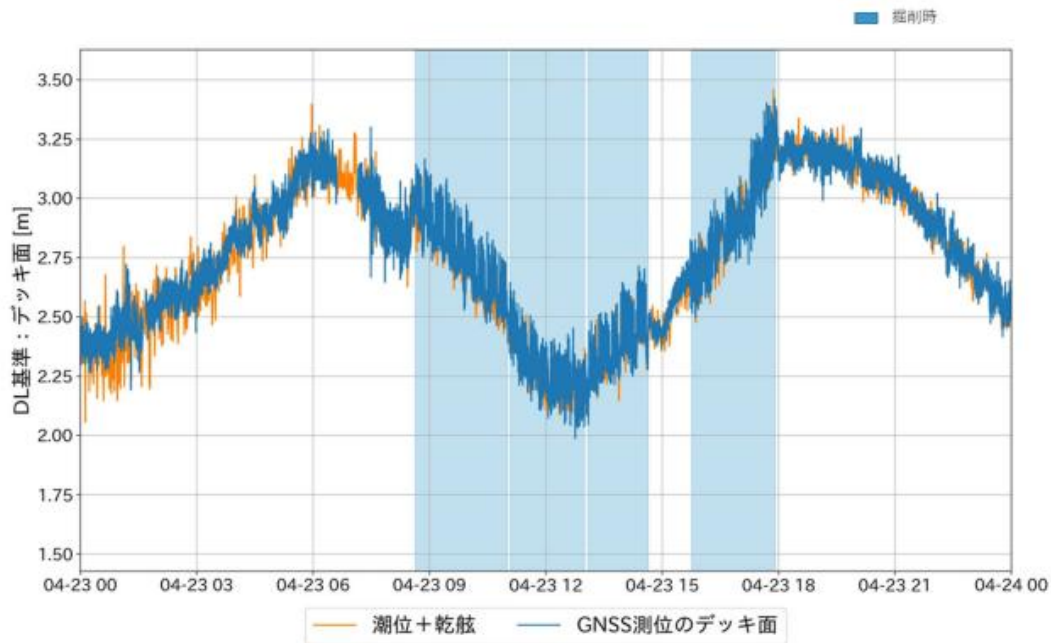


図-57 デッキ面高の計測結果（2024年4月23日）

(5) 考察

GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると0.014mであり、GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高は概ね一致していると評価できる。

ただし、図-57が示すとおり、GNSS測位（青線）は、0.1m～0.2m程度の振幅の振動が見られた。振動は日中に発生していること、また、陸上固定点には振動が見られなかったことから、GNSS測位の振動の要因は、浚渫作業中の船体の動揺によるものと考えられる。

3.5 八代港における現地試験（地盤改良工）

(1) 現地試験場所の概況

八代港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-58に示す。大築島の陸上固定点①に渡海できない可能性があったため、大築島の対岸にも陸上固定点②を設置した。

(2) 最低水面モデル

八代港の最低水面モデルを図-59に示す。平均水面の標高は0.277m、 Z_0 は2.15m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向

1.5 分である。最低水面モデルの平均水面は、阿久根検潮所における 2017 年～2021 年の潮位観測から算出したものである。

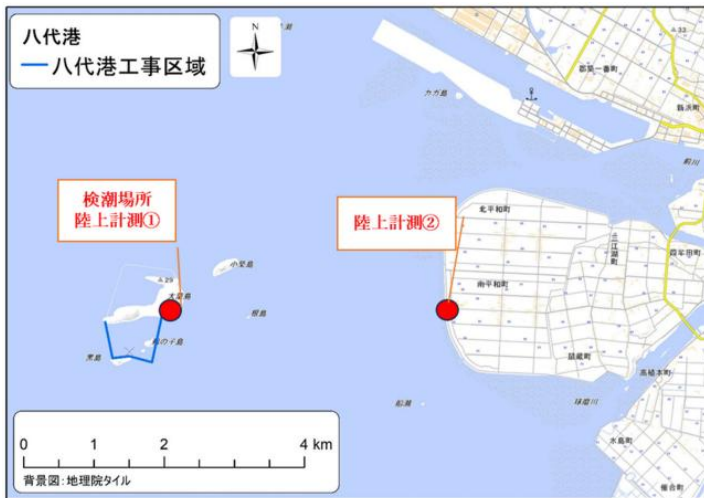


図-58 八代港の現地試験場所と臨時検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

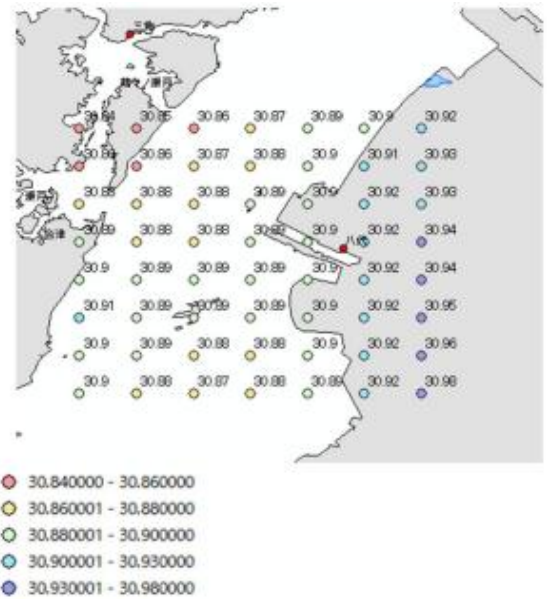


図-59 八代港の最低水面モデル

(3) 現地試験で使用した作業船

八代港の現地試験では、サンドコンパクション船を使用した。使用したサンドコンパクション船の概要及び計測機器の設置位置を、図-60に示す。

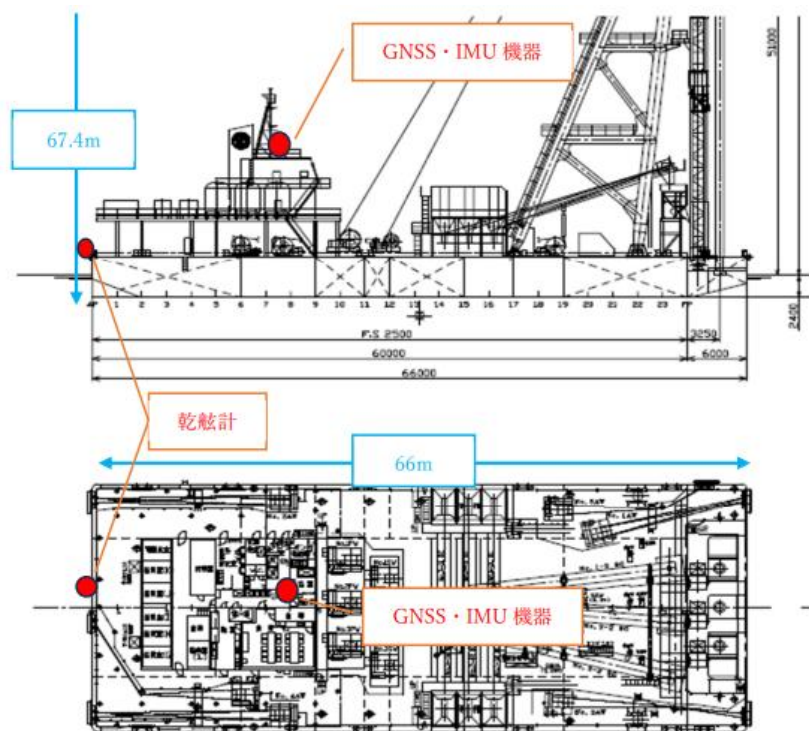


図-60 八代港の現地試験で使用した作業船

(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年2月19日～3月11日）の差の平均値と標準偏差を、表-22に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-22には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、2月29日の時系列データを図-61に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-22 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	0.032	0.157
陸上固定点①	-0.027	0.010
陸上固定点②	-0.053	0.023

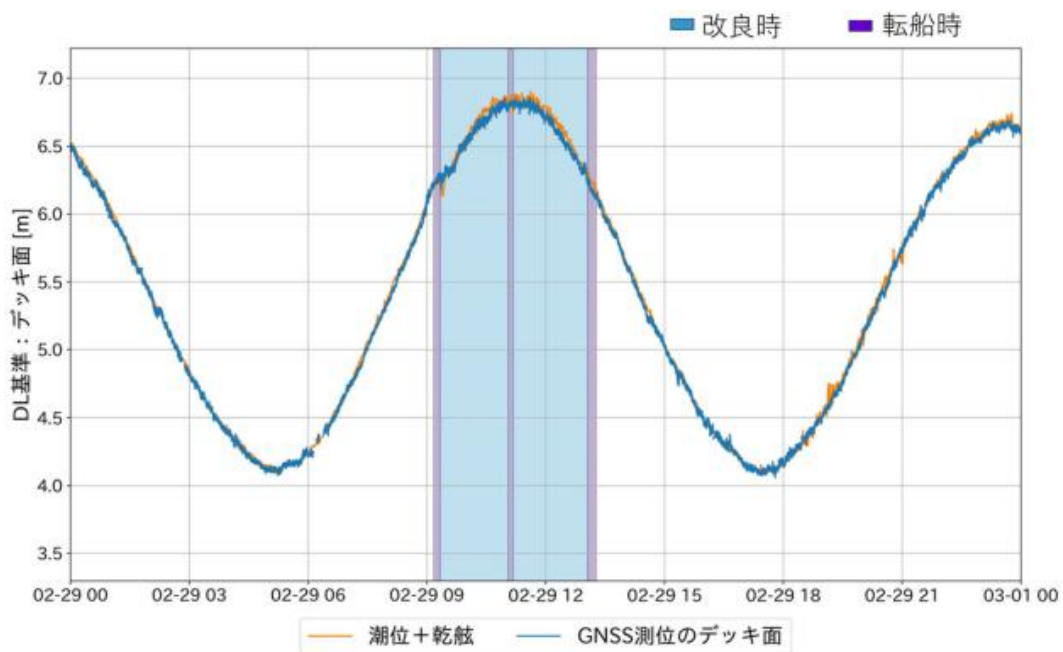


図-61 デッキ面高の計測結果（2024年2月29日）

(5) 考察

GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると0.032mであり、GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高は概ね一致していると評価できる。

また、図-61が示すとおり、横浜港・広島港・大阪港におけるグラブ浚渫船の現地試験結果とは異なり、GNSS測位（青線）には顕著な振動が発生しなかった。ただし、GNSS測位と従来潮位補正の間でデッキ面高に乖離が生じることはあり、地盤改良による盛り上がり土の影響で船体が傾斜したためと考えられる。

3.6 函館港における現地試験（地盤改良工）

(1) 現地試験場所の概況

函館港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-62に示す。

(2) 最低水面モデル

函館港の最低水面モデルを図-63に示す。平均水面の標高は-0.009m、 Z_0 は0.57m、格子間隔は緯度方向1分、経度方

向 1.5 分である。最低水面モデルの平均水面は、函館検潮所における 2017 年～2021 年の潮位観測から算出したものである。

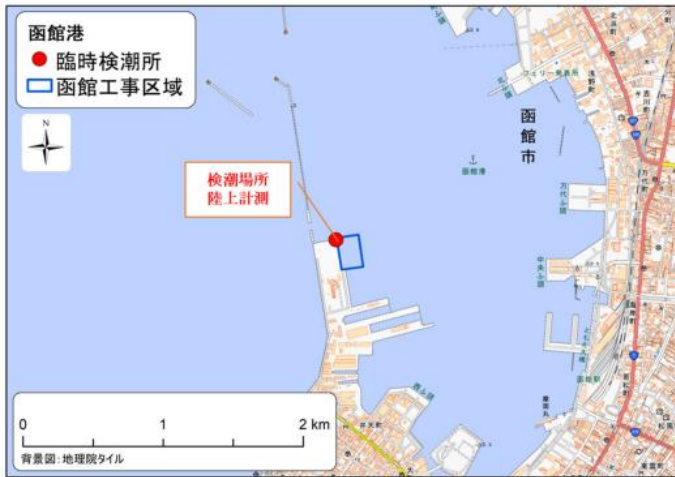


図-62 函館港の現地試験場所と臨時検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

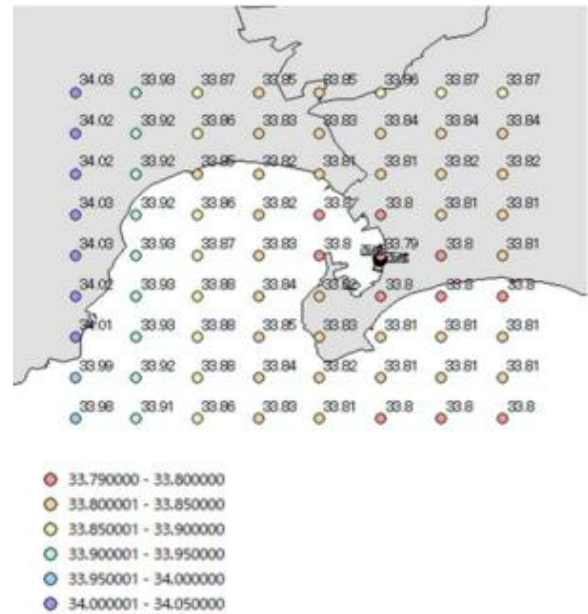


図-63 函館港の最低水面モデル

(3) 現地試験で使用した作業船

函館港の現地試験では、深層混合処理船を使用した。使用した深層混合処理船の概要及び計測機器の設置位置を、図-64 に示す。

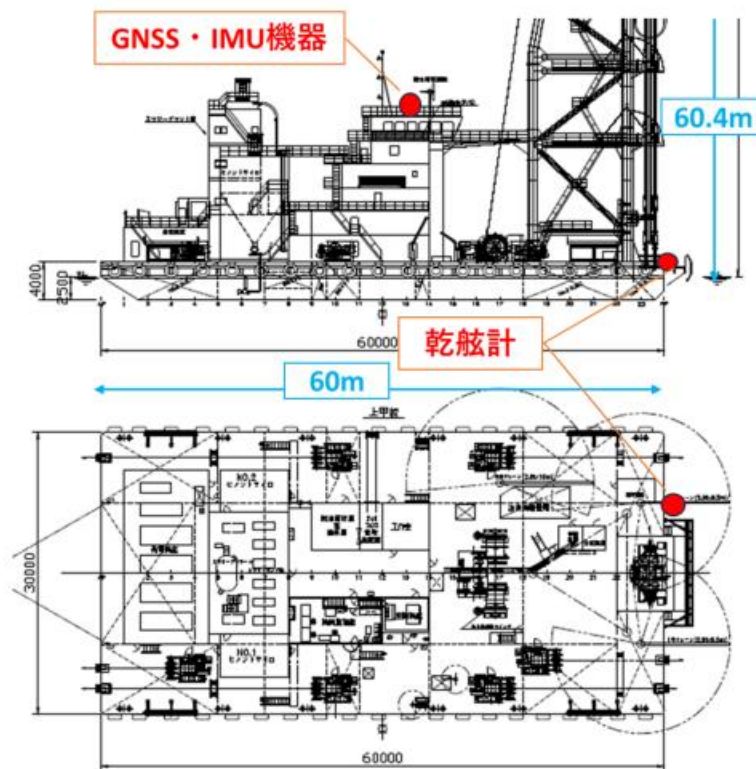


図-64 函館港の現地試験で使用した作業船

(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年9月21日～10月8日）の差の平均値と標準偏差を、表-23に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-23には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、9月23日の時系列データを図-65に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-23 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	0.022	0.053
陸上固定点	-0.012	0.024

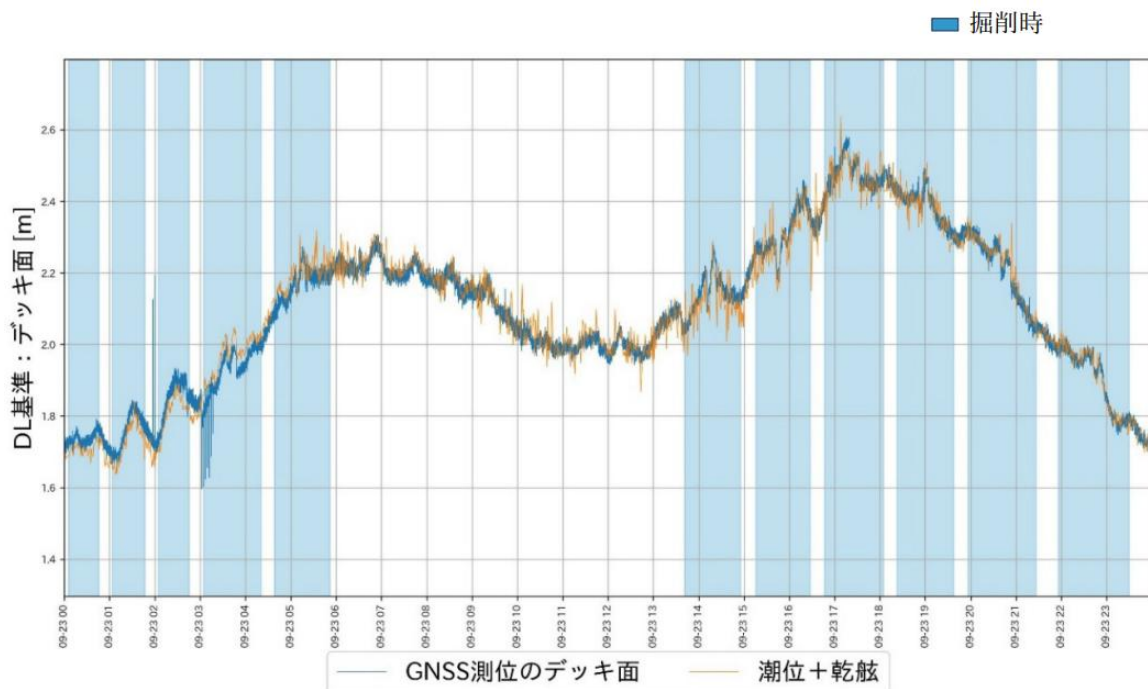


図-65 デッキ面高の計測結果（2024年9月23日）

(5) 考察

GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると0.022mであり、GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高は概ね一致していると評価できる。

なお、図-65が示すとおり、従来潮位補正（橙色）の方が振動していた。函館港の現地試験では風が強かったため、乾舷計（超音波式水位計）が海表面の乱れを計測したものと考えられる。

3.7 室津港における現地試験（基礎捨石工）

(1) 現地試験場所の概況

室津港の現地試験について、施工場所・臨時検潮所・GNSS測位のための陸上固定点の位置を、図-66に示す。

(2) 最低水面モデル

室津港の最低水面モデルを図-67に示す。平均水面の標高は0.250m、 Z_0 は1.10m、格子間隔は緯度方向1分、経度方向1.5分である。最低水面モデルの平均水面は、室戸岬検潮所における2017年～2021年の潮位観測と室津港の臨時検潮所の潮位

観測から算出したものである。

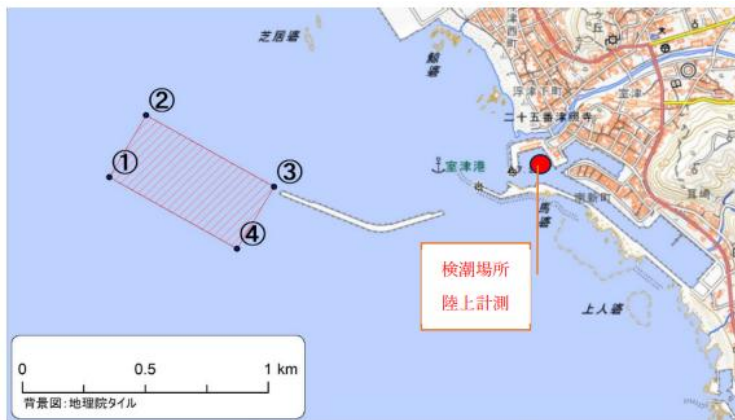


図-66 室津港の現地試験場所と臨時検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

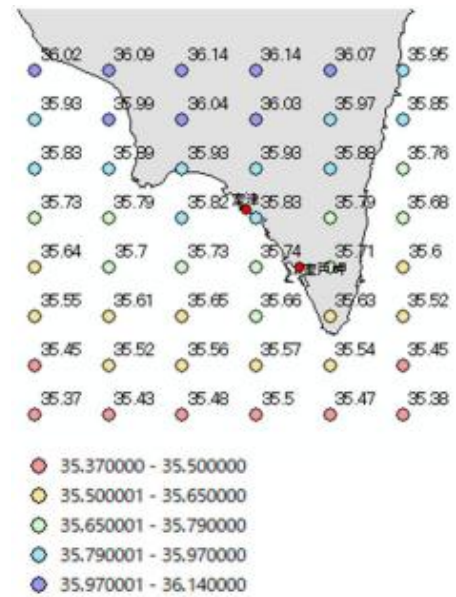


図-67 室津港の最低水面モデル

(3) 現地試験で使用した作業船

室津港の現地試験の対象工種は基礎捨石工であるが、基礎捨石工の施工管理で使用するマルチビーム測深のための測量船を用いて現地試験を実施した。使用した測量船の概要及び計測機器の設置位置を、図-68に示す。なお、測量船であることを考慮して、乾舷計は設置しなかった。

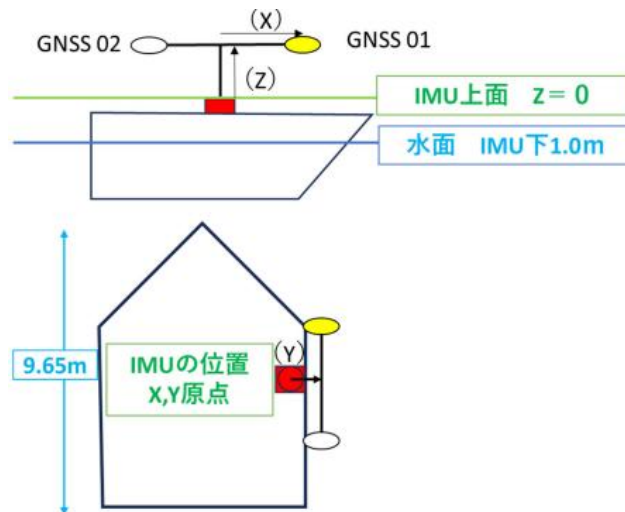


図-68 室津港の現地試験で使用した測量船

(4) デッキ面高の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高の差について、現地試験実施期間（2024年3月15日～3月29日）の差の平均値と標準偏差を、表-24に示す。デッキ面高の差が正の場合は、GNSS測位のデッキ面高が従来潮位補正よりも高い。また、表-24には、陸上固定点の楕円体高と、本研究で実施したRTK-GNSS連続測位の差の平均値と標準偏差を、合わせて記載する。陸上固定点の楕円体高は、GNSSスタティック測量で別途計測した。さらに、デッキ面高の計測結果の例として、3月27日の時系列データを図-69に示す。橙色の線が従来潮位補正、青色の線がGNSS測位に対応する。

表-24 デッキ面高・陸上固定点の計測結果

項目	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
デッキ面高	0.022	0.053
陸上固定点	-0.015	0.015

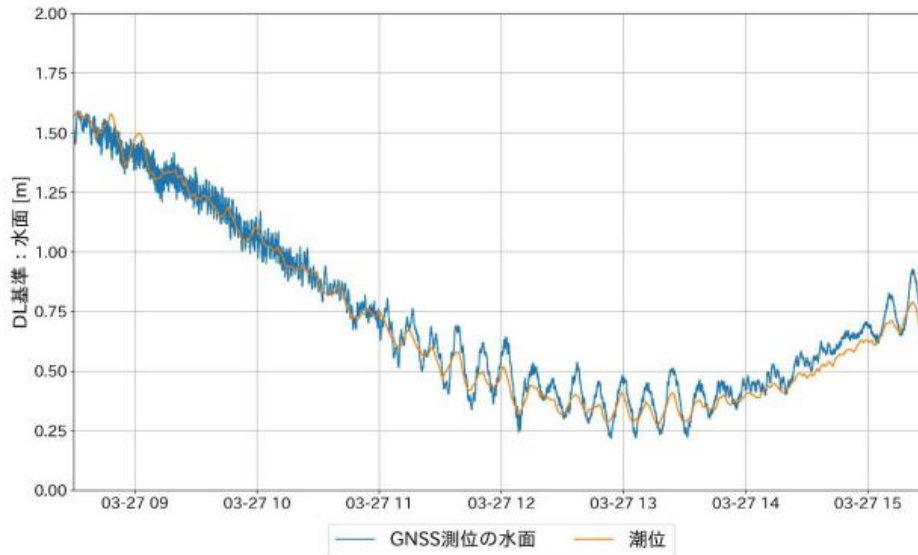


図-69 デッキ面高の計測結果（2024年3月27日）

(5) 考察

GNSS測位と従来潮位補正の差は、平均すると0.022mであり、GNSS測位と従来潮位補正のデッキ面高は概ね一致していると評価できる。

なお、図-69が示すとおり、GNSS測位（青線）には振動が発生している。3月27日は10時30分まで外洋を航行し、10時30分以降は室津港内に係留中であった。10時30分の前後でGNSS測位（青線）の挙動が変化している要因は、外洋の航行中の細かい振動と、港内の係留中の周期の長い振動の違いによるものと考えられる。

3.8 和歌山下津港における現地試験（床掘工）

(1) 現地試験場所の概況

和歌山下津港の現地試験について、施工場所及び最寄りの検潮所（海南）の位置を、図-70に示す。

(2) 最低水面モデル

和歌山下津港の最低水面モデルを図-71に示す。平均水面の標高は0.1149m、 Z_0 は1.11mである。最低水面モデルの平均水面は、海南検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである。

一方、GNSS測位で使用した港湾管理用基準面は、和歌山（下津）検潮所の潮位観測に基づき1986年に決定されており、GNSS測位の平均水面は従来潮位補正よりも0.105m高い。このため、GNSS測位と従来潮位補正の平均水面の高さが一致するように補正を行った。



図-70 和歌山下津港の現地試験場所と最寄りの検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

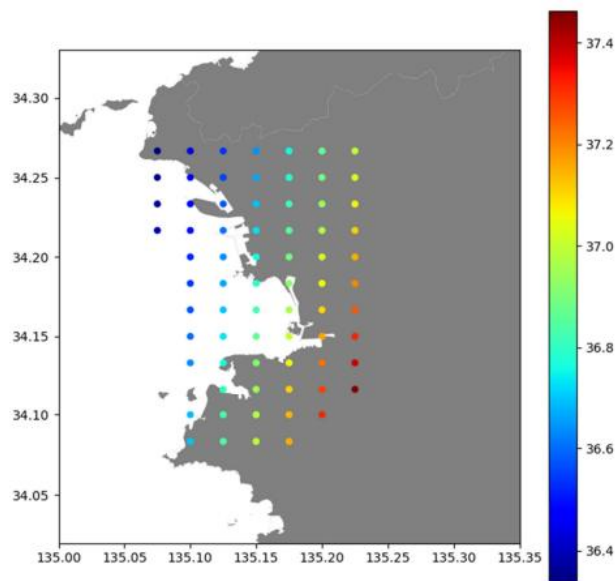


図-71 和歌山下津港の最低水面モデル

(3) 現地試験で使用した作業船

和歌山下津港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-72及び表-25に示す。表-25のX方向は船首方向を正、Y方向は右舷方向を正、Z方向はデッキ面を基準として鉛直上向きを正とする座標系である。

GNSS受信アンテナの3次元位置からバケット深度を算出する手順は、以下のi)～v)に示すとおりである。

- 3個のGNSS受信アンテナの3次元位置から、図-72に示す、クレーン旋回中心部・右舷デッキ面・左舷デッキ面の3ヶ所の3次元位置を算出する。
- クレーン旋回中心部・右舷デッキ面・左舷デッキ面の3点で構成される平面の法線ベクトルを算出する。算出された法線ベクトルは、船体の傾斜を補正するために使用する。
- 図-73に示すとおり、作業船の一般配置図を基に、クレーン旋回中心部からクレーン起点までのオフセット量及びアーム長を予め読み取っておく。そして、クレーン旋回中心部の3次元位置から、ii)で算出した法線ベクトルを考慮して、クレーン起点の3次元位置を算出する。
- クレーン起点の3次元位置から、クレーンのアーム長及び起伏角を用いて、クレーン先端部の高さ（楕円体高）を算出する。
- クレーン先端部の高さから、ロープの繰り出し長を用いて、バケット深度（バケット刃先位置の高さ）を算出する。バケット深度は楕円体高で算出されるので、最低水面モデルを用いて、最低水面基準の深さに換算できる。

表-25 クレーン旋回中心部からGNSS受信アンテナまでのオフセット値

機器	X方向(m)	Y方向(m)	Z方向(m)
GNSS中央	-29.445	-2.245	13.579
GNSS右舷	-37.166	5.873	8.121
GNSS左舷	-36.885	-6.619	8.168

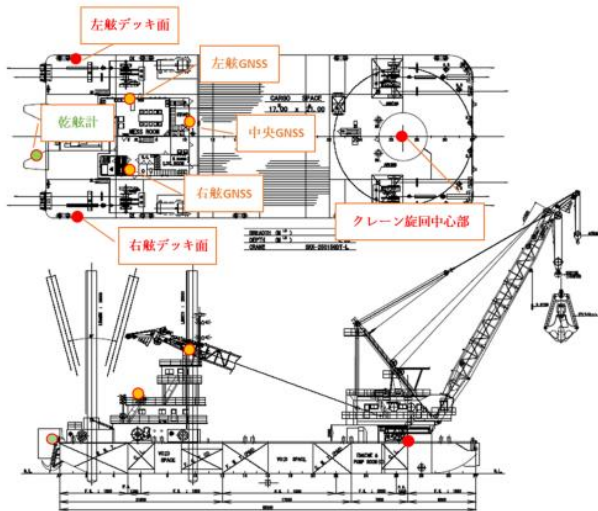


図-72 和歌山下津港で使用した作業船

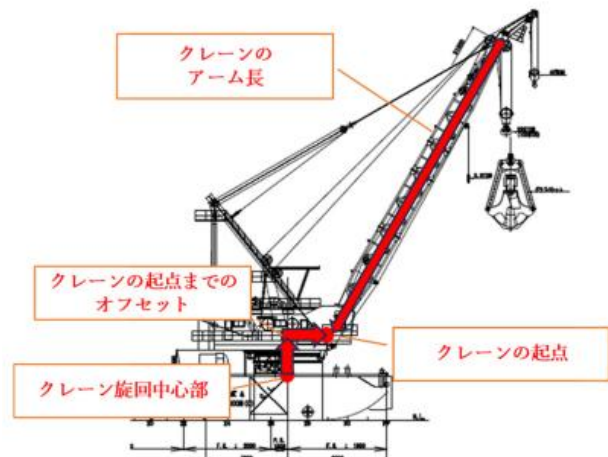


図-73 バケット刃先位置の算出手順

(4) RTK-GNSS測位

現地試験実施期間におけるGNSS測位のFIX率を、表-26に示す。和歌山下津港のRTK-GNSS測位はVRS方式で実施したため、元期座標が算出される。しかし、水路測量業務準則施行細則では今期座標を使用することになっているため、元期座標から今期座標へセミダイナミック補正を行った²⁰⁾。補正量は0.103mである。

表-26 和歌山下津港のGNSS測位のFIX率

機器	計測期間	FIX率(%)
GNSS中央	2025年2月27日～3月14日	87.87
GNSS右舷		93.65
GNSS左舷		95.00

(5) バケット深度の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差について、現地試験実施期間の差の平均値と標準偏差を、表-27に示す。バケット深度の差が負の場合は、GNSS測位によるバケット深度が従来潮位補正よりも深いことを表す。また、バケット深度の計測結果の例として、3月10日の時系列データを図-74に示す。橙色の点が従来潮位補正、青色の点がGNSS測位（1分平均値）に対応する。

さらに、クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果の例として、3月10日の時系列データを図-75に示す。GNSS測位の平均値の算出方法の違いを調べるため、1秒・10秒・30秒・1分平均値を表示している。

表-27 GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差

GNSS測位	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
1秒平均	-0.05	0.11
10秒平均	-0.06	0.09
30秒平均	-0.06	0.09
1分平均	-0.04	0.09
2分後方移動平均	-0.04	0.07
5分後方移動平均	-0.03	0.07
10分後方移動平均	-0.02	0.06



図-74 バケット深度の計測結果（GNSS測位は1分平均値，2025年3月10日）

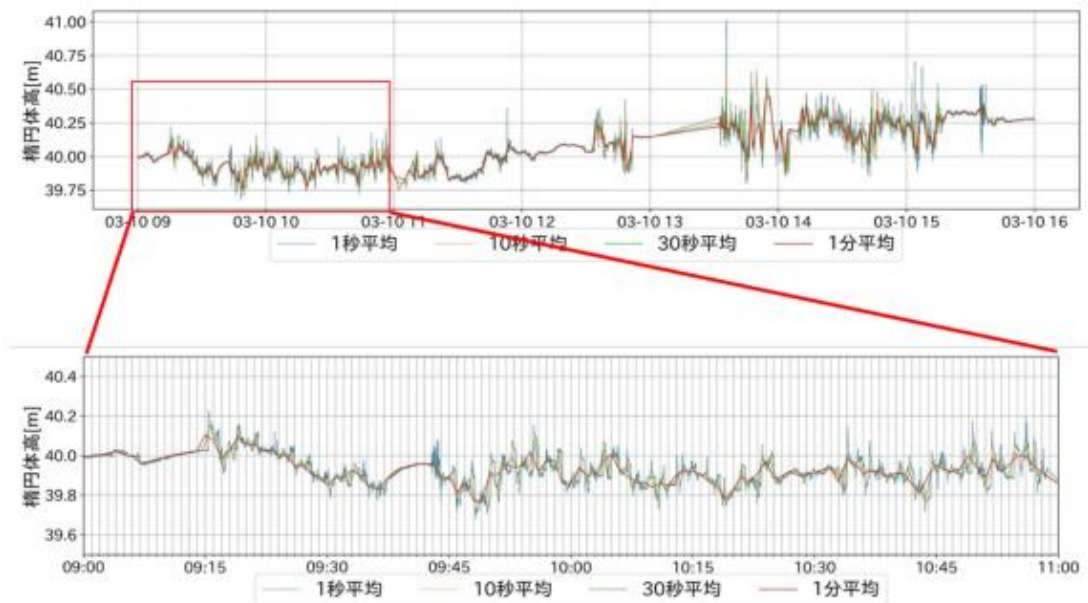


図-75 クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果（2025年3月10日）

(6) 考察

表-27及び図-74が示すとおり，GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差は数cmであり，大きな乖離は生じていないと評価できる．また，GNSS測位の平均値算出の対象時間を長くすると，GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差が小さくなる傾向が見られた．一方，図-75が示すとおり，GNSS測位の平均値算出の対象時間が1秒・10秒・30秒では，短周期のスパイク状のノイズを除去できていない．

3.9 徳山下松港における現地試験（浚渫工）

(1) 現地試験場所の概況

徳山下松港の現地試験について，施工場所及び最寄りの検潮所（徳山）の位置を，図-76に示す．

(2) 最低水面モデル

徳山下松港の最低水面モデルを図-77に示す．平均水面の標高は0.229m， Z_0 は1.80mである．最低水面モデルの平均水面は，徳山検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである．

一方，GNSS測位で使用した港湾管理用基準面は，徳山検潮所の2009年～2013年の潮位観測に基づき決定されており，GNSS測位の平均水面は従来潮位補正よりも0.026m高い．このため，GNSS測位と従来潮位補正の平均水面の高さが一致するように補正を行った．



図-76 徳山下松港の現地試験場所と最寄りの検潮所（地理院タイド（国土院）を加工）

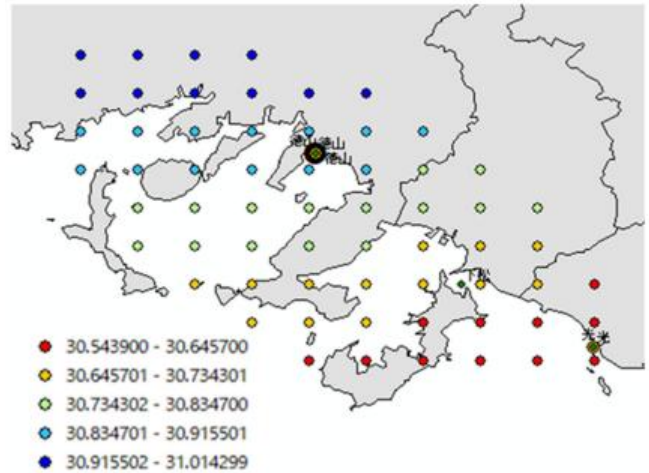


図-77 徳山下松港の最低水面モデル

(3) 現地試験で使用した作業船

徳山下松港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-78及び表-28に示す。表-28のX方向は船首方向を正、Y方向は右舷方向を正、Z方向はデッキ面を基準として鉛直上向きを正とする座標系である。

なお、GNSS受信アンテナの3次元位置からバケット深度を算出する手順は、和歌山下津港と同様のため、記載を省略する。

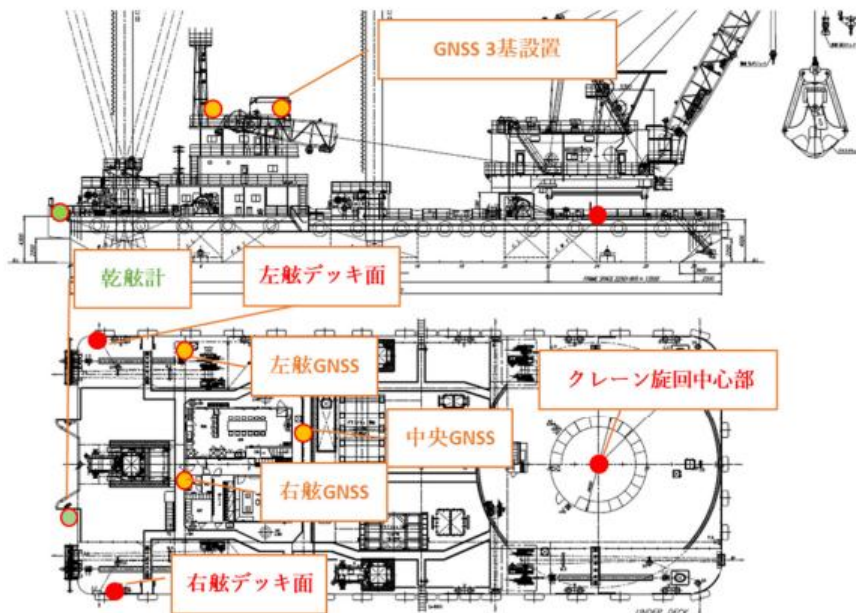


図-78 徳山下松港で使用した作業船

表-28 クレーン旋回中心部からGNSS受信アンテナまでのオフセット値

機器	X方向(m)	Y方向(m)	Z方向(m)
GNSS中央	-28.007	-6.066	10.358
GNSS右舷	-36.468	1.842	10.354
GNSS左舷	-37.373	11.518	10.201

(4) RTK-GNSS測位

現地試験実施期間におけるGNSS測位のFIX率を、表-29に示す。現地試験実施期間中にGNSS計測装置の不具合が発生し、途中で機器の交換を行ったため、未測の期間を挟んで計測期間が2つに分かれている。

なお、徳山下松港のRTK-GNSS測位はVRS方式で実施したため、元期座標が算出される。しかし、水路測量業務準則施行細則では今期座標を使用することになっているため、元期座標から今期座標へセミダイナミック補正を行った。補正量は0.012mである。

表-29 徳山下松港のGNSS測位のFIX率

機器	計測期間	FIX率(%)
GNSS中央	2024年11月27日～12月3日	46.97
	12月9日～12月12日	77.18
GNSS右舷	2024年11月27日～12月3日	47.88
	12月9日～12月12日	97.10
GNSS左舷	2024年11月27日～11月29日	13.12
	12月9日～12月12日	75.38

(5) バケット深度の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差について、現地試験実施期間の差の平均値と標準偏差を、表-30に示す。バケット深度の差が負の場合は、GNSS測位によるバケット深度が従来潮位補正よりも深いことを表す。また、バケット深度の計測結果の例として、12月10日の時系列データを図-79に示す。橙色の点が従来潮位補正、青色の点がGNSS測位（1分平均値）に対応する。

さらに、クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果の例として、12月10日の時系列データを図-80に示す。GNSS測位の平均値の算出方法の違いを調べるため、1秒・10秒・30秒・1分平均値を表示している。

表-30 従来の潮位補正とGNSS測位のバケット深度の差

GNSS測位	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
1秒平均	-0.04	0.16
10秒平均	-0.04	0.16
30秒平均	-0.05	0.16
1分平均	-0.06	0.16
2分後方移動平均	-0.12	0.15
5分後方移動平均	-0.13	0.14
10分後方移動平均	-0.15	0.29

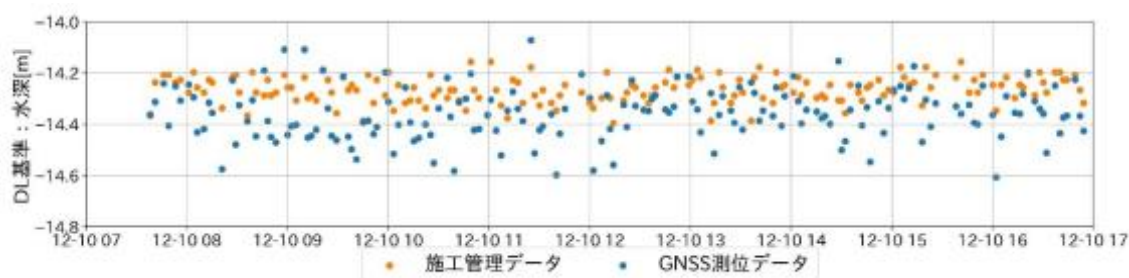


図-79 バケット深度の計測結果（GNSS測位は1分平均値，2024年12月10日）

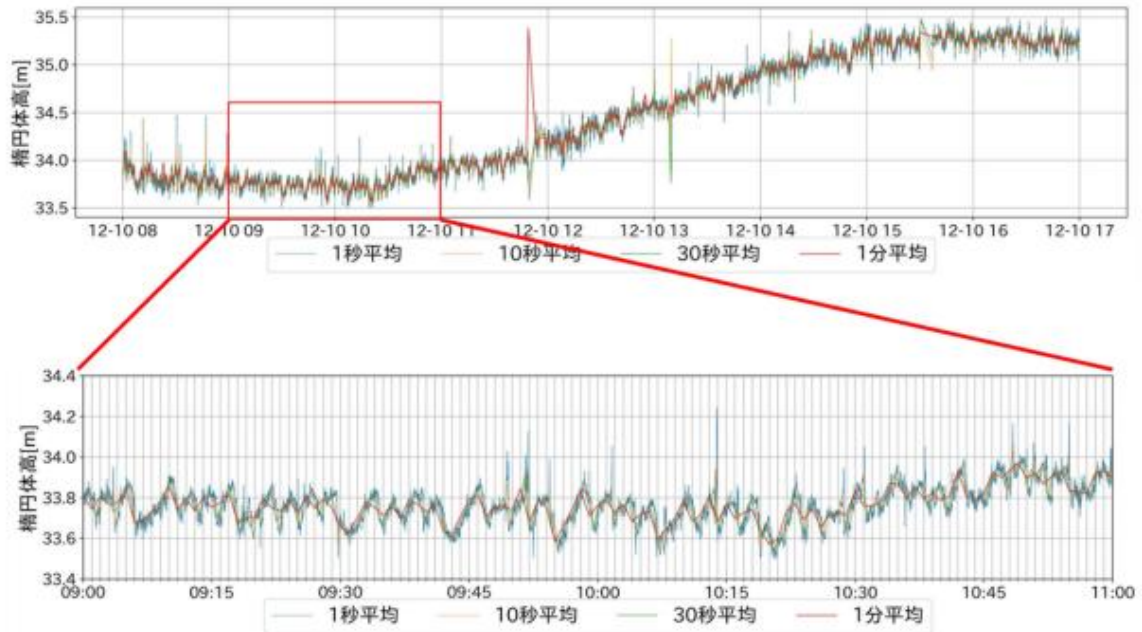


図-80 クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果（2024年12月10日）

(6) 考察

表-30及び図-79が示すとおり，GNSS測位の平均値算出の対象時間が1秒・10秒・30秒・1分の場合は，GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差は数cmであり，大きな乖離は生じていないと評価できる．また，GNSS測位の平均値算出の対象時間を長くすると，GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差が大きくなる傾向が見られた．一方，図-80が示すとおり，GNSS測位の平均値算出の対象時間が1秒・10秒・30秒では，短周期のスパイク状のノイズを除去できていない．

3.10 中城湾港における現地試験（浚渫工）

(1) 現地試験場所の概況

中城湾港の現地試験について，施工場所及び最寄りの検潮所（中城湾）の位置を，図-81に示す．



図-81 中城湾港の現地試験場所と最寄りの検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

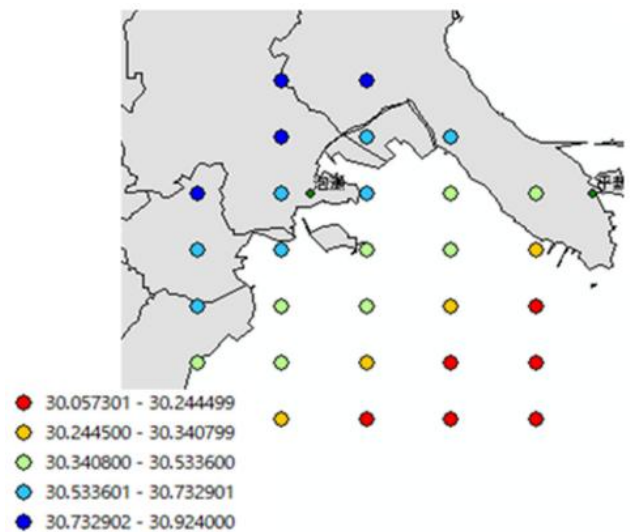


図-82 中城湾港の最低水面モデル

(2) 最低水面モデル

中城湾港の最低水面モデルを図-82に示す．平均水面の標高は0.131m， Z_0 は1.20mである．最低水面モデルの平均水面は，

沖縄検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである。

一方、GNSS測位で使用した港湾管理用基準面は、沖縄（津波古）検潮所の1979年～1983年の潮位観測に基づき決定されており、GNSS測位の平均水面は従来潮位補正よりも0.078m高い。このため、GNSS測位と従来潮位補正の平均水面の高さが一致するように補正を行った。

(3) 現地試験で使用した作業船

中城湾港の現地試験では、グラブ浚渫船を使用した。使用したグラブ浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-83及び表-31に示す。表-31のX方向は船首方向を正、Y方向は右舷方向を正、Z方向はデッキ面を基準として鉛直上向きを正とする座標系である。

なお、GNSS受信アンテナの3次元位置からバケット深度を算出する手順は、和歌山下津港と同様のため、記載を省略する。

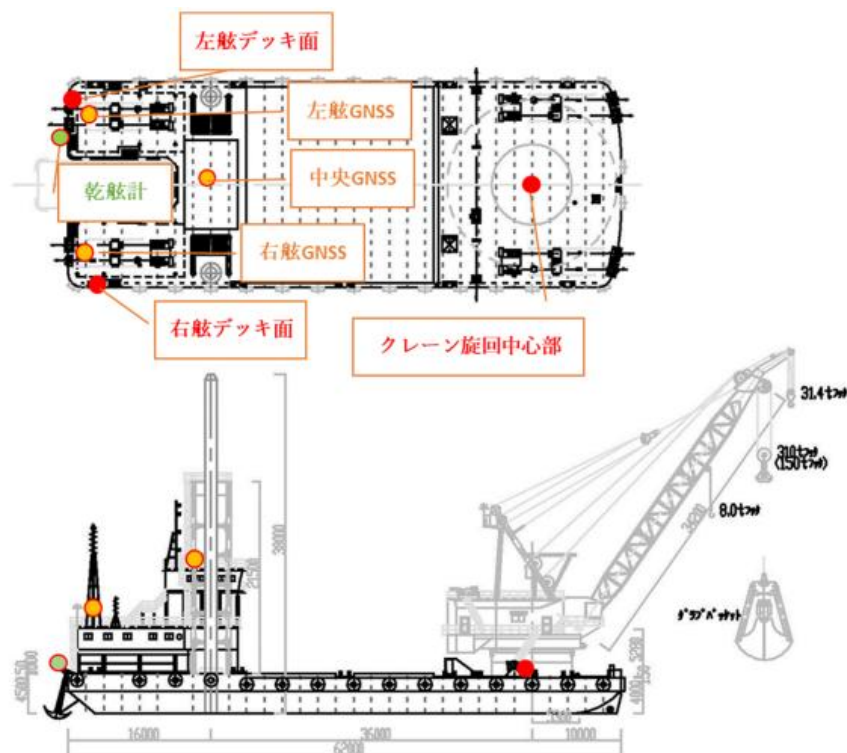


図-83 中城湾港で使用した作業船

表-31 クレーン旋回中心部からGNSS受信アンテナまでのオフセット値

機器	X方向(m)	Y方向(m)	Z方向(m)
GNSS中央	-39.284	-0.268	14.180
GNSS右舷	-51.261	7.306	7.529
GNSS左舷	-51.034	-7.339	7.598

(4) RTK-GNSS測位

現地試験実施期間におけるGNSS測位のFIX率を、表-32に示す。2024年12月26日から2025年1月6日までは年末年始の休工であったため、未測の期間を挟んで計測期間が2つに分かれている。

なお、中城湾港のRTK-GNSS測位はVRS方式で実施したため、元期座標が算出される。しかし、水路測量業務準則施行細則では今期座標を使用することになっているため、元期座標から今期座標へセミダイナミック補正を行った。補正量は0.045mである。

表-32 中城湾港のGNSS測位のFIX率

機器	計測期間	FIX率(%)
GNSS中央	2024年12月23日～12月25日	85.77
	2025年1月6日～1月12日	90.58
GNSS右舷	2024年12月23日～12月25日	93.65
	2025年1月6日～1月12日	89.71
GNSS左舷	2024年12月23日～12月24日	95.00
	2025年1月7日～1月12日	94.55

(5) バケット深度の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差について、現地試験実施期間の差の平均値と標準偏差を、表-33に示す。バケット深度の差が負の場合は、GNSS測位によるバケット深度が従来潮位補正よりも深いことを表す。また、バケット深度の計測結果の例として、1月10日の時系列データを図-84に示す。橙色の点が従来潮位補正、青色の点がGNSS測位（1分平均値）に対応する。

さらに、クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果の例として、1月10日の時系列データを図-85に示す。GNSS測位の平均値の算出方法の違いを調べるため、1秒・10秒・30秒・1分平均値を表示している。

(6) 考察

表-33及び図-84が示すとおり、GNSS測位の平均値算出の対象時間が1秒・10秒・30秒・1分・2分の場合は、GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差は数cmであり、大きな乖離は生じていないと評価できる。また、GNSS測位の平均値算出の対象時間を長くすると、GNSS測位と従来潮位補正のバケット深度の差が大きくなる傾向が見られた。一方、図-85が示すとおり、GNSS測位の平均値算出の対象時間が1秒・10秒・30秒では、短周期のスパイク状のノイズを除去できていない。

表-33 従来の潮位補正とGNSS測位のバケット深度の差

GNSS測位	差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
1秒平均	0.03	0.12
10秒平均	-0.06	0.12
30秒平均	-0.08	0.13
1分平均	-0.08	0.16
2分後方移動平均	-0.08	0.13
5分後方移動平均	0.11	0.82
10分後方移動平均	0.56	2.12

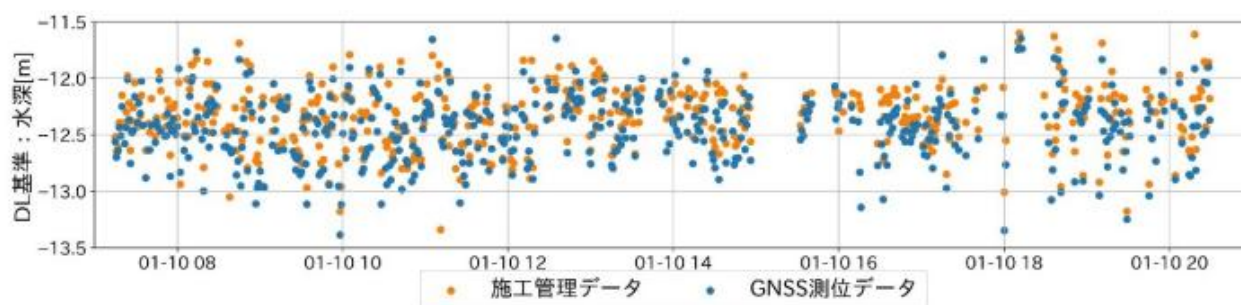


図-84 バケット深度の計測結果（GNSS測位は1分平均値，2025年1月10日）



図-85 クレーン旋回中心部の楕円体高の計測結果（2025年1月10日）

3.11 関門航路における現地試験（浚渫工）

(1) 現地試験場所の概況

関門航路の現地試験について、施工場所及び最寄りの検潮所（青浜）の位置を、図-86に示す。

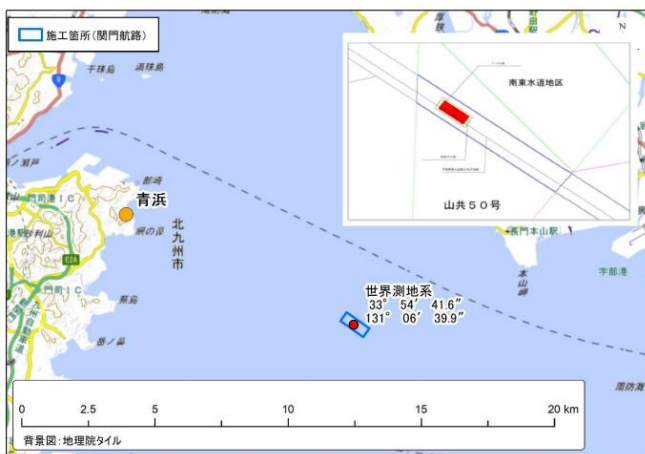


図-86 関門航路の現地試験場所と最寄りの検潮所（地理院タイル（国土地理院）を加工）

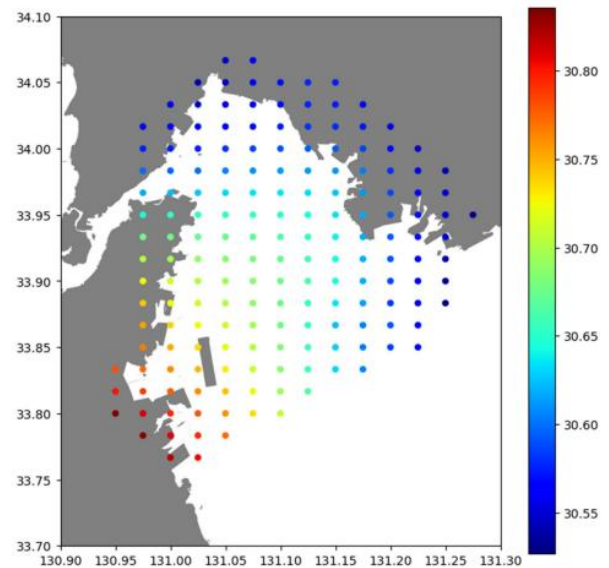


図-87 関門航路の最低水面モデル

(2) 最低水面モデル

関門航路の最低水面モデルを図-87に示す。平均水面の標高は0.205m、 Z_0 は2.10mである。最低水面モデルの平均水面は、青浜検潮所における2017年～2021年の潮位観測から算出したものである。

一方、GNSS測位で使用した港湾管理用基準面は、青浜検潮所の潮位観測に基づき2018年に決定されており、GNSS測位

の平均水面は従来潮位補正よりも0.004m高い。このため、GNSS測位と従来潮位補正の平均水面の高さが一致するように補正を行った。

(3) 現地試験で使用した作業船

関門航路の現地試験では、ドラグサクシオン浚渫船を使用した。使用したドラグサクシオン浚渫船の概要及び計測機器の設置位置を、図-88及び表-34に示す。表-34のX方向は船首方向を正、Y方向は右舷方向を正、Z方向は乾舷計設置位置を基準として鉛直上向きを正とする座標系である。

関門航路の現地試験ではドラグサクシオン浚渫船を使用したため、乾舷計設置位置の高さについて、潮位観測を利用した従来の潮位補正とGNSS測位の比較を行った。このため、表-34は、乾舷設置位置からGNSS受信アンテナまでのオフセット値を整理している。

また、RTK-GNSS測位は、海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用したが、比較のためにVRS方式も試行した。このため、GNSS計測装置は4台設置した。GNSS_VがVRS方式のためのGNSS計測装置である。

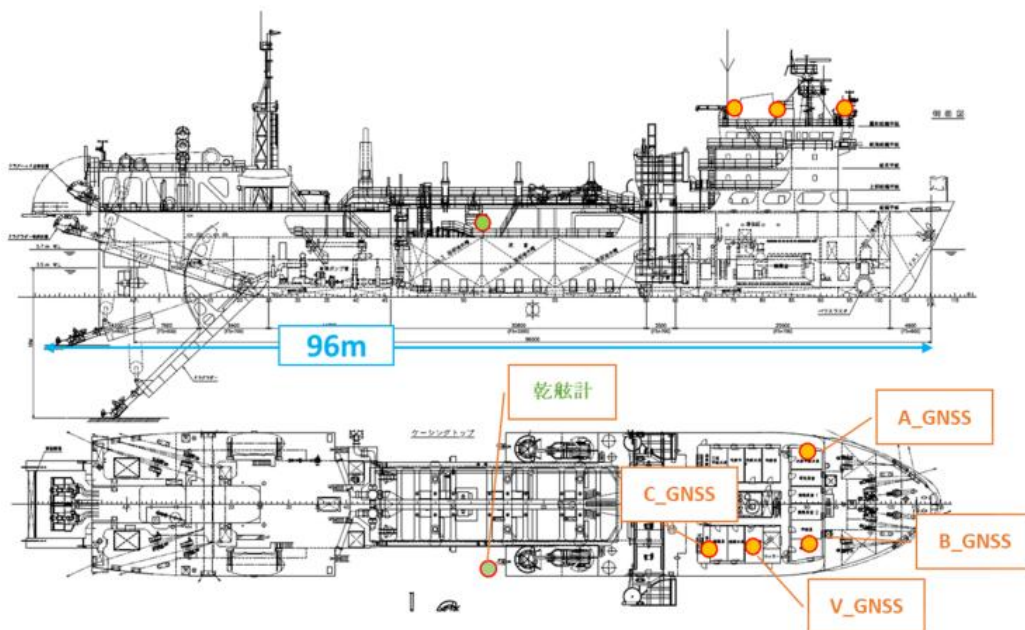


図-88 関門航路で使用した作業船

表-34 乾舷計設置位置からGNSS受信アンテナまでのオフセット値

機器	X方向(m)	Y方向(m)	Z方向(m)
GNSS_A	37.2842	-17.6297	15.320
GNSS_B	37.2842	-1.7417	15.309
GNSS_C	22.7432	-2.5668	15.130
GNSS_V	26.3232	-2.5668	15.212

(4) RTK-GNSS測位

関門航路の現地試験では、RTK-GNSS計測装置の設定の都合上、1秒間隔で計測を行い、平均値算出処理を行わず、1秒間隔の計測結果をそのまま使用した。

現地試験実施期間におけるGNSS測位のFIX率を、表-35に示す。海上GPS利用推進機構の補正情報サービスを利用したGNSS_A・GNSS_B・GNSS_Cと比較すると、VRS方式のGNSS_VのFIX率が低かった。

海上GPS利用推進機構の補正情報サービスとVRS方式を比較するため、GNSS_CとGNSS_Vで計測した楕円体高の時系列データを図-89に、測位品質の時系列データを図-90に示す。なお、GNSS_CとGNSS_Vのアンテナ高は、表-34に示すとおり0.082m差があるので、アンテナ高の差を補正して図-89を作成した。また、図-90の縦軸は測位品質を示し、「1：単独測

位」・「2：ディフレンシャル測位」・「4：RTK-FIX」・「5：RTK-FLOAT」を表す。測位品質は、「4：RTK-FIX」が最も精度が高い。

図-89及び図-90が示すとおり、VRS方式を利用したGNSS_V（青色）は、5月12日0時以降、測位品質がRTK-FIX（縦軸の数値で4）ではなくなり、楕円体高にノイズと思われる短周期の上下動が発生している。VRS方式の測位品質が低下した要因は、5月12日に北九州市周辺で発生した、大雨による携帯電話回線の通信障害の可能性が考えられる。携帯電話回線を通じて補正情報を受信するVRS方式に対して、海上GPS利用推進機構の補正情報サービスは、専用の補正情報受信アンテナを使用しており、高いFIX率を達成したものと考えられる。なお、測位品質がRTK-FIXの状態に限れば、GNSS_CとGNSS_Vの楕円体高の差の平均値は0.01mであり、概ね一致した。

また、海上GPS利用推進機構の補正情報サービスとVRS方式の両方において、元期座標が算出される。水路測量業務準則施行細則では今期座標を使用することになっているため、元期座標から今期座標へセミダイナミック補正を行った。関門航路の現地試験では作業船の航行範囲が広がったため、作業船の位置ごとに補正量を算出した。

表-35 関門航路のGNSS測位のFIX率

機器	計測期間	FIX率(%)
GNSS_A	2025年5月11日～5月15日	99.93
GNSS_B		99.82
GNSS_C		99.96
GNSS_V		49.25

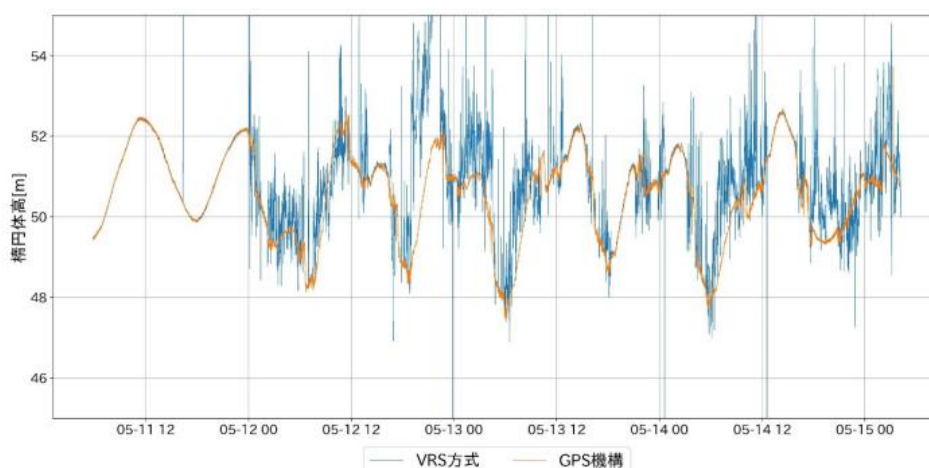


図-89 GNSS_CとGNSS_Vの楕円体高の計測結果の比較

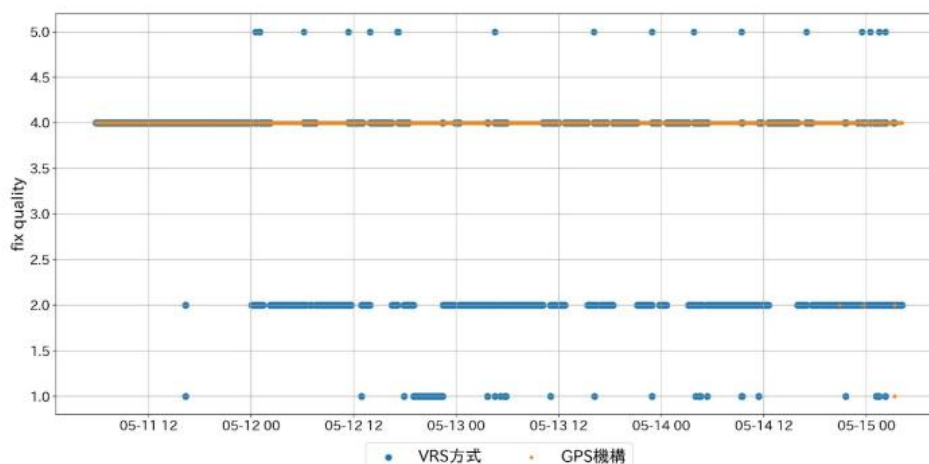


図-90 GNSS_CとGNSS_Vの測位品質の比較

(5) 乾舷設置位置の計測結果

GNSS測位と従来潮位補正の乾舷計設置位置の差について、現地試験実施期間の差の平均値と標準偏差を、表-36に示す。乾舷計設置位置の差が正の場合は、GNSS測位による乾舷計設置位置が従来潮位補正よりも高いことを表す。また、乾舷計設置位置の計測結果の時系列データを図-91に示す。橙色が従来の潮位補正、青色がGNSS測位に対応する。

表-36 従来の潮位補正とGNSS測位の乾舷計設置位置の差

差の平均値(m)	差の標準偏差(m)
0.05	0.12

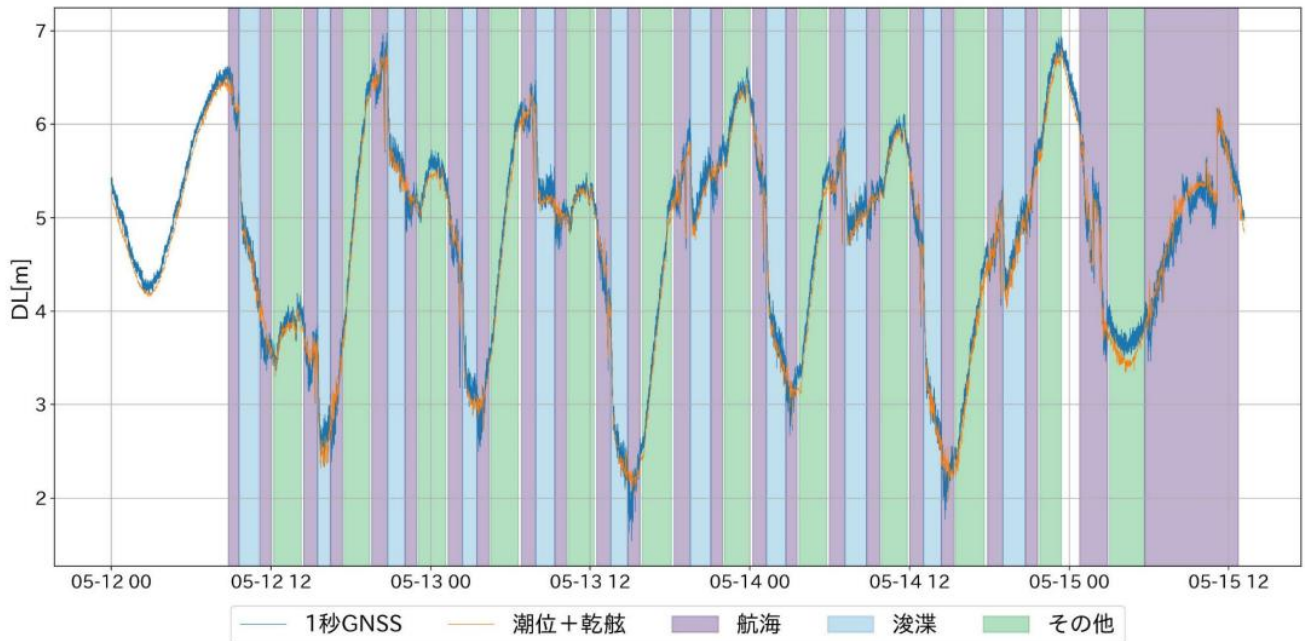


図-91 乾舷計設置位置の計測結果（2025年5月12日～5月15日）

(6) 考察

表-36及び図-91が示すとおり、GNSS測位と従来潮位補正の乾舷計設置位置の差は数cmであり、大きな乖離は生じていないと評価できる。なお、GNSS測位の乾舷計設置位置の計測結果には、航行中の作業船の動揺による振動が見られた。

3.12 浚渫工・床掘工等を対象とした現地試験の結果のまとめ

浚渫工・床掘工等を対象とした現地試験の結果のまとめを、表-37及び表-38に示す。表-37が2023年度、表-38が2024年度の結果である。それぞれの表は、工種、実施場所、従来潮位補正とGNSS測位の差の平均値、差の標準偏差を集計したものである。なお、2023年度の結果は作業船のデッキ面高を比較したものであり、2024年度の結果は、関門航路を除いてクラブ浚渫船のバケット深度を比較したものである（関門航路は乾舷計設置位置を比較）。差が正の場合は、GNSS測位が従来潮位補正よりも上側（高い位置）であることを表す。

また、2023年度の現地試験と関門航路（2024年度）では、1秒間隔でGNSS測位を行い、平均値算出処理を行わなかった。一方、関門航路を除く2024年度の現地試験では、10HzのサンプリングレートでGNSS測位を行い、平均値算出処理を行った。本研究の範囲では、平均値算出の対象期間の最適値を一意に決定することは困難であったので、表-38には1分間平均の結果のみを示す。

表-37及び表-38が示すとおり、2023年度の広島港（床掘工）を除けば、潮位観測を利用した従来の潮位補正とGNSS測位の差の平均値は、0.1m以内に収まっている。また、特定の工種や特定の作業船において、従来潮位補正とGNSS測位の差が大きくなる・小さくなるという傾向は見られなかった。

表-37 GNSS測位と従来の潮位補正の比較結果のまとめ（2023年度）

工種	施工場所	差の平均(m)	差の標準偏差(m)
床掘工	横浜港	0.008	0.077
	広島港	-0.112	0.085
浚渫工	大阪港	0.014	0.096
地盤改良工	八代港	0.032	0.157
	函館港	0.022	0.053
基礎捨石工	室津港	0.022	0.053

表-38 GNSS測位と従来の潮位補正の比較結果のまとめ（2024年度）

工種	施工場所	差の平均(m)	差の標準偏差(m)
床掘工	和歌山下津港	-0.04	0.09
浚渫工	徳山下松港	-0.06	0.16
	中城湾港	-0.08	0.16
	関門航路	0.05	0.12

表-39 港湾工事の出来形管理基準（関係部分のみ抜粋）²¹⁾

工種	管理項目	測定密度	測定単位	許容範囲
床掘工	水深	特記仕様書で規定	0.1m	底面 ±0.3m
浚渫工	水深	特記仕様書で規定	0.1m	底面 +0m/-規定なし
地盤改良工 (締固工)	砂杭天端高 先端深度	全数	0.1m	天端高 +規定なし/-0m 先端深度 +0m/-規定なし
基礎捨石工	天端高	測点間隔10m以下	0.01m	本均し ±0.05m

港湾工事の出来形管理基準（表-39）を参照すると、基礎捨石工の本均しを除けば、測定単位が0.1m、許容範囲も0.1m以上のものが多い。従来潮位補正とGNSS測位の差の平均値が0.1m以内に収まっていることは、GNSS測位による潮位補正が、港湾工事の施工管理・出来形管理として一定の精度を有しているものと評価できる。

GNSS 測位と従来潮位補正の差の要因としては、次の3つの要因が考えられる。

第1の要因は、潮位補正に使用したGNSS測位や潮位観測の計測誤差である。第2の要因は、GNSS測位が考慮する作業船の位置の海面変動と、従来潮位補正が考慮する検潮所の位置の海面変動が必ずしも一致しないことである。第1及び第2の要因は深浅測量と共通するものであり、詳細は2.9節を参照いただきたい。

第3の要因は、GNSS測位と従来潮位補正で、デッキ面高やバケット深度の計測方法が異なることである。デッキ面高を計測する場合、従来潮位補正では乾舷計（超音波式水位計）を使用する。乾舷計のデータ取得間隔は1分間であるが、GNSS測位のデータ取得間隔は0.1秒または1秒間隔であるため、計測されるデッキ面高は一致しない可能性がある。また、バケット深度を計測する場合、従来潮位補正では乾舷計1点のみの計測のため船体が水平であることを仮定している。GNSS測位ではGNSS受信機3点の計測により船体の傾斜の影響を考慮しているため、計測されるバケット深度は従来潮位補正と一致しない可能性がある。

なお、深浅測量の現地試験と異なり、浚渫工・床掘工等の現地試験では、GNSS測位と従来潮位補正の差に対して、使用する平均水面の高さの差は影響していないものと考えられる。2023年度の浚渫工・床掘工等の現地試験では、GNSS測位と従来潮位補正で同じ高さの平均水面を使用した。また、2024年度の現地試験では、平均水面の高さの差を補正してデッキ面高・バケット深度の比較を行った。

本研究では、それぞれの現地試験におけるGNSS測位と従来潮位補正の差が、上記要因のいずれによるものかを個別に特定することはできなかった。また、本研究では、GNSS測位と従来潮位補正の差の平均値に着目して検討を行ったが、GNSS測位と従来潮位補正の差が局所的に大きくなっている可能性がある。GNSS測位と従来潮位補正の間で局所的に大きな差が生じる場合、どのようなデータ処理をする必要があるかについて、施工管理・出来形管理の実務の観点から予め検討する必要がある。さらに、GNSS測位の平均値算出処理に関し、平均値算出の対象期間の設定方法を検討する必要がある。平均値算出の対象期間を短くすると、船体の動揺と考えられる短周期の振動を除去できない。他方、平均値算出の対象期間を長くすると、デッキ面高・バケット深度や海面変動を正しく計測できない。

4. おわりに

4.1 主要な結論

本研究は、GNSS 測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入することを目的として、深浅測量及び浚渫工・床掘工等の施工管理・出来形管理の現場で実証試験を行った。

深浅測量に関しては、合計 8 ヶ所の現場でマルチビーム測深を実施し、従来潮位補正と GNSS 測位の間で、水深の計測結果の差の平均値が概ね 0.1m 以内に収まることを確認した。深さの測定の不確かさの限度を考慮すると、GNSS 測位による潮位補正が、深浅測量として一定の精度を有しているものと評価できた。

施工管理・出来形管理に関しては、床掘工・浚渫工・地盤改良工・基礎捨石工の 4 つの工種を対象に、合計 10 ヶ所の現場で、作業船の高さ（鉛直位置）の計測を実施した。グラブ浚渫船については、施工管理・出来形管理で使用するバケット深度を計測し、その他の作業船についてはデッキ面高または乾舷計設置位置を計測した。従来潮位補正と GNSS 測位の間で、作業船の高さ（鉛直位置）の計測結果の差の平均値が概ね 0.1m 以内に収まることを確認した。港湾工事出来形管理基準の測定単位や許容範囲を考慮すると、GNSS 測位による潮位補正が、施工管理・出来形管理として一定の精度を有しているものと評価できた。

4.2 今後の課題

今後の課題としては、以下に示す 3 つの項目で、更なる検討が必要であると考えられる。

第1に、本研究では、施工管理・出来形管理で使用する部位として、グラブ浚渫船のバケット深度のみで GNSS 測位の精度検証を実施した。グラブ浚渫船以外の作業船については、デッキ面高で GNSS 測位の精度検証を実施した。施工管理・出来形管理で使用するためには、機械均しの均し機の先端、ドラグサクシオン浚渫船のドラグヘッド、サンドコンパクション船の砂杭打設位置等、施工管理・出来形管理で使用する部位の挙動で、GNSS 測位の精度検証を実施する必要がある。また、グラブ浚渫船のバケット深度についても、本研究では、従来潮位補正を利用した施工履歴データと比較したが、マルチビーム測深による出来形測量と比較を行うことも重要である。

第2に、本研究では、従来潮位補正と GNSS 測位の差の平均値に着目して検討を行ったが、従来潮位補正と GNSS 測位の差が局所的に大きくなっている可能性がある。従来潮位補正と GNSS 測位の間で局所的に大きな差が生じる場合、どのようなデータ処理をする必要があるかについて、深浅測量及び施工管理・出来形管理の実務の観点から予め検討する必要がある。なお、従来潮位補正と GNSS 測位では、計測のサンプリングレートが異なり、また、検潮所の海面変動と船が実際にいる位置の海面変動の差等も影響することから、従来潮位補正と GNSS 測位が必ずしも一致する必要が無いことに留意する。

第3に、本研究では、平常時の深浅測量及び施工管理・出来形管理を検討対象とした。GNSS 測位の利点の一つは、地震・津波等の災害発生時における、深浅測量・海上工事の迅速な実施であるので、災害発生時の調査・施工や維持管理での利用についても検討を行うことが必要である。

(2025年11月7日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」（委員長：岩波光保 東京科学大学 教授、事務局：国土交通省 港湾局 参事官（技術監理・港湾情報）室）の委員及び事務局関係者から、貴重なご意見をいただいた。また、現地試験の実施にあたっては、関係する地方整備局・工事関係者等にご協力いただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

なお、「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」の委員名簿及び開催概要を、付録に示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction 2.0～建設現場のオートメーション化～，34p.，2024，
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001738240.pdf>（最終閲覧日 2025 年 11 月 7 日）

- 2) 宇宙開発戦略本部：宇宙基本計画工程表（令和6年度改訂），62p., 2024,
https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy06/kaitei_fy0612.pdf（最終閲覧日2025年11月7日）
- 3) 国土地理院：令和7年4月1日に基準点の標高成果を改定します～衛星測位を基盤とする標高の仕組みへの移行～（国土地理院2025年3月10日付け報道発表資料），https://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/keikaku61003_00001.html
（最終閲覧日2025年11月7日）
- 4) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）令和7年3月版，455p., 2025,
<https://www.mlit.go.jp/tec/constplan/content/001880735.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 5) 国土地理院：ジオイドとは，https://www.gsi.go.jp/buturisokuchi/grageo_geoid.html（最終閲覧日2025年11月7日）
- 6) 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・小川遥・安原徹：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，第61号，pp.48-61，2023.
- 7) 国土交通省港湾局：マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編），48p., 2023,
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001599630.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 8) 松本良浩・土屋主税・山野寛之・住吉昌直：諸外国の事例にみる鉛直基準面モデル構築の取り組み，海洋情報部研究報告，第57号，pp.87-100，2019.
- 9) 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：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，第60号，pp.16-28，2022.
- 10) 林王弘道・佐藤勝彦・瀬尾徳常・南部正裕：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），驗潮との差異の要因分析と最低水面モデル構築への示唆，第63号，pp.29-41，2025.
- 11) 渡瀬陽信：GNSS測位技術におけるZ値活用に向けた実証計測結果について，マリンボイス21（一般社団法人 日本埋立浚渫協会 広報誌），Vol.327，p.19，2024.
- 12) 廣瀬大輔・川上司・辰巳大介・宮田正史・川原洋・瀬水幸治：GNSS鉛直測位による港湾工事における測深作業の効率化～最低水面モデルの作成と海上地盤改良工における実施試験～，国土技術政策総合研究所資料，第1278号，43p., 2024.
- 13) 海上保安庁：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.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 14) 国土地理院：日本のジオイド2011（Ver.2.2）取扱説明書，13p., 2023，<https://www.gsi.go.jp/common/000273610.zip>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 15) 海上保安庁：水路測量における測定又は調査の方法に関する告示別表第2（最終改正：2024年3月21日），
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/suirosoku/kokuji/ userdata/annex2.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 16) 久保信明：図解よくわかる衛星測位と位置情報，日刊工業新聞社，168p., 2018.
- 17) 合田良実（監修）・海象観測データの解析・活用に関する研究会（編集）：潮位を測る（潮位観測の手引き），沿岸開発技術研究センター，188p., 2002.
- 18) 国土交通省港湾局：施工履歴データを用いた出来形管理要領（基礎工編），49p., 2024,
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001735910.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 19) 国土交通省港湾局：施工履歴データを用いた出来形管理要領（海上地盤改良工：床掘工編），46p., 2024,
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001735918.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 20) 国土地理院：セミダイナミック補正，<https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/semidyna.html>（最終閲覧日2025年11月7日）
- 21) 国土交通省港湾局：港湾工事出来形管理基準，126p., 2025，<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001598403.pdf>（最終閲覧日2025年11月7日）

付録 「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」の概要

国土交通省港湾局では、2022 年 12 月に「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」を設置し、学識経験者、海上保安庁・国土地理院等の関係の行政機関、関係団体から技術的助言をいただき、GNSS 測位による水深（鉛直位置）の計測を海上工事へ導入するための検討を進めて来た。

「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」の委員名簿及び開催概要を以下に示す。

表-A.1 「港湾工事における衛星測位活用に向けた検討会」委員名簿

	氏名	所属・役職
委員長	岩波 光保	東京科学大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授
委員	久保 信明	東京海洋大学 海洋工学部 海事システム工学科 教授
	佐藤 勝彦 (鐘尾 誠)	海上保安庁 海洋情報部 沿岸調査課 上席沿岸調査官
	平岡 喜文 (酒井 和紀)	国土地理院 測地部 物理測地課 課長
	大岡 秀哉 (原田 卓三・宮田 正史)	国土交通省 港湾局 参事官（技術監理・情報化）
	畠田 繁実 (相澤 幹男・青島 豊一)	国土交通省 港湾局 技術企画課 港湾工事高度化室 室長
	辰巳 大介	国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾情報化支援センター 港湾業務情報化研究室 室長
	小倉 勝利	一般社団法人 日本埋立浚渫協会 技術委員会 委員
	佐藤 伸一 (三上 晃・安原 晃・小笠原 政之)	国土交通省 関東地方整備局 港湾空港部 事業計画官
	東野 隆之 (近藤 達夫・日置 幸司・神谷 一弘)	国土交通省 中部地方整備局 港湾空港部 事業計画官
	久米 英輝 (三上 圭一)	特定非営利活動法人 海上 GPS 利用推進機構 顧問
事務局	国土交通省 港湾局 参事官（技術監理・情報化）室	

「氏名」のカッコ内は前任者を表す。「所属・役職」は 2025 年 5 月時点で記載している。

(1) 第 1 回開催概要（2022 年 12 月 16 日）

議事：検討会設置趣旨及び検討スケジュール

港湾工事における衛星測位を活用した高精度 3 次元測位技術の確立
ジオイド・モデルについて
最低水面モデルについて
海上工事における GNSS 測位利用について
三港湾での調査及びとりまとめの方向性

(2) 第 2 回開催概要（2023 年 3 月 23 日）

議事：第 1 回検討会における主な意見と対応

実装に向けた全体像、ロードマップについて
ジオイド・モデルの算定について
平均水面分布及び最低水面モデルの算定について
GNSS 測位の測位方式による比較検証
港湾工事における実用化実証試験の計画
実用化に向けた課題

(3) 第3回開催概要（2023年5月11日）

議事：第2回検討会における主な意見と対応

港湾工事における衛星測位活用による生産性の向上
横浜港における実用化実証試験について
実用化に向けた意見及び課題
実用化に向けた課題とアプローチについて
実装に向けたロードマップについて
2023年度業務内容（案）について

(4) 第4回開催概要（2023年12月26日）

議事：港湾工事における衛星三次元測位実用化に向けて

2022年度検討会の成果
精密重力ジオイドの構築状況
最低水面モデル構築にかかる進捗状況について
3次元測位実用化に向けた課題整理
海上におけるGNSS測位の実用化実証試験に向けた検討
2023年度の検討業務
最低水面モデルの検証について（5港湾）
実用化に向けた実証試験について（3工種）

(5) 第5回開催概要（2024年3月25日）

議事：第4回検討会でのご指摘と対応

RTK-GNSSの誤差について
衛星測位精度の影響要因検証
最低水面モデルの検証
実用化に向けた実証試験
最低水面モデルを活用できるソフトウェアの検討
運用マニュアルの骨子及びロードマップ（案）

(6) 第6回開催概要（2024年5月30日）

議事：第5回検討会でのご指摘と対応

衛星測位におけるマルチパス誤差と搬送波位相測位（RTK）
衛星測位精度の影響要因検証
最低水面モデルの検証
実用化に向けた実証試験
最低水面モデルの周知
2024年度業務内容（案）について

(7) 第7回開催概要（2024年12月18日）

議事：港湾工事における衛星三次元測位実用化に向けて

2023年度検討会の成果
最低水面モデル構築について
衛星三次元測位の誤差要因の検証
2024年度の検討概要
深浅測量における衛星三次元測位を用いたデータ処理に関する検証

実工事における衛星三次元測位を用いた実証試験
関係機関への説明会

(8) 第8回開催概要（2025年3月27日）

議事：第7回検討会でのご指摘と対応

深浅測量におけるデータ処理に関する検証

港湾工事における実用化に向けた検証

関係機関からのご意見と対応案（説明会）

港湾工事における衛星三次元測位導入に関するガイドライン（手引き）

ロードマップ案

(9) 第9回開催概要（2025年5月29日）

議事：第8回検討会でのご指摘と対応

衛星測位精度の影響要因検証

深浅測量におけるデータ処理に関する検証

港湾工事における実用化に向けた検証

港湾工事における衛星三次元測位導入に関する技術資料のとりまとめ

今後、社会実装に向けて