

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1250

July 2023

マルチビーム測深を活用した基礎捨石均しの出来形管理に関する検討

川上司・辰巳大介・小川雅史・小嶋一弘

Study on the Application of Multibeam Echo Sounding to
Finished Form Management for Port Foundation Works

KAWAKAMI Tsukasa, TATSUMI Daisuke, OGAWA Masashi, KOJIMA Kazuhiro

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

マルチビーム測深を活用した基礎捨石均しの出来形管理に関する検討

川上司*・辰巳大介**・小川雅史***・小嶋一弘****

要 旨

国土交通省では、少子高齢化に伴う労働力不足を上回る生産性向上を目指して、全ての建設生産プロセスでICT等を活用し、2025年までに建設現場の生産性を2割向上させるi-Constructionの取組を推進している。港湾分野では、2017年よりマルチビーム測深の導入が進められており、浚渫工、床掘工の出来形管理等に活用されている。一方、基礎捨石均しについては、浚渫工、床掘工よりも出来形管理の測定単位及び許容範囲が小さく、また計測対象が平面ではなく凹凸を有する形状であることから、マルチビーム測深による出来形管理が未だ導入されていない。

本研究は、基礎捨石均しの出来形管理へマルチビーム測深を導入することを目的に、マルチビーム測深による基礎捨石均しの出来形計測手法を提案し、別途現地試験において提案した手法の精度検証を行うものである。基礎捨石均しの天端高の出来形計測については、潮位による誤差に対応するため、標定点を設置し補正を行う。また、計測対象が凹凸を有する形状であることに対応するため、取得する測深データの標準偏差で最浅値を算定する。基礎捨石均しの天端幅・延長の出来形計測については、出来形管理基準の計測単位である10 cm四方の平面格子による格子単位の判定を行う。

6ヶ所の施工現場で現地試験を行った結果、天端高については、提案したマルチビーム測深による計測結果が設計値に対して80%以上の達成率となり、提案手法を用いることで出来形計測に十分な計測精度を有していることが確認できた。ただし、キャリブレーションの計測値のばらつきが他の現場より大きかった現場では達成率が80%に達しなかった。天端幅・延長については、提案した出来形計測手法では定量的な出来形の評価が困難であった。今後、天端高の計測については、キャリブレーションにおける計測値のばらつきと達成率の関係を整理するとともに、出来形管理要領類の作成に向けた検討を進める。天端幅・延長の出来形計測については、格子単位の判定で用いる適切な格子サイズ等について引き続き検討を行う。

キーワード：基礎捨石均し、マルチビーム測深、出来形管理、i-Construction

*港湾情報化支援センター港湾業務情報化研究室 主任研究官
**港湾情報化支援センター港湾業務情報化研究室 室長
***港湾・沿岸海洋研究部港湾システム研究室 主任研究官
****前 港湾研究部港湾施工システム・保全研究室 交流研究員（現 若築建設株式会社）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail：ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

Study on the Application of Multibeam Echo Sounding to Finished Form Management for Port Foundation Works

KAWAKAMI Tsukasa*
TATSUMI Daisuke**
OGAWA Masashi***
KOJIMA Kazuhiro****

Synopsis

In order to achieve economic growth in the context of the declining working population, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) is promoting the “i-Construction” initiative to improve productivity at construction sites by utilizing ICT and other technologies in all construction production processes. In the field of port construction, multibeam echo sounding has been introduced to dredging works for improving the productivity since 2017. On the other hand, the measurement unit and tolerance range for the finished form management of port foundation works are more detailed than those for dredging and floor excavation, and finished form management by multibeam echo sounding has not been introduced yet because the target of measurement is an uneven shape.

This study proposes a method of measuring the port foundation works using multibeam echo sounding and verifies the accuracy of the proposed method in field tests. A control point is set on the seabed to reduce measurement errors due to tide level. Also, to accommodate the fact that the measurement target has an uneven shape, the shallowest value is calculated by the standard deviation of the depth data to be acquired. On the other hand, for the measurement of the width and extension of the top edge of the foundation rubble, a grid unit of 10 cm square, which is the unit of measurement of finished form management.

Field tests at six construction sites showed that the proposed multibeam echo sounding achieved more than 80% of the design depth for the top of foundation works, confirming that the measurement accuracy was sufficient. On the other hand, it was difficult to accurately evaluate the design values for the edge width and extension using the proposed multibeam echo sounding. The accuracy of the measurement of top edge height will be verified by accumulating more data through field tests. In addition, it is necessary to review the grid size used to determine the grid unit for the measurement of the top edge width and extension.

Key Words: Port Foundation Works, Multibeam Echo Sounding, Finished Form Management,
i-Construction

* Senior Researcher of Port Advanced Information Technology Division, Support Center for Port and Harbor Advanced Information Technology

** Head, Port Advanced Information Technology Division, Support Center for Port and Harbor Advanced Information Technology

*** Senior Researcher of Port Systems Division, Port, Coastal and Marine Department

**** Ex- Visiting Researcher, Port Construction Systems and Management Division, Port and Harbor Department (WAKACHIKU CONSTRUCTION Co., Ltd.)

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail : ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
1.1 背景と目的	1
1.2 構成	2
2. マルチビーム測深における基礎捨石均しの天端高計測手法の検討	2
2.1 基礎捨石均しの天端高の計測精度に関する課題	2
2.2 マルチビーム測深における潮位による誤差の低減手法の検討	2
2.3 基礎捨石均しの天端高の最浅値の算定手法の検討	5
2.4 提案する計測手法の現地計測における達成率の検証	7
3. 現地試験による天端高計測手法の検討	8
3.1 現地試験の概要	8
3.2 現地試験の計測結果	8
3.3 提案した計測手法の評価	17
4. 天端幅・延長の計測手法の検討	19
4.1 天端幅・延長の計測手法の概要	19
4.2 3次元点群データを用いた断面評価	20
4.3 平面格子を用いた面評価	22
4.4 提案した計測手法の評価	25
5. おわりに	25
謝辞	26
参考文献	26

1. はじめに

1.1 背景と目的

国土交通省では、少子高齢化に伴う労働力不足を上回る生産性向上を目指して、調査・測量から設計、施工、検査、維持管理・更新までの全ての建設生産プロセスでICT等を活用し、2025年までに建設現場の生産性を2割向上させるi-Constructionの取組を推進している。

港湾分野では、2017年度から浚渫工事を対象にマルチビーム測深を導入し、ICT浚渫工として現場での運用を本格化させている。また、2021年度には床掘工にもマルチビーム測深を導入した出来形管理の要領類を整備するなど、浚渫工事以外の工種へのICTの導入が進められている。

浚渫工以外の工種として、基礎捨石均しの出来形計測では施工後に潜水士が水中スタッフやスチールテープを用いた計測が行われている。計測作業に係る生産性や安全性の向上を目的とした基礎捨石均しへのICT導入について、2021年に起工測量をマルチビーム測深で行う「3次元データを用いた港湾工事数量算出要領（基礎工編）」¹⁾が整備されたが、計測精度等の課題により出来形管理への活用には至っていない。

基礎捨石均しの出来形管理へのマルチビーム測深活用の課題として、マルチビーム測深時の潮位等による誤差の影響や施工面に捨石の凹凸形状により天端高の計測が困難なことがある。また、基礎捨石均しのうち、本均しの施工面上にはケーソンなどの構造物が据付けられるため、ケーソン底版に過大な集中荷重が作用しないように特に高い均し精度が必要とされ、既にマルチビーム測深が活用されている浚渫工や床掘工よりも出来形管理の要求精度が高い。表-1.1に示す通り本均しの天端高の出来形管理基準²⁾では測定単位が1cm、許容範囲が±5cmとされている。既にマルチビーム測深が導入されている浚渫工の出来形管理基準は測定単位が10cm、許容範囲が0cm以下（設計値より深いこと）であり、マルチビーム測深の計測精度は浚渫工には対応できるが、同じ計測手法を基礎捨石均しの計測に適用することは精度の観点から困難である。実際に、2018年度にマルチビーム測深による基礎捨石均しの計測の実証が行われた³⁾際は、既存手法で合格した施工面におけるマルチビーム測深の達成率（計測範囲を1m四方の平面格子で分割し、平面格子の計測値が出来形管理基準を満たしている割合）が人力均しで40%、機械均しで達成率60%に留まる結果となった。

基礎捨石均しをマルチビーム測深で計測するためには、計測精度を向上させる必要があるが、そのためにはマル

チビーム測深における潮位による誤差の低減及び捨石の凹凸形状から天端高の最浅値を算定する手法が必要である。

なお、本均しの出来形管理基準である±5cmは経験的に得られたものであり、宮田ら⁴⁾等は均し精度とケーソン底版に作用する荷重の検討を行っているが、出来形管理基準の変更には至っていないことから、本研究において天端高の出来形管理基準は現行の±5cmを前提として検討を行う。

また、マルチビーム測深による出来形管理の生産性向上のためには、天端高以外の出来形管理項目である天端幅・延長についての計測も必要である。前述の2018年度の実証時にはマルチビーム測深による点群データから作成した断面より目視での計測について検討されているが、この手法についても要領化には至っておらず、計測手法の検討が必要である。

そこで、本研究では、基礎捨石均しのマルチビーム測深に必要な①本均しの要求精度に対応した計測手法、②天端幅、延長の計測手法の検討を行い、マルチビーム測深による出来形管理手法を提案する。

なお、基礎捨石均しは潜水士による人力均しと起重機船から重錘を落下させて捨石を均す機械均しが現場条件等に応じて使い分けられているが、機械均しについては小嶋ら⁵⁾により施工履歴データを活用した出来形管理の検討が行われていることから、本研究では人力均しを対象に検討を行う。

表-1.1 基礎捨石均しの出来形管理基準

	管理項目	測定密度	測定単位	許容範囲
本均し	天端高	測線間隔10m以下	1cm	±5cm
	天端幅	測線間隔10m以下	10cm	+側:規定なし -側:10cm
	延長	法線上又は監督職員の指示	10cm	+側:規定なし -側:10cm
荒均し	天端高	測線間隔10m以下	10cm	±50cm 岸壁前面: +0.-20cm 異形ブロック据付面(整積)の 高さ: ±30cm
	天端幅	測線間隔10m以下	10cm	+側:規定なし -側:10cm
	延長	法線上又は監督職員の指示	10cm	+側:規定なし -側:10cm
	法面	10m以下測点3点以上	10m	±50cm(法面に直角) 異形ブロック据付面(整積)の 高さ(法面に直角)±30cm

1.2 構成

本稿の構成は次の通りである。第1章では、本検討の背景・目的について記述し、第2章では、マルチビーム測深による天端高の計測精度に関する課題について、音線追跡シミュレーション及び現地試験結果より検討を行い、天端高の出来形計測手法を提案する。第3章では第2章で提案手法に基づいて基礎捨石均しの施工現場における現地試験を実施し、マルチビーム測深による天端高の計測について提案した計測手法の妥当性を検証する。第4章では、現地試験データより天端幅・延長の計測手法の検討を行う。これらの検討結果について、第5章においてまとめを示した。

2. マルチビーム測深における基礎捨石均しの天端高計測手法の検討

2.1 基礎捨石均しの天端高の計測精度に関する課題

マルチビーム測深で基礎捨石均しの計測を行う場合、達成率が低くなる要因として、(1)マルチビーム測深における潮位による誤差、(2)天端高の最浅値の算定が必要という2つの課題が挙げられる。

(1) マルチビーム測深における潮位による誤差

マルチビーム測深の計測精度に影響する要素としては、機器の艀装状況、船舶の動揺、水中音速度の変化、潮位等によるものがある。

このうち、機器の艀装、船舶の動揺、水中音速度の変化については計測前にパッチテストや水中音速度の計測を行うことで、計測誤差を軽減している。これらの要因によるマルチビーム測深の誤差については、適切にキャリブレーション等を行うことで出来形管理基準の許容値と比べて小さな値となり、計測精度への影響は軽微となる。

一方、潮位による誤差については、計測場所近隣の検潮所の潮位を用いて補正するのが一般的だが、検潮所と計測場所が離れている場合には補正に用いた検潮所潮位と現地潮位の差が大きくなり、出来形計測の精度に影響を及ぼすことが考えられる。このため、マルチビーム測深の精度向上のためには潮位誤差の補正が必要となる。

(2) 天端高の最浅値の算定

基礎捨石均しの天端は図-2.1に示すように捨石の形状によって凹凸が生じる。従来の計測手法で基礎捨石均しの天端高を計測する際は、捨石の最も浅い部分に潜水士が計測機器を設置し天端高を取得しているが、マルチビーム測深で計測を行った場合、赤点で示すように捨石間の窪み部分まで点群データとして計測される。

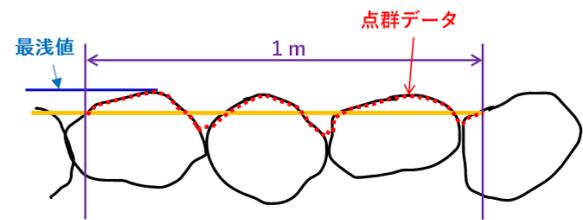


図-2.1 基礎捨石均しの天端における点群取得

このため、基礎捨石均しの天端高をマルチビーム測深で計測するためには、捨石間の窪み部分を含んだ計測結果から最浅値を求める必要がある。

2.2 マルチビーム測深における潮位による誤差の低減手法の検討

基礎捨石均しのうち、本均し部分は天端高の出来形管理基準の許容範囲が設計値 $\pm 5\text{cm}$ と浚渫工や床掘工と比べて厳しいことから、浚渫工や床掘工の計測におけるキャリブレーションに加えて、さらに計測精度を向上させる必要がある。

そこで、まずは潮位による誤差の低減手法を検討する。2.1(1)のとおり、潮位については計測時に検潮所の潮位を用いた補正を行っているが、検潮所からマルチビーム測深の計測位置が離れている場合には検潮所と現地潮位に差が生じることが考えられる。

そこで、水中に水深が既知の点（標定点）を設置し、マルチビーム測深による計測水深との差を用いることで潮位による誤差を低減できるか現地試験により検討する。

検討は鹿児島港で建設中の係留施設において、捨石を投入し人力均しを行った後、ケーソン据付前に基礎捨石均しの天端に標定点を設置し、標定点を従来手法（水中水準測量）及びマルチビーム測深で計測することにより行った。なお、マルチビーム測深の計測作業は「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）」⁶⁾に準じて実施した。

現地試験の概要を表-2.1に、設置した標定点の模式図及び写真を図-2.2に示す。なお、標定点は1m四方の溶接金網の上に脚となる5個の軽量ブロックを置き、その上に1m四方のエキスバンドメタルを敷き、平板となる15個の軽量ブロックを並べたものを用いた。

表-2.1 現地試験概要

実施場所	鹿児島港
実施時期	2021年9月
設計水深	9.00m(基礎捨石工の均し面の位置)
計測範囲	29m×23m
石材	5kg~100kg/個
均し方法	人力均し
マルチビーム測深	周波数 400kHz ビーム数 (A)256本, (B)1024本 スワス角 120度 隣接ルートラップ率 50% 船速 4.0ノット

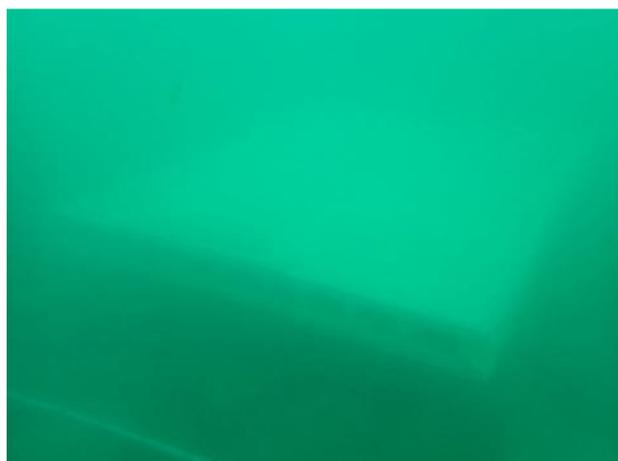
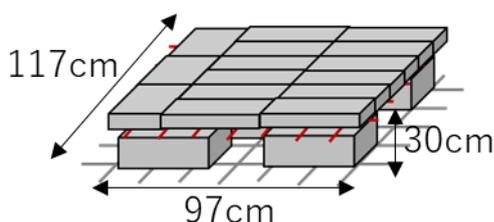


図-2.2 標定点の模式図(上)及び写真(下)

マルチビーム測深器は、ビーム数が256本の機器Aと、ビーム数が1024本の機器Bの2種類を使用した。ビーム数以外の計測条件(周波数, スワス角, 隣接ルートラップ率, 船速)は機器Aと機器Bで同一である。

(1) 標定点の計測結果の比較

潜水士による水中水準測量とマルチビーム測深で標定点を計測した結果を表-2.2に示す。標定点は1m四方の平板であり、マルチビーム測深では機器Aで269点, 機器Bで649点の水深値が計測された。水中水準測量は0.5m程度の間隔で計測を行い、平板の四隅・各辺の中点・平板の中心の計9点を計測した。

表-2.2 標定点の計測結果

	水中水準測量	マルチビーム測深	
		機器A	機器B
取得点数	9	269	649
水深の平均値(m)	8.697	8.703	8.736
水深の標準偏差(m)	0.020	0.027	0.030

計測された水深の平均値を比較すると、水中水準測量は8.697m, マルチビーム測深が機器Aで8.703m, 機器Bで8.736mとなり、マルチビーム測深の方が0.006m~0.039m深い値であった。この水中水準測量とマルチビーム測深の結果の差が、検潮所と現地の間における潮位による誤差と考えられる。

また、計測された水深の標準偏差は、水中水準測量が0.020m, マルチビーム測深が機器Aで0.027m, 機器Bで0.030mとなり、マルチビーム測深の方が水中水準器よりややばらつきが大きい結果となった。

(2) 基礎捨石均しの計測結果の比較

マルチビーム測深で基礎捨石均しの施工後に計測した海底地形図を図-2.3に示す。図中の茶色の部分が設計水深9.0mの基礎捨石均しの本均し部分である。周囲は水深10.5m~12.0mの原地盤であり、基礎捨石均しの天端面が浅く盛り上がっていることがわかる。なお、図中の白抜きとなっている部分は、既にケーソンが設置されている箇所である。

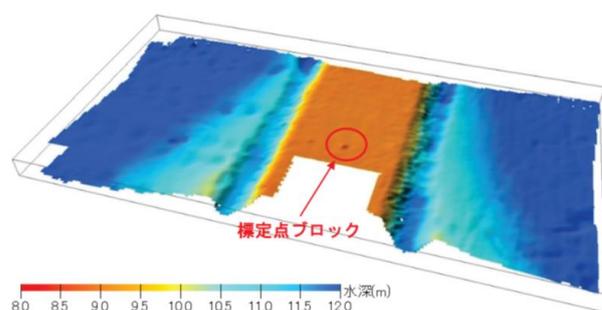


図-2.3 マルチビーム測深で計測した海底地形図

マルチビーム測深の結果を評価するにあたり、既に運用が行われている浚渫工の出来形管理手法⁶⁾を準用して計測値を算出した。これは、マルチビーム測深による計測範囲を1m四方の平面格子で分割し、1つの平面格子内において計測データから代表値を抽出し、出来形管理に用いるものである。ここでは平面格子内の中央値, 平均値, 最浅値を代表値として抽出し、本均しの出来形管理基準内となっているか確認した。なお、浚渫工では、土量計算において中央値, 水深の出来形管理においては最

浅値を使用することとされている。

抽出した代表値について、計測値の精度を評価するためには従来の計測手法による計測結果と比較する必要があるが、天端高の計測間隔の目安は10mであり、面的な比較が難しい。このため、本検討では設計水深9.0mに対して基礎捨石均しの本均しの出来形管理基準である±5cm以内に入っている平面格子の割合を達成率とし、施工面に対する計測精度評価の指標とした。

マルチビーム測深で計測した水深値と設計値の比較結果を表-2.3に示す。まず、マルチビーム測深で計測した水深について、機器A、Bともに、平均値、中央値いずれの指標でも設計値より深い値を示した。機器Aでは、平均値で0.040m、中央値で0.038m深い値となり、機器Bでは、平均値で0.099m、中央値で0.098m深い値となった。次に、達成率について、機器Aでは平均値で74.4%、中央値で67.5%、最浅値で53.4%となり、機器Bでは平均値で5.0%、中央値で5.5%、最浅値で76.0%となった。

表-2.3 マルチビーム測深で計測した計測値及び達成率

	機器A	機器B
平均値(m)	9.040	9.099
中央値(m)	9.038	9.098
達成率(%) (平均値)	74.4	5.0
達成率(%) (中央値)	67.5	5.5
達成率(%) (最浅値)	53.4	76.0

また、機器A、Bとも平均値と中央値の達成率は最浅値の達成率と比べて同程度の値を示した。機器Aでは平均値と中央値の達成率が最浅値の達成率より高く、機器Bでは最浅値の達成率が平均値と中央値の達成率より高い結果となった。

(3) 標定点による潮位誤差補正効果

(2)で計測したマルチビーム測深の結果を、(1)で確認した標定点における従来手法とマルチビーム測深の結果の差で潮位誤差を補正する。

語差の低減は、標定点の計測ではマルチビーム測深の方が従来手法より深い値となったことから、(2)の結果を(1)の計測差分浅くすることにより行う。標定点による補正前後の計測値と達成率を表-2.4に示す。

表-2.4 標定点との計測差を反映した計測結果

標定点反映	機器A		機器B	
	無	有 (-0.006m)	無	有 (-0.039m)
平均値(m)	9.040	9.034	9.099	9.059
中央値(m)	9.038	9.032	9.098	9.058
達成率(%) (平均値)	74.4	78.2	5.0	48.6
達成率(%) (中央値)	67.5	80.1	5.5	40.5
達成率(%) (最浅値)	53.4	53.4	76.0	61.1

機器A、Bともに標定点における従来手法とマルチビーム測深の計測差で補正することで、計測値が設計値に近い値となり、達成率も向上していることがわかる。

機器Aの達成率は、平均値では74.4%から78.2%へ、中央値では67.5%から80.1%へ、3.8~12.6%上昇した。一方、最浅値の達成率は標定点による補正前後とも53.4%と変化しなかった。

機器Bの達成率は、平均値では5.0%から48.6%へ、中央値では5.5%から40.5%へ、35.0~43.6%向上している。一方、最浅値の標定点による補正後の達成率は76.0%から61.1%と、14.9%下がる結果となった。

これにより、平均値と中央値では標定点の計測結果で補正することにより、マルチビーム測深における潮位誤差の影響を低減し、計測精度が上昇することが確認できた。最浅値では精度が一定又は低下することとなったが、これは最浅値が点群データの最も浅い数値を採用するため、点群データに大きなばらつきがある場合には特異的な水深値を取得してしまい、必ずしも点群の全体的な傾向を再現していないことによるものと考えられる。

ただし、標定点の値で補正することで平均値、中央値を採用した場合の達成率は上昇したものの、上昇後の達成率も40.5~78.2%に留まり、標定点の計測差を反映した後の水深の計測値は設計水深に対し機器Aで0.032~0.034m、機器Bで0.058~0.059mより深い値となった。特に機器Bの達成率は標定点の計測差を反映した後も平均値で48.6%、中央値で40.5%に留まる結果となった。

この原因として、捨石の形状の影響が考えられることから、計測精度を向上させるためには、捨石の天端面の最浅値を算出することが必要となる。

2.3 基礎捨石均しの天端高の最浅値の算定手法の検討

(1) 音線追跡シミュレーションの計算手法

2.1(2)で記載のとおり、マルチビーム測深のビームは捨石間の窪み部分まで計測するため、マルチビーム測深における平均値や中央値は、捨石の最浅値を基準とする従来の出来形計測よりも深くなる傾向がある。

その影響を確認するため、マルチビーム測深の計測値と設計値の関係性を一般化するため、マルチビーム測深における潮位誤差や捨石ごとの形状のバラツキなどが生じない理想的な環境下における音線理論⁷⁾に基づく音線追跡シミュレーションを実施した。

音線追跡シミュレーションは、海中を伝播する音波の波動性を省略し、音波が直線として進行すると仮定したシミュレーションである。なお、本稿では水中音速度を深さによらず一定として仮定している。

音線追跡シミュレーションの計算手順を図-2.4に、音線追跡シミュレーションで使用する3次元幾何学モデルの模式図を図-2.5に示す。

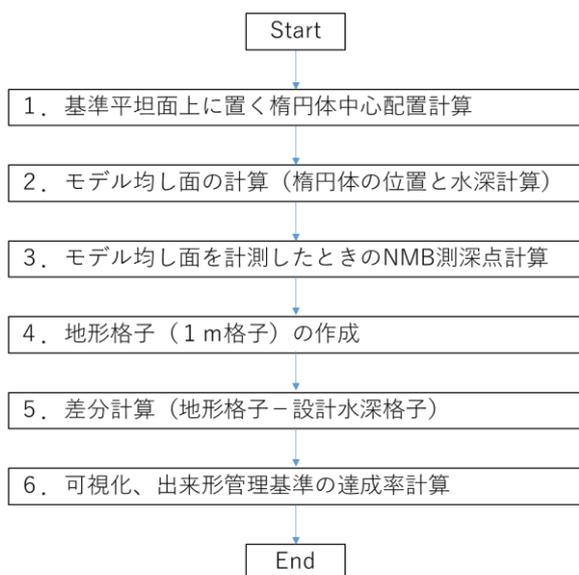


図-2.4 音線追跡シミュレーションの計算手順

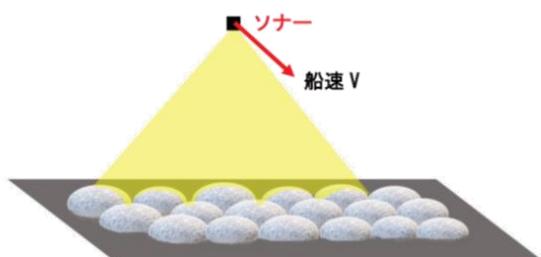


図-2.5 3次元幾何学モデルの模式図

音線追跡シミュレーションでは、捨石は半分に切断した楕円体で模擬する。まず、基準となる平面上に、中心点と隣接中心点の距離が楕円体の水平方向半径の2倍となるよう楕円体中心を配置する。次に、楕円体中心から楕円体表面の3次元座標（平面位置と水深）を計算し、点群として配置する。その後、船速と発振間隔からマルチビームのショット位置を算出し、ソナーから発信されたビーム（音線）が楕円体と接触する位置を計算し、当該地点の水深をマルチビーム測深で計測した水深値として記録する。最後に、計測範囲を1m四方の平面格子に分割し、格子ごとの水深値から中央値等の統計量を求め、設計水深との比較や図化を行う。

音線追跡シミュレーションで使用したパラメータの一例を表-2.5に示す。基準となる水深は10m,15m,20mの3種類を用意した。基準水深に楕円体の中心を配置するため、設計水深は捨石の短半径分浅い値となる。捨石の形状は長半径0.45m、短半径0.15mと仮定した。捨石の比重を2.65とすると、1個当たり340kgの石材に相当する。

表-2.5 音線解析シミュレーションのパラメータ

パラメータ	設定値
基準水深(m)	10,15,20
捨石形状(m)	0.45(長辺)、0.15(短辺)
ビーム数(本)	256
スワス角(度)	120
ビーム幅(度)	0.5
発射間隔(Hz)	20
船速(knot)	4
測線(本)	2
ラップ率(%)	100
格子サイズ(m)	1×1

マルチビーム測深に関するパラメータ（ビーム数、スワス角、ビーム幅、発振間隔、船速、測線、ラップ率）については、2.2の現地試験を参考に設定した。

(3) 音線追跡シミュレーションの計算結果

音線追跡シミュレーションで算出した平均値、中央値及び標準偏差の平均値を表-2.6に示す。基準水深が10m,15m,20mのいずれの場合でも、音線追跡シミュレーションの結果は石材頂部の水深より0.05m深い値を示した。これは、現地試験で標定点による潮位誤差補正後も計測値が設計値より深い値を示したことと一致する。

表-2.6 音線追跡シミュレーション結果

基準水深 (m)	石材頂部の 水深 (m)	水深の平均値		水深の中央値	
		計測値 (m)	標準偏差 (m)	計測値 (m)	標準偏差 (m)
10	9.85	9.90	0.03	9.90	0.04
15	14.85	14.90	0.03	14.90	0.04
20	19.85	19.90	0.03	19.90	0.04

ここで、音線追跡シミュレーションにおける平均値、中央値の標準偏差はそれぞれ 0.03m, 0.04m となった。標準偏差は計測点群の高さのばらつきに応じて変動し、捨石の凹凸が大きい場合には標準偏差は大きくなり、平坦な捨石では標準偏差は小さくなる。このことから、図-2.6 に示す通り平均値、中央値の値を標準偏差分浅くすることで、石材頂部 (= 最浅値) の水深の値を算定できることが考えられる。今回のシミュレーションにおける平均値、中央値の標準偏差は、石材頂部の水深と計測値の差である 0.05m と近い値であった。

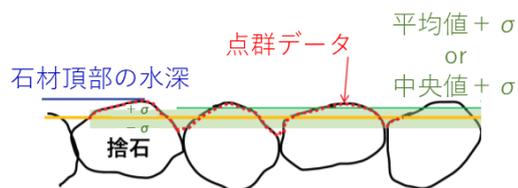


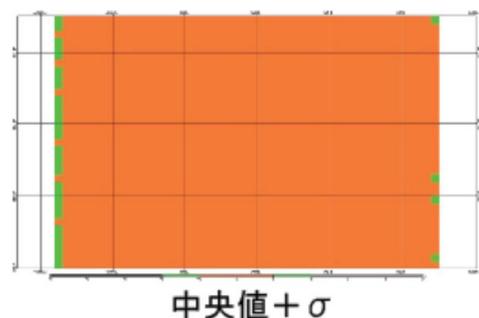
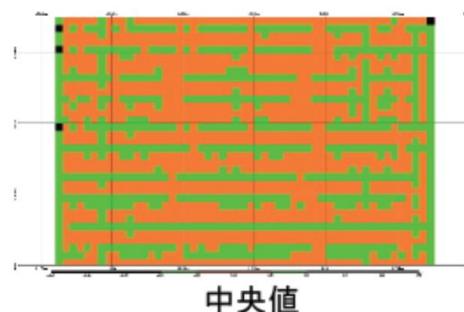
図-2.6 標準偏差の加算による捨石形状影響の低減

音線追跡シミュレーションの計算結果に標準偏差を加算した結果を表-2.7 に示す。計測値及び加算後の水深に併記した括弧内の値は達成率を示している。平均値、中央値とも標準偏差を加算することにより計測値が設計値である石材頂部の水深に近い値となり、達成率も加算前と比べて 100% に近い値にまで上昇している。

標準偏差の加算による計測値の面的な変化を確認するため、図-2.7 に中央値における標準偏差加算前後の計測値の水深をヒートマップとして図化したものを示す。橙色が出来形管理基準内となった平面格子を示しており、緑色は設計値から ± 10 cm 以内の平面格子、黒色は 10cm

より深い平面格子、灰色は 10cm より浅い平面格子を示す。補正前のヒートマップでは計測範囲の半数程度が緑色の格子であり、橙色の格子は計測範囲の半分程度に留まっている。一方、標準偏差を加算したヒートマップでは、格子が全体的に橙色となっており、設計値に近い値となっていることが確認できる。

本稿における音線追跡シミュレーションは、水中音速度を一定とし、捨石の大きさや配置を単純化しているため、実際の港湾における計測結果の再現は困難であるが、潮位誤差等の影響を除外した計測精度の検証が可能である。本検証により、中央値、平均値を標準偏差の分浅くすることで捨石の最浅値を算定できることが確認できた各格子の標準偏差は複雑な計算を行わずに求めることができ、本手法は簡便な算定が可能なことも利点となる。



- 凡例
- : 設計値-10cm未満
 - : 設計値 ± 5 cm
 - : 設計値 ± 10 cm
 - : 設計値 10cm以上

図-2.7 音線追跡シミュレーションのヒートマップ

表-2.7 標準偏差を加算した場合における音線追跡シミュレーション結果

基準水深(m)	石材頂部の 水深(m)	水深の平均値		水深の中央値	
		計測値(m)	標準偏差を 加算後(m)	計測値(m)	標準偏差を 加算後(m)
10	9.85	9.90 (20.9%)	9.87 (100%)	9.90 (61.5%)	9.86 (100%)
15	14.85	14.90 (27.7%)	14.87 (100%)	14.90 (59.9%)	14.86 (100%)
20	19.85	19.90 (30.4%)	19.97 (99.6%)	19.90 (56.5%)	19.86 (99.5%)

2.4 提案する計測手法の現地計測における達成率の検証

2.2 で実施した鹿児島港における現地計測事例について、2.3 で検討した標準偏差を用いた最浅値の算定を行い、実際の基礎捨石均しの達成率が向上するかどうか適用性を検証する。

表-2.8 に機器 A,B の平均値、中央値それぞれの標準偏差と、標定点・標準偏差反映前後の達成率を示す。

機器 A では平均値・中央値ともに各格子の水深の標準偏差の平均値は 0.029m となった。機器 B の各格子の水深の標準偏差の平均値は平均値指標で 0.033m、中央値指標で 0.034m となり、機器 B の方が機器 A より標準偏差は大きくなった。

表-2.8 標準偏差を加算した現地計測結果

標定点補正	機器A (ビーム数:256本)		機器B (ビーム数:1024本)	
	無	有 (-0.006m)	無	有 (-0.039m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.029		0.033	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.029		0.034	
達成率(% (平均値)	74.4	78.2	5.0	48.6
達成率(% (中央値)	67.5	80.1	5.5	32.0
達成率(% (平均値+標準偏差)	92.4	95.7	34.6	87.0
達成率(% (中央値+標準偏差)	92.2	95.7	32.0	84.1

標準偏差反映後の達成率は、機器 A,B の両方で平均値、中央値いずれの代表値も上昇し、機器 A では平均値の達成率が 74.4% から 92.4%、中央値では 67.5% から 92.2% に上昇した。機器 B では平均値の達成率が 5.0% から 34.6%、中央値では 5.5% から 32.0% に上昇した。

さらに、標準偏差反映後の計測値を標定点の計測差で補正することで、いずれのケースでも達成率は向上し、機器 A では平均値、中央値ともに 95.7% となり、機器 B では平均値で 87.0%、中央値で 84.1% となった。特に機器 B では標準偏差・標定点反映後に達成率が大きく向上している。機器 B の計測結果の方が標準偏差の値が大きいことから、捨石の凹凸形状の影響を機器 A よりも大きく受けており、標準偏差・標定点を反映させることでこれらの誤差要因を低減できたものと考えられる。

機器 B が機器 A より標準偏差が大きく、最浅値の算定による達成率の上昇量が大きくなった理由としては、機器 B が機器 A よりビーム幅が狭いことから捨石の窪み部分までビームが入り込み、捨石の窪み間の深い値の取得

データ数が多かったことが考えられる。このことから、捨石の凹凸が大きい場合やビーム数が密な場合など、捨石の窪みの影響が大きくなる場合でも、平面格子内の標準偏差が大きくなることから、標準偏差を反映させることで適切に最浅値を算出できるものと考えられる。

機器 A,B の計測結果について、中央値に標準偏差を反映したケースにおける標定点補正前後の達成率をヒートマップとして図化したものを図-2.8 に示す。橙色が出来形管理基準内となった平面格子を示しており、緑色は設計値から ±10cm 以内の平面格子、黒色は設計値より 10cm 以上深い平面格子、灰色は設計値より 10cm 以上浅い平面格子を示す。なお、白抜きの部分は標定点や目印の設置位置のため、評価対象から除外した部分である。また、青線の外側は使用した石材が異なるため、本稿では青線に囲まれた範囲のみを評価範囲としている。

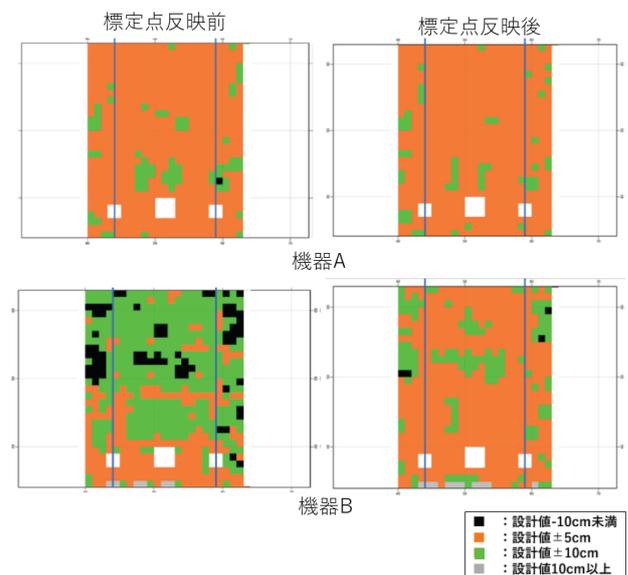


図-2.8 標定点反映前後 (中央値+σ) のヒートマップ

機器 A については、標定点反映前から橙色の範囲が広く存在し、標定点を反映することでさらに橙色の範囲が広がっていることがわかる。

機器 B については、標定点反映前は出来形管理基準内の緑色の格子が橙色の格子より多く存在し、一部では基準値より 10cm 以上深い黒色の格子も存在する。しかし、標定点を反映することで計測範囲の大部分が橙色の格子となり、緑色の格子が減少し、黒色の格子は青線に囲まれた範囲からなくなっている。

以上より、基礎捨石均しの施工面において、標準偏差・標定点を計測値に反映することで潮位誤差の補正及び捨石の最浅値の算定ができることが確認できた。

なお、標準偏差・標定点反映後も達成率が80%程度であることについては、実際の基礎捨石均し面には不陸が存在し、高さが均一でないことによることが原因と考えられる。

宮田ら⁸⁾によると、厚さ3.5mと1.5mの実験マウンドにおいて潜水士による本均し後に測定間隔10cmで水中スタッフによる天端高の計測を行ったところ、標準偏差がそれぞれ3.7cm、3.9cmとなったことが報告されている。基礎捨石均しの天端面の高さの分布を正規分布とすると、天端高の平均値が設計高と同一の場合、出来形管理基準±5cmを満たす割合は標準偏差3.7cmのとき82.3%、標準偏差3.9cmのときは79.9%となる。また、当該計測において、マウンド表層に多数存在する捨石と捨石の間にある窪みにスタッフが入り込むことから-5cmより深い計測値が存在することが報告されており、これはマルチビーム測深時に最浅値より深い値が計測されることと一致している。

上記実験よりも測定間隔は大きくなるが、築造後のマウンドで本均し天端高の測定を行った事例として、宮田ら⁴⁾、口田ら⁹⁾による結果をそれぞれ事例①、事例②として表-2.9に示す。

表-2.9 天端高の従来手法による計測結果の事例

	事例①	事例②
測定間隔(m)	0.3	5.5
水深(m)	15.3	14.0
設計値との差の平均(m)	0.011	0.000
標準偏差(m)	0.021	0.035

事例①と事例②について、それぞれ天端高の高さの分布が正規分布とすると、設計値±5cm以内となる確率は事例①で96.7%、事例②で84.7%となる。

基礎捨石均しの天端高計測値の分布が正規分布となるかどうかは更なる検証が必要であり、また、標準偏差の大きさは、使用した捨石の規格や施工管理の精度によりばらつきが生じる。このため、マルチビーム計測における基礎捨石均しの達成率については引き続き検討の余地があるものの、以降の章ではこれらの既往の計測事例に基づき、天端高の達成率が80%を超えていることを目安としてマルチビーム測深結果の検討を行う。

3. 現地試験による天端高計測手法の検討

3.1 現地試験の概要

第2章においてマルチビーム測深による基礎捨石均しの計測精度向上手法として、標定点による潮位誤差の補正及び標準偏差による最浅値の算出を提案した。当該手法が基礎捨石均しの現場で一般的に適用可能か検討するため、水深、使用石材の異なる現場にて現地試験を行う。

現地試験を行った港湾を表-3.1に示す。いずれの港湾も本均しの施工範囲全体を計測対象とし、本均しの施工範囲内またはその近傍に標定点を設置した。なお、計測手法は「マルチビームを用いた深淺測量マニュアル(浚渫工編)」¹⁰⁾に準じて実施した。

表-3.1 現地試験実施港湾

	実施場所	水深	使用石材
①	仙台塩釜港(石巻地区)	12.0m	30~800kg/個
②	横浜港	9.6m	30~200kg/個
③	石垣港	5.8m	5~200kg/個
④	指宿港	0.0m	5~100kg/個
⑤	高知港	14.2m	200~500kg/個

3.2 現地試験の計測結果

(1) 仙台塩釜港(石巻地区)

評価範囲をマルチビーム測深で計測した海底地形図を図-3.1で示す。赤枠の内側が本均し施工範囲であり、中心の赤く高さが変わっている部分は標定点を示している。なお、設計水深は12.0mである。

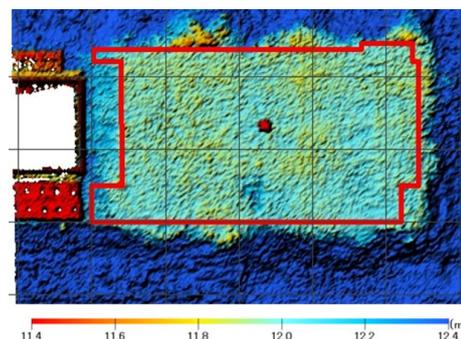


図-3.1 マルチビーム測深による海底地形図(仙台塩釜港)

標定点を従来手法(水中水準測量)とマルチビーム測深で計測した結果を表-3.2に示す。従来手法の平均値は11.369m、マルチビーム測深の平均値は11.352mとなり、マルチビーム測深は従来手法より0.017m浅い結果とな

った。このため、天端高のマルチビーム測深結果を0.017m深くすることで潮位誤差を補正する。

表-3.2 標定点計測結果（仙台塩釜港）

	水中水準測量	マルチビーム測深
取得点数	9	663
水深の平均値(m)	11.369	11.352
水深の標準偏差(m)	0.008	0.018

表-3.3 計測結果（仙台塩釜港）

標定点補正	仙台塩釜港	
	無	有 (0.017m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.047	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.049	
達成率(%) (平均値)	23.1	9.6
達成率(%) (中央値)	27.5	16.1
達成率(%) (平均値+標準偏差)	90.2	83.4
達成率(%) (中央値+標準偏差)	89.5	86.8

施工範囲全体を対象とした達成率について平均値、中央値とそれぞれ標定点、標準偏差反映前後の結果を表-3.3に示す。なお、平均値指標における水深の標準偏差の平均値は0.047m、中央値指標の標準偏差の平均値は0.049mとなった。

標定点、標準偏差反映前の達成率は平均値で23.1%、中央値で27.5%となった。標準偏差のみ反映した達成率は平均値で90.2%、中央値で89.5%と達成率は反映前より70%程度上昇した。一方、標定点のみ反映した達成率は平均値で9.6%、中央値で16.1%と反映前より低下した。標準偏差、標定点とも反映した達成率は平均値で83.4%、中央値で86.8%と標準偏差のみ反映した場合より低下したが、目安とした80%を超える結果となった。

標定点を反映させることで達成率が下がった理由として、工事における出来形計測として従来手法で20箇所計測した平均値は、設計値より0.25cm深い結果となっており、潮位誤差の補正として計測結果を0.017m深くしたことで出来形管理基準値外となる平面格子が増加したことが考えられる。このように、基礎捨石均しの実際の出来形の水深が設計値と異なる場合、標定点を反映させることで達成率が低下する可能性がある。ただし、その場合でも達成率が80%を超えていれば、天端高の出来形管理基準は満たしていると考えられる。

図-3.2に中央値を指標とした際の達成率について、中

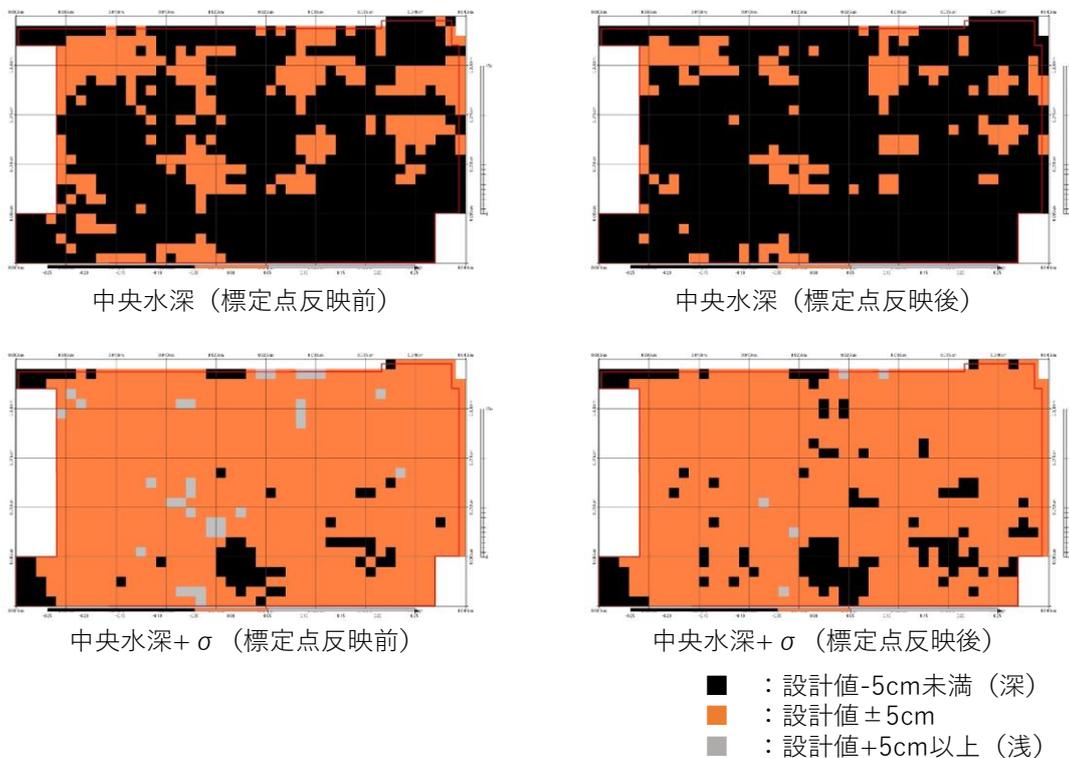


図-3.2 中央値におけるヒートマップ（仙台塩釜港）

中央のみ、標定点のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点・標準偏差を反映させたヒートマップを示す。標準偏差反映前は施工範囲の大部分が設計値より 5cm 以上深い黒色の平面格子となっているが、標準偏差を反映することで黒色だった平面格子の大部分が出来形管理基準内である橙色の格子になっていることがわかる。一方、標定点を反映することで橙色の格子が黒色の格子となっている部分があり、標定点の反映により基準より深い格子が増えたことが示されている。

(2) 横浜港

評価範囲をマルチビーム測深で計測した海底地形図を 図-3.3 で示す。黄色の枠内が本均しの施工範囲であり、設計水深は 9.6m である。なお、標定点は 図-3.4 に示す黄色丸印部分(水深 11.5m)に設置している。

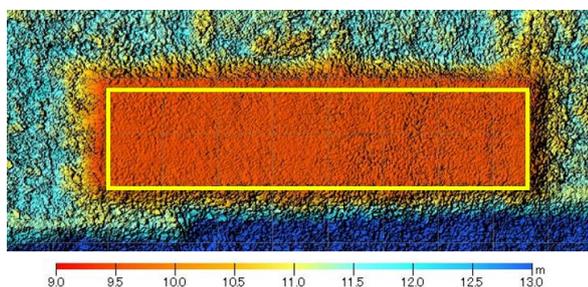


図-3.3 マルチビーム測深による海底地形図 (横浜港)

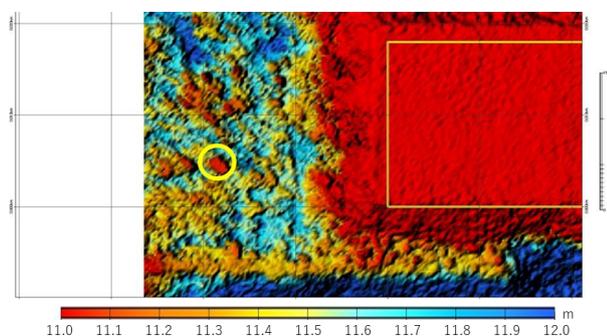


図-3.4 標定点設置値

標定点を従来手法（水中スタッフ）とマルチビーム測深で計測した結果を表-3.4 に示す。従来手法の計測結果は 11.090m、マルチビーム測深の平均値は 11.060m となり、マルチビーム測深は従来手法より 0.03m 浅くなった。

表-3.4 標定点計測結果 (横浜港)

	水中スタッフ	マルチビーム測深
取得点数	9	404
水深の平均値(m)	11.090	11.060
水深の標準偏差(m)	0.014	0.018

施工範囲全体を対象とした達成率について平均値、中央値とそれぞれ標定点、標準偏差反映前後の結果を表-3.5 に示す。なお、平均値指標の水深の標準偏差は 0.029m、中央値指標の標準偏差は 0.032m となった。

表-3.5 計測結果 (横浜港)

	横浜港	
	無	有 (0.030m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.029	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.032	
達成率(%) (平均値)	18.1	0.4
達成率(%) (中央値)	42.9	7.9
達成率(%) (平均値+標準偏差)	87.2	58.5
達成率(%) (中央値+標準偏差)	87.3	59.0

標定点、標準偏差反映前の達成率は平均値で 18.1%、中央値で 42.9% となった。標準偏差のみ反映した達成率は平均値で 87.2%、中央値で 87.3% と達成率は反映前より 45~70% 程度上昇した。一方、標定点のみ反映した達成率は平均値で 0.4%、中央値で 7.9% と反映前より低下する結果となり、標準偏差、標定点とも反映した達成率は平均値で 58.5%、中央値で 59.0% と標準偏差のみ反映した場合より低下する結果となった。

標定点を反映させた場合に達成率が目安とした 80% を下回った理由として、標定点の計測結果について検討する。図-3.5 に示す通り、本試験では高さ 0.45m の標定点を水深 11.50m の海底面に設置しているため、計算上の標定点の頂部の水深は 11.05m となる。一方、従来手法（水中スタッフ）による計測結果は 11.09m となり、計算値よりも 0.04m の深い結果となった。



図-3.5 横浜港における標定点計測結果

計算値と計測値の差の原因は確認できなかったが、天端高の出来形管理基準である $\pm 5\text{cm}$ に対し、計算値と計測

値の差の4cmが達成率の低下に影響した可能性が考えられる。ここで、標定点頂部の水深を設置水深と寸法から求めた計算値である11.05mとした場合における達成率を表-3.6に示す。

表-3.6 計測結果 (横浜港・計算値)

標定点補正 (計算値を使用)	横浜港	
	無	有 (-0.010m)
平均値の標準偏差の 平均(m)	0.029	
中央値の標準偏差の 平均(m)	0.032	
達成率(%) (平均値)	18.1	32.5
達成率(%) (中央値)	42.9	57.1
達成率(%) (平均値+標準偏差)	87.2	91.7
達成率(%) (中央値+標準偏差)	87.3	88.6

標定点の水深を計算値とした場合、標定点のみを反映した達成率は平均値で32.5%、中央値で57.1%と反映前より向上した。標準偏差、標定点ともに反映した達成率は平均値で91.7%、中央値で88.6%となり、標定点反映前より向上するとともに、達成率が目安とした80%を超える結果となった。

図-3.6に中央値を指標とした際の達成率について、中央値のみ、標定点のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点・標準偏差を反映したヒートマップを示す。施工範囲右側に設計値より深い黒色の格子が生じているが、標準偏差を反映することで黒色の格子だった部分を含め施工範囲全体が橙色の格子となった。一方、標定点を反映すると施工範囲の右側に再び黒色の格子となる部分が生じる結果となった。

図-3.7に中央値を指標とした際の達成率について、中央値のみ、標定点(計算値)のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点(計算値)・標準偏差を反映したヒートマップを示す。図-3.6と比較すると、標定点を反映させることにより、出来形管理基準値内を示す橙色の格子が増えていることが確認できる。

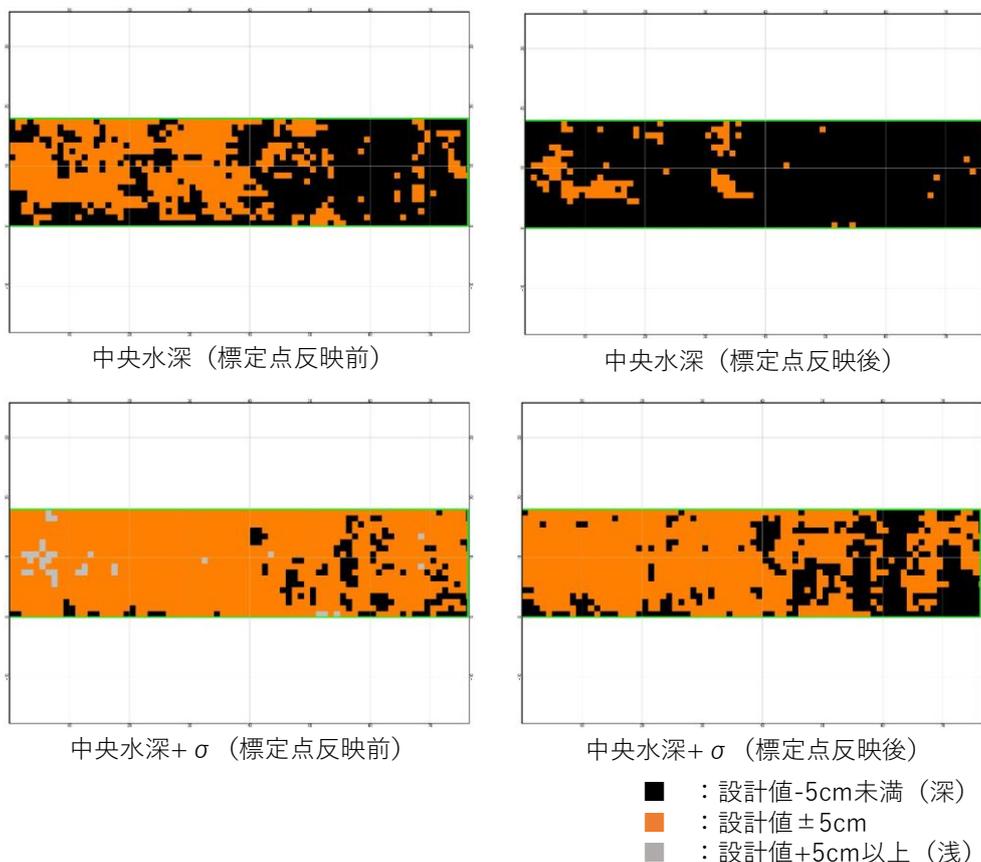


図-3.6 中央値におけるヒートマップ (横浜港) (標定点：計測値)

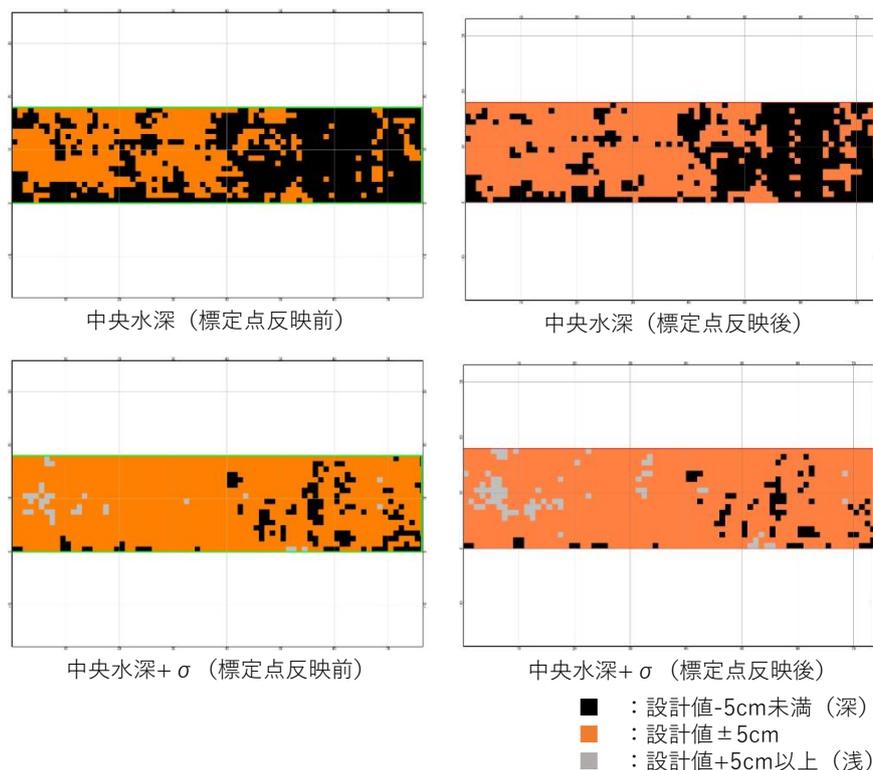


図-3.7 中央値におけるヒートマップ（横浜港）（標定点：計算値）

(3) 石垣港

評価範囲をマルチビーム測深で計測した海底地形図を図-3.8で示す。赤枠の内側が本均し施工範囲であり、中心付近で高さが変わっている部分は標定点を示している。なお、設計水深は5.8mである。

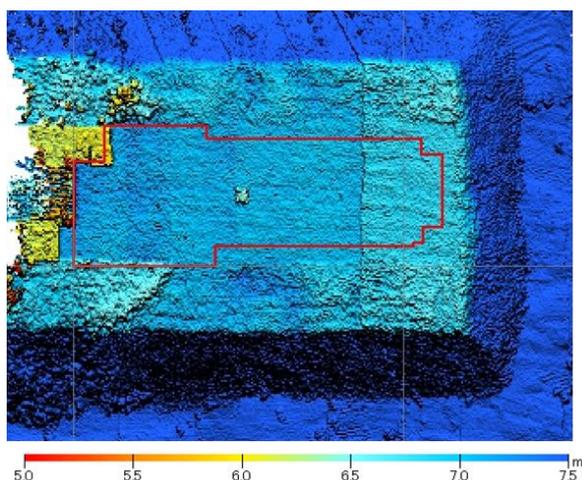


図-3.8 マルチビーム測深による海底地形図（石垣港）

標定点を従来手法（水中水準測量）とマルチビーム測深で計測した結果を表-3.7に示す。従来手法の計測結果

は5.320m, マルチビーム測深の平均値は5.325mとなり、マルチビーム測深は従来手法より0.005m深い結果となった。

表-3.7 標定点計測結果（石垣港）

	水中水準測量	マルチビーム測深
取得点数	9	4198
水深の平均値(m)	5.320	5.325
水深の標準偏差(m)	0.010	0.013

施工範囲全体を対象とした達成率について平均値、中央値とそれぞれ標定点、標準偏差反映前後の結果を表-3.8に示す。なお、平均値指標、中央値指標ともに水深の標準偏差は0.027mとなった。

標定点、標準偏差反映前の達成率は平均値、中央値ともに0.1%となった。標準偏差のみ反映した達成率は平均値で0.2%、中央値で0.3%と反映前とほぼ同じ値となった。標定点のみ反映した達成率は平均値、中央値ともに0.1%と反映前と同じ値となった。標準偏差、標定点とも反映した達成率は平均値で0.3%、中央値で0.4%と標準偏差、標定点の反映に関わらず全てのケースで達成率が1%を下回る結果となった。

表-3.8 計測結果 (石垣港)

標定点補正	石垣港	
	無	有 (-0.005m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.027	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.027	
達成率(% (平均値)	0.1	0.1
達成率(% (中央値)	0.1	0.1
達成率(% (平均値+標準偏差)	0.2	0.3
達成率(% (中央値+標準偏差)	0.3	0.4

標準偏差，標定点反映後も達成率が1%を下回ったことについて，(2)横浜港における検討と同様に標定点の寸法から理論上の標定点の頂部の水深を求めると，設置水深が5.8m，標定点の高さが0.58mのため，計算上の頂部の水深は5.22mとなる．一方，従来手法による計測結果は5.32mであり，0.10mの差異が生じている．

ここで，標定点の頂部の水深を計算値である5.22mとした場合における達成率を表-3.9に示す．

表-3.9 計測結果 (石垣港・計算値)

標定点補正 (計算値を使用)	石垣港	
	無	有 (-0.105m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.027	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.027	
達成率(% (平均値)	0.1	20.1
達成率(% (中央値)	0.1	21.1
達成率(% (平均値+標準偏差)	0.2	84.1
達成率(% (中央値+標準偏差)	0.3	84.7

この時，マルチビーム測深は標定点の計算値より0.105m深い結果となっている．標定点のみ反映した達成率は平均値で20.1%，中央値で21.1%となり，標準偏差，

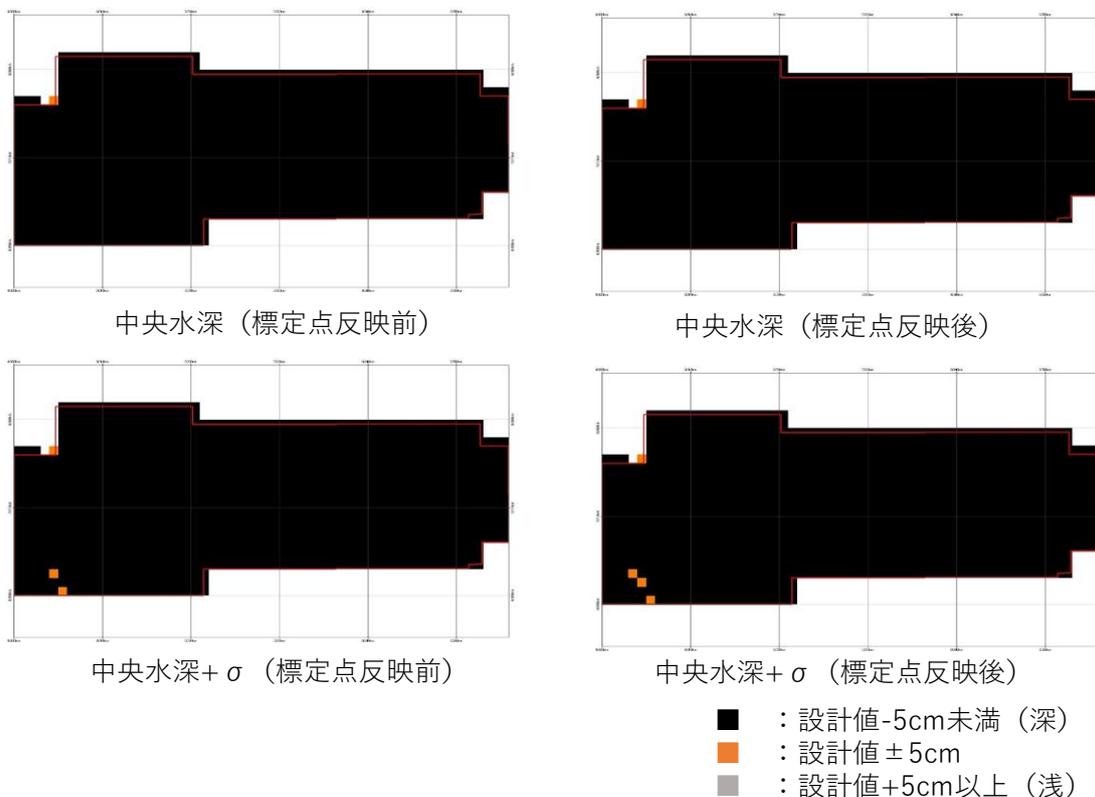


図-3.9 中央値におけるヒートマップ (石垣港) (標定点：計測値)

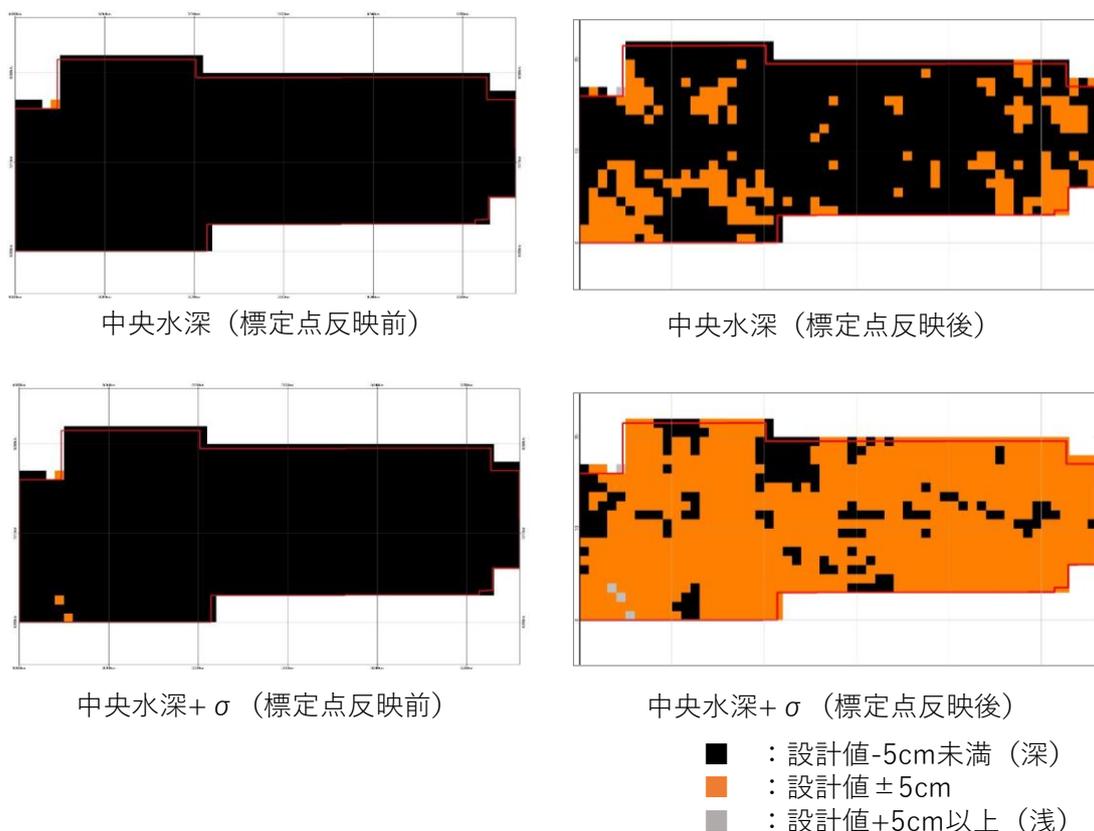


図-3.10 中央値におけるヒートマップ (石垣港) (標定点: 計算値)

標定点とも反映した達成率は平均値で 84.1%、中央値で 84.7%と、標定点の計測値で補正した場合よりも 80%以上が向上する結果となった。

図-3.9 に中央値を指標とした際の達成率について、中央値のみ、標定点 (計測値) のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点 (計測値) ・標準偏差を反映させたヒートマップを示す。いずれのケースでも達成率が 1%未満であり、施工範囲の大半が設計値よりも 5cm 以上深いという結果となった。

図-3.10 に中央値を指標とした際の達成率について、中央値のみ、標定点 (計算値) のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点 (計算値) ・標準偏差を反映させたヒートマップを示す。標準偏差の反映前後とも標定点を反映させることで出来形管理基準値内となる橙色の格子数が増加し、標準偏差、標定点の両方を反映した場合は計測範囲の大部分が橙色の格子となることわかる。

石垣港の計測結果について、工事における従来手法での出来形検査では施工面は出来形管理基準値内となっており、標定点 (計算値) を用いた計測結果の方が施工面を適切に計測できているものと考えられる。このため、標定点の従来手法による計測において何らかの要因で計

測誤差が生じたことが考えられるが、工程都合等により標定点の再計測を行えなかったため、実際に計測差が生じていたかを確認することはできなかった。

(4) 指宿港

評価範囲をマルチビーム測深で計測した海底地形図を図-3.11で示す。赤枠の内側が本均し施工範囲であり、施工範囲左上部分に隣接した黄色い部分は標定点である。なお、設計水深は0.0mである。

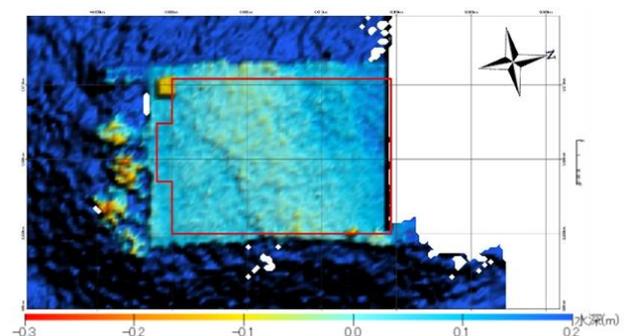


図-3.11 マルチビーム測深による海底地形図 (指宿港)

標定点を従来手法 (水中水準測量) とマルチビーム測深で計測した結果を表-3.10 に示す。従来手法の計測結

果は-0.200m, マルチビーム測深の平均値は-0.076mとなり, マルチビーム測深は従来手法より 0.124m 深い結果となった。

表-3.10 標定点計測結果 (指宿港)

	水中水準測量	マルチビーム測深
取得点数	9	6078
水深の平均値(m)	-0.200	-0.076
水深の標準偏差(m)	0.013	0.019

表-3.11 計測結果 (指宿港)

	指宿港	
	無	有 (0.124m)
水深の標準偏差 (平均値)(m)	0.040	
水深の標準偏差 (中央値)(m)	0.042	
達成率(% (平均値))	8.8	68.8
達成率(% (中央値))	20.0	67.1
達成率(% (平均値+標準偏差))	37.6	38.8
達成率(% (中央値+標準偏差))	41.9	36.5

施工範囲全体を対象とした達成率について平均値, 中央値とそれぞれ標定点, 標準偏差反映前後の結果を表-3.11に示す。なお, 平均指標の水深の標準偏差は 0.040m, 中央値指標の水深の標準偏差は 0.042m となった。

標定点, 標準偏差反映前の達成率は平均値で 8.8%, 中央値で 20.0% となった。標準偏差のみ反映した達成率は平均値で 37.6%, 中央値で 41.9% と達成率は 20~30% 程度上昇した。標定点のみ反映した達成率は平均値で 68.8%, 中央値で 67.1% と 45~60% 程度上昇した。一方, 標準偏差, 標定点とも反映した達成率は平均値で 38.8%, 中央値で 36.5% と標準偏差のみ反映した場合とほぼ同等の結果となった。

図-3.12 に中央値を指標とした際の達成率について, 中央値のみ, 標定点のみ反映, 標準偏差のみ反映, 標定点・標準偏差を反映したヒートマップを示す。標定点又は標準偏差のいずれかを反映した場合には出来形管理基準値内となる橙色の平面格子が増えているが, 標定点, 標準偏差の両方を反映した場合, 計測範囲の半分以上が設計値より 5cm 以上浅いことを示す灰色となった。

達成率が最大でも 70% 弱に留まった原因として, 艀装・テストによる影響が考えられる。現地試験に当たっては「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工

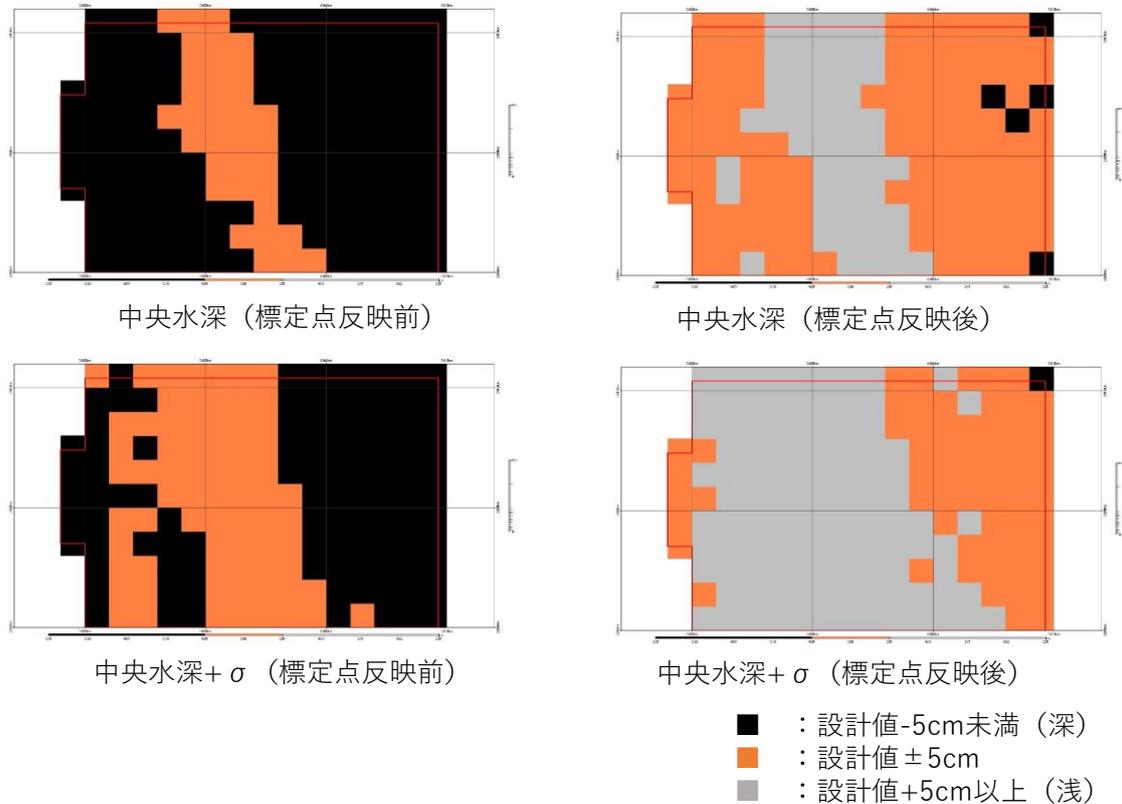


図-3.12 中央値におけるヒートマップ (指宿港)

編) (令和4年4月改訂版)』¹⁰⁾に準じて艀装・テストを行っており、測量船に艀装したマルチビームソナーの喫水の深さはパーチェックにより確認している。パーチェックは、測量船から垂下させたパーチェック板(反射物)をマルチビームソナーで3回計測し、垂下長から平均値を引くことで喫水値を求める手法である。今回現地試験を行った港湾のパーチェック結果を表-3.12に示す。指宿港以外の港湾では3回のパーチェックの最大値と最小値の差が1~2cmだったのに対し、指宿港では6cmの差が生じていた。このため、平均値から算出したマルチビームソナーの喫水長と艀装された実際の喫水長との差が他の3港に比べると大きく生じていた可能性が考えられる。なお、石垣港についてはパーチェックの結果が取得できなかったため、同表には記載していない。

マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工編)ではパーチェックの計測について、計測差のばらつきの許容値は規定されていない。一方、基礎捨石均しの出来形管理基準は本均しの天端高の測定単位が1cmであり、許容値も±5cmと浚渫工より許容範囲が小さくなっていることから、マルチビーム測深で基礎捨石均しの計測を行う際は、パーチェック時の計測値のばらつきが大ききときは計測回数を増やして異常値を除外するなど、他工種よりも留意して行うことが望ましいと考えられる。パーチェック時の計測値のばらつきの許容値については、天端高の施工状況も影響することから、引き続き現地計測事例等を踏まえた検討が必要である。

表-3.12 パーチェックにおけるマルチビーム計測値

	仙台塩釜港	横浜港	指宿港	高知港
1回目(m)	3.78	1.89	1.47	1.48
2回目(m)	3.78	1.89	1.52	1.47
3回目(m)	3.79	1.89	1.53	1.49
平均値(m)	3.79	1.89	1.51	1.48

(5) 高知港

評価範囲をマルチビーム測深で計測した海底地形図を図-3.13で示す。赤枠の内側が本均し施工範囲であり、施工範囲中心付近の高さの異なる赤い部分が標定点である。なお、設計水深は14.2mである。

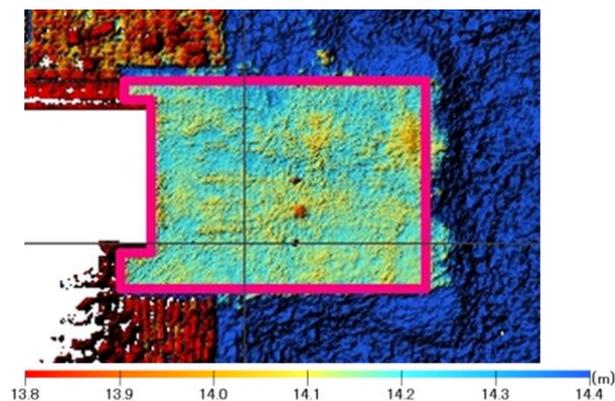


図-3.13 マルチビーム測深による海底地形図(高知港)

標定点を従来手法(水中水準測量)とマルチビーム測深で計測した結果を表-3.13に示す。従来手法の計測結果は13.99m、マルチビーム測深の平均値は14.06mとなり、マルチビーム測深は従来手法より0.066m深い結果となった。

施工範囲全体を対象とした達成率について平均値、中央値とそれぞれ標定点、標準偏差反映前後の結果を表-3.14に示す。なお、平均値指標、中央値指標ともに水深の標準偏差は0.033mとなった。

表-3.13 標定点計測結果(高知港)

	水中水準測量	マルチビーム測深
取得点数	9	572
水深の平均値(m)	13.99	14.06
水深の標準偏差(m)	0.022	0.062

表-3.14 計測結果(高知港)

	高知港	
	無	有 (-0.066m)
標定点補正		
水深の標準偏差(平均値)(m)	0.033	
水深の標準偏差(中央値)(m)	0.033	
達成率(%)(平均値)	2.9	69.8
達成率(%)(中央値)	2.4	70.6
達成率(%)(平均値+標準偏差)	37.4	87.6
達成率(%)(中央値+標準偏差)	40.8	85.9

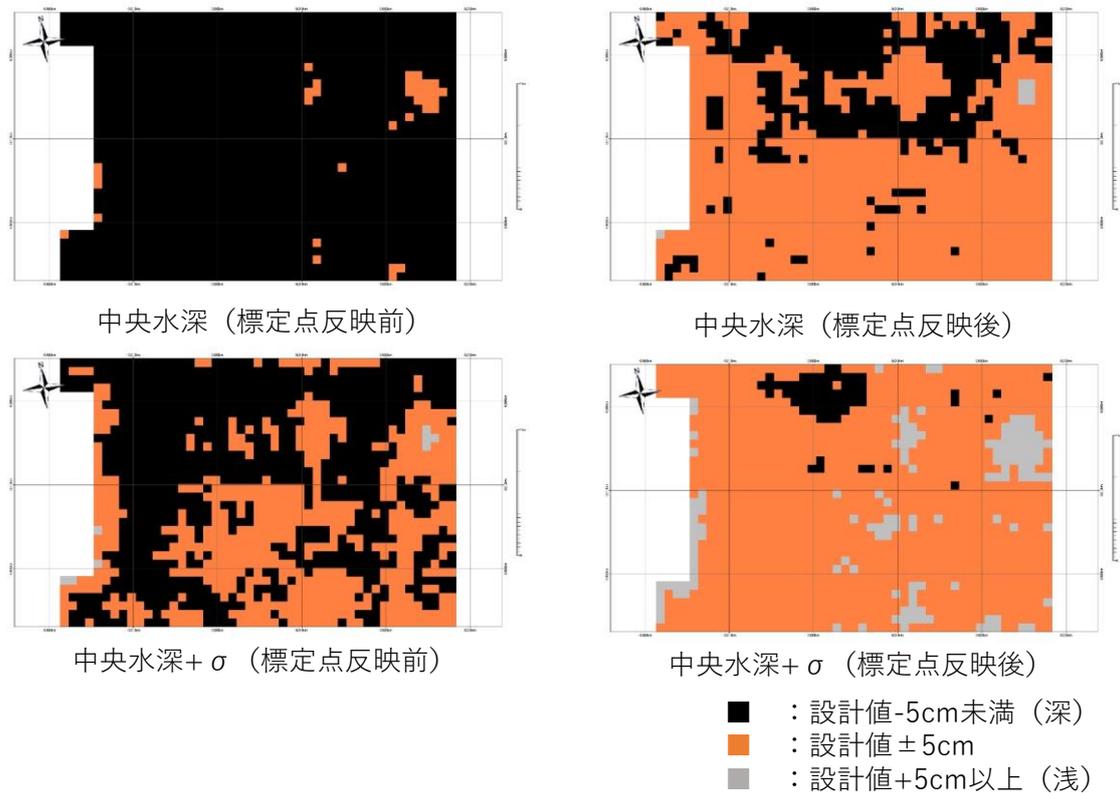


図-3.14 中央値におけるヒートマップ (高知港)

標定点、標準偏差反映前の達成率は平均値で 2.9%，中央値で 2.4% となった。標準偏差のみ反映した達成率は平均値で 37.4%，中央値で 40.8% と 35% 程度上昇した。標定点のみ反映した達成率は平均値で 69.8%，中央値で 70.6% と 67% 程度上昇した。標準偏差、標定点とも反映した達成率は平均値で 87.6%，中央値で 85.9% となり、標準偏差のみ、標定点のみ反映した上昇する結果となった。

図-3.14 に中央値を指標とした際の達成率について、中央値のみ、標定点のみ反映、標準偏差のみ反映、標定点・標準偏差を反映させたヒートマップを示す。標定点・標準偏差の反映前は施工範囲の大部分が設計値より 5cm 以上深い黒色の平面格子となっているが、標定点、標準偏差を反映後はそれぞれ出来形管理基準値内となる橙色の平面格子が増加し、標定点・標準偏差の両方を反映したときは範囲内の大部分が橙色の平面格子となっていることがわかる。

また、マルチビーム測深結果により基礎捨石均しの出来形管理を行うことで計測作業の効率化が見込まれることから、高知港の現地試験実施者に対し計測に要した時間のヒアリングを行った。本均しの天端高・天端幅・延長の出来形計測の事前準備から計測作業に要した作業量

は、従来方式では 24 人日だったのに対し、マルチビーム測深の場合は 3.5 人日と大幅な効率化が図られた。ただし、計測に要する作業量は水深や計測範囲によって変動が生じるため、効率化の定量的な評価を行うためには引き続き事例の収集が必要である。また、計測作業後の帳票類整理・報告書作成に要する作業量については従来手法では 3 人日、マルチビーム測深では 14 人日とマルチビーム測深結果のノイズ処理作業等のために従来手法よりも時間を要しており、出来形管理全体での効率化には計測結果処理の効率化が必要である。

3.3 提案した計測手法の評価

現地試験の結果について、2.4 で検討した鹿児島港の結果を含めて整理した達成率を表-3.15 に示す。また、平均値、中央値を指標とした達成率のグラフをそれぞれ図-3.15、図-3.16 に示す。なお、鹿児島 A、B はそれぞれ計測機器 A、B の計測結果を示している。また、横浜港（計測値）及び石垣港（計測値）は標定点の頂部の水深を従来手法の計測結果を使用した結果、横浜港（計算値）及び石垣港（計算値）は標定点の頂部の水深を設置水深と標定点の形状から求めた値を使用した結果を示している。図中の破線は 2.4 において目安にした達成率 80% のライ

表-3.15 マルチビーム測深結果一覧

	鹿児島港A	鹿児島港B	仙台塩釜港	横浜港 (計測値)	横浜港 (計算値)	石垣港 (計測値)	石垣港 (計算値)	指宿港	高知港
設計水深(m)	9.0	9.0	12.0	9.6	9.6	5.8	5.8	0.0	14.2
ビーム数(本)	256	1,024	256~512	256	256	1,024	1,024	1,024	256~512
標定点の計測差(m)	0.006	0.039	-0.017	-0.030	-0.030	0.005	-0.105	-0.124	-0.066
水深の標準偏差(平均値) (m)	0.029	0.033	0.047	0.029	0.029	0.027	0.027	0.040	0.033
達成率(平均値)(%)	74.4	5.0	23.1	18.1	18.1	0.1	0.1	8.8	2.9
達成率(平均値+σ)(%)	92.4	34.6	90.2	87.2	87.2	0.2	0.2	37.6	37.4
達成率(平均値+標定点) (%)	78.2	48.6	9.6	0.4	32.5	0.1	20.1	68.8	69.8
達成率(平均値+σ+標定点) (%)	95.7	87.0	83.4	58.5	91.7	0.3	84.1	38.8	87.6
水深の標準偏差(中央値) (m)	0.029	0.034	0.049	0.032	0.032	0.027	0.027	0.042	0.033
達成率(中央値)(%)	67.5	5.5	27.5	42.9	42.9	0.1	0.1	20.0	2.4
達成率(中央値+σ)(%)	92.2	32.0	89.5	87.3	87.3	0.3	0.3	41.8	40.8
達成率(中央値+標定点) (%)	80.1	40.5	16.1	7.9	57.1	0.1	21.1	67.1	70.6
達成率(中央値+σ+標定点) (%)	95.7	84.1	86.8	69.0	88.6	0.4	84.7	36.5	85.9

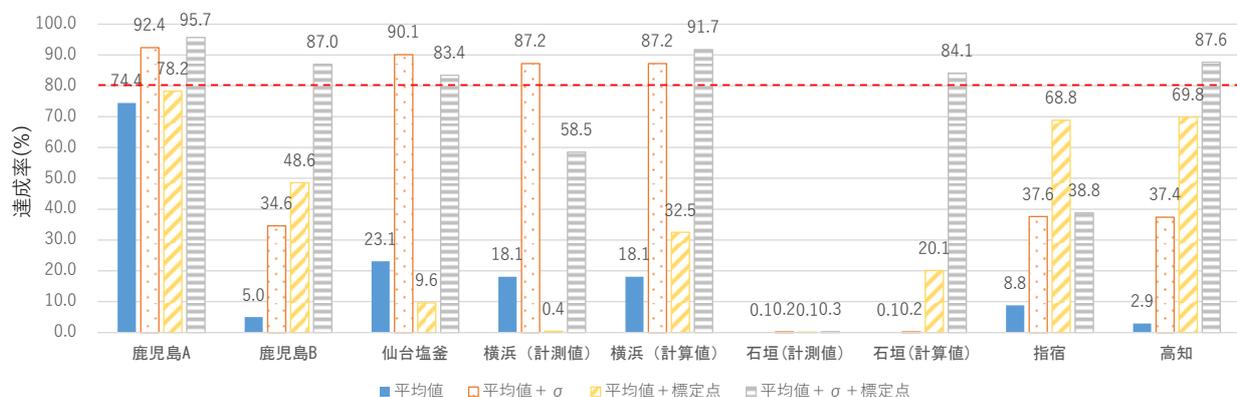


図-3.15 マルチビーム測深結果図示 (平均値指標)

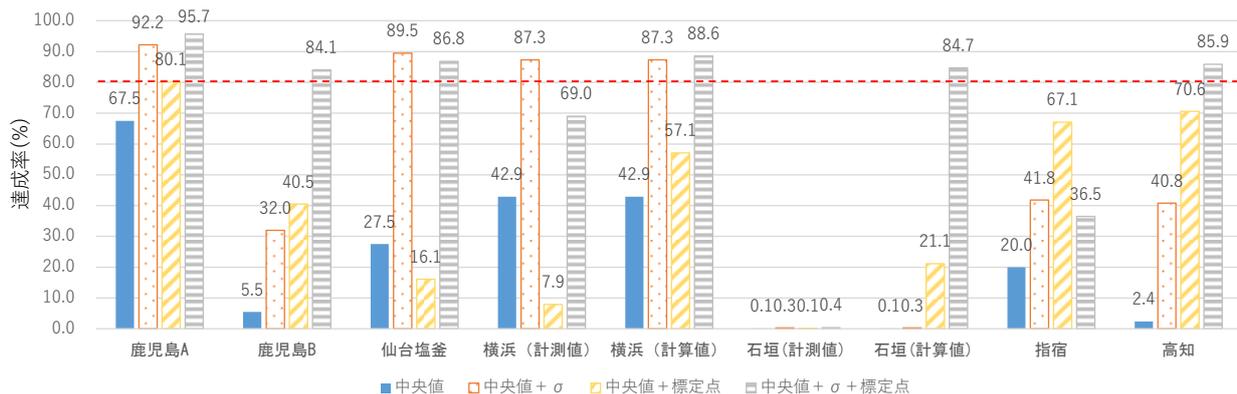


図-3.16 マルチビーム測深結果図示 (中央値指標)

ンである。

計測値に標準偏差と標定点の両方を反映することで、達成率は概ね80%を超えた。横浜港、石垣港、指宿港では反映後の達成率が80%に達していないが、横浜港、石垣港については3.2(2)、(3)で検討したように標定点頂部

の水深を従来手法で計測した際の影響が考えられる。ここで、標定点頂部の水深について、表-3.16に従来手法による計測値、設置水深と標定点の寸法から求めた計算値、マルチビーム測深による計測値を示す。横浜港、石垣港の事例では、他の港湾より標定点頂部の計算値と計測値

表-3.16 標定点頂部の計測結果一覧

	鹿児島港	仙台塩釜港	横浜港	石垣港	指宿港	高知港
標定点の高さ寸法(m)	0.30	0.64	0.45	0.58	0.20	0.20
設置水深(m)	9.00	12.00	11.50	5.80	0.00	14.20
標定点の計算値(m)	8.70	11.36	11.05	5.22	-0.20	14.00
従来手法による標定点の計測値(m)	8.70	11.37	11.09	5.32	-0.20	13.99
計算値と計測値の差(m)	0.00	0.01	0.04	0.10	0.00	-0.01
マルチビーム測深による標定点の計測値(m)	機器A:8.70 機器B:8.74	11.35	11.06	5.33	-0.08	14.06

表-3.17 現地試験結果のまとめ

港湾名	平均値・中央値の達成率の変化			達成率 標準偏差 +標定点	原因の検証
	潮位誤差補正 (+標定点)	最浅値算定 (+標準偏差)	標定点+ 標準偏差		
鹿児島港	上昇	上昇	上昇	80%以上	
仙台塩釜港	低下	上昇	上昇	80%以上	出来形（設計値より深め）の影響の可能性
横浜港	低下	上昇	上昇	80%以下	標定点の従来手法での計測値に誤差が生じていた可能性（設置水深と寸法による計算値を用いた場合の達成率80%以上を達成）
石垣港	変化なし	上昇	上昇	80%以下	
指宿港	上昇	上昇	上昇	80%以下	キャリブレーション（パーチェック）における計測回ごとの計測値のばらつきが他港より大きい（3～6倍）
高知港	上昇	上昇	上昇	80%以上	

の差が大きく、これにより標定点を反映することで達成率が低下したと考えられる。

指宿港でも達成率が80%に達していないが、これは3.2(4)に示した通り、基礎捨石均しにおいては浚渫工や床掘工よりも留意してキャリブレーションを実施する必要があると考えられる。今回の試験結果から、パーチェックの計測毎のばらつきは1～2cm以内とすることが望ましいが、計測毎のばらつきと達成率の関係やばらつきの許容値については引き続き検討が必要である。

以上の現地試験結果の整理を表-3.17に示す。マルチビーム測深による計測値について潮位誤差を標定点で補正するとともに、標準偏差で最浅値を算出することで、基礎捨石均しの天端高の達成率が目安とした80%以上で計測可能なことが確認できた。

なお、平均値、中央値の2つの代表値で検討を行ったが、平均値と中央値の達成率に大きな違いは無く、標準偏差、標定点を反映した場合の達成率の変化も同様の傾向を示した。マルチビーム測深はノイズ処理作業後も特異値が残ることから、中央値を使用することで特異値の影響を低減できることを想定していたが、約1m×1mの大きさの標定点でも計測点数が200点以上となり、点数が十分多いことから平均値で統計処理を行った場合でもノイズ等による特異値の影響が小さくなったと考えられる。

本稿では基礎捨石均しのうち、本均し部分を対象として検討を行ったため、本均しより施工面の凹凸が大きくなる荒均し面での傾向を確認し、天端高の計測の指標としてどちらが適当であるか引き続き検討する必要がある。

また本検討では精度評価の観点から達成値のみで評価を行ったが、出来形管理への実用化にあたっては各平面格子の計測値と設計値の差の上限についても検討が必要と考える。

4. 天端幅・延長の計測手法の検討

4.1 天端幅・延長の計測手法の概要

基礎捨石均しの天端幅・延長の出来形管理基準は表-1.1で示した通り、本均し、荒均しとも設計値-10cmを下回らないことと規定されている。

マルチビーム測深による基礎捨石均しの天端幅・延長の計測手法については、国土交通省港湾局の「港湾におけるICT導入検討委員会」³⁾において、点群からTINデータを作成し、測線上のTINデータの断面を目視により評価を行う手法が検討されたが、出来形管理基準の策定には至っていない。

そこで、本稿ではまず第3章の現地試験のうち、標準偏差及び標定点を反映した際の達成率が目安とした80%を

超えた仙台塩釜港、高知港の2港を対象として、点群データから測線上の断面を作成し、目視により天端幅・延長の出来形計測を行えるか検討する。

4.2 3次元点群データを用いた断面評価

仙台塩釜港と高知港の現地試験データについて、標定点により潮位誤差を補正したデータを用い、図-4.1に示すように測線から5cmの範囲内の点群を直接プロットした点群断面を作成する。また、マルチビーム測深データからTINデータを作成し測線上の断面を抽出したTIN断面を作成し、点群断面、TIN断面それぞれにおいて天端幅・延長の設計値及び従来手法による出来形計測値と比較する。

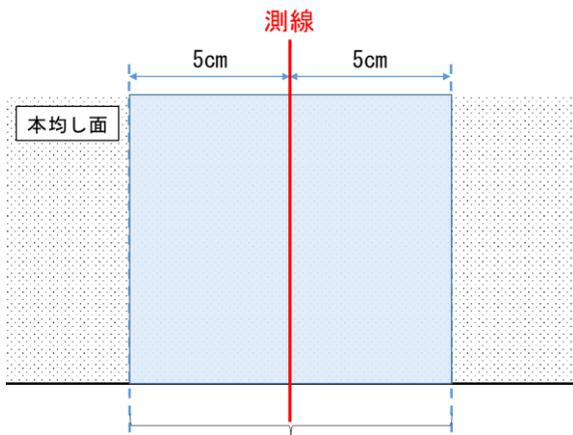


図-4.1 点群断面作成におけるデータ取得範囲

(1) 仙台塩釜港

天端幅の検討にあたり実際の工事における出来形管理測線に準じて測線を4本設定する。設定した測線は図-4.2に示す通りであり、いずれの測線も設計幅は23.7mである。天端幅について既設ケーソンに近い側から順に幅1~4とし、点群断面から作成した断面を図-4.3に、TIN断面から作成した断面を図-4.4に示す。

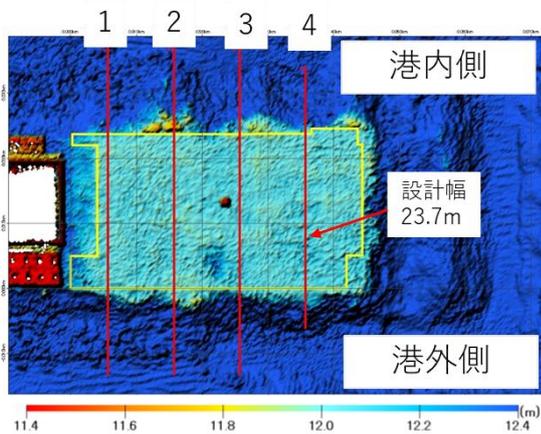


図-4.2 測線設定図（仙台塩釜港）

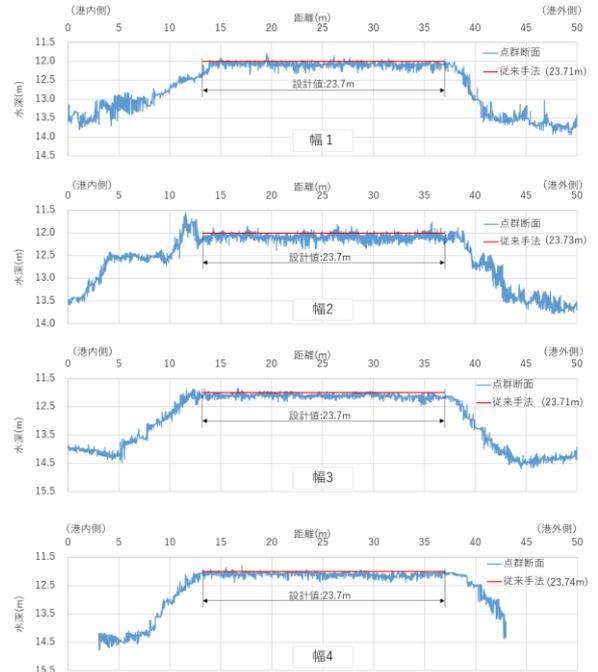


図-4.3 点群断面と設計幅の目視比較（仙台塩釜港）

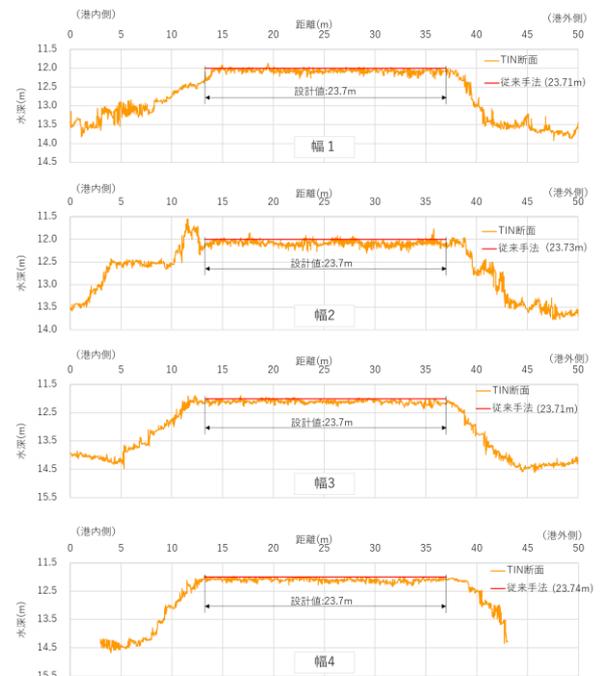


図-4.4 TIN断面と設計幅の目視比較（仙台塩釜港）

点群断面、TIN断面とも測線上の大まかな形状は確認できるものの、捨石の凹凸形状の影響等により天端高の出来形管理基準 $\pm 5\text{cm}$ を超える部分が本均しの施工範囲全体に存在し、断面の形状から目視で本均しと荒均しの境界部分を判断することはできなかった。

(2) 高知港

実際の出来形管理測線に準じて図-4.5に示す通り測線を設定する。天端幅の測線について既設ケーソンに近い側から順に幅1~6、延長の測線について港内側から順に延長1~3とした。なお、幅1は港内側と港外側で分かれているため、それぞれ幅1-1、幅1-2としている。点群から作成した天端幅の図-4.6、延長の断面を図-4.7に示す。

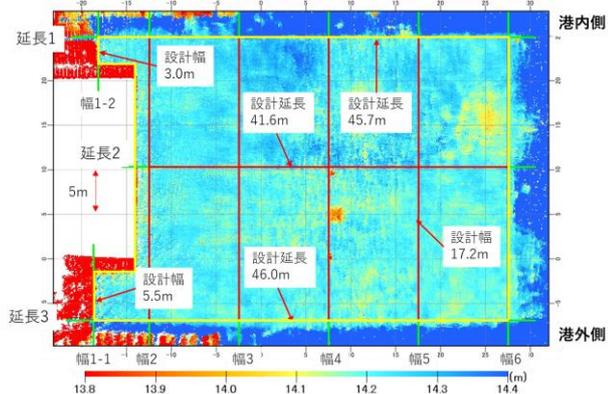


図-4.5 測線設定図 (高知港)

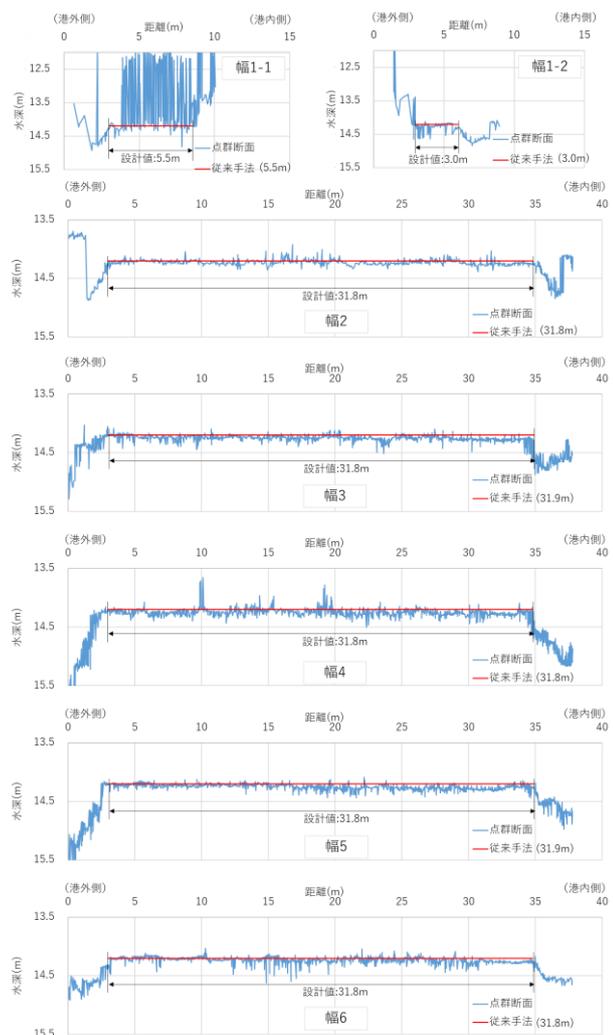


図-4.6 点群断面と設計幅の目視比較 (高知港)

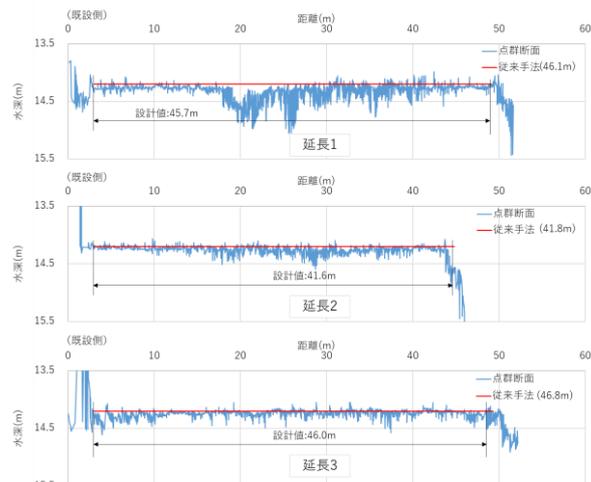


図-4.7 点群断面と延長の目視比較 (高知港)

同様にTINデータから作成した天端幅の断面を図-4.8に、延長の断面を図-4.9に示す。

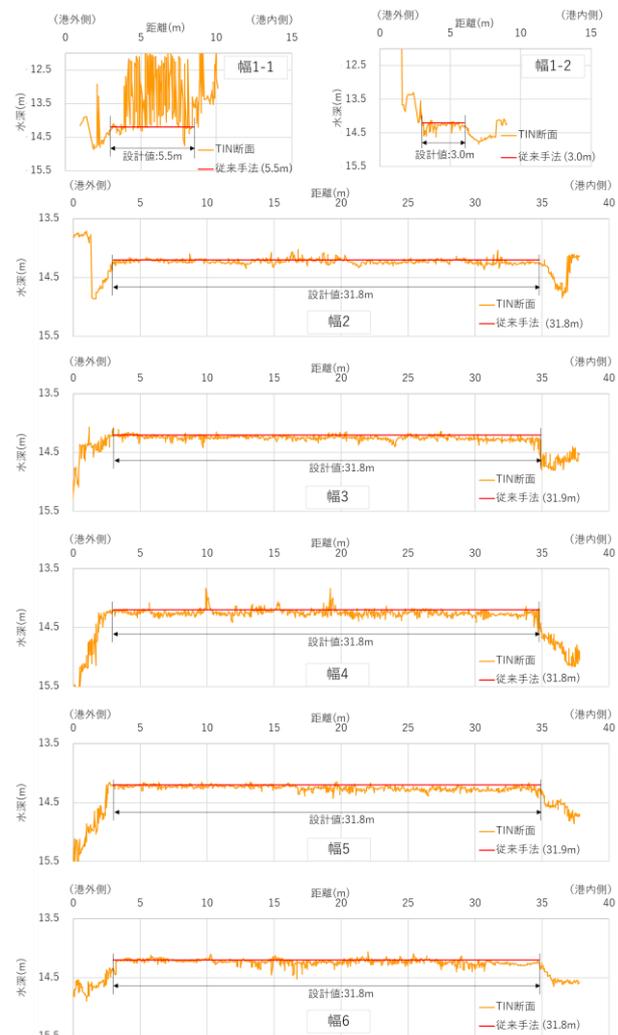


図-4.8 TIN断面と設計幅の目視比較 (高知港)

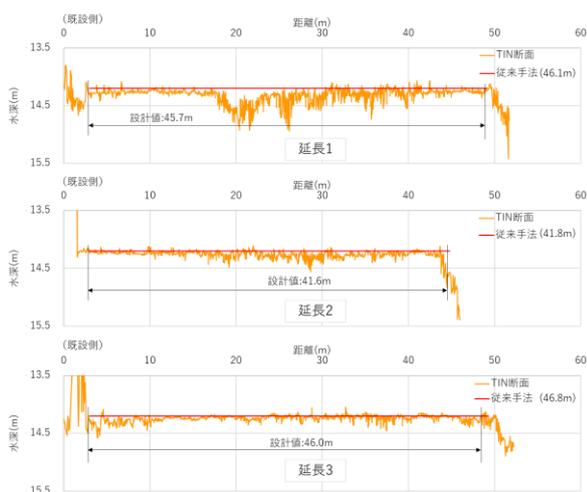


図-4.9 TIN断面と延長の目視比較（高知港）

点群断面、TIN断面とも測線上の大きな形状は確認できるものの、捨石の凹凸形状の影響等により天端高の出来形管理基準 $\pm 5\text{cm}$ を超える部分が本均しの施工範囲全体に存在し、断面から目視で本均しと荒均しの境界部分を確認することはできなかった。

また、根固めブロックとの境界部分である幅1-1は計測結果に2m程度のばらつきが生じている。隣接する根固めブロックは高さの寸法は2mであり、測線から幅5cm以内の点群を使用していることにより根固めブロックの天端の点群が含まれていることや、既設構造物との境界であることによりノイズが生じたことが考えられ、既設構造物との境界付近の測線は断面作成が困難である。

なお、幅4の港外側から10m付近でも断面が大きく盛り上がりしている部分があるが、これは測線に隣接する標定点の高さを取得したものと考えられる。

(1)、(2)より点群及びTINデータから作成した断面を用いて目視で天端幅・延長を定量的に評価することは困難であり、従来の管理手法と同程度の精度で評価をするためには他の手法を検討する必要がある。

4.3 平面格子を用いた面評価

4.2で点群から作成した断面で評価が困難だった原因として、基礎捨石均しの断面は捨石の形状により凹凸が生じており、点群を直接使用すると端部の特定が難しいことがある。

そこで、第2章で提案した天端高の計測手法と同様に点群データを平面格子で分割し、格子内の標準偏差を加算することで算定した最浅値により天端幅・延長を面的に評価することができるか検討を行う。

なお、天端高の計測時には浚渫工や床掘工の評価手法

に基づき $1\text{m} \times 1\text{m}$ の平面格子を用いたが、天端幅・延長の計測に当たっては出来形管理基準における測定単位が 10cm であることから、現行の出来形管理基準と同等の精度とすることを念頭に $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の平面格子を用いて評価を行う。

(1) 仙台塩釜港

$10\text{cm} \times 10\text{cm}$ で作成した平面格子について、4.2(1)で設定した測線付近で評価を行う。幅1~4の測線について開始点と終了点を平面格子で評価したヒートマップを図-4.10に示す。図中の白線が本均しの設計範囲を示し、黄色の線が設定した測線を示している。また、橙色の格子は天端高が出来形管理基準である設計値 $\pm 5\text{cm}$ 以内、黒色の格子は設計値より 5cm 以上深く、灰色の格子は設計値より 5cm 以上浅いことを示す。

黄色の線で示す測線上において、幅1では開始点付近では境界付近が設計値より深い黒色の平面格子であり、終了点付近は橙色の平面格子となっているが、境界線の内側に黒色の平面格子となっている部分も見られた。

幅2については開始点、終了点とも境界部分は黒色の平面格子となっており、開始点の外側は浅いことを示す灰色の平面格子、終了点の外側は橙色の平面格子が見られた。

幅3については、開始点付近は橙色の平面格子となっているものの、終了点付近は黒色の平面格子が続いている。

幅4については開始点、終了点とも橙色の平面格子となっているが、終了点側では境界部分の内側に黒い平面格子が見られた。

幅1~4のいずれも測線が出来形管理基準値内の平面格子で満たされている事例はなく、また、出来形管理基準値外の平面格子と基準値内の平面格子が不連続に存在するなど、天端幅の計測は困難な結果となった。

この理由として、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の平面格子とした場合、格子内の点群数が $1\text{m} \times 1\text{m}$ の平面格子に比べて少なくなることが考えられる。幅1~4の測線端部付近の平面格子の点群密度を図-4.11に示す。赤色の格子は格子内の点数が少なく、青色の格子は格子内の点数が多いことを示す。平面格子内の点群数が3~4点程度となる平面格子が多く、格子内の標準偏差を用いても適切に最浅値を算定できなかったものと考えられる。

また、当該工事では $30\text{kg} \sim 800\text{kg}$ の捨石が使用されているが、捨石を比重 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ の立方体とすると、 30kg の捨石の形状は1辺約 23cm 、 800kg の捨石では1辺約 69cm となる。このため、図-4.12に捨石断面を楕円形で模式的に示す通り、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の平面格子では1つの捨石の一部分だけの計測結果を抽出することになり、捨石の頂部が含

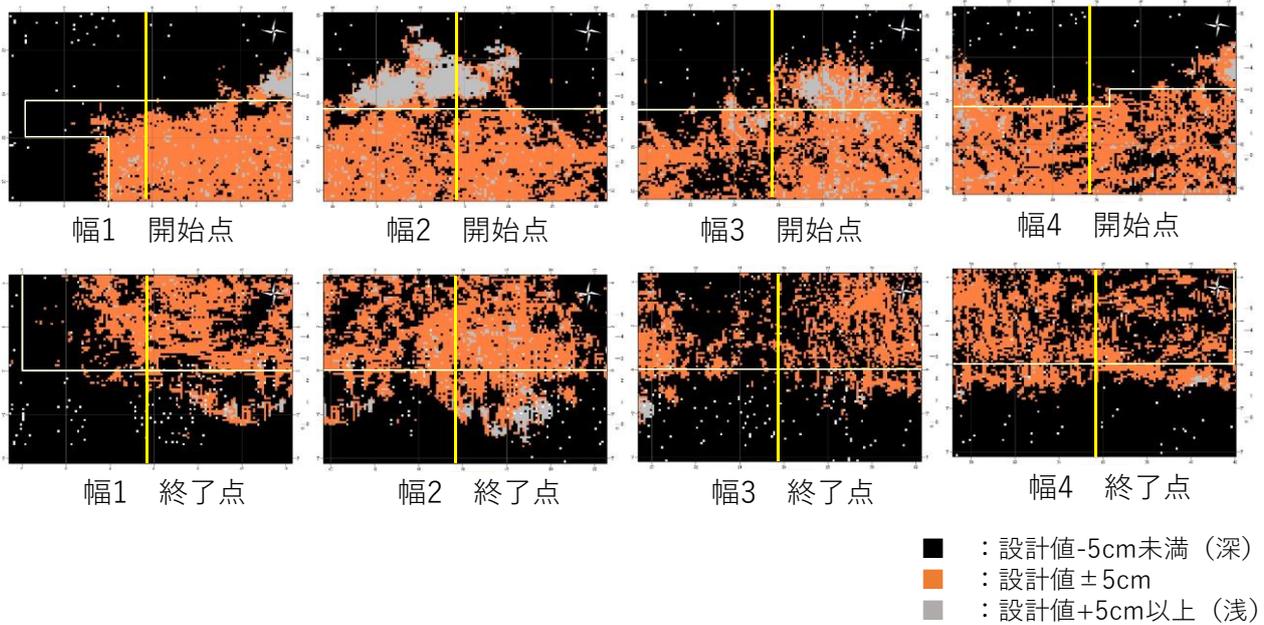


図-4.10 10cm×10cm 平面格子による測線端部の天端高の評価 (仙台塩釜港)

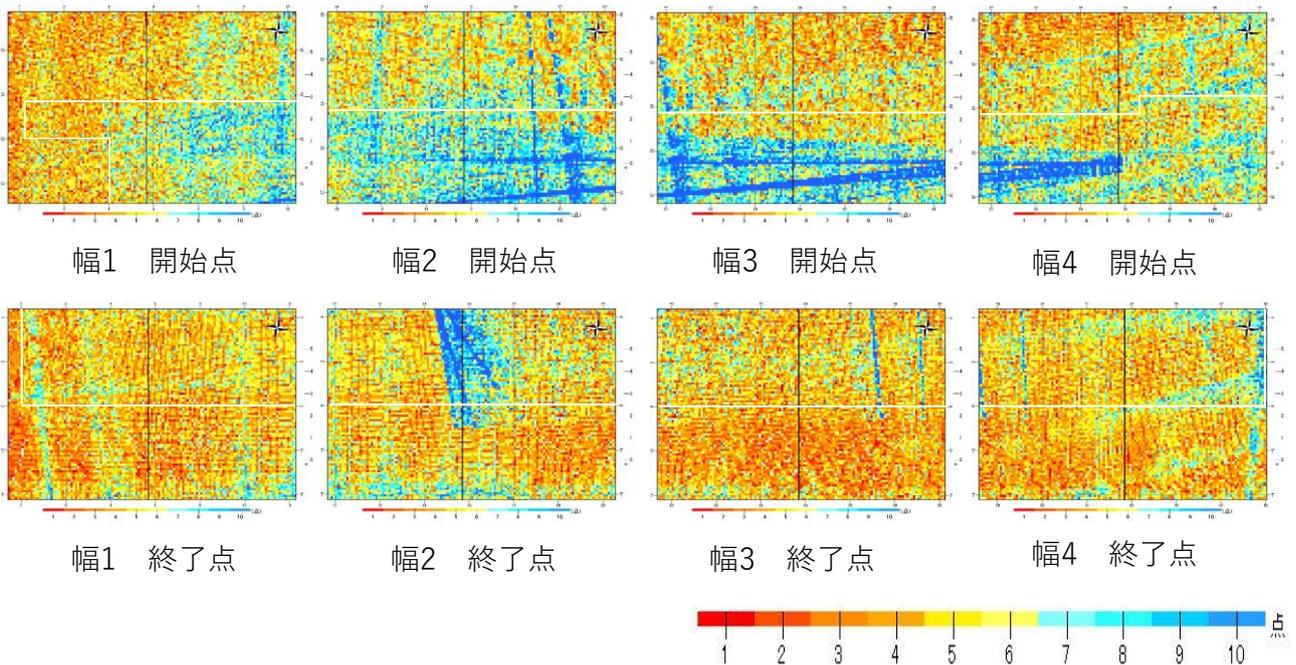


図-4.11 10cm×10cm 平面格子による測線端部の取得点密度 (仙台塩釜港)

まれな平面格子では出来形管理基準よりも深い値となったことが考えられる。

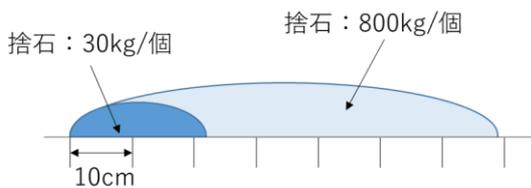


図-4.12 10cm平面格子に対する捨石の大きさ

(2) 高知港

幅1~6, 延長1~3の測線について, 開始点と終了点を平面格子で評価したヒートマップを図-4.13に示す。白線が本均しの設計範囲, 黄色の線が設定した測線を示している。なお, 図中の白色の範囲は既設ケーソンが設置されており点群を取得できなかった部分である。

高知港の事例では幅, 延長共に測線端部付近は黒色の格子となっており, 広い範囲で出来形管理基準より深い値となっていた。

測線端部付近の取得点密度を図-4.14に示す。10cm×10cmの平面格子内の点数が3点未満である赤色から橙色の範囲の格子が多く、仙台塩釜港の事例よりも取得点密度が疎になっていることがわかる。

当該工事では200kg～500kgの捨石が使用されているが、捨石を比重2.4g/cm³の立方体とすると、200kgの捨石の形

状は1辺約44cm、500kgの捨石は1辺約59cmとなる。このため、10cm×10cmの平面格子では1つの捨石の一部分だけの計測結果を抽出することになり、捨石形状の影響等により出来形管理基準値よりも深い値となったものと考えられる。

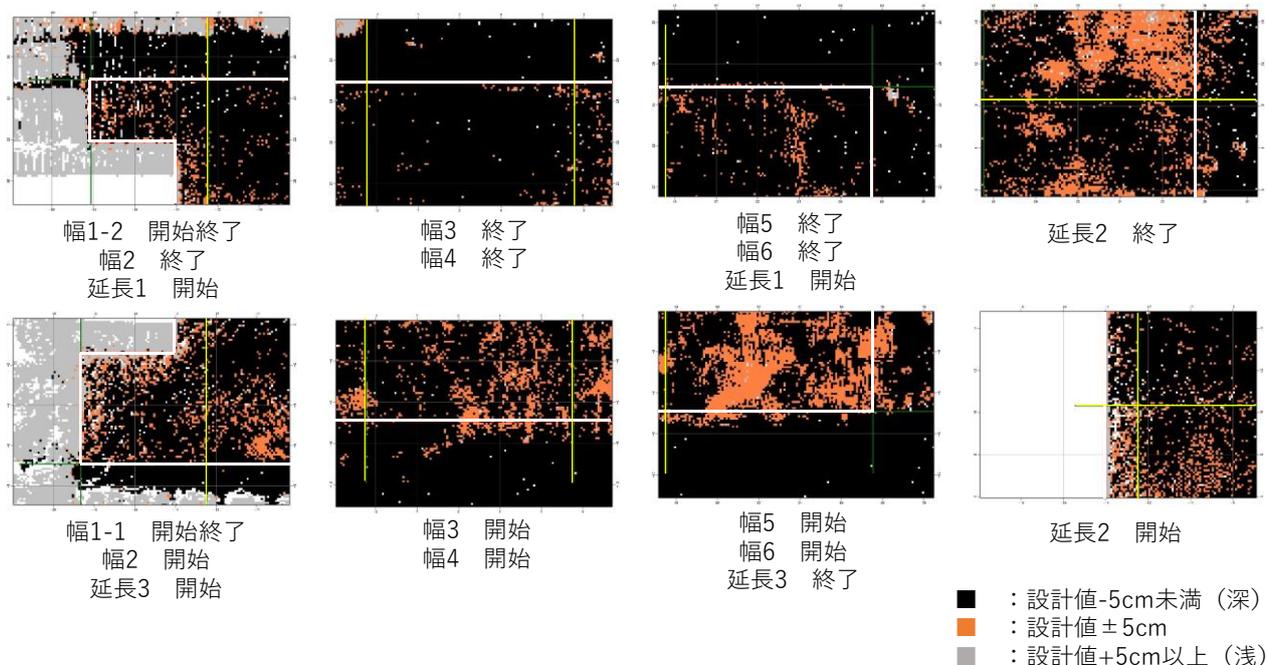


図-4.13 10cm×10cm 平面格子による測線端部の天端高の評価 (高知港)

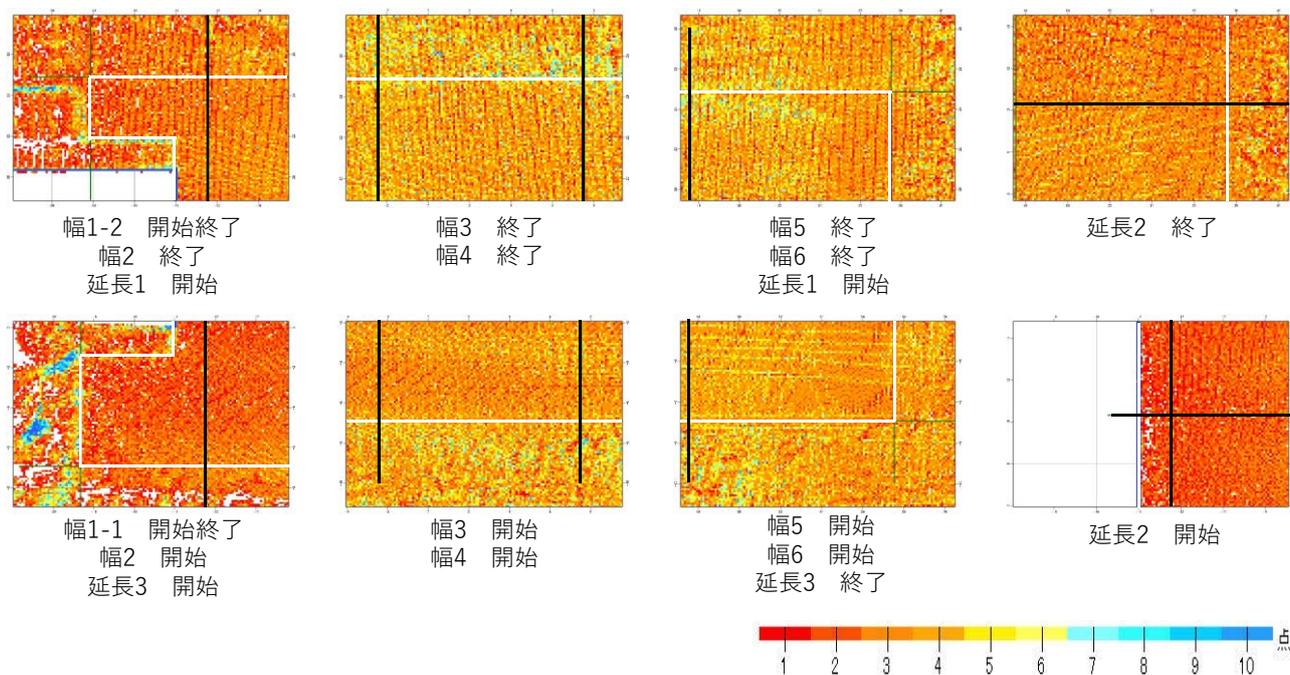


図-4.14 10cm×10cm 平面格子による測線端部の取得点密度 (高知港)

4.4 提案した計測手法の評価

マルチビーム測深で得られた3次元点群データを用いた断面評価、10cm×10cmの平面格子を用いた面評価による天端幅・延長の計測を実施したが、いずれも天端幅・延長の定量的な計測は困難という結果となった。

点群及びTINデータを用いた断面評価では、作成した断面が捨石形状の影響により天端高の出来形管理基準±5cmを超えて変化するため、本均し面の端部を特定することができなかった。

10cm×10cmの平面格子を用いた面評価では、測線端部付近の平面格子が出来形管理基準よりも深い値となり、天端幅・延長の長さを定量的に評価することができなかった。この原因としては平面格子が捨石よりも小さいサイズとなり、捨石頂部を含まない平面格子が生じたことが考えられる。

上記課題を解決するためには、捨石の大きさに応じて平面格子の大きさを変えて面評価を行うことや、天端高の評価と同様に達成率を踏まえた評価を行うことが考えられる。一方で天端幅・延長の測定間隔は10cmであることから、平面格子のサイズを大きくした場合や達成率により許容値に幅を持たせた場合でも、現行の出来形管理基準と同等の計測精度で評価することが可能かどうか引き続き検討が必要である。

5. おわりに

本資料では、基礎捨石均しを対象にマルチビーム測深を活用した出来形管理について、現地試験結果等を基に検討を行った。

天端高の検討結果を表-5.1に示す。計測精度向上手法として、潮位誤差の補正及び標準偏差による最浅値の算出について、現地試験及び音線追跡シミュレーションの結果から効果を確認し、提案手法の現場適用性を現地試験により確認を行った。計測精度向上について、潮位誤差については標定点における従来手法とマルチビーム測深による水深を比較することで補正可能であり、最浅値については平面格子内の標準偏差を用いることで算出できることが確認できた。現地試験で提案手法の適用性を検討した結果、基礎捨石均しの本均し面の天端高の出来形管理基準±5cmに対し、マルチビーム測深結果の達成率80%以上となることが確認できた。ただし、キャリブレーション（パーチェック）における計測値のばらつきが6cm生じた事例では達成率が80%に達しなかった。今回の試験結果からは1~2cmのばらつき内でキャリブレーションを行うことが望ましいと考えられるが、ばらつきと達成率の関係及びばらつきの許容値については引き続き確認が必要である。

天端幅・延長の検討結果を表-5.2に示す。点群データから断面を作成し目視により確認する手法を検討したが、境界の判定が困難だった。このため、出来形管理基準の

表-5.1 天端高計測手法の検討結果

	手法の概要	検証結果	原因と対応
潮位誤差の補正	計測面に1m×1m程度の標定点を設置し、従来手法とマルチビームの計測差を潮位誤差として補正に用いる。	現地実証を行った6港湾中3港湾では達成率が補正前より低下、または同一という結果となった。	・従来手法による標定点の計測値に誤差が生じた可能性 →従来手法による計測に留意 ・出来形が全体的に設計値よりも深め（又は浅め）であり、計測値の潮位誤差を補正することで設計値との差が大きくなった。 →対応不要
最浅値の算出	1m平面格子の標準偏差を中央値・平均値から最浅値までの差分の目安として加算することで、最浅値を算出する。	現地実証を行った6港湾全てで達成率が上昇した。	標準偏差を用いることで最浅値が算出できた
達成率の確認 (目安:80%)	潮位誤差の補正+最浅値の算出を行った平面格子の達成率を目安の80%と比較。	現地実証を行った6港湾中3港湾で達成率が80%以下の結果となった。うち1港湾は潮位誤差補正、最浅値算出ではそれぞれ達成率が上昇したものの達成率が80%以下だった。	キャリブレーション（パーチェック）作業の計測値のばらつきが大きく、実際の計測精度に影響が生じた可能性 →キャリブレーション精度の留意が必要（実証では1~2cmのばらつきであれば達成率への影響は見られなかった）

表-5.2 天端幅計測手法の検討結果

	評価手法の概要	評価結果	原因と対応
断面評価	①測線から5cmの範囲内の点群を使用して作成した点群断面、 ②点群からTINデータを作成し、測線で取得したTIN断面を目視で評価	天端幅・延長の端部を明確に特定できなかった。	捨石の凹凸によりどこまでを端部とするか判断が困難 →面評価を試行
面評価	10cm四方の平面格子で点群を分割し、標準偏差で最浅値を算出し、天端高の管理基準を満たした平面格子により面的に評価。	1m×1m平面格子と比べ基準値内となる格子数が少なく、全体的に基準値より深い結果となった。	①10cm平面格子では格子内の点群が少なく、標準偏差による最浅値の算定が不十分だった ②捨石の大きさが10cmより大きい場合、最浅値を含まない格子では深い値となった →適切な格子サイズの検討が必要

測定単位に基づき 10cm の平面格子による面管理が可能かを検討した。面管理の場合についても格子サイズが 10cm では捨石の形状をとらえきれず、明確な境界が確認できなかった。

天端高については概ね提案する計測手法の効果が確認できたことから、キャリブレーションと達成率の関係を整理するとともに出来形管理要領類の作成に向けた検討を進める。天端幅・延長について出来形管理に適切な格子サイズ等について出来形管理要領類作成に向けた検討を引き続き行う。

なお、本資料は、既投稿論文¹¹⁾に基づいて加筆・補足して作成したものである。

謝辞

本資料をとりまとめるにあたり、現地試験の実施のため国土交通省港湾局及び関係する各地方整備局等にご協力いただいた。ここに記し、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：3次元データを用いた港湾工事数量算出要領(基礎工編)(令和3年4月版)，2021，（最終閲覧日 2023.5.31）。
- 2) 国土交通省：港湾工事共通仕様書（令和5年3月），2023，pp3-37～3-38。
- 3) 国土交通省：第7回港湾におけるICT導入検討委員会，2019，<<https://www.mlit.go.jp/common/001274017.pdf>>，（最終閲覧日 2023.5.31）。
- 4) 宮田正史，菅野高弘，長尾毅，篠原勝次，近藤隆道：均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響，港湾技研資料，Vol.945，49p.，1999。
- 5) 小嶋一弘，辰巳大介，川上司，小川雅史：機械均し

の施工履歴データを活用した基礎捨石均し出来形管理の効率化に関する検討，国土技術政策総合研究所資料，No.1240，2023。

- 6) 国土交通省：マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）（令和3年4月改訂版），2021，<<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001475801.pdf>>，（最終閲覧日 2023.5.31）。
- 7) 海洋音響学会：海洋音響の基礎と応用，pp.77-79，成山堂書店，2004。
- 8) 宮田正史，森屋陽一，長尾毅，菅野高弘：均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響について～その2～，国土技術政策総合研究所資料，No.93，2003。
- 9) 口田登，辻垣武彦，森田博史：捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察，港湾技術研究所報告，Vol.30，No.1，347p.，1991。
- 10) 国土交通省：マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）（令和4年4月改訂版），2022，<<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001475803.pdf>>，（最終閲覧日 2023.5.31）
- 11) 辰巳大介，小川雅史，川上司：基礎捨石工の出来形計測を対象としたマルチビーム測深の適用性に関する研究，土木学会論文集F4(建設マネジメント)，78巻，2号，2022

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1250

July 2023

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.1250

マルチビーム測深を活用した基礎捨石均しの出来形管理に関する検討

July 2023