

# 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 (その2)

大倉翔太\*・辰巳大介\*\*・川上司\*\*\*・里村大樹\*

## 要 旨

国土交通省では、建設現場における省人化対策、生産性向上の取組として、「i-Construction2.0」の推進を行っている。港湾分野では、浚渫工、基礎工、ブロック据付工、本体工、海上地盤改良工等の多くの工種でICT施工が行われている。基礎捨石均しに関して、機械均しについては、施工履歴データを用いた出来形管理要領が策定された。一方で、人力均しについては、前報でマルチビーム測深による出来形管理手法の検討を行ったが、マルチビーム測深による誤差の影響を軽減するために標定点による水深補正が必要となること、天端幅・延長の評価する手法等の課題があり、出来形管理要領の策定には至っていない。

本研究では、マルチビーム測深を活用した基礎捨石均しの人力均しの出来形計測作業の効率化、生産性向上を目標として、標定点による補正を必要としないマルチビーム測深の1 m平面格子データによる均し面の平坦性評価及び潜水土の1箇所以上の水深計測による均し面の設計水深に対する定量評価の2種類の評価による出来形管理手法を提案し、その手法による出来形管理精度の検討を行った。

本均し6工事、荒均し4工事の現地試験結果による検討を行った結果、本均しの天端高、天端幅・延長の平坦性の評価は、均し面の1 m平面格子が許容範囲内となる割合（達成率）が80%を超え、提案手法により従来の出来形管理基準と同等の評価が可能であることが確認できた。また、荒均しの天端高、天端幅・延長の平坦性の評価及び法面の評価についても達成率80%を超え、提案手法により従来の出来形管理基準と同等の評価が可能であることが確認できた。これらの結果は、本研究で提案した手法を基に基礎捨石均しの人力均しに関するマルチビーム測深を活用した出来形管理要領を策定するための基礎資料として有用である。

**キーワード：**基礎捨石均し，マルチビーム測深，出来形管理，平坦性

---

\* 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長

\*\*\* 前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（現港湾局技術企画課課長補佐）  
〒239-0826 横浜賀市長瀬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](mailto:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp)

## **Study on the Application of Multibeam Echo Sounding to Finished Form Management for Port Foundation Works (Part 2)**

**OKURA Shota\***

**TATSUMI Daisuke\*\***

**KAWAKAMI Tsukasa\*\*\***

**SATOMURA Daiki\***

### **Synopsis**

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) is promoting the “i-Construction 2.0” as a measure to reduce the number of workers, and improve productivity, at construction sites. In the port and harbor field, efforts for ICT-aided construction have been expanded to include dredging, foundation work, block installation work, main bodywork, and offshore ground improvement work. Concerning port foundation works, procedures for the finished form management using construction history data have been established for mechanical leveling. On the other hand, in the previous report, we examined a method for the finished form management of manual leveling using multi-beam sounding, but there are issues, such as the need for depth correction using reference points to eliminate errors due to factors such as tidal differences in depth surveys using multi-beam sounding, and the need for a method for evaluating the width and spread of the top surface; thus, we have not yet been able to establish procedures for management.

In this study, to improve the efficiency and productivity of port foundation works of the manual leveling using multi-beam depth sound, we proposed a method for controlling the shape of the finished product using two types of evaluation: evaluation of the flatness of the leveling surface using 1 m plane grid data from multi-beam depth sounding, which does not require correction using reference points, and quantitative evaluation of the leveling surface using the measured depth at one or more points by divers.

As a result of examining the results of the on-site tests for the 6 main leveling and 4 rough leveling works, it was confirmed that the evaluation for main leveling achieved an 80% or higher rate of completion and that the proposed method makes it possible to evaluate the same as the conventional finished form management standards. In addition, it was confirmed that the evaluation for rough leveling also exceeded the 80% achievement rate. These results are useful as basic data for formulating a procedure for the finished form management of manual leveling using multi-beam sounding based on the method proposed in this study.

**Key Words:** port foundation works, multibeam echo sounding, finished form management, flatness

---

\* 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

\*\*\* Ex-Senior Researcher of Port Advanced Information Technology Division, Support Center for Port and Harbor Advanced Information Technology (Deputy Director, Engineering Planning Division, Ports and Harbors Bureau)

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](mailto:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp)

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 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の課題と提案手法 .....	2
2.1 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の課題 .....	2
2.2 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手法の提案 .....	3
3. 基礎捨石本均しの出来形管理手法の現地実証 .....	6
3.1 現地実証の方法 .....	6
3.2 現地実証の結果 .....	6
3.3 出来形管理手法の評価 .....	12
4. 基礎捨石荒均しの出来形管理手法の現地実証 .....	13
4.1 現地実証の方法 .....	13
4.2 現地実証の結果 .....	13
4.3 出来形管理手法の評価 .....	19
5. おわりに .....	20
5.1 本研究の結論 .....	20
5.2 今後の課題 .....	20
謝辞 .....	21
参考文献 .....	21





## 1. はじめに

国土交通省では、建設現場における省人化対策、建設現場の生産性向上の取組として、「i-Construction2.0」<sup>1)</sup>の推進を行っている。「i-Construction2.0」では、2040年度までに、建設現場の省人化を少なくとも3割、すなわち生産性を1.5倍以上に向上することを目指し、「施工のオートメーション化」、「データ連携のオートメーション化」、「施工管理のオートメーション化」を柱として、建設現場のオートメーション化に取り組むとされている。港湾分野では、工事におけるICT施工の取組みが様々な工種で進められており、2019年度に浚渫工を対象としてICT活用工事を実施してから、基礎工、ブロック据付工、本体工、海上地盤改良工に拡大して行われている。

基礎捨石均しは、ICT活用工事として検討が進められている工種の一つである。基礎捨石均しのうち、起工測量や数量算出は既に要領<sup>2)</sup>が策定されており、既にICT活用が行われている。出来形管理については、潜水士による出来形の計測、石の分布状況及び安定性の確認が行われており、潜水士による作業量が多くなっている。出来形管理の効率化、生産性向上を図るため、潜水士の作業の一部をICT施工に代替する出来形管理が検討されている。水中部施工状況調査の手引き<sup>3)</sup>にあるように、水中部施工状況調査は、工事の監督職員が自ら直接確認することが困難なため、代わりに潜水士が施工状況を調査し、契約図書の適合等について確認及び把握することとなっている。潜水作業のうち、ICT機器での代替が困難な定性的な観察は従来通り行うが、ICT機器での代替が可能な定量的な計測はICT施工に置き換える検討が進んでいる。

基礎捨石均しは、潜水士による人力均し、起重機船から重錘を落下させて捨石を均す機械均し等が現場条件等により使い分けられている。機械均しについては、重機による施工履歴を活用した出来形管理の検討が進み、施工履歴データを用いた出来形管理要領（基礎工編）<sup>4)</sup>が2024年に整備されている。人力均しについても、マルチビーム測深を用いた出来形管理を実施する方法が考えられている（図-1.1）。前報<sup>5)</sup>では、マルチビーム測深による基礎捨石均しの出来形管理手法を提案し、その手法について現地実証データから精度検証を行った。天端高の計測については、提案手法により出来形管理に十分な計測精度が得られることが確認できたが、天端幅・延長については、提案手法では定量的な出来形の評価が困難であった。前報<sup>5)</sup>では、マルチビーム測深による水深計測において生じる潮位等による誤差をなくすため標定点による水深補正が必要となること、天端幅・延長の評価が

うまくいかないこと等の課題があったため、マルチビーム測深による出来形管理手法を策定するには、これらの課題を解決する新たな手法の提案が必要である。

本研究は、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の作業効率化、生産性向上を目標として、マルチビーム測深による標定点を必要としない出来形管理手法を提案し、その手法による計測精度を検討することにより基礎捨石均しの人力均しについて従来の出来形管理基準と同程度の成果が得られるマルチビーム測深による出来形管理手法の策定を図るものである。

本研究は全5章の構成とし、第1章は研究の背景と目的を述べる。第2章では、基礎捨石人力均しの出来形管理基準について説明し、マルチビーム測深を活用した出来形管理を行うための既存研究における課題を整理する。そして、前報における課題を解決するマルチビーム測深を活用した基礎捨石人力均しの出来形管理手法の提案を行う。

第2章で提案した手法について、従来の出来形管理基準を満たした現地実証データを用いて、第3章では基礎捨石人力均しの本均しを対象とした現地実証結果を述べる。次に、第4章では、基礎捨石人力均しの荒均しを対象とした現地実証結果を述べる。第5章は主要な結論及び今後の課題を述べる。

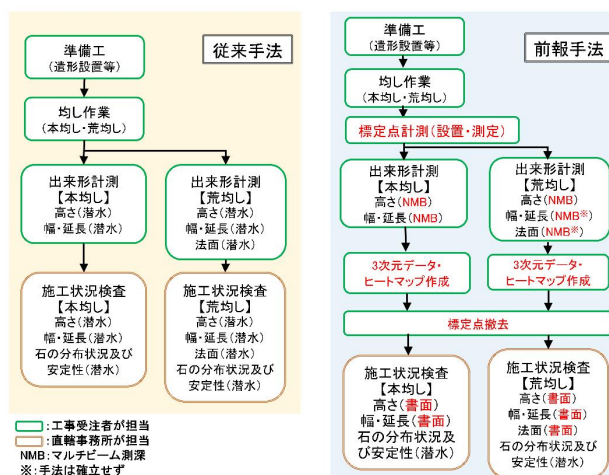


図-1.1 基礎捨石均しの人力均しの施工から出来形管理までの流れについて、従来手法と出来形管理時にマルチビーム測深（NMB）を用いた前報手法との比較。工事受注者が行う潜水士による出来形計測、直轄事務所の行う施工状況検査の出来形計測についてマルチビーム測深に置き換えることとしている。赤字は、従来手法から変更した点を示している。

## 2. 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の課題と手法の提案

### 2.1 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の課題

基礎捨石均しの出来形管理基準は、港湾工事出来形管理基準<sup>6)</sup>において表-2.1のとおり規定されている。基礎捨石均しの出来形管理は、ケーソン等の荷重がかかる部分の本均し部とその外側の荒均し部で求められる精度が異なる。管理項目は、天端高、天端幅、延長、法面があり、それぞれ測定密度、測定単位、許容範囲が定められている。特に、本均し天端高に関しては、測定単位1 cm、許容範囲 $\pm 5$  cmと高い精度が必要とされている。

表-2.1 基礎捨石均しの出来形管理基準

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

基礎捨石均しにおける出来形管理について、ICTを活用して効率化するために様々な検討が行われている。基礎捨石機械均しでは、すでに施工履歴データを活用した出来形管理要領<sup>4)</sup>が策定されているが、基礎捨石人力均しは、マルチビーム測深を活用した検討が行われているものの、いくつかの課題があり、要領策定には至っていない。

マルチビーム測深の計測精度に影響する要素としては、機器の艤装状況、船舶の動揺、水中音速度の変化、潮位等によるものがある（図-2.1）。機器の艤装状況、船舶の動揺、水中音速度の変化については、測深の前に実施する取り付け角度の誤差や機器の収録遅延等を求めるパッチテスト、水中音速度の計測結果から補正し、誤差を軽減する。潮位については、計測場所近隣にある検潮所の潮位を用いて補正をかけることが一般的であるが、検

潮所と計測場所が離れている場合には現地の潮位と検潮所の潮位との差により誤差が生じることがある。このようにマルチビーム測深は、計測精度に影響する項目に対して補正を行うが、誤差をゼロにすることは難しく、マルチビーム測深による基礎捨石均しの出来形管理の検討を行った後述する既存研究である前報<sup>5)</sup>、塚本・琴浦<sup>7)</sup>では、マルチビーム測深の計測誤差について、標定点等（図-2.2）を用いてマルチビーム測深結果の補正を行ったデータを用いて評価、検討を行っている。

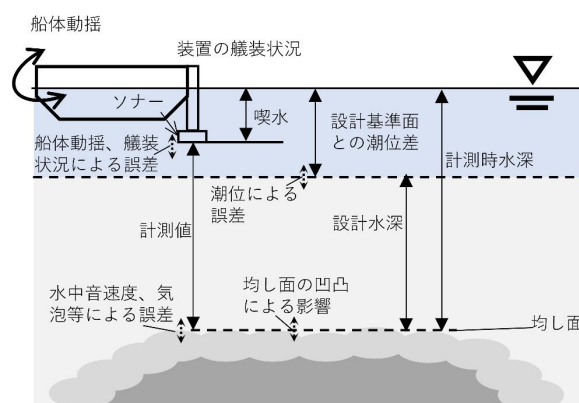


図-2.1 マルチビーム測深による均し面計測と精度に影響する要素。

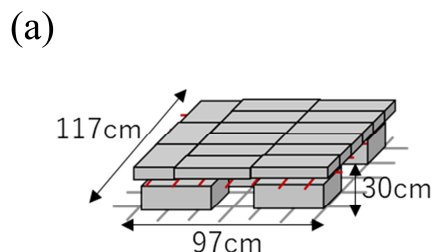


図-2.2 標定点の(a)模式図と(b)写真。前報<sup>5)</sup>より引用。

基礎捨石均しの均し面については、捨石を並べているため、捨石の形状によって凹凸が生じる。従来の出来形管理手法では均し面の天端高を計測する際に均し面の浅い位置に合わせて計測が行われるが、マルチビーム測深により均し面を計測した場合には、凹部、凸部に関わらず計測され、捨石間の窪みを含んだ結果となる。マルチビーム測深結果から従来手法と同様に均し面の浅い位置となる天端高を算出するには、マルチビーム測深結果から均し面の最浅値に相当する値を求める必要がある。後述する既存研究<sup>5)・7)</sup>では、最浅値に相当する値を求めるため、均し面を1 m平面格子に分割し、格子内のデータの中央値に標準偏差( $\sigma$ )を足した値を1 m平面格子の最浅値として用いていた(図-2.3)。

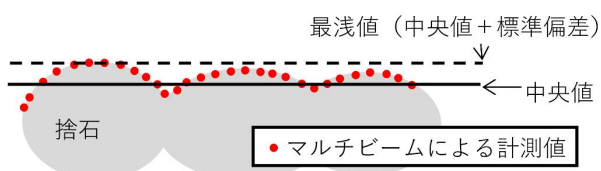


図-2.3 計測面の凹凸に対応した最浅値の設定方法。

前報<sup>5)</sup>は、マルチビーム測深を活用した基礎捨石人力均しの出来形管理手法として、均し範囲を1 m平面格子に分割し、潮位による誤差に対応するための標定点による補正、及び計測面の凹凸の形状に対応するため、測深データから先述の方法により求めた最浅値による天端高の評価を行い、1 m平面格子の最浅値が従来の出来形管理基準である設計水深に対して許容範囲内となる割合が80%以上となることを確認した。しかしながら、天端幅・延長の評価については、点群断面、TIN断面による断面評価と10 cm平面格子を用いた面評価を行ったが、提案した手法では定量的な出来形の評価が困難であった。また、法面評価については、未検討であった。

塚本・琴浦<sup>7)</sup>は、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の検討を行い、均し範囲を1 m平面格子に分割し、先述の方法により求めた1 m平面格子の最浅値による面的評価を行い、天端高は設計値に対して出来形管理基準の許容範囲内に含まれる格子が80%以上となることを確認し、天端幅・延長は、天端高の基準を満たした範囲の格子数と設計値を比較することで従来手法と同等の検査が可能であるという見解を示した。塚本・琴浦の検討においても、潮位による誤差が見られており、従来計測手法で計測したコンクリートブロック天端高を用いて、天端高の補正を行っていた。また、法面部は天端部同様の方法で求めた1 m平面格子の最浅値から隣り合う格子の最浅値から勾配を算定し、平面格子毎の鉛直

許容範囲を求め、その範囲内に収まる格子内の点群データの割合が95%以上となることを確認した。

これまでの検討では、潮位等の誤差が生じることによる標定点等の設置、計測、撤去の手間が必要となること、捨石均し面の天端高を求めるために測深データの標準偏差の算定が必要となり手順が複雑化すること等の実用上での課題があった。これらの課題は、マルチビーム測深を活用して効率的に出来形管理を行う上では省略することが望ましいものであり、本研究ではこれらを省略した出来形管理手法の検討を行った。

## 2.2 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手法の提案

マルチビーム測深による水深は、前述したように機器の機装状況、船舶の動揺、水中音速度の変化、潮位等による誤差が生じ、場合によっては設計水深と大きな差が生まれる。そのため、既存研究では、標定点等によりマルチビーム測深で生じている誤差を求めて補正していた。上記の補正は、マルチビーム測深値のゼロ点補正にあたり、マルチビーム測深値の空間的な凹凸形状は変わらない。また、基礎捨石均しの出来形管理基準の天端高については、均し面の高さが設計水深に対して許容範囲内に収まることを確認するが、これは均し面が許容範囲を超えるような凹凸面を持たないかどうかの平坦性の評価、均し面が設計水深を満足していることの確認を行うものである。本研究では、均し面が平坦であるかどうかの平坦性の評価と均し面が設計水深を満たしているかどうかの定量評価を分けて検討することとした。

マルチビーム測深による均し面の平坦性については、設計水深と比較せず、代わりにマルチビーム測深結果の基準値となる値を設定し、その基準値に対して測深結果が許容範囲を超えるかどうか調べることにした。均し面の基準値をマルチビーム測深結果から設定することにより、マルチビーム測深が誤差を持つ場合でも平坦性の評価が可能となる。ただし、この評価だけでは、均し面が設計水深を満たしているかどうかの定量評価ができないため、均し面の設計水深に対する定量評価として、潜水士による最低1箇所以上の水深計測を併せて行い、計測水深が設計水深に対して従来の出来形管理基準の許容範囲内となっていることを定量的に確認することとした。潜水士による水深計測は、基本的に均し面の凹凸のうち凸部を選んで計測される。マルチビーム測深は、凹部、凸部に関わらず計測され、捨石間の窪みを含んだ結果となるため、マルチビーム測深による基準値は、水深計測よ



りも深い水深となることが考えられる。実測された水深が設計水深よりも深くなる場合には、均し面が設計水深に比べて深くなり、ケーソンを載せた際に周囲の高さとのずれが生じることが危惧される。そのため、可能な場合は複数箇所の水深計測を行い、均し面の水深が設計水深に対して許容範囲を満足しているかどうか確認することが望ましい。

本研究では、上述するマルチビーム測深による均し面の平坦性の評価と潜水土の1箇所以上の水深計測による均し面の設計水深に対する定量評価の2種類の評価による出来形管理手法を提案する（図-2.4）。前報で検討できていなかった法面部の評価については、後述するTINデータを用いた実測値と設計値の比較による差分によって評価することとした。前報手法<sup>5)</sup>と本研究の提案手法の施工から出来形管理までの流れの比較を図-2.5に示す。本研究の提案手法では、標定点に関係する作業はなくなるが、代わりに潜水土による1箇所以上の水深計測が増える。ただ、この水深計測については、均し作業の後連続して行うことにより作業量としては大きな増加なく実施できるものであると考えられる。

基礎捨石均しの出来形管理は、天端高、天端幅、延長、法面の評価が必要である。それぞれの項目における本研究で提案する手法の評価方法については、以下で詳細に説明する。

天端高の出来形管理は、マルチビーム測深の1 m平面格子による平坦性評価によって行う。1 m平面格子は、各格子内の計測点群データから求められる中央値を代表値とした。1 m平面格子による平坦性評価は、均し範囲内にある1 m平面格子の代表値から最頻値を求めて基準値とし、その基準値に対して代表値が許容範囲以内となる均し範囲内の格子の割合（以後、達成率）により調べた。

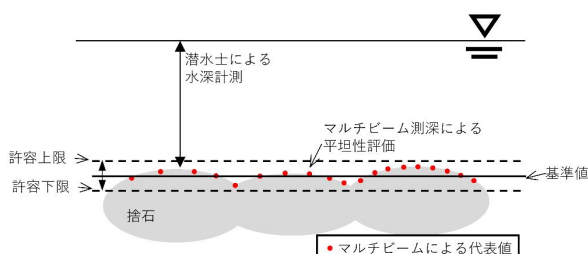


図-2.4 本研究における提案手法. マルチビーム測深による平坦性評価により、均し面において設定した基準値に対し、許容範囲を超える凹凸がないか確認し、潜水土による水深計測により設計水深を満足することを確認する。

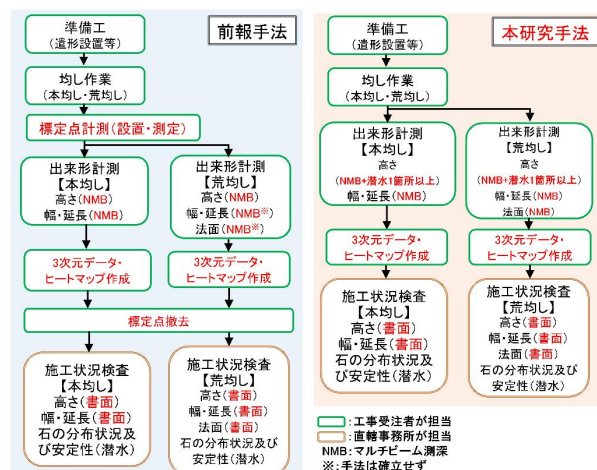


図-2.5 人力均しの施工から出来形管理までの流れについて、前報手法と本研究提案手法の比較。赤字は、従来手法から変更している点を示す。

天端高の平坦性評価の達成率が従来の出来形管理基準と同等の評価となる目安については、前報<sup>5)</sup>では既存研究<sup>8)・9)・10)</sup>の基礎捨石均しの本均しの天端高の計測を行った結果から設定した。平均を設計値、標準偏差を既存研究の計測結果から得られた値とした正規分布を仮定し、本均し天端高の出来形管理基準である設計値 $\pm 5$  cmを満たす正規分布の確率について調べ、この結果から達成率が80%を超えていることを目安とした（表-2.2）。ただ、この結果については基礎捨石均しの天端高計測値の分布が正規分布となることを前提として考えたが、正規分布に従う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。上記のような検討の余地はあるものの、塚本・琴浦<sup>7)</sup>でも達成率80%を目安としていること、現状そのほかに妥当な値は検討できていないことから引き続き達成率が80%を超えることを目安とした。

表-2.2 既存研究で行われた天端高の計測結果で得られた標準偏差に基づいた正規分布において、設計値 $\pm 5$  cmとなる確率

測定事例	測定間隔 (m)	標準偏差 (m)	確率(%)
口田ら <sup>8)</sup>	5.5	0.035	84.7
宮田ら <sup>9)</sup>	0.3	0.021	96.7
宮田ら <sup>10)</sup> その1	0.1	0.037	82.3
宮田ら <sup>10)</sup> その2	0.1	0.039	79.9

天端幅と延長の出来形管理は、均し範囲が規定の長さを確保できているかどうかを調べる必要がある。前報<sup>5)</sup>では、マルチビーム測深結果から点群断面、TIN断面を作成し、目視にて本均し部の長さを評価したが、本均し部と荒均し部の境界の把握が難しく、天端幅・延長の端部を明確に特定できなかった。また、10 cm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る面的評価も行ったが、10 cm平面格子では、格子サイズが捨石のサイズよりも小さく、深い値となる格子がありうまくいかなかった。そのような経緯からマルチビーム測深結果の断面による評価は難しく、面的評価についてもある程度サイズの大きい格子を用いることが適していると考え、天端高同様に1 m平面格子を用いた手法とした。均し面の平坦性については、天端高の評価で確認できている。そのため、天端幅・延長の評価については、均し範囲の端部の格子が平坦性を確保できているか調べることにし、均し面の端部にあたる境界部の格子を対象に均し面の平坦性評価を行った。この平坦性評価の達成率が天端高の評価同様に80%を超えることによって、均し範囲の天端幅・延長が規定の長さを確保できているか判断した。

1 m平面格子については、均し範囲によっては格子の一部が範囲外となることがある。本研究では、均し部範囲内のデータのみを扱い、範囲外を含む格子は、均し範囲内の測深データのみで代表値を求めた。なお、格子内の面積が小さく代表値を得るために十分なデータ点数の確保が難しいと考えられること及び天端幅・延長の出来形管理基準における許容範囲が10 cmであることから、1 m平面格子の均し範囲内の箇所が1辺10 cm未満となる格子は解析対象外としても従来の出来形管理基準と同等の評価が可能であると判断し、1辺10 cm以上となる格子のみ解析対象とした（図-2.6）。

法面は、1 m平面格子による評価を行う場合、格子内の法肩部と法尻部では勾配により測深結果が異なり、格子の代表値が断面を代表する値とは言えない。そのため、本研究の法面の出来形管理では3次元データであるTINデータを用い、設計TINと実測TINの差分が許容範囲内となる実測TINの数の割合で評価した。まず、3次元データを用いた港湾工事数量算出要領（基礎工編）<sup>2)</sup>を参考とした設計TINを作成し、これを基準データとする。マルチビーム測深データは、10 cm平面格子の中央値を代表値とした実測TINを作成する。これらのTINデータについて、プリズモイダル法<sup>2)</sup>により設計TINと実測TINの差分 $D$ を求める（図-2.7(a)）。法面の評価は、法面に直角の高さ

で評価するため、式(1)に示すように差分 $D$ に対して、傾斜角 $(\theta)$ 補正をかけ、法面に直角な差分 $D'$ を算出する。

$$D' = D \times \cos \theta \quad (1)$$

この法面に直角な差分 $D'$ が出来形管理基準の許容範囲内となるTIN数の達成率を求めることで評価した（図-2.7(b)）。法面の評価における達成率が従来の出来形管理基準と同等の評価となる目安については、他の項目と並びを揃えて80%とした。

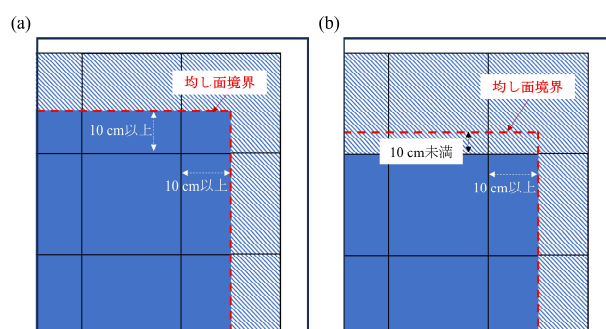


図-2.6 均し面境界における 1 m 平面格子. (a)均し境界部の 1 m 平面格子の均し範囲が 1 辺 10 cm 以上の場合. (b)均し境界部の 1 m 平面格子の均し範囲内が 1 辺 10 cm 未満の場合. 1 辺 10 cm 未満となる場合は対象格子から除外する. 青塗り部が解析対象となる範囲, 青斜線部は対象外の範囲となる。

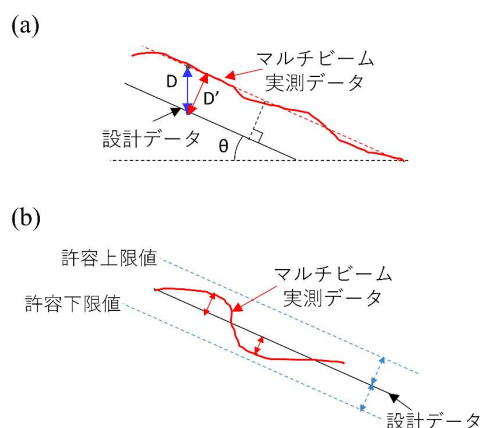


図-2.7 法面部の評価方法. (a)同位置の設計 TIN と実測 TIN の差分 $D$ と法面に直角な差分 $D'$ . (b)法面部の評価方法. 法面に直角な差分 $D'$ が許容上限値と許容下限値の範囲内にあるかどうかで評価する。

本研究では、上記に示す提案手法について、現地実証データを用いて検討を行った。現地実証データについては、「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル（浚渫工編）」<sup>11)</sup>に準じて実施し、水中音速度計測結果、潮位観測結果を適用した補正及び電氣的ノイズや水中浮遊物、魚群等のノイズ除去処理を実施した水深データを利用し、データの単位系はm、小数第2位止めとした。本均しの検討結果は第3章、荒均しの検討結果は第4章で整理した。

### 3. 基礎捨石本均しの出来形管理手法の現地実証

#### 3.1 現地実証の方法

本章では、第2章で提案した基礎捨石人力均しの出来形管理手法による本均し部の評価について、現地実証データを用いて検討を行った。

本研究で対象とする現地実証場所を表-3.1に示す。いずれの地点もすべて本均し部全範囲を対象に解析を行った。小名浜港を除く港では本均し部範囲内に標定点を設置しているため、標定点の点群を目視で取り除いたうえ解析を行った。石垣港その1については、水中バックホウによる施工であるが、水中バックホウによる施工は、透明度の高い場所で人力均しの代わりとして使用されているため、本研究では人力均しの1工事として扱った。

表-3.1 基礎捨石本均しの現地実証データの概要

ケース名	設計水深(m)	使用石材(kg/個)	幅(m)	延長(m)	格子数
仙台塩釜港	-12.0	30~800	23.70	40.30	1003
石垣港その1	-5.8	5~200	21.50	55.90	1012
石垣港その2	-5.8	5~200	16.50	52.40	902
高知港	-14.2	200~500	31.80	41.60	1416
室津港	-8.7	200~500	26.20	14.80	405
小名浜港	-14.2	30~800	26.70	22.01	607

対象とした現地実証ケースは、すべて従来の出来形管理基準による検査を満たしたものであり、本研究の提案手法である潜水士による1箇所以上の水深計測は、複数地点における水深計測により設定水深に対して許容範囲内( $\pm 5$  cm)となることが確認できており、均し面は設計水深を満たしていると判断した。そのため、本章では、本均し部の天端高及び天端幅・延長のマルチビーム測深結果による均し部の平坦性の評価を実施した。平坦性の評価は、均し範囲内にある格子の代表値(中央値)から最頻値を求めて基準値とし、その基準値に対して代表値が許容範囲である $\pm 5$  cmの範囲内となる割合(達成率)が80%以上かどうかで判断した。

#### 3.2 現地実証の結果

##### (1) 仙台塩釜港

マルチビーム測深による仙台塩釜港の本均し部周辺の海底地形図を図-3.1に示す。仙台塩釜港の本均し部は、隣接するような位置に左側に均し部より水深の浅い地形が存在していた。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-3.2に示す。1 m平面格子の代表値の最頻値は-12.05 m、標準偏差は0.048 mであった。

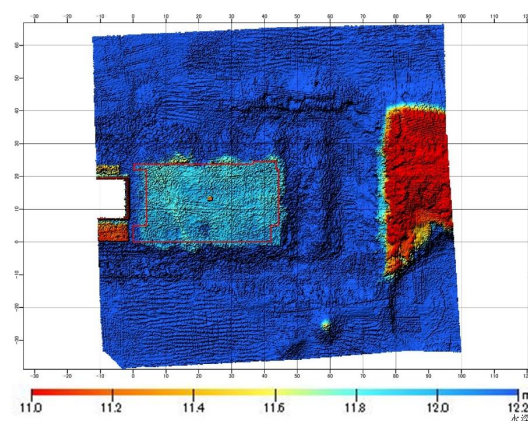


図-3.1 仙台塩釜港における海底地形図。赤枠は本均し部を示す。

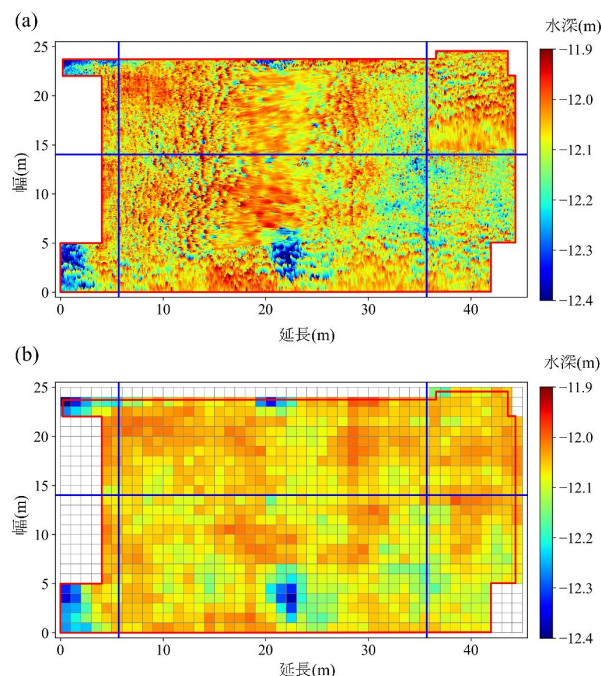


図-3.2 仙台塩釜港におけるマルチビーム測深結果。(a) マルチビーム測深の点群データのヒートマップ。(b) 1 m平面格子の代表値のヒートマップ。赤枠が均し範囲、青線が従来の出来形管理箇所の一部を示す。



各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.3に示す。天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は、87.8%と目安の80%を上回っていたが、天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は、76.4%と目安の80%を下回る結果であった。延長0～4 mの箇所において、基準値に比べ許容範囲よりも深い格子が多く存在していた。この影響は、延長0～4 mの格子が全体の約1割以上を占める天端幅・延長の評価において現れており、達成率が目安の80%を下回ったと考えられる。延長0～4 mを除いた天端幅・延長の評価は(図-3.4)，達成率は86.7%と目安の80%を上回る結果となり、境界部の達成率が80%を下回ったのは、対象となる格子に局所的に許容範囲外となる格子が存在していたためと分かった。この局所的に許容範囲外となる格子が存在した要因について、既設構造物に近い箇所であり、マルチストーク現象の影響を受けている可能性を考えたが、その場合には水深が浅くなる。今回の場合は水深が深くなっていたため、別の要因であると考えられ、要因の特定はできなかった。

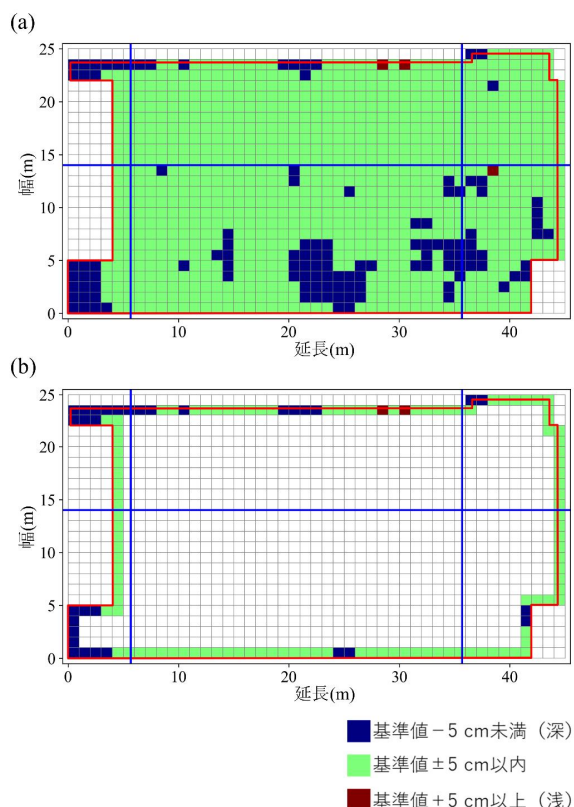


図-3.3 仙台塩釜港における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

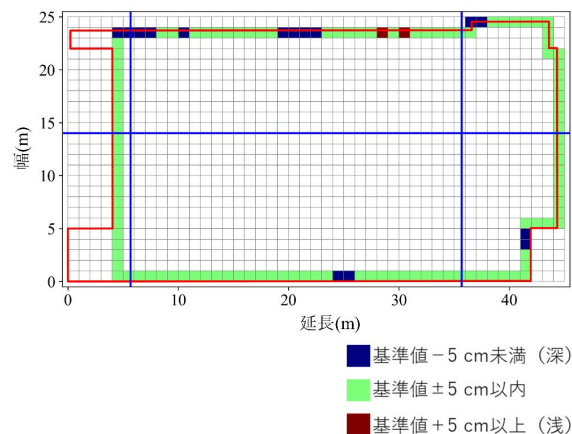


図-3.4 仙台塩釜港における天端幅・延長の出来形評価の延長 0～4 m の範囲を除いた場合のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

## (2) 石垣港その1

マルチビーム測深による石垣港その1の本均し部周辺の海底地形図を図-3.5に示す。石垣港その1については、赤枠部に示す本均し範囲の一部箇所において、水深の浅い箇所が見られた(図-3.5(b)青枠内)。この箇所のデータは、隣接するケーソンが本均し範囲に一部被っていたため、該当箇所について目視、手作業により除去を行った。

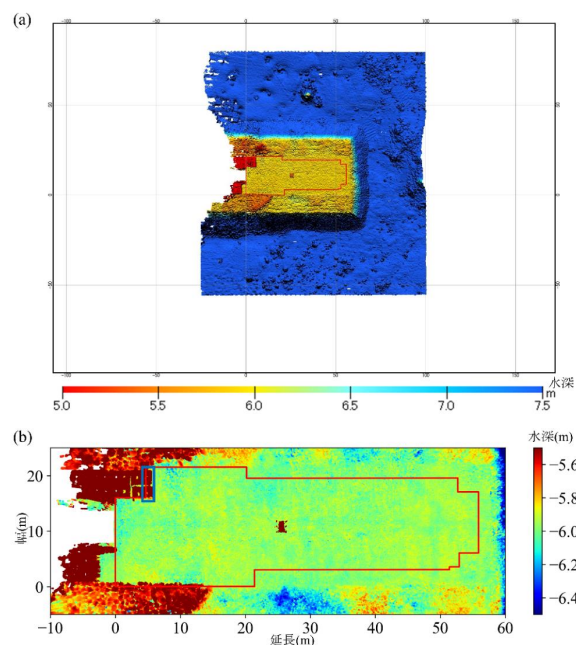


図-3.5 石垣港その1における海底地形図。(a)マルチビーム測深箇所全域。(b)本均し箇所周辺を抽出したもの。赤枠は本均し部を示す。青枠は本均し範囲において隣接するケーソンが含まれる箇所を示す。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-3.6に示す。均し範囲の測深結果を見ると、一部分欠測となっている箇所があるが、これは上述する隣接するケーソンが含まれるデータを除去した結果、格子内のデータがなくなったためである。また、延長0～13 m、幅0～1 mの格子において、1 m平面格子の水深が浅くなっている箇所が見られた。該当箇所は、本均し施工前に余盛の荒均しが行われている箇所であり、境界部においてその影響を受けていたと推察される。1 m平面格子の代表値の最頻値は-5.98 m、標準偏差は0.055 mであった。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.7に示す。天端幅・延長の評価を行う境界部については、上述するように欠測箇所があるため、均し範囲の欠測でない最も外側の格子とした。天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は、94.4%と目安の80%を上回った。天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は、延長0～13 m、幅0～1 mの格子が全て許容範囲外となっていたものの、82.9%と目安の80%を上回る結果であった。

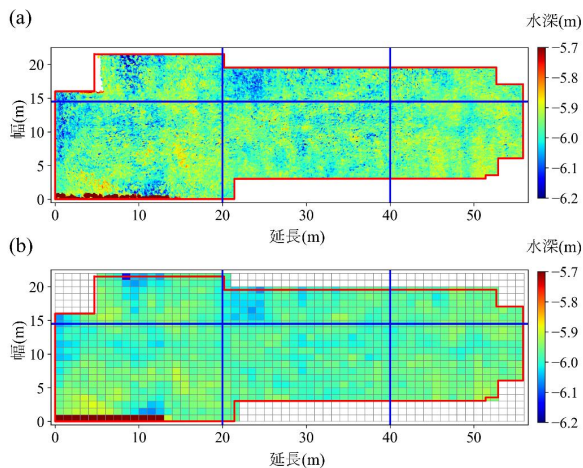


図-3.6 石垣港その1におけるマルチビーム測深結果。

(a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ。(b)1 m平面格子の代表値のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2と同じ。

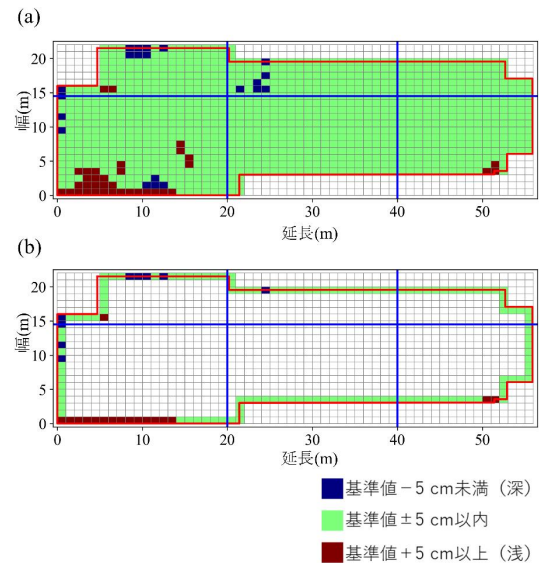


図-3.7 石垣港その1における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2と同じ。

### (3) 石垣港その2

マルチビーム測深による石垣港その2の本均し部周辺の海底地形図を図-3.8に示す。本均し部の左側には、本均し範囲よりも水深の浅い施工済の地形が確認できる。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-3.9に示す。1 m平面格子の代表値から求めた基準値となる最頻値は-6.18 m、標準偏差は0.023 mであった。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.10に示す。均し範囲のうち、許容範囲である基準値±5 cmの範囲外となる格子は、ごく少数まばらに存在するのみであり、天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は96.9%、天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は93.3%とどちらも80%を上回る結果であった。

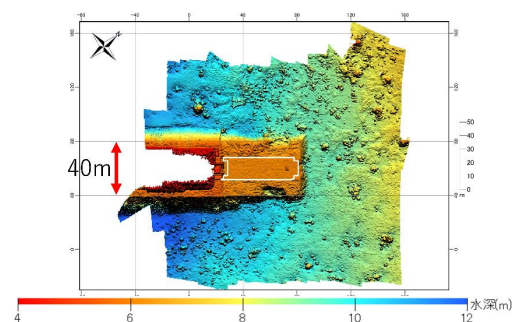


図-3.8 石垣港その2における海底地形図。白枠は本均し部を示す。



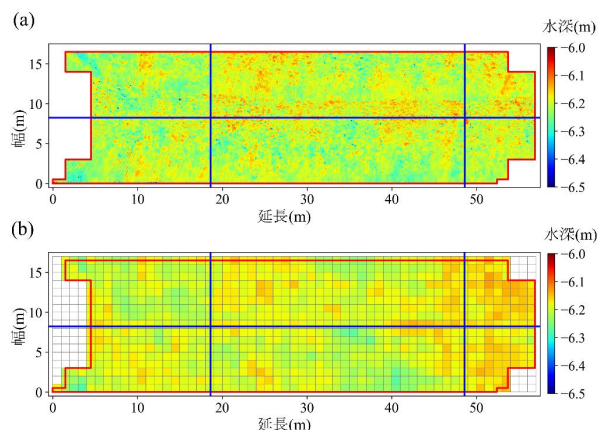


図-3.9 石垣港その 2 におけるマルチビーム測深結果.

(a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ. (b)1 m 平面格子の代表値のヒートマップ. 赤枠, 青線は, 図-3.2 と同じ.

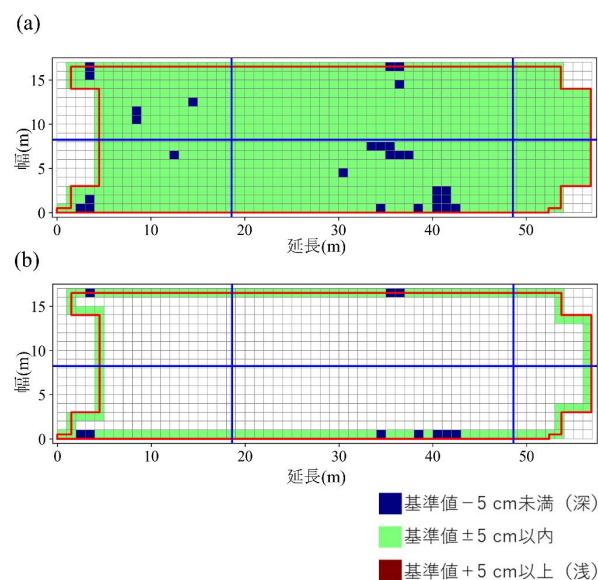


図-3.10 石垣港その 2 における出来形評価結果. (a)天端高の平坦性評価のヒートマップ. (b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ. 赤枠, 青線は, 図-3.2 と同じ.

#### (4) 高知港

マルチビーム測深による高知港の本均し部周辺の海底地形図を図-3.11に示す. 高知港の本均し部は, 本均し部の左側に隣接するように本均し範囲よりも水深の浅い施工済の地形が存在していた.

均し範囲のマルチビーム測深結果, 1 m 平面格子の代表値のヒートマップを図-3.12に示す. 1 m 平面格子の代表値の最頻値は-14.29 m, 標準偏差は0.033 mであった.

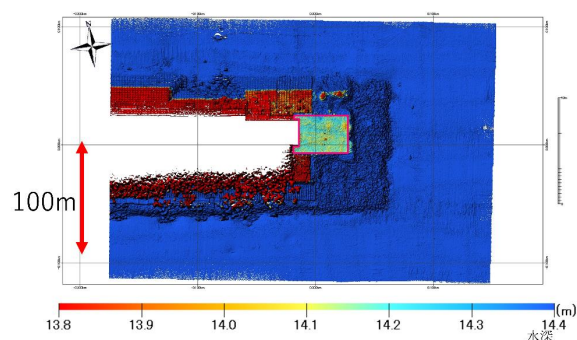


図-3.11 高知港における海底地形図. 赤枠は本均し部を示す.

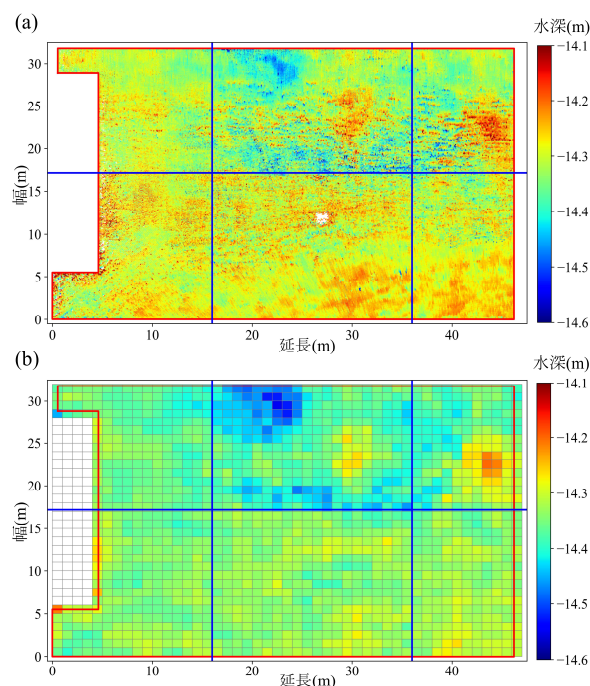


図-3.12 高知港におけるマルチビーム測深結果. (a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ. (b)1 m 平面格子の代表値のヒートマップ. 赤枠, 青線は, 図-3.2 と同じ.

各格子の代表値について, 基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.13に示す. 均し範囲のうち, 許容範囲である基準値 $\pm 5$  cmの範囲外となる格子は, 幅30 m, 延長20 m付近に固まって存在していたが, 天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は89.5%, 天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は90.7%とどちらも80%を上回る結果であった.

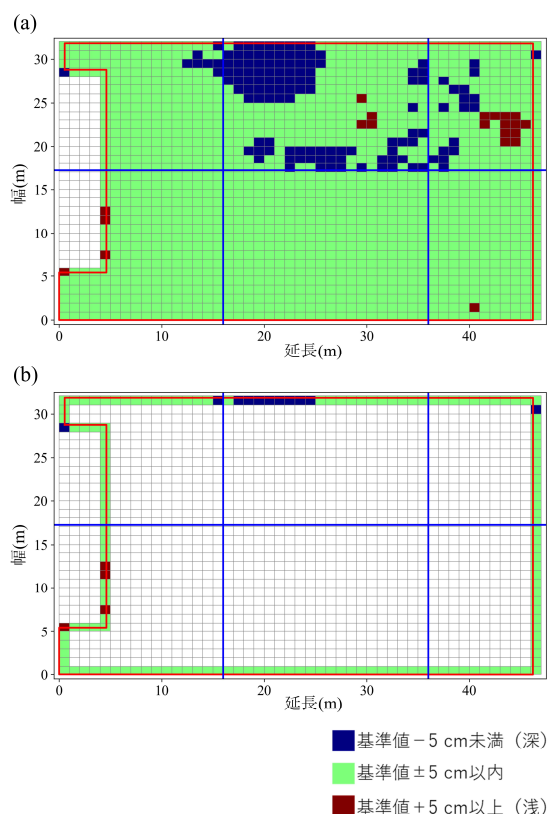


図-3.13 高知港における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

#### (5) 室津港

マルチビーム測深による室津の本均し部周辺の海底地形図を図-3.14に示す。本均し箇所は、天端幅の長い長方形の形状となっており、左端の部分は近くに均し範囲よりもやや水深の浅い地形が確認できる。

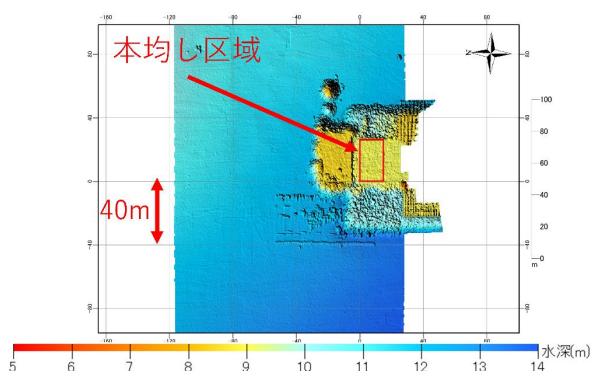


図-3.14 室津港における海底地形図。赤枠が本均し部を示す。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-3.15に示す。1 m平面格子の代表値の最頻値は-9.12 m、標準偏差は0.027 mであった。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.16に示す。天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は95.3%、天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は92.5%とどちらも80%を上回る結果であった。

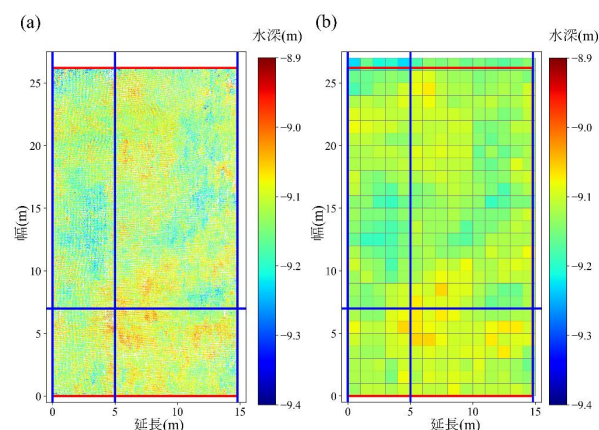


図-3.15 室津港におけるマルチビーム測深結果。(a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ。(b)1 m平面格子の代表値のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

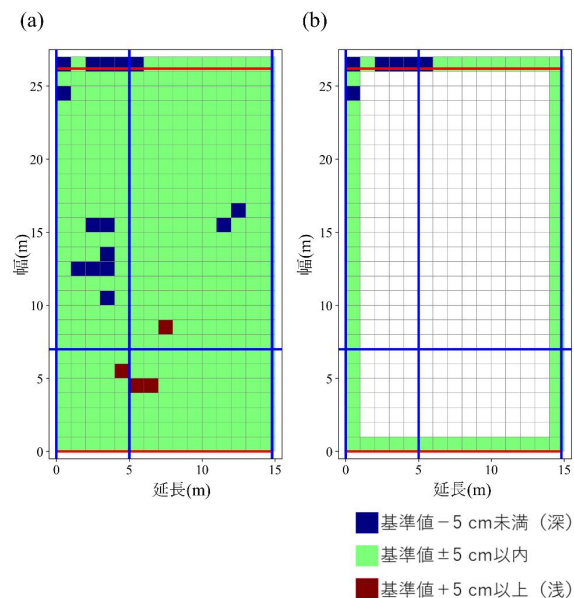


図-3.16 室津港における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

# (6)小名浜港

マルチビーム測深による小名浜港の本均し部周辺の海底地形図を図-3.17に示す。本均し箇所は、上部と下部に法面が隣接する地形であった。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-3.18に示す。1 m平面格子の代表値の最頻値は-14.34 m、標準偏差は0.027 mであった。

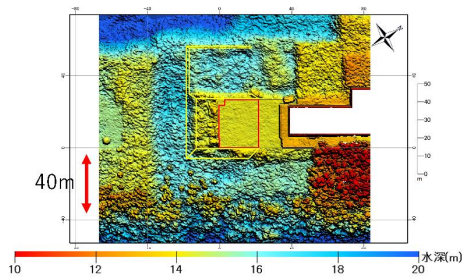


図-3.17 小名浜港における海底地形図。赤枠が本均し部を示す。

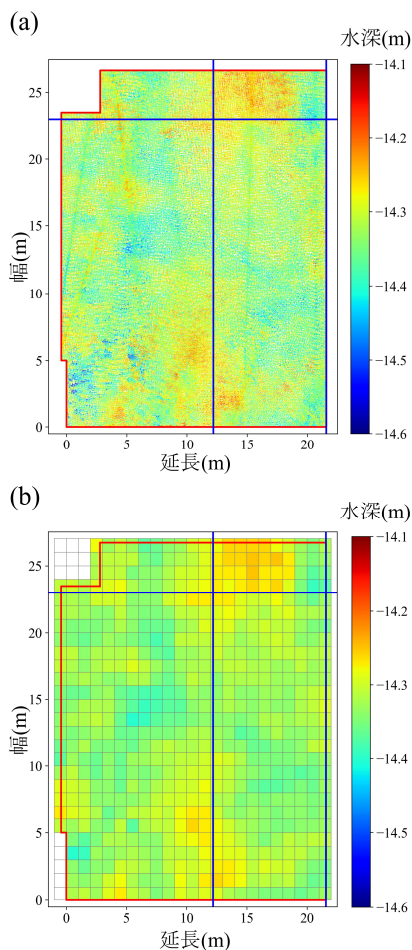


図-3.18 小名浜港におけるマルチビーム測深結果。(a) マルチビーム測深の点群データのヒートマップ。(b)1 m平面格子の代表値のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-3.19に示す。均し範囲の幅25 m、延長15 m付近に基準値から+5 cmより水深の浅い格子が固まって存在していたが、天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は90.0%、天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は89.5%とどちらも80%を上回る結果であった。

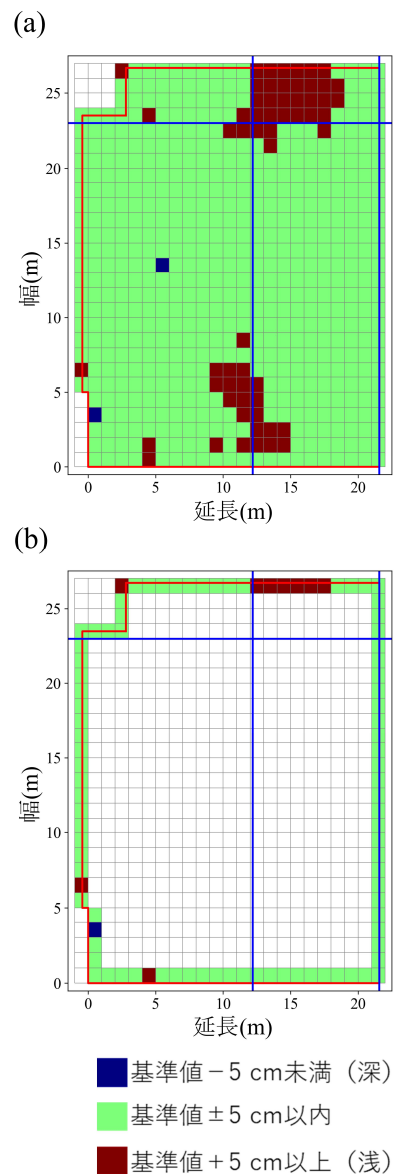


図-3.19 小名浜港における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は、図-3.2 と同じ。

### 3.3 出来形管理手法の評価

本研究で提案した出来形管理手法による6工事における基礎捨石本均しの評価結果（表-3.2）は、天端高は全てのケースで目安となる達成率80%を上回っていたが、天端幅・延長は仙台塩釜港で達成率80%を下回っていた。

仙台塩釜港、高知港、小名浜港において、設定した均し面の基準値に対して許容範囲外となる格子が局所的に存在する箇所が見られた。マルチビーム測深結果に許容範囲外となるデータが局所的に存在した要因については、水中の音速度、気泡の存在、船体動揺などの影響が考えられるが、本研究では分からなかった。天端幅・延長の達成率が唯一目安を下回った仙台塩釜港は、前述したように天端幅・延長の評価となる均し境界部の格子が多く存在する幅0～4 mにおいて、局所的に許容範囲外となる格子が存在しており、達成率が80%を下回ったが（図-3.3(b)）、該当の部分を除いた評価（図-3.4）では80%以上の達成率となった。本研究のマルチビーム測深による評価は、従来の点、線の測定と異なり、面的な評価としており、局所的に水深が許容範囲外となる格子が多数存在する場合に、全格子で確認した天端高の達成率は80%を上回る場合でも、境界部の達成率が悪くなることが考えられる。また、境界部以外の場所でも局所的に水深が許容範囲外となる格子の存在箇所によっては、ケーソンの荷重のかかり方に影響のある可能性もある。従来の出来形管理手法では、10 m間隔で高さ計測を行い、それよりも細かい範囲については潜水土の目視による定性的な石の分布状況及び安定性の確認となっている。そのため、今回の場合のような10 mに満たない局所的に許容範囲外となる箇所については、潜水土における定性的な出来映えの確認によって判断することで従来の出来形管理基準と同等の評価ができる。ただ、マルチビーム測深の評価結果のみで判断できる方が効率的となるため、評価方法については検討する余地が残る。

また、本研究における石垣港その2及び室津港では、平坦性評価の基準となる基準値が設計水深に比べ、石垣港その2では0.38 m、室津港では0.42 m深い結果となっており、マルチビーム測深結果が設計水深との誤差が大きいケースであった。この2ケースは、これまでの標定点や標準偏差( $\sigma$ )による補正では十分に補正しきれないと考えられるケースであったが、本研究の提案手法では、どちらも目安となる達成率80%を上回る結果が得られており、潜水土による1箇所以上の水深測定により均し面の設計水深に対する定量評価と併せて確認することで、測深結果に誤差を持つ場合でも使える手法であることが分かった。

本研究で検討したケースにおいて1ケースの天端幅・延長の評価が達成率80%を下回る結果となり、課題は見られたものの、今回提案したマルチビーム測深結果による均し範囲の平坦性評価及び潜水土による1箇所以上の水深計測の出来形管理手法により、基礎捨石均しの人力均しの本均しの天端高と天端幅・延長は、従来の出来形管理と同等の評価が可能であると確認でき、実務に適用可能だと考えられる。

表-3.2 基礎捨石本均しの現地実証の出来形評価結果

ケース名	設計水深(m)	幅(m)	延長(m)	基準値(m)	標準偏差(m)	天端高の達成率(%)	天端幅・延長の達成率(%)
仙台塩釜港	-12.00	23.70	40.30	-12.05	0.048	87.8(881/1003)	76.4(110/144)
石垣港その1	-5.80	21.50	55.90	-5.98	0.055	94.4(955/1012)	82.9(126/152)
石垣港その2	-5.80	16.50	52.40	-6.18	0.023	96.9(874/902)	93.3(139/149)
高知港	-14.20	31.80	41.60	-14.29	0.033	89.5(1268/1416)	90.7(147/162)
室津港	-8.70	26.20	14.80	-9.12	0.027	95.3(386/405)	92.5(74/80)
小名浜港	-14.20	26.70	22.01	-14.34	0.027	90.0(546/607)	89.5(85/95)



## 4. 基礎捨石荒均しの出来形管理手法の現地実証

### 4.1 現地実証の方法

本章では、第2章で提案した基礎捨石人力均しの出来形管理手法による荒均し部の評価について、現地実証データを用いて検討を行った。

本研究で対象とする現地実証場所を表-4.1に示す。浜田港については、施工範囲のうち法面部のみを対象とした。その他の地点は、荒均し全範囲を対象に解析を行った。対象ケースは、第3章の本均しの工事同様にすべて従来の出来形管理基準による検査を満たしたものであり、複数地点における水深計測により荒均し箇所的水深は、設定水深に対して許容範囲内となることが確認できており、均し面は設計水深を満たしていると判断した。そのため、本章では、荒均し部の天端高、天端幅・延長に対するマルチビーム測深結果による均し部の平坦性の評価、及び法面に対する設計TINと実測TINによる差分による評価を実施した。

荒均し箇所の従来の出来形管理の許容範囲は、 $\pm 50$  cmであるが、異なる値が設定されている地点があり、敦賀港及び新潟港その2の一部箇所は、許容範囲が $\pm 70$  cm、浜田港の法面部は、許容範囲が $\pm 30$  cmに設定されており、本研究の許容範囲もこの基準を用いることとした。各評価の出来形管理基準を満たすかどうかの目安は、本均し時同様に達成率が80%を上回るかどうかで判断した。

表-4.1 基礎捨石荒均しの現地実証データの概要

ケース名	設計水深(m)	使用石材(kg/個)	幅(m)	延長(m)	法面TIN数	法面勾配
敦賀港	-8.0 (天端部) -9.5 (中間平坦部)	30~200	14.50	167.07	578217	1:2
浜田港	-13.0	200~500	72.90	40.30	438035	1:2
新潟港 その1	-8.5	30~200	8.00	70.00	27850	1:1
新潟港 その2	-8.5	30~200	8.00	59.50	34951	1:1 1:3

### 4.2 現地実証の結果

#### (1) 敦賀港

マルチビーム測深による敦賀港の荒均し部周辺の海底地形図を図-4.1に示す。敦賀港の荒均し面は、天端部と法面の途中に中間平坦面が存在する形状となっており、マルチビーム測深値は天端部と中間平坦部で異なる水深となるため、平坦性の評価を行うために求める基準値についてはそれぞれ算出した。

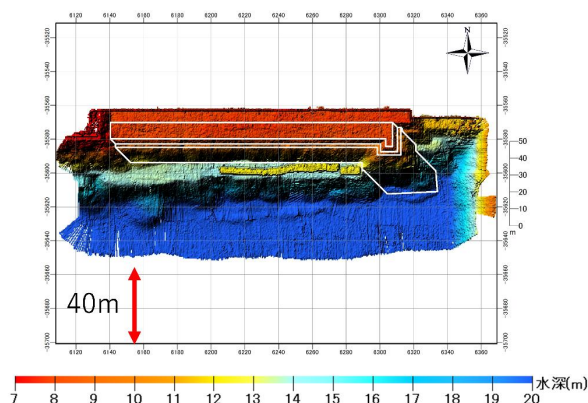


図-4.1 敦賀港における海底地形図。白枠が荒均し部を示す。

荒均し天端部のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値のヒートマップを図-4.2に示す。1 m平面格子の代表値の最頻値は天端部で-8.14 m、中間平坦部で-9.28 m、標準偏差は天端部で0.121 m、中間平坦部で0.246 mであった。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-4.3に示す。一部範囲における許容範囲は $\pm 70$  cmであるため、その部分の平坦性の評価は基準値から $\pm 70$  cm以内かどうかで判定した。許容範囲よりも深いもしくは浅い地点は数点存在するのみであり、天端高の評価となる均し範囲全体の達成率は99.1%、天端幅・延長の評価となる均し境界部の達成率は97.6%であり、天端高、天端幅・延長ともに目安の80%を上回る結果であった。

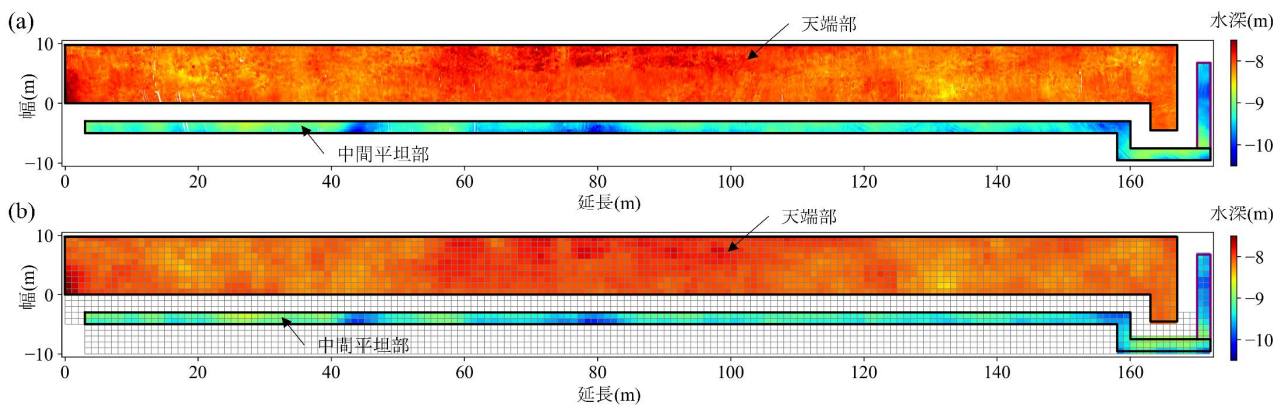


図-4.2 敦賀港におけるマルチビーム測深結果. (a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ. (b)1 m 平面格子の代表値のヒートマップ. 黒枠は、許容範囲 $\pm 50$  cmである均し範囲を示す. 紫枠は、許容範囲 $\pm 70$  cmである均し範囲を示す.

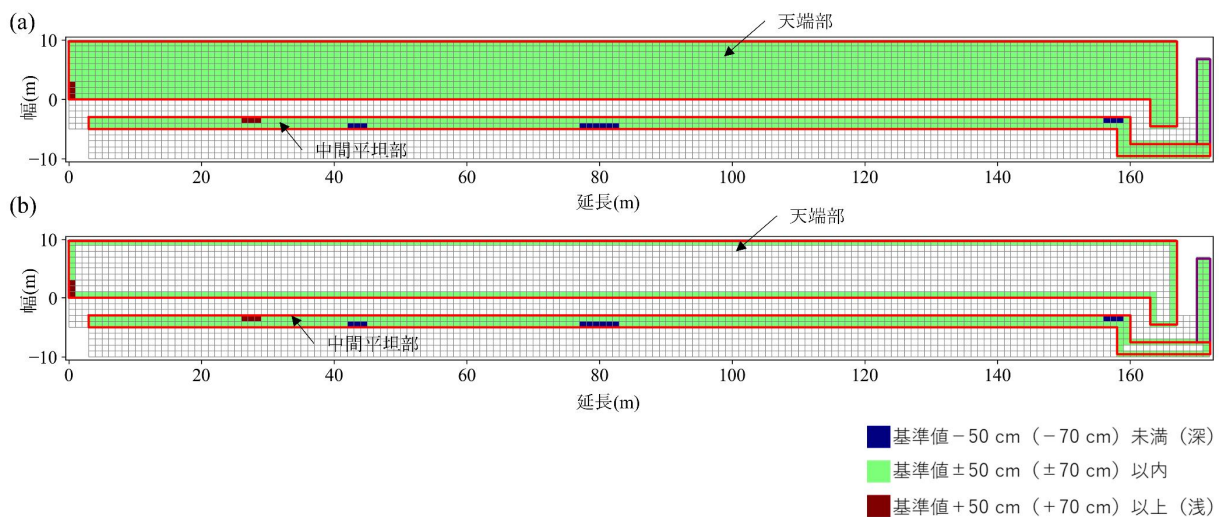


図-4.3 敦賀港における出来形評価結果. (a)天端高の平坦性評価のヒートマップ. (b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ. 赤枠は、許容範囲 $\pm 50$  cmである均し範囲を示す. 紫枠は、許容範囲 $\pm 70$  cmである均し範囲を示す.

法面部におけるマルチビーム測深による10 cm平面格子の中央値を代表値とした実測TIN及び実測TINと設計TINの差分による評価を行った結果を図-4.4に示す. 法面についても、一部許容範囲が $\pm 70$  cmとなっているため、その部分の評価は $\pm 70$  cm以内かどうかで判定した. 法面の評価結果は、達成率79.97%と目安の80%をわずかに下回る結果となった.

法面の評価は、マルチビーム測深により作成した実測TINと設計図面から作成した設計TINを比較して評価しているが、マルチビーム測深結果と設計水深については、潮位等による誤差が生じることがある. 天端部と中間平坦部の基準値は、設計水深と10 cm以上の差があり、特に中間平坦部は設計水深より22 cm浅くなっており、設計水

深とのマルチビーム測深結果との間に誤差が生じていたと考えられる. このような場合には、前報と同じように標定点等により水深補正をすることが望ましいが、本研究では標定点を用いない手法を検討している. そこで、荒均し天端部の評価で使用した中間平坦部の基準値を用いて、中間平坦部の基準値と設計水深の差分から法面の実測TINの補正(-22 cmを加算)を行い、その値にて法面の評価を行うと(図-4.5)、達成率は85.1%(503102/591192)と目安の80%を上回った.

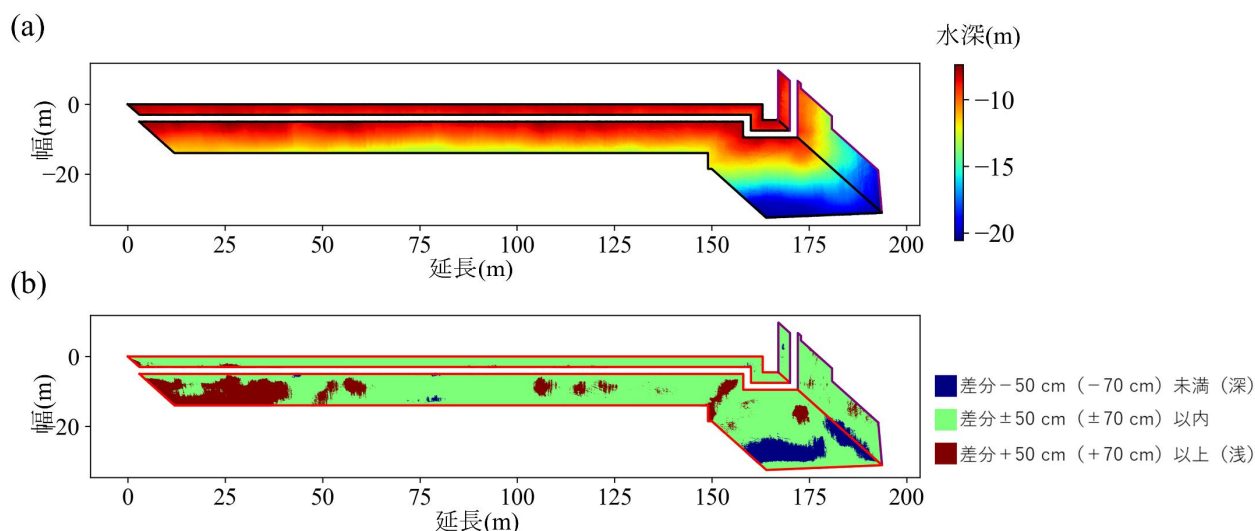


図-4.4 敦賀港における法面の評価結果。(a)実測 TIN データのヒートマップ。(b)法面に直角の実測 TIN と設計 TIN の差分のヒートマップ。(a)の黒枠, (b)の赤枠は許容範囲 $\pm 50$  cm である均し範囲, 紫枠は許容範囲 $\pm 70$  cm である均し範囲を示す。

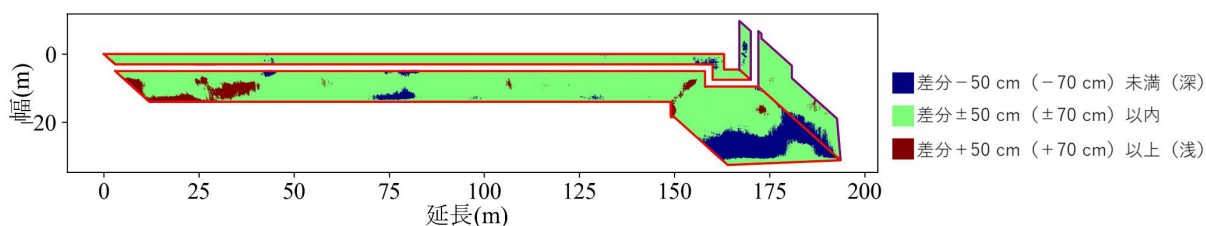


図-4.5 敦賀港における法面評価について, 中間平坦部の基準値と設計水深との差分による実測 TIN の補正を行った場合の法面に直角の実測 TIN と設計 TIN の差分のヒートマップ。赤枠は許容範囲 $\pm 50$  cm である均し範囲, 紫枠は許容範囲 $\pm 70$  cm である均し範囲を示す。

## (2) 浜田港

マルチビーム測深による浜田港の荒均し部周辺の海底地形図を図-4.6に示す。浜田港においては, 法面部が荒均し対象区域に指定されており, 許容範囲は $\pm 30$  cmであった。天端部は, 荒均しを行わない箇所と設定されていた。そのため, 浜田港では法面部のみを対象として出来形管理手法の評価を行った。

法面部におけるマルチビーム測深による10 cm平面格子の中央値を代表値とした実測TIN及び実測TINと設計TINの差分による評価を行った結果を図-4.7に示す。延長20 m, 幅80 m辺りにおいて, 許容範囲外となるTINが多く存在していたものの, 達成率は89.5%であり, 目安の80%を上回る結果であった。

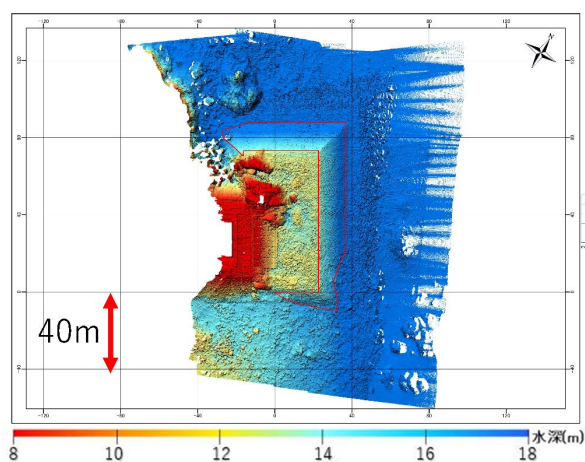


図-4.6 浜田港における海底地形図。赤枠が荒均し部を示す。

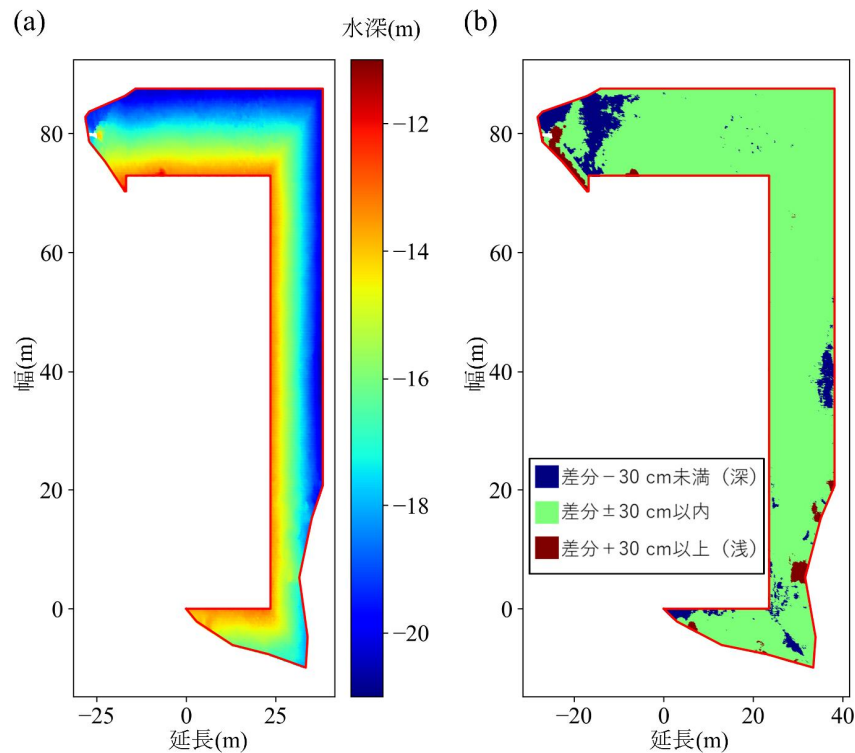


図-4.7 浜田港における法面の評価結果. (a) 実測 TIN データのヒートマップ. (b) 法面に直角の実測 TIN と設計 TIN の差分 のヒートマップ. 赤枠内が法面範囲を示す.

### (3) 新潟港その1

マルチビーム測深による新潟港その1の荒均し部周辺の海底地形図を図-4.8に示す. 荒均し部は, 延長が長く幅は短い形状であり, 法面については, 幅2 m程度とかなり短い法面となっている.

均し範囲のマルチビーム測深結果, 1 m平面格子のヒートマップを図-4.9に示す. 1 m平面格子の代表値の最頻値は-8.46 m, 標準偏差は0.093 mであった.

各格子の代表値について, 基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-4.10に示す. 天端部の全ての格子が許容範囲内であり, 天端高の評価となる均し範囲全体, 天端幅・延長の評価となる均し境界部のともに達成率は100%であった.

法面部におけるマルチビーム測深による10 cm平面格子の中央値を代表値とした実測TIN及び実測TINと設計TINの差分による評価を行った結果を図-4.11に示す. 場所によって法面の水深変化にバラつきが見られたものの, 許容範囲外となるTINはごく一部であり, 達成率は99.0%と80%を上回る結果であった.

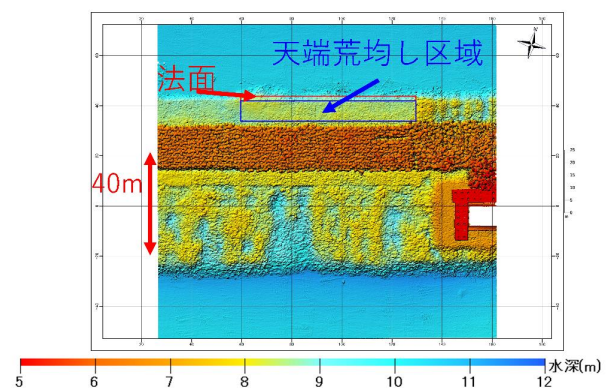


図-4.8 新潟港その1における海底地形図



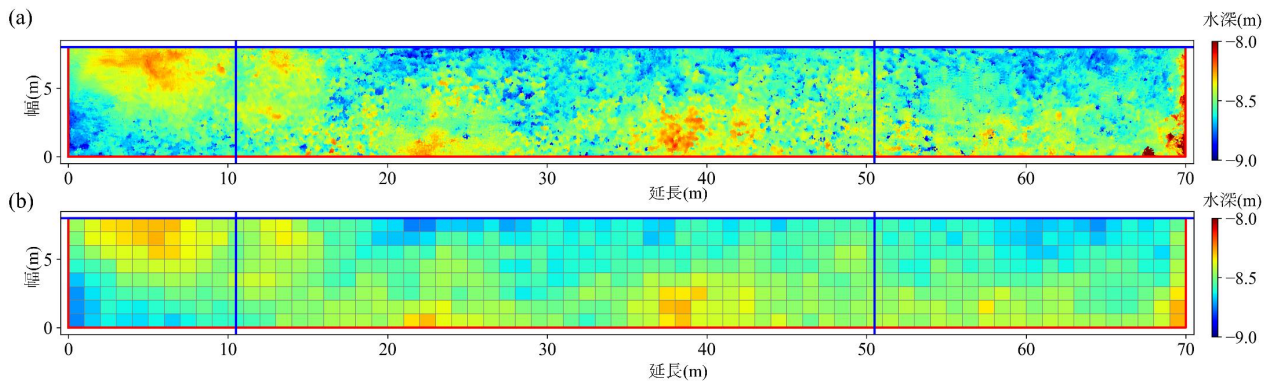


図-4.9 新潟港その1におけるマルチビーム測深結果. (a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ. (b)1 m 平面格子の代表値のヒートマップ. 赤枠は、均し範囲, 青線は、出来形管理箇所の一部を示す.

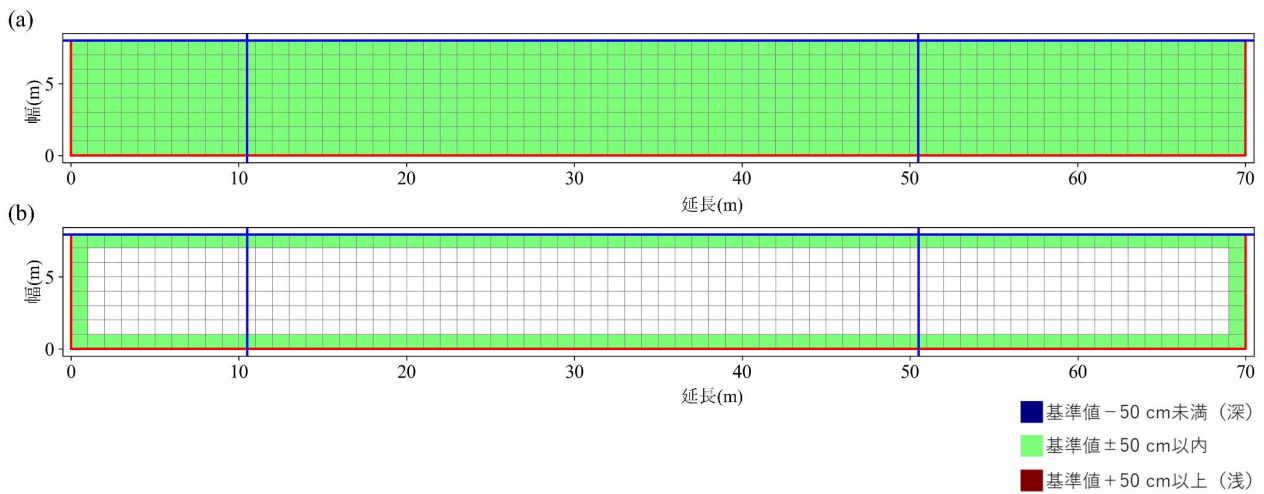


図-4.10 新潟港その1における出来形評価結果. (a)天端高の平坦性評価のヒートマップ. (b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ. 赤枠、青線は図-4.9と同じ.

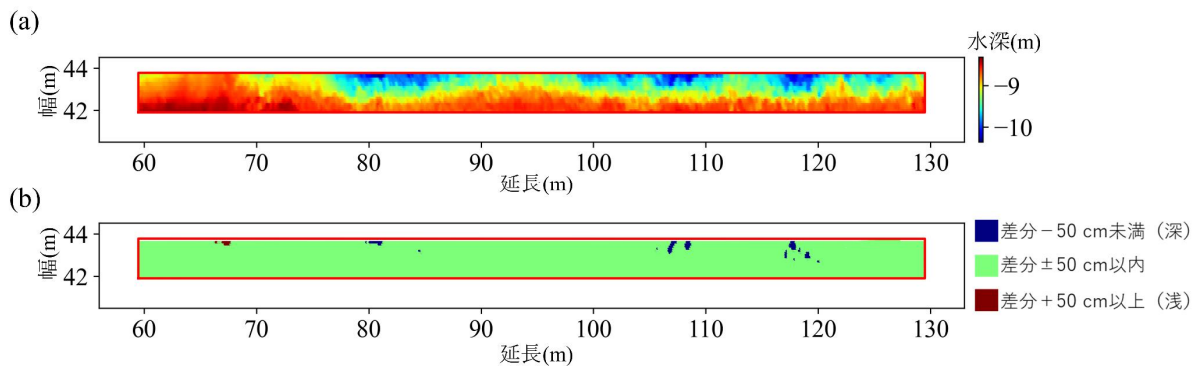


図-4.11 新潟港その1における法面の評価結果. (a)実測 TIN データのヒートマップ. (b)法面に直角の実測 TIN と設計 TIN の差分 のヒートマップ. 赤枠は、法面範囲を示す.

#### (4) 新潟港その2

マルチビーム測深による新潟港その2の荒均し部周辺の海底地形図を図-4.12に示す。荒均し部は、新潟港その1の隣接する箇所に位置している。また、延長方向にも法面が存在している。

均し範囲のマルチビーム測深結果、1 m平面格子の代表値として抽出した中央値のヒートマップを図-4.13に示す。1 m平面格子の代表値から求めた基準値となる最頻値は-8.72 m、標準偏差は0.094 mであった。

各格子の代表値について、基準値である最頻値との差分から平坦性の評価を行った結果を図-4.14に示す。天端部の均し範囲内で許容範囲外となる格子はなく、天端高

の評価となる均し範囲全体、天端幅・延長の評価となる均し境界部ともに達成率は100%であった。

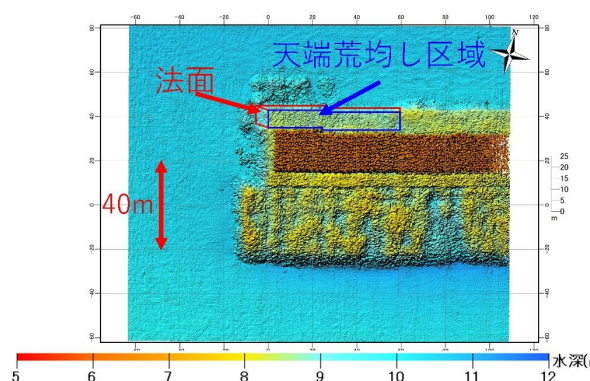


図-4.12 新潟港その2における海底地形図

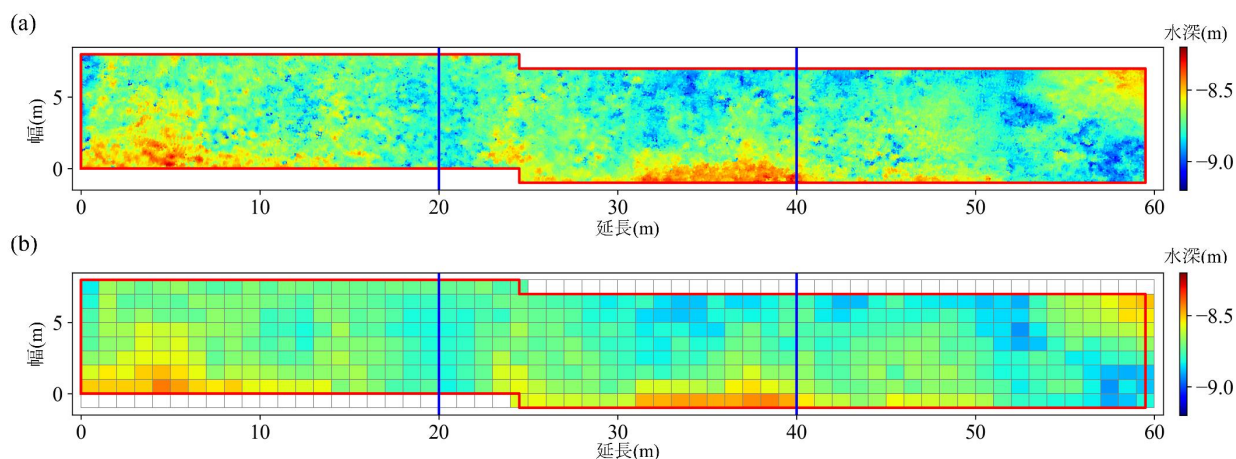


図-4.13 新潟港その2におけるマルチビーム測深結果。(a)マルチビーム測深の点群データのヒートマップ。(b)1 m平面格子の代表値のヒートマップ。赤枠、青線は図-4.9と同じ。

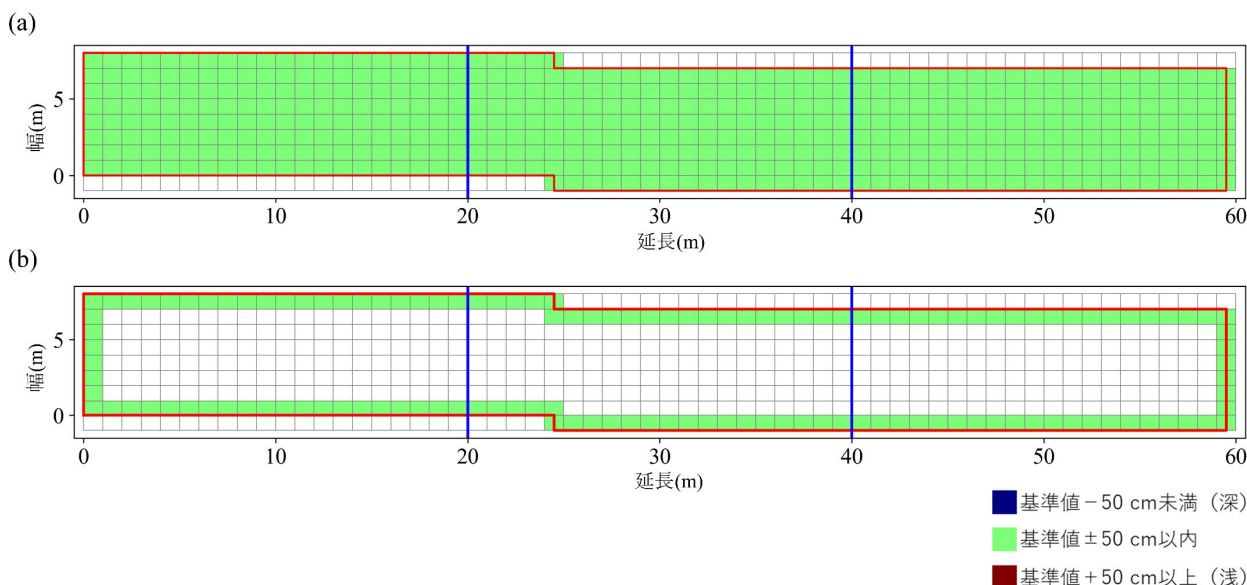


図-4.14 新潟港その2における出来形評価結果。(a)天端高の平坦性評価のヒートマップ。(b)天端幅・延長の平坦性の評価のヒートマップ。赤枠、青線は図-4.9と同じ。

法面部におけるマルチビーム測深による実測TINの水深及び実測TINと設計TINの差分による評価を行った結果を図-4.15に示す。天端部から幅方向に延びる法面は、許容範囲 $\pm 50$  cm、法面勾配1:1であり、延長方向に延びる法面は、許容範囲 $\pm 70$  cm、法面勾配1:3となっている。天端部から幅方向に延びる法面において、許容範囲より深くなるTINが見られたものの、達成率は94.9%であり、目安の80%を上回る結果であった。

#### 4.3 出来形管理手法の評価

4工事における基礎捨石荒均しの天端高、天端幅・延長の評価は、すべての工事で目安となる80%を上回っていたが、敦賀港の法面評価において、達成率80%をわずかに下回る結果であった。法面評価については、設計水深から作成した設計TINと実測TINとの差分を評価することからマルチビーム測深結果と設計水深との間に誤差がある場合にはどうしても誤差の影響が生じてしまう。達成率80%を唯一下回った敦賀港の法面評価は、設計水深とマルチビーム測深との間に誤差があったため、法面評価の達成率が悪くなったと考えられる。このように設計水

深とマルチビーム測深との間に誤差がある場合に法面評価が達成率80%を下回る場合が想定される。その場合には、誤差が少なくなるように再測定を行うことが望ましいが、4.2(1)で行った天端高の評価の基準値と設計水深との差分により実測TINの補正を行い、法面評価をすること及び潜水土における定性的な出来映えの確認等により法面の施工状況に問題がないか確認する必要がある。

基礎捨石人力均しの荒均しの天端高、天端幅・延長については、1工事の法面評価において、達成率80%を下回ったものの、マルチビーム測深結果による均し範囲の平坦性の評価及び潜水土による1箇所以上の水深計測の評価、法面については設計TINと実測TINの差分比較による評価によって従来の出来形管理と同等の評価は可能であるが確認でき、実務に適用可能だと考えられる。

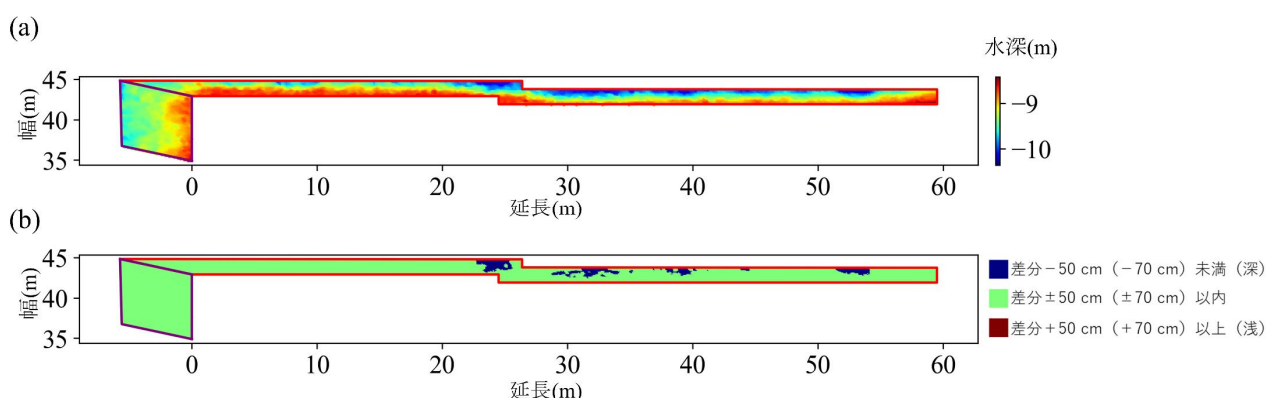


図-4.15 新潟港その2における法面の評価結果。(a) 実測 TIN データのヒートマップ。(b) 法面に直角の実測 TIN と設計 TIN の差分のヒートマップ。赤枠は、法面勾配 1:1、許容範囲 $\pm 50$  cm の均し範囲を示す。紫枠は、法面勾配 1:3、許容範囲 $\pm 70$  cm の均し範囲を示す。

表-4.2 基礎捨石荒均しの現地試験の出来形評価結果。敦賀港の法面の達成率は、80%をわずかに下回ったことから他のケースと異なり、小数第2位までの記載としている。

ケース名	設計水深(m)	基準値(m)	天端高の達成率(%)	天端幅・延長の達成率(%)	法面の達成率(%)
敦賀港	-8.0 (天端部)	-8.14	99.1 (2060/2078)	97.6 (718/736)	79.97 (462062/578217)
	-9.5 (中央平坦部)	-9.28			
浜田港	-13.0	-	-	-	89.5 (392213/438035)
新潟港その1	-8.5	-8.46	100 (560/560)	100 (152/152)	99.0 (27572/27850)
新潟港その2	-8.5	-8.72	100 (481/481)	100 (134/134)	94.9 (33184/34951)

## 5. おわりに

### 5.1 本研究の結論

本研究では、基礎捨石均しの生産性向上を目標として、マルチビーム測深を活用した基礎捨石人力均しの出来形管理について、標定点を必要としない効率的な手法を提案し、現地実証結果により検討を行った。

基礎捨石人力均しについて、本均し6工事、荒均し4工事の現地実証結果から提案手法の検討を行った結果、表-5.1に示すマルチビーム測深を活用した新たな出来形管理手法は、潜水土による石の分布状況及び安定性の確認の定性的な評価を併せて行うことで、すべての管理項目に対して、従来手法と同等の評価が可能であることが確認でき、実務に適用することできると考えられる。これらの結果は、マルチビーム測深を用いた基礎捨石均しの人均しの出来形管理要領の策定を行うにあたって有用な資料となる。

本研究のマルチビーム測深による出来形管理手法を行うことにより、潜水土の作業量を軽減できるとともに、出来形管理における作業日数を減らすことが期待できる。従来の出来形管理では、均し作業終了後、工事受注者が手配した潜水土による各項目の出来形の計測が行われるが、本研究の提案手法では、出来形の計測は1箇所以上の水深計測とマルチビーム測深による3次元データ・ヒートマップの作成を実施することとなる（図-1.1, 図-2.4）。潜水作業は、1箇所以上の高さ計測となり、均し作業終了後に続けて実施することが可能であると考えられることから潜水作業の所要時間が大幅に短縮される。また、発注者である直轄事業所が行う施工状況検査についても、各項目の出来形の計測は工事受注者が作成した3次元データ・ヒートマップを用いた書面検査となり、潜水土による作業は定性的な石の分布状況及び安定性の確認のみとなり、作業時間が短縮される。マルチビーム測深による出来形管理が基礎捨石均しの作業効率化、生産性向上につながることを期待される。

### 5.2 今後の課題

本研究では、従来の出来形管理基準と同等の評価ができることを目標とし、マルチビーム測深による出来形管理手法を提案し、現地実証データの精度評価により従来と同等の評価ができることを確認したが、本研究で行った現地実証結果では、いくつかの課題が確認された。

本研究で提案した出来形管理手法では、均し面が設計水深を満足することを確認するために、潜水土による水深計測を1箇所以上行うこととしているが、均し面の面積が大きい場合についても1箇所でも問題ないかどうかということ、水深計測結果が設計水深に対して深い場合に均し面が設計水深に対して深すぎる可能性が懸念されることについては、本研究では十分に検証ができていない。上記事項は、潜水土の作業日数に支障のない範囲で複数箇所を計測することで実務上問題ないと考えられるが、試行工事を進めて、課題となる場合には詳細な検討が必要となる。

本研究で見られた基準値に対して許容範囲外となる格子が局所的に存在する要因については、本研究では分らなかった。これらの格子が天端幅・延長の評価対象である境界部に存在し、天端幅・延長の達成率が80%を下回る工事も見られていた。局所的に許容範囲外となる格子がケーソンの荷重がかかる場合に問題ないかどうか潜水土による出来映え確認で担保することとしているが、局所的に許容範囲外となる格子が存在する要因の検討、天端幅・延長の評価方法の検討を行い、より効率的に出来形管理できるようにすることが課題として残る。

荒均しの法面評価において、マルチビーム測深結果と設計水深との水深差による誤差の影響で達成率の低下等の課題が確認された。本研究では、天端高の評価時に用いた基準値と設計水深との差分から実測TINを補正することで目安の達成率を超えることを確認したが、天端高の評価のようにマルチビーム測深の誤差の影響受けないような手法の検討を行うことが課題として残る。

表-5.1 本研究で提案したマルチビーム測深を活用した基礎捨石人力均しの出来形管理手法。

種類	管理項目	出来形管理手法
本均し	天端高	潜水土による1箇所以上の水深計測が設計水深に対して $\pm 5$ cmとなること 均し範囲の1 m平面格子において、格子の代表値（中央値）が「均し範囲の基準値（均し範囲内1 m平面格子の代表値の最頻値） $\pm 5$ cm」を満たす割合が80%以上
	天端幅・延長	均し範囲境界部の1 m平面格子において、格子の代表値が「均し範囲の基準値 $\pm 5$ cm」を満たす割合が80%以上
荒均し	天端高	本均しと同じ手法（許容範囲は $\pm 50$ cm）
	天端幅・延長	本均しと同じ手法（許容範囲は $\pm 50$ cm）
	法面	設計TINと実測TINの法面に直角の差分が許容範囲（ $\pm 50$ cm）を満たす割合が80%以上

本研究で提案したマルチビーム測深による出来形管理手法を用いることで、出来形管理における作業日数を減らすことが期待できるが、本研究の提案手法は、現地実証工事で行った手法から改良した手法を用いていることから具体的な工数が算出できなかった。今後、試行工事において要する日数から従来手法との作業量の比較を検討し、提案手法における生産性向上について評価する必要がある。

マルチビーム測深による出来形管理では、従来の出来形管理基準に比べて細かい間隔で計測される。本研究では、従来の出来形管理基準の品質性能と同等の精度を満たすことができるマルチビーム測深による出来形管理手法について検討を行ったが、マルチビーム測深の利点である細かい間隔で面的な情報を活かすことで、効率的、精度の高い出来形管理手法についても検討が可能であると考えられる。ただ、マルチビーム測深の細かい計測間隔を用いて出来形管理を行う場合には、均し面の凹凸の影響も大きくなることから、従来の出来形管理基準の許容範囲の変更も含めて、詳細に検討することが必要となる。

本研究で見られた課題の検討や従来の出来形管理基準の許容範囲の変更も含めたマルチビーム測深による出来形管理手法の検討を進めるにあたっては、マルチビーム測深による多くの現地実証結果が必要となることから、現地におけるマルチビーム測深データが蓄積されることが重要となる。

(2025年2月12日受付)

## 謝辞

本資料を取りまとめるにあたり、現地実証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：i-Construction ～建設現場のオートメーション化～（令和6年4月），2024。  
<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001741647.pdf>（最終閲覧日2025年2月12日）
- 2) 国土交通省 港湾局：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4年4月版），2022。  
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001475816.pdf>（最終閲覧日2025年2月12日）
- 3) 国土交通省 港湾局：水中部施工状況調査の手引き，2018。  
<https://www.mlit.go.jp/common/001220381.pdf>（最終閲覧日2025年2月12日）
- 4) 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）（令和6年4月版），2024。  
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001735910.pdf>（最終閲覧日2025年2月12日）
- 5) 川上司，辰巳大介，小川雅史，小嶋一弘：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，国土技術政策総合研究所資料，No.1250，2023。
- 6) 国土交通省：港湾工事共通仕様書（令和5年3月），2023，pp.3-37-3-38。
- 7) 塚本高文，琴浦毅：水中点群データを活用した出来形検査に向けた検討，土木学会論文集B3（海洋開発），78巻，2号，2022，p.I\_145-I\_150。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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～その2～，国土技術政策総合研究所資料，No.93，2003。
- 11) 国土交通省 港湾局：マルチビームを用いた深淺測量マニュアル（浚渫工編）（令和5年4月改訂版），2023。  
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001599630.pdf>（最終閲覧日2025年2月12日）