

博士論文

港湾におけるICT施工のための
モニタリング手法の研究

2025年3月

岡山大学 大学院環境生命科学研究科

照屋 市朗

目次

第 1 章 序 論	1
1.1 研究背景	1
1.2 本研究の目的	11
1.3 本論文の概要	11
第 2 章 港湾 DX と既往研究の整理	12
2.1 概説	12
2.2 港湾 DX の導入の背景	12
2.3 港湾における ICT 技術の進化	13
2.4 関連研究	17
2.4.1 浚渫工事の施工管理・測量に関する研究	17
2.4.2 マルチビームソナーによる水中地形計測	18
2.4.3 USV を用いた水路測量の研究	20
2.4.4 マルチビーム水深測量への CUBE 処理の適用	21
2.4.5 グリーンレーザ搭載ドローンによる浚渫土砂処分場のモニタリング	22
2.5 本章のまとめと本研究の位置づけ	24
第 3 章 自律航行型小型船舶(USV)による深淺測量	25
3.1 USV 技術の概説	25
3.2 USV を用いた計測の課題	25
3.2.1 USV 計測のハード仕様	29
3.2.2 計測現場と計測作業の概要	32
3.3 計測作業の概要	34
3.4 最適軌跡解析	44

3.5 CUBE アルゴリズムの概要	44
3.5.1 CUBE 処理の概要	44
3.5.2 CUBE アルゴリズム	46
3.5.3 CUBE 処理によるデータ解析	49
3.6 解析結果と考察	50
3.6.1 精度検証結果	50
3.6.2 PDOP (Position Dilution of Precision) 位置精度	51
3.6.3 最適軌跡解析結果	52
3.6.4 計測データによる 3 次元モデル作成結果	53
3.6.5 精度比較	64
3.6.6 データ間の変状抽出	65
3.6.7 変状抽出手法の概要	67
3.7 従来工法との比較	69
第 4 章 UAV による減容化工事のモニタリング技術の検討	72
4.1 概説	72
4.2 モニタリング実験の概要	72
4.2.1 計測機器	72
4.2.2 計測現場と計測作業の概要	74
4.2.3 試験タンクの概要	76
4.2.4 濁度の指標	77
4.3 検証・計測結果と議論	79
4.3.1 精度検証結果	79

4.3.2 土砂処分場の特性による測深能力への影響	86
4.3.3 現地土砂処分場計測結果	95
4.4 従来工法との比較	107
第5章 浚渫工における3次元点群データの4次元モデルへの活用	111
5.1 4次元モデル活用への背景	111
5.2 4次元モデル活用への目的	111
5.3 4次元モデル活用への課題	112
5.4 4次元モデル活用への検証	114
5.5 4次元モデル活用へのまとめ	114
第6章 結論	116
6.1 研究成果のまとめ	116
6.2 今後の展望と提案	117
参考文献	120

第1章 序 論

1.1 研究背景

近年、港湾では大型船舶の寄港増加の対応に向けて、浚渫工事の需要が高まっている。一方で、港湾の機能が発展していく中で、世界的にコンテナ船の超大型化による輸送コストの低減が図られている。船舶の大型化に対応するためには深い航路や泊地が必要で、それに伴う港湾の整備が不可欠である。ここ数年で、各港ではコンテナターミナルの再編整備が行なわれている。水島港は、国際バルク戦略港湾にも指定されている国際拠点港湾で、直轄事業により航路浚渫を実施している。しかしながら、浚渫現場での浚渫量の把握や浚渫航路の水深等の状況把握は、オモリ竿や水位表などを用いた定性的な手法に限定されており、定量的なモニタリング手法は未だ確立されていない。

このように、我が国の港湾では大型船舶への対応や効率的な浚渫作業の実施など、高度な港湾運営が求められている。これは、港湾が我が国において極めて重要な役割を担っていることに起因する。日本は世界有数の海洋国であり、陸地の約70%が山林や住宅地に占められているため、陸上輸送には限界がある。そのため、日本の港湾は資源・エネルギー・食料の大部分を海外に依存している。具体的には、エネルギーの約9割、食料の約6割が海外からの輸入で賄われており、ほぼ全ての重要な貨物が海上輸送に頼っている。図-1.1に日本の輸出入貨物の割合を示す。

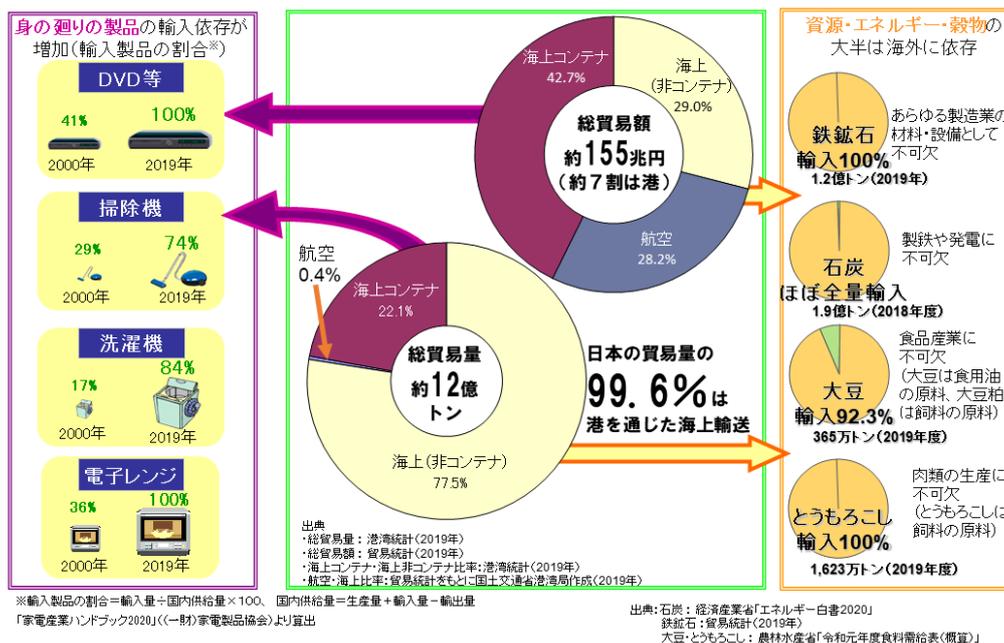


図-1.1 日本の輸出入貨物の割合

（国土交通省関東地方整備局：「港の役割と暮らしとの係わり」より抜粋）

日本の貿易は港湾を中心に展開されており、日本の貿易額の約7～8割、貿易量の99%以上は港湾を通じた海上輸送である。近年では、世界的に輸送の効率化の追及により船舶の大型化が進んでおり、大型船が入港できるように航路や泊地の水深を確保していくことが必要とされている。図-1.2は穀物や鉄鉱石、石炭などの輸送に利用されるバルク貨物船の大型化について示したもので、6～8DWT（載荷重量トン）以上の運航隻数が増加しており2023年には2000年の約3倍以上に増加していることがグラフから読み取れる。また、コンテナ船についても大型化が進んでいることが分かる。そのため、各地では大型船が入港可能な水深の確保のために、海底を掘削する浚渫工

事が行われている。浚渫工事の際には大量の土砂が発生するため、処分先の確保が必要となるが、新たな処分地は環境問題等の関係から、地元調整の困難なことから整備が中々進まないのが現状である¹⁾。

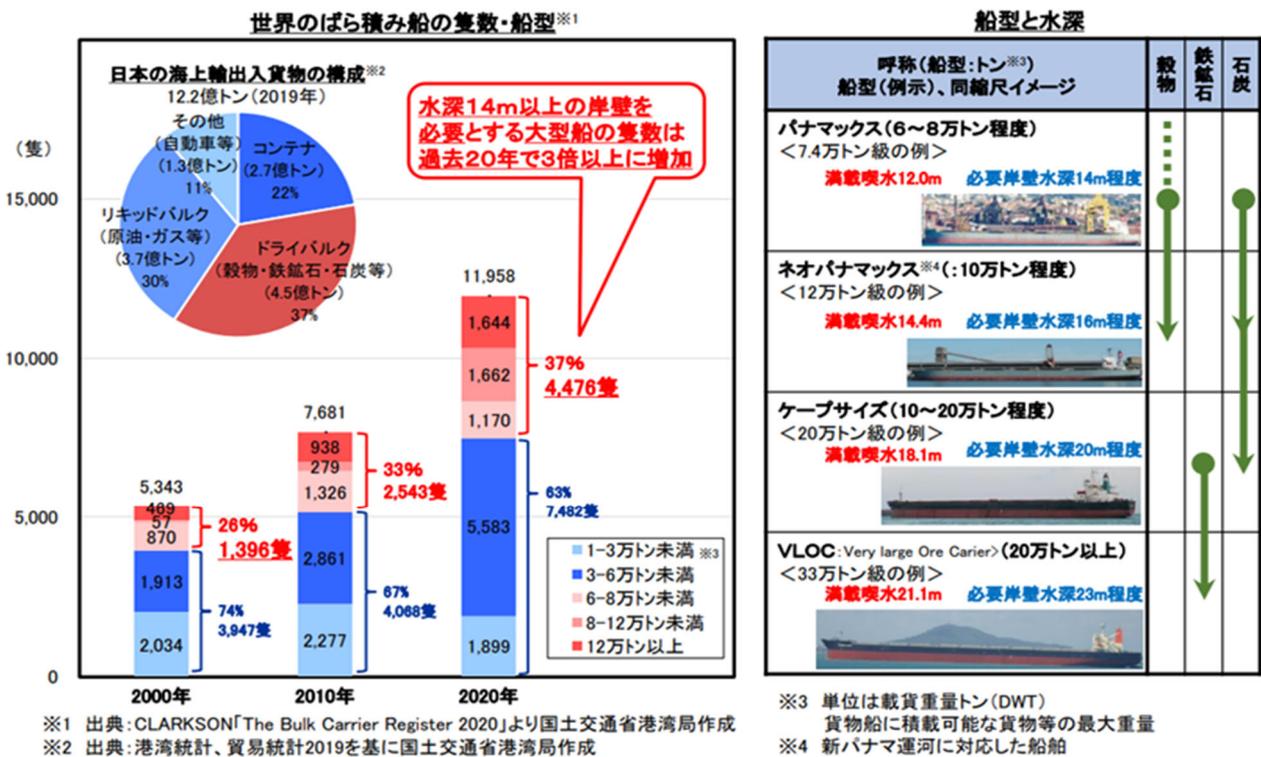


図-1.2 世界のバルク船の大型化

(財務省 国際バルク戦略港湾政策等についてより抜粋)

特に、東京湾、大阪湾、名古屋港、神戸港などの主要港湾は、国内外からの貨物が取り扱われている。その中でも、水島港は岡山県内で瀬戸内海に位置する港湾であり、その地理的位置から海洋交通の要所として重要な役割を果たしている。水島港は平成23年(2011年)5月に国際バルク戦略港湾 (International Strategic Port) に指定された国際拠点港湾港である²⁾。国際バルク戦略港湾は、日本国内の特定の港湾に対して国際的な貨物輸送の促進と競争力の強化を支援するために指定された一部の港湾を指し、指定港湾には主に大規模な貨物取り扱いや国際的な物流において重要な役割を果たす港湾が含まれている。水島港は主に鉄鋼製品、特に鉄鉱石や鋼材の取り扱いが特徴的であり、鉄鋼業界において国内外の需要を支える役割を果たしている。また、水島港は一部でコンテナ取り扱いも行っており、多種多様な貨物の輸送に寄与している。国際バルク戦略港湾政策の一つとして企業間連携による大型穀物船を活用した共同輸送の進展に対応するため、水島港の玉島地区及び水島地区において、航路・泊地の整備等の港湾施設の整備を行う水島港国際物流ターミナル整備事業が平成29年度(2017年度)から着手されている³⁾。図-1.3はその進捗状況を示した図である。また、経済活動にも港が密接に関わっている。水島港は1962年に開港し、その歴史は約400年前の干拓に遡る。水島港は高梁川河口部に位置し、臨海工業地帯と100万人以上の大規模な都市圏を背後地に持つ重要な港である^{4) 5)}。水島港の開発により、水島臨海工業地帯に立地する基幹産業を支え、国際拠点港湾に発展している。工業化と都市化を経て、水島は一大工業都市となった⁶⁾。岡山県の従業者数の約16.9%が水島コンビナートで働いており、また製造品出荷額の約47.4%が水島コンビナートで製造されており、水島コンビナートは岡山県の産業を支えている⁷⁾。さらに港や

海辺の魅力を活かしたホテルや商業・飲食施設などができるとともに、観光客などの人々が集うことで経済が活性化される⁸⁾。このように港湾による経済活性は市民生活や地域経済に幅広い効果をもたらしている。港湾は国内外の貿易、物流、観光、産業などの多くの分野において中心的な役割を果たしている。また、その地理的条件と経済的要因から、日本の港湾は、外国との交流を支え、経済の発展に寄与している。

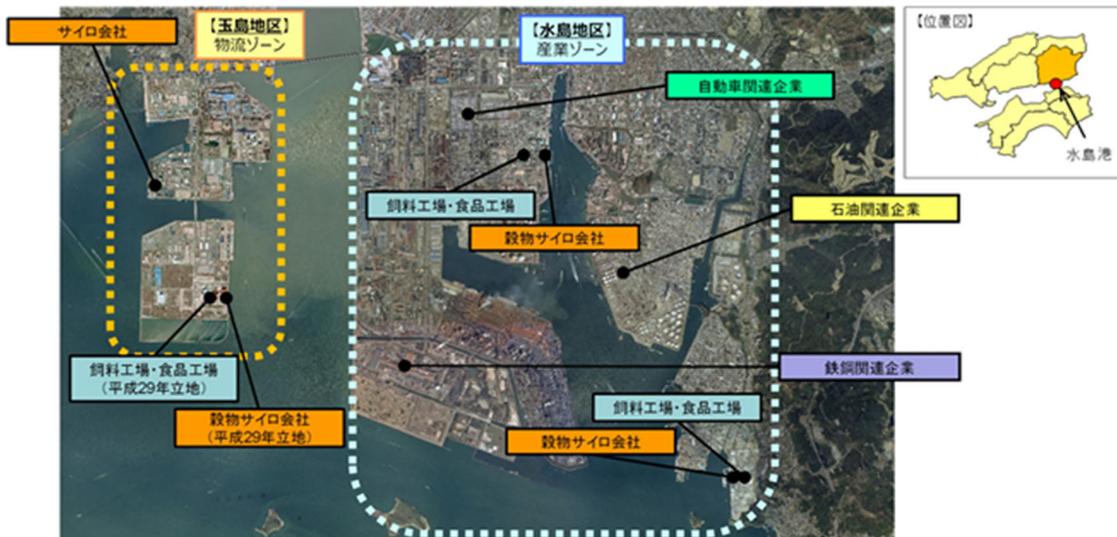


図-1.3 水島港国際物流ターミナル事業の進捗状況

(国土交通省中国地方整備局「水島港国際物流ターミナル整備事業」より抜粋)

図-1.4は国土交通省が進める玉島水島航路の整備の進捗を示したもので、平成29年度から航路の整備に着手し、令和5年度を持って黄色枠以外の航路の整備を概ね終了している。しかしながら黄色部分は水深-14m整備となっており、現在の航路よりより深く整備が必要となる。その為にも既存の土砂処分場の残容量の把握は、喫緊の課題となり、整備が本格的に進んできた場合は土砂を捨てながら、リアルタイムに残容量の把握が必要となる為、迅速に簡便な計測方法の確立が必要となる。

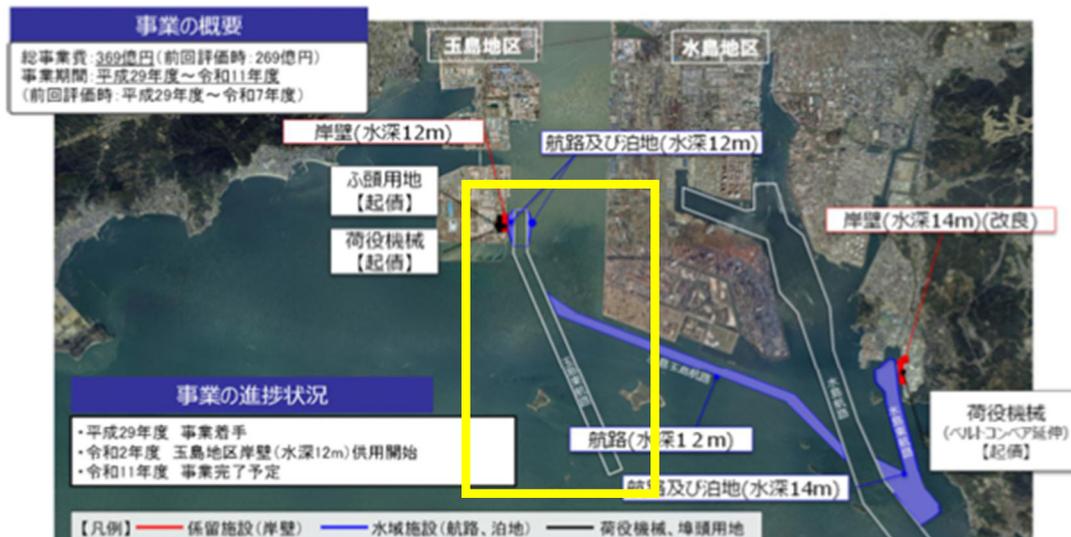


図-1.4 水島港国際物流ターミナル事業の進捗状況

(国土交通省中国地方整備局「水島国際物流ターミナル整備事業」より抜粋)

港湾の運営において、航路の浚渫は重要な要素の一つである。日本の港湾は、海底の浚渫作業を通じて、船舶の安全な進入や出港を確保し、貨物の効率的な運搬を支援している。航路浚渫の維持と改善は、港湾の長期的な発展に欠かせない要素であり、浚渫工事の現場において、工事の効率性や精度向上のために、リアルタイムなモニタリングと計測データの迅速な解析が求められている。具体的には、浚渫船の位置や作業状況のトラッキング、浚渫土砂のバケット容量の測定、浚渫後の水底地形の3次元計測等が重要なニーズである。特に浚渫後の水底地形モニタリングへの活用が重要となる。例えば、浚渫後の水底地形データの迅速な把握は、出来形や正確性の把握や次期浚渫計画立案のために重要であるが、広範囲にわたる浚渫区域全体を高頻度かつ効率的にモニタリングセンシングすることはコストや労力の観点から容易ではない。かつては、浚渫工事現場において、浚渫量や出来形を把握する手法は、図- 1.5左に示すような、計測の度に船を止めて、ロープの先に付けた錘鉛を海中に下ろして水深を測定するオモリ竿（重錘法）などによる手法に限られていた。しかしながら、近年国土交通省は浚渫工事のDX (Digital transformation) 化を推進しており、より効果的かつ効率的なモニタリング手法の導入が求められている。

そこで問題を整理する為に浚渫工の作業プロセスをフローにした図-1.6 に示す。この作業フローにおいて起工測量や深淺測量は有人船によるマルチビーム測量と呼ばれている手法である。マルチビームとは、ナロー（細かい）マルチ（複数の）ビームによる測深が名前の由来であるナローマルチビームシステムを略した表現のことである。平成30年度(2018)から、i-Constructionの港湾におけるICT技術導入の一環として、浚渫工での水路測量に浅海マルチビーム測深が本格的に採用されており⁹⁾、また、令和4年8月には国土交通省による「i-Constructionの概要と港湾における取組」にて“マルチビーム”技術の指針が公開されるなど、現在、水路測量におけるマルチビーム測深が広く普及している。船舶によるマルチビーム測量は、図- 1.5右に示すように、船舶が搭載したマルチビームエコーサウンダー（以下マルチビーム）を使用して行われる海洋測量技術である。この手法は、船の船底から扇状に放射された複数の音波ビームが海底に発振され、その反射音波が受信されることで多数の水深値を算出し、海底地形を詳細にマッピングすることが可能となる。根幹となる原理は、ミルズクロス法（クロスファンビーム法）と呼ばれ、進行方向に指向性の高い音波（送波ビーム）を送波器から発信して、海底からの後方散乱により返ってくる音波を受波器により形成したスワス方向に指向性の高い多数の受波ビームで聞き分けることにより、海底地形を面的に細かく分割して捉えている¹⁰⁾。

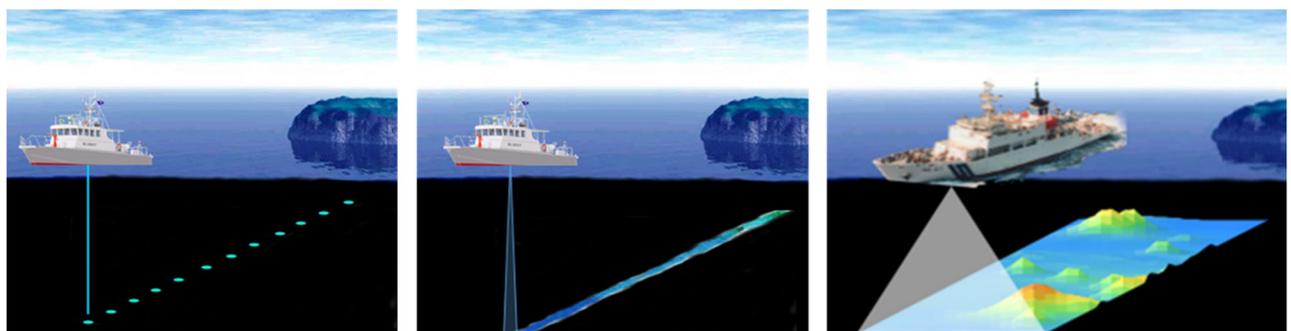


図- 1.5 錘鉛（左）とシングルビーム(真中)、マルチビーム（右）による測深
 (海上保安庁 海洋情報部：「マルチビーム測深機」より転載)

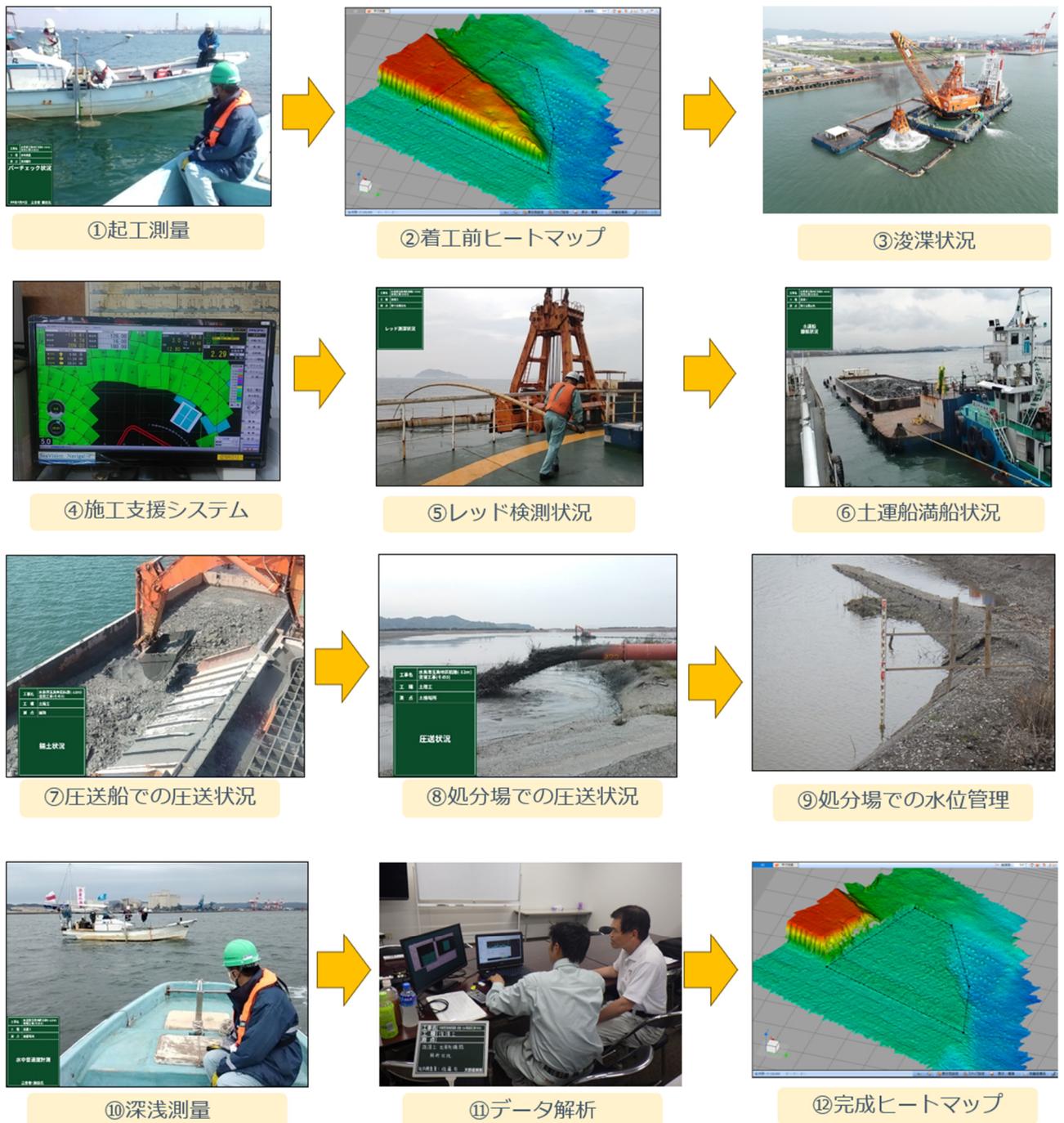


図- 1.6 浚渫工における作業フロー図

これまで一般的に採用されてきた測深手法は、図- 1.5 に示すレッド測深や真中のようなシングルビーム測深によるアナログ手法が主流であった。レッド測深とは、紐のついた鉛塊を海底に向けて投下することにより1点1点の水深を測る方法である。シングルビーム測深は単ビームで水深を測定するため、1度に測定できる領域が少ない。また、航行速度によっては広範囲の水深を測定するには時間がかかり、効率が低いことがデメリットとしてある。このようにシングルビーム測深が送受波機器直下の水深情報を線で測深しているのに対し、マルチビーム測深は複数のビームが同時に広範囲を面的にカバーするため、一度の測定で全域を対象とした多くの地形情報を得ることができ、高精度かつ高解像度のデータを収集することが可能となる。これらの背

景から、測深技術は点から線、線から面的なものに進化している¹¹⁾。前述のように、広範囲な海底地形を高精度でマッピングするため、航路の設計や維持管理においても非常に有効である。さらに、深海の測量にも適しており、海洋資源調査や地形の変化のモニタリングにも広く活用されている。その他、リアルタイムでのデータ収集が可能であり、船上のコンピュータによって得られたデータをその場で確認することができるといった利点もある。これらの特徴から、現在有人船舶によるマルチビーム測深が主流となっている。一方で、有人船舶によるマルチビーム測深には、設備の高価さや船舶の運用コストが高く、費用がかかる点や、マルチソナー機器を船舶に搭載して使用するため、設置・計測に時間がかかるといったデメリットをもつ。また有人船である為に漁船の手配が必要となる。浚渫工は図 1-6③の状況からわかるように作業が大規模で 1 日当たりの作業コストが莫大である。その為、日々の計画が重要で漁船の手配や計測による工程の遅延はあってはならないことが測量における問題点である。次に図 1-6③から⑤にかけて、浚渫作業を表したものである。現在の浚渫は ICT 浚渫工と呼ばれ、施工支援システムが導入されており、掘削作業については効率化、省人化が行われている¹²⁾。しかしながら、その掘削作業の確認方法は図 1-6⑤のようなレッドでの検尺作業が主流となっている。このレッドが水底に着いたかどうかの確認は、作業員の熟練度に大きく影響する部分である。手戻りや修正掘りや過掘りを防ぐためには施工中の海底の状況把握が重要であるにもかかわらず、作業員の熟練度に依存しては、本当の意味での効率化や省人化は実現できない。また施工中に有人船舶によるマルチビーム測深の検討も考えられるが、1 回あたりの費用が高価なのに加えて掘削作業を 1 日止めることにコストがかかってしまう問題がある。次に図 1-6⑥⑦⑧⑨においては土運船と呼ばれる浚渫土砂を運ぶ船で土砂処分場へ運搬され、揚土船と呼ばれる船で圧送され、土砂処分場へと捨てられる。その土砂処分場について航路や泊地の増深や機能の維持に伴い、大量の浚渫土砂が発生する。同時に浚渫土砂の処分場や埋立地が不足しており、新たな埋立地の整備が進まないという課題が存在する。新たな埋立地の整備には、環境問題や地元の調整が難しい場合があり、進展が遅れているのが現状である。そこで減容化施工は、浚渫土砂の処分場を有効に利用し、浚渫土砂の受入容量を増加させるための重要な手段となる。特に、減容化工事において PDF 工法 (Plastic-board Drain by Floating System) の有用性が報告されている¹³⁾。PDF 工法の原理を図- 1.7 に示す。今工法は、プラスチックドレーンを排水材として打設し、圧密排水を促進させるものである。粘土地盤を圧密させることで新たな空間を生み出し、浚渫土砂の収容量を増加させる効果がある。これらの減容化効果、土砂容量の把握が求められるが、現在の減容化施工のモニタリング手法は図- 1.8 のような水位計を用いた目視による定性的な判断である上に、揚土場の広い面積における水底地形や搬入可能な容量の把握を人力でモニタリングするには限界があることが現状である。これらの背景から、減容化施工を支援する効率的かつ効果的なモニタリング手法の確立が必要である。水島港においても、大型化する船舶の航路確保のために高頻度で大規模な浚渫工事が行われ、水島港玉島地区ハーバーアイランドの浚渫土砂処分場において浚渫土砂受け入れ容量不足が課題となっている。図- 1.9 に示すように、現在も浚渫土砂の処分場確保のため前述の PDF 工法による減容化工事で受け入れ容量の増加が図られているが、減容化の効果の迅速かつ効率的な把握や水底地形の定量的な計測は課題として現存し、これらの検討が重要となる。

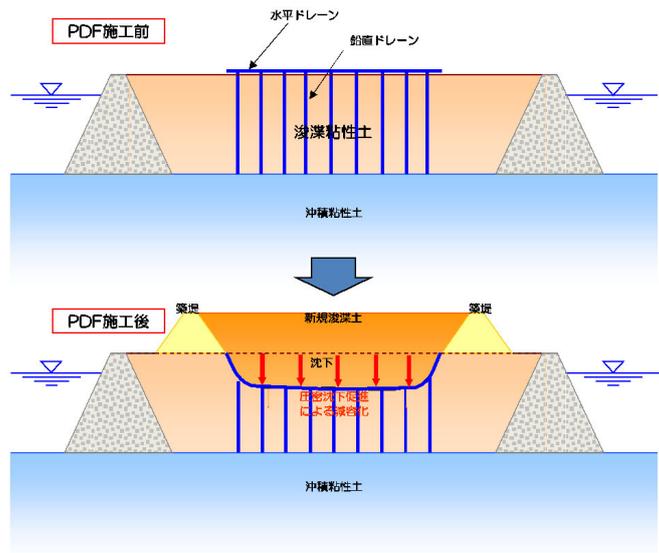


図-1.7 減容化施工における PDF 工法の原理
 (「浚渫土処分場における 減容化の目的と手法について」より転載)



図-1.8 水位計によるモニタリング手法



図-1.9 PDF 工法による減容化の様子(水島港玉島地区ハーバーアイランド浚渫土砂処分場)

これらを踏まえ、本研究では、水島港玉島地区ハーバーアイランド浚渫土砂処分場におけるモニタリング手法として、グリーンレーザスキャナを搭載したUAV(Unmanned Aerial Vehicle)測量に着目する。グリーンレーザスキャナは上空からグリーンレーザを地上に向けて照射し、反射してきたパルスを計測することで水面下の地形が計測可能であるという特徴を持つ。UAV測量は飛行機にレーザスキャナを搭載する測量手法である航空レーザ測量 (ALB)に比べて対地高度が低く、高密度な計測が可能である。水深の浅い土砂処分場における計測により、減容化施工のモニタリング手法となり得るか検証する。

次に図1-6⑩の深淺測量後のデータ解析はマルチビーム測深機における単位時間あたりのデータ取得量はシングルビームの数千倍におよび、処理に多くの時間を有してしまう状況である。宮崎¹⁴⁾によると、“2016年の水路測量によるシングルビーム測深では、63,000m²の測量で10万点の測量データが得られており、1m²あたり約2点であるのに対し、2018年の出来形測量兼水路測量によるマルチビーム測深では、35,700m²で約380万点の測量データが得られており、1m²あたり約100点のデータ取得が出来ている。”約50倍の取得データ数の差である。大量の計測データを迅速かつ正確に解析し、浚渫計画へフィードバックするプロセスにも技術的課題がある。現在のデータ処理は主に専門家による手動で行われており、人による技術格差や結果の不均一であることや処理に多くの時間を要することが課題の一つである。図-1.10に示す1工事当たりの平均作業時間のグラフからも、データ解析（ノイズ処理等）に多くの時間を要していることがわかる¹⁵⁾。データ処理・補正工程の構築さらには自動化が必要であることが明らかである。

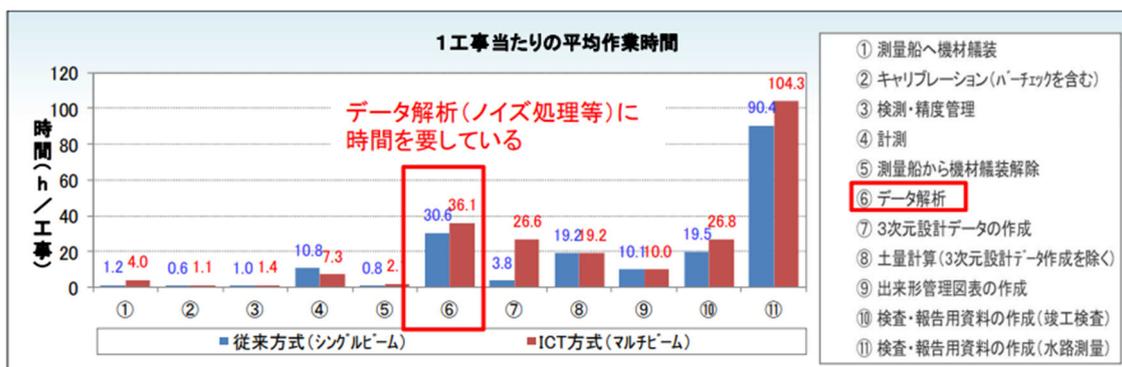


図- 1.10 1工事当たりの平均作業時間

(国土交通省 ; 「港湾における ICT 導入検討委員会 第7回委員会資料」より転載)

現時点での手動によるデータ処理にはかなりの時間を有し、計測した日、その場で計測結果や出来形を確認することが困難である。浚渫工は先述した通り、日々の計画が綿密で深淺測量の結果が迅速に出ない為、浚渫船や揚土船、土運船についても拘束することになり拘束費と呼ばれる経費を発注者が計上している。これらのデータをリアルタイムで把握し解析することで、発注者としても無駄な費用の計上がなくなり、より浚渫する部分に予算を計上することができる。施工者としては進捗管理や精度管理を高度に行うことができ、手戻りや修正掘りが減少すれば利益に直結する。また国土交通省が推進するDX化の取組において、特に浚渫作業におけるリアルタイムでの可視化が重要視されている。具体的には、浚渫作業中に得られた海底の情報を即座に可視化し、作業中および作業後の結果を発注者や関係者と共有できるシステム・技術の構築が求められている。このようなシステムの実現により、海底状況のリアルタイム把握が可能となり、安全性の向上や作業の

効率化・省力化、施工結果（出来形）の確認が可能となる。本研究では、計測作業中に船上での計測画面をTeamsを用いて、現場に立ち会い出来なかった発注者、関係者と共有することで、海底の見えない部分をリアルタイムに可視化することを目指す。また、測定終了後即座にCUBE処理によるデータ処理を検討する。CUBE処理についての詳細は第3章3節にて記述する。

また、インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション（建設DX）施策（国土交通省では令和3年(2021年)2月9日公表）が推進されている。施策の概要を図-1.11に示す。現在の建設現場で直面している人材不足や災害、インフラの老朽化の問題に対処するために、i-Constructionの推進が行われている。同時に、Society5.0などの技術革新や新型コロナウイルス感染症などの社会経済の変化に対応するために、インフラ分野でのデジタル化やスマート化が進んでいる¹⁶⁾。i-Constructionは、国土交通省が採用している取り組みの1つで、建設現場で個々の作業効率を向上させ、魅力的な環境を実現することを目指している。特にICT技術の積極的な活用を促進し、各段階でデータを立体的に管理することを目指している¹⁷⁾。港湾分野でも、ICT浚渫工を含む浚渫作業全体の流れを3次元データで管理する取り組みや、BIM/CIMの利用拡大など、ICTの導入が計画されている。港湾におけるDX施策については第2章で詳しく説明する。こうした3次元データの利用は、定量的で面的な測量技術として期待されている。



図-1.11 国土交通省による建設DXの取組

(国土交通省 「インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(DX)施策一覧」より抜粋)

また港湾工事に限らず全体の取り組みとして国土交通省では平成28年からi-Constructionの推進を通してICT施工や設計・施工におけるデジタル技術の積極的な活用を進めている。現在は従来のi-Constructionの目的である現場の生産性向上に加えて、業務・組織・プロセス・文化・風土や働き方の変革を目的としたインフラ分野のデジタルトランスフォーメーション(DX)の実現に向けて取り組みを進めている¹⁸⁾。

建設分野の生産性向上を目指す重要な取り組みの一つがBIM/CIM(Building/ Construction

Information Modeling, Management)である。従来、発注者は受注者に提供する2次元図面や工程表などの契約図書、参考資料および三者協議の場を通して、設計者から施工者への情報伝達を実施してきた。BIM/CIMとは、計画・調査・設計段階から3次元モデルを導入することにより、その後の施工、維持管理の各段階においても3次元モデルを連携・発展させて事業全体にわたる関係者間の情報共有を容易にし、一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を図るものである。しかし、従来のCIM試行事業において、3次元モデルを用いた設計・施工間での情報連携がなされた事例はほとんどみられておらず、これは、設計者からどのような3次元モデルを受け取れば施工者にとって有用なのかを発注者が把握していないためだと考えられている。そこで、3次元モデルに時間情報を付与した4次元モデル(4D施工)が着目されている。設計時に4次元モデルを活用した施工計画シミュレーションで施工計画の検討が行われ、確実に施工段階に伝達できれば、施工計画をわかりやすく受発注者間で共有できるようになる。図-1.12に4次元モデルによる施工計画の可視化事例を示す。このように、想定する工程表に対応する時間情報を3次元モデルに付与することで、施工手順を可視化し、実現可能な工程であるかどうかや安全を考慮した施工が可能か等を確認することができる。これによって、施工者は設計段階で検討された内容を把握した上で、設計意図に則した施工計画の立案や、円滑な受発注者協議の実現、施工の手戻り防止に結びつけることができる。こうして、必要に応じて4次元モデルを適用することにより、発注者から施工者への正確かつ効率的な設計意図の伝達が期待されている。¹⁹⁾²⁰⁾

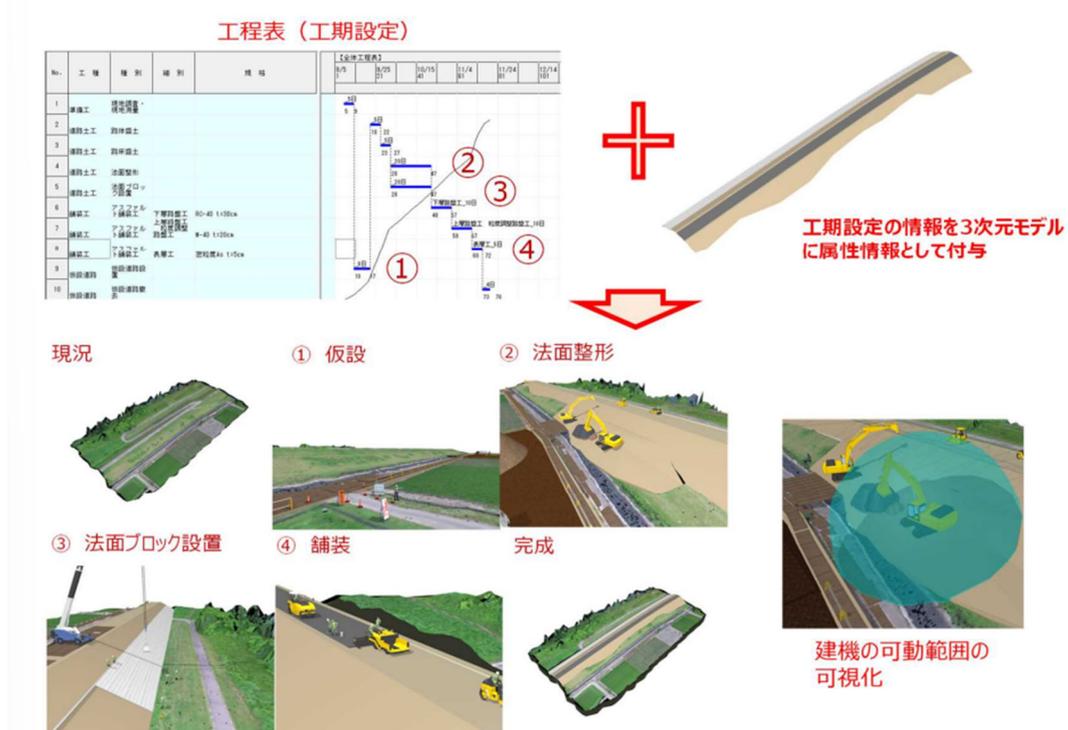


図-1.12 4次元モデルによる施工計画の可視化事例
(国土交通省：設計・施工間の情報連携を目的とした4次元モデル活用の手引き(案))

1.2 本研究の目的

このような背景を踏まえ、本研究では、自律航行型小型船舶(Unmanned Surface Vehicle)によるマルチソナー深浅測量技術とグリーンレーザスキャナ搭載ドローンに着目する。USV にマルチソナーを搭載し、浚渫作業や減容化施工時の水底地形を高精度かつ低コストで3次元測量するモニタリング手法の開発を目指す。また、グリーンレーザスキャナを搭載したドローン(UAV)による浚渫土砂処分場のモニタリングも実施した。本論文において、UAVに関する研究では、ハードウェア的要素ではなく、収集された膨大なソナーデータをAI(Artificial Intelligence)等の最新手法で処理・解析するソフトウェア的要素に焦点を当てる。従来のマルチビームソナー測量との精度比較や実際の減容化施工での検証を通じ、提案手法の有用性と実用性を明らかにする。また、UAVによる計測に関しては、ハード要素の検討もを行い、港湾特有の濁度と計測可能な水深と計測精度の関係の明確化を目標とした。以上を踏まえて、減容化施工や浚渫工事の効率化と高度化に資するモニタリング・計測技術としての可能性を考察する。

1.3 本論文の概要

本論文は図-1.11 に示す通り、第1章～第5章までの5つの章で構成している。以下に本研究の内容を各章ごとに概説する。

第1章では、本研究の背景および目的を示した後、論文の概要を述べる。

第2章では、港湾DX実現に向けたICT技術の導入に焦点を当てて、背景と重要性について述べる。また、章の後半には関連する既往研究を整理する。そして章の最後には、これらの整理した既往研究や第1章で述べた背景などをもとに本研究の位置づけや新規性について述べる。

第3章では、1つ目の研究開発テーマである、ナローマルチビームを搭載した自律航行型小型船舶(USV)による深浅測量について検討を行う。初めに、計測に関わる諸元について述べ、データ収集と解析手法・手順を説明した後、解析結果をもとに考察を行い従来法との費用の比較を行う。その結果に基づいて内製化について検討する。

第4章では、2つ目の研究開発テーマである、グリーンレーザ搭載ドローン(UAV)による浚渫土砂処分場(揚土場)の計測技術の検討を行う。初めに、計測に関わる諸元について述べ、その後検証・計測結果について議論する。最後に、計測結果に対する原因分析を行い、それについて考察を行い従来法との費用の比較を行う。その結果に基づいて内製化について検討する。

第5章では、浚渫工における3次元点群データの4次元モデルへの活用の検討を行う。

第6章では、本研究の要約を行い、結論とともに今後の課題を示す。

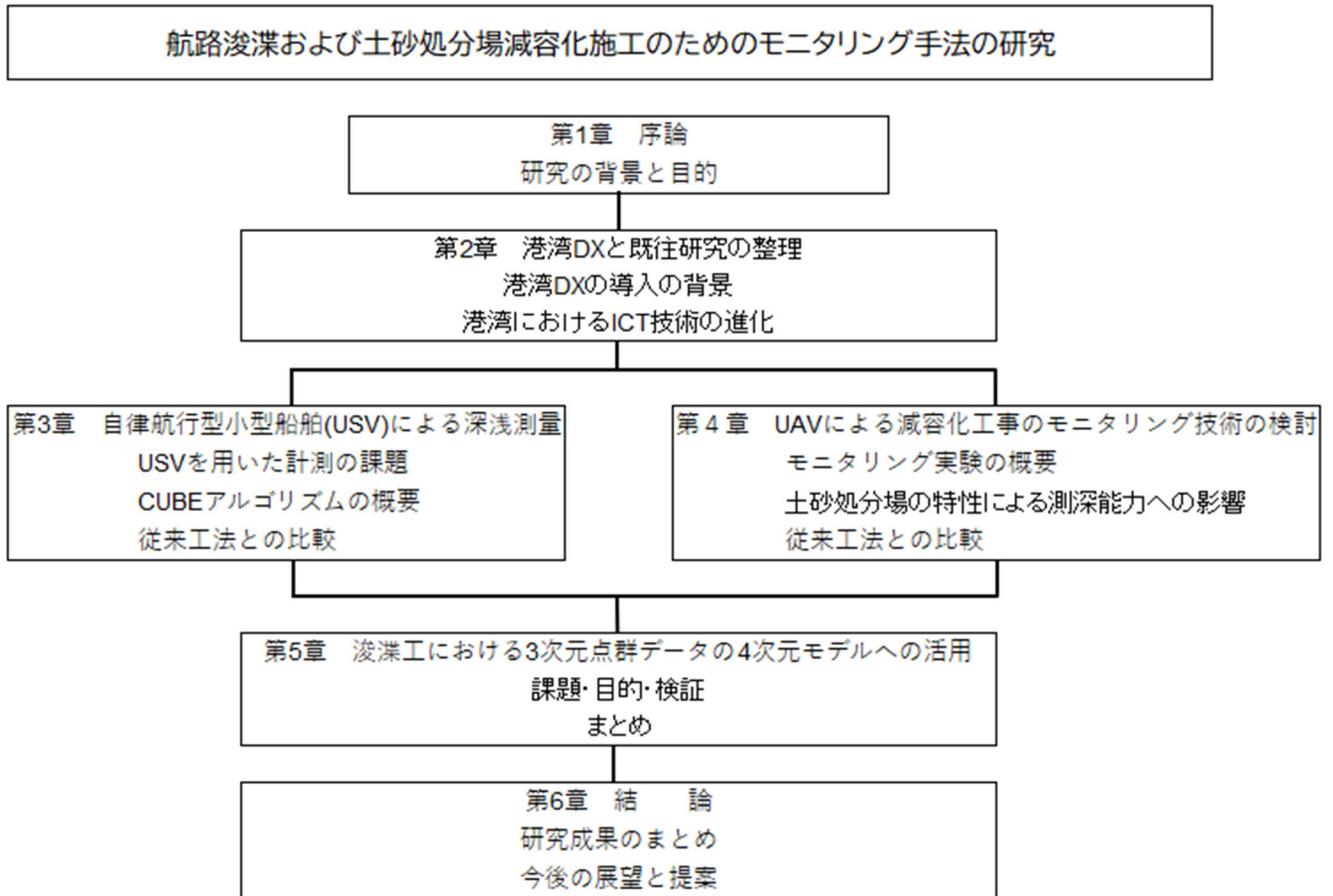


図-1.11 本論文の構成

第2章 港湾 DX と既往研究の整理

2.1 概説

本章では、ICT (Information and Communication Technology) を活用した測量技術と港湾分野におけるDX (デジタルトランスフォーメーション)、特にi-Construction (ICT浚渫工)について概説する。その後、先行研究の知見を踏まえつつ、本研究の位置づけを行う。

2.2 港湾DXの導入の背景

ICT 技術の導入が進む大きな背景の一つが、建設業を取り巻く環境の変化である。具体的には、建設投資の減少に伴う市場縮小、担い手の高齢化、若年入職者の減少といった人口動態の変化、建設生産システムの非効率性などの構造的な課題がある。建設業の就業者数はピーク時から約3割減少しており、高齢化と次世代への技術継承が大きな問題となっている。これらの要因により、建設業の生産性の低迷が長期にわたり続いている。一方、社会インフラの老朽化に伴う更新需要の増大や災害時の早期復旧の必要性など、建設生産量の確保・拡大が求められる状況にある。こうした中、限られた建設資源で社会的ニーズに応えるため、生産性向上が喫緊の課題となっている。このため、国土交通省を中心に i-Construction などの取り組みによって、ICT の全面的な導入が推進されている。これは第4次産業革命に対応し、令和7年度(2025年度)までに建設現場の生産性を2割向上させることを目標としている。ICT 技術の進展に伴い、測量分野においても ALB (Airborne Lidar Bathymetry: 航空レーザ測深)や UAV (Unmanned Aerial Vehicle: ドローン測量)、MMS (Mobile

Mapping System : モービルマッピングシステム), SLAM (Simultaneous Localization and Mapping などの新しい測量技術が導入され, 従来の TS (トータルステーション) による点のデータから, ドローンやレーザースキャナによって面的なデータを取得できるようになった. これらの技術は, 従来の人手による測量と比較して, より迅速かつ正確なデータ取得が可能となり, 測量作業の効率化と精度向上に大きく貢献している.

2.3 港湾におけるICT技術の進化

近年, 港湾分野において, Society5.0実現に向けたDXが国家戦略として重要視されている. 前節で述べたi-ConstructionやICT技術をその中心的な概念としてDX化が重点的に取り組まれている. 特に, ICT浚渫工がこの潮流の中で特に重要な位置を占め, 浚渫作業における3次元データ管理やBIM/CIMの適用が行われることが期待されている.

港湾における ICT 技術の本格的な導入は 1990 年代後半から 2000 年代にかけて実施された. 導入の背景には, 船舶の大型化や複雑化などによる港湾業務の煩雑化, 運送業界の国際化・情報化の進展, 港湾の競争力強化の必要性などがある. 国土交通省では, 1997 年の「港湾の高度情報化研究会」²¹⁾ において, 港湾情報システムの高度化の方向性が示された. これを受け, 次世代港湾管理システム(PORTMIS)の開発が進められ, 2000 年代には主要港で運用が開始されている. PORTMIS では, 船舶の動静管理, ヤード管理, ゲート管理などの機能が実現化され, 港湾管理の効率化が図られた. また, AIS(船舶自動識別装置)の導入により, 船舶位置の監視体制も整備されている²²⁾. 平成 28 年度(2016 年度)からは, 「港湾における ICT 導入検討委員会」を設置し, 浚渫工事を対象に ICT 活用の検討を始め, 他工種への ICT 活用の拡大や業務・工事への BIM/CIM の導入等の取組を実施している. 令和 2 年度(2020 年度)からは, 「港湾における i-Construction 推進委員会」に改称し, 現場で必要とする技術課題を現場で実証しながら, 港湾の建設生産の全プロセスで ICT・BIM/CIM の活用等を推進し, 効率化に取り組まれている. 具体的には, ICT を活用した作業船での浚渫と水中施工箇所の見視化により施工管理が効率化されている. 一方, 港湾のインフラ面でも, 3D-CAD や 3D レーザースキャナーを用いた設計・施工が本格化し, 成果品である 3 次元数値データの共有・活用が進んでいる. 2000 年代後半からは, これらの基盤を生かし, 無人航空機(UAV)や自律航行可能な無人船舶(USV)などのロボット技術の導入が進められている²⁴⁾. 具体的な取り組み事例としては, 各地の港湾局におけるドローンを用いた監視や船体検査, USV による水質調査などが挙げられる. このように, 国土交通省は海の次世代モビリティ活用促進に向けた取り組みに力を入れている. その他, UUV や ROV といった次世代モビリティの活用事例も報告されている. 以下に, 図-2.1 に示す実際の次世代モビリティについてまとめる²⁵⁾.

1. USV (Unmanned Surface Vehicle) : USV とは, 遠隔操縦または自律航行により制御され, 水面を航行する無人の小型艇を指す. 水面上で航行するため, GPS などの測位システムを利用した位置特定が容易であり, また目視での確認が可能であるため運用の面でも安全である. 他にも, 船体が小型であるため浅瀬にも進入できることや多用途で活用できる等の利点があげられる. 港湾監視, 海洋調査, データ収集等の任務に適しており, 実際に海洋データの収集や船舶の追跡監視等に活用されている. 一方で, 波浪の影響で計測作業が困難になることや, 計測結果の正確性が欠落すること, また, 船舶の運送が困難なことや, 他船との衝突や事故を防ぐため, 洗練された遠隔操船技術が必要といった課題がある.

2. UUV (Unmanned Underwater Vehicle) : UUVは自律型の無人潜水機であり、母艦から離れて目的地まで潜航し、水面の浮上までの任務を自動的に遂行する。潜航時間と航続距離が長く、深海への進入が可能であり、水面からの潜航深度や水底からの高度といった周囲の状況をセンサー類により把握することができる。AUVは、主に航行型、ホバリング型、水中グライダーに分類することができ、潜航時間は10時間から1ヶ月以上と幅広く、最大潜航深度は11,000mを超える。航行型AUVは、細長い魚雷のような形状をしており、水中を安定して巡航しながら観測を行う。通常、海底から数10~100メートルの高度を保ち、海底の地形調査や海底面や海底下の異常物の検出、水質調査など、広範なマッピングに適している。ホバリング型AUVは、海底や海中の物体に接近することを前提として設計されており、垂直方向や横方向への移動のための推進器を備え、複雑な動きを可能にしている。これにより、海底などに接近して生物や水中構造物の光学画像を撮影するなどの用途で活躍し、水中設備の保守・点検にも使用される。一部の機体は水中構造物に触れて作業を行うこともできる。水中グライダーは、航行型AUVに似ているが、推進器を使わずに浮力制御だけで航行する。通常は水温や塩分濃度などの水質調査に使用される。このように、本技術は、海底調査、探査、機雷処理等に活用されている。ただし、航続距離は動力源の容量に依存していることや、自動で操作されるため、遠隔操作型のような複雑な行動には不向きである。さらに、外部との通信には伝送速度の遅い水中音響が使用されるため、収集したデータをリアルタイムで確認することが難しいという制約もある。
3. ROV (Remotely Operated Vehicle) : ROVは、母艦からのケーブルで操縦される遠隔操作型無人潜水機であり、小型の光ケーブル式と大型の電力・通信ケーブル式がある。高解像度カメラや精密なマニピュレーターを搭載可能で、カメラ映像を確認しながら遠隔操作することで、水中映像や必要な情報をリアルタイムで船上に伝送することができる。この技術は、石油掘削施設のメンテナンス等に欠かせない存在であり、他にも海底資源調査、パイプライン検査、修繕作業等に活用されている。

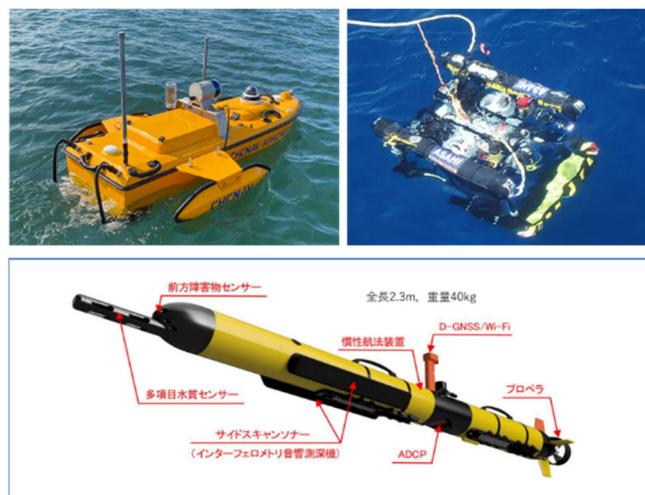


図-2.1 海の次世代モビリティ (左上 : USV, 右上 : ROV, 下 : UUV)

浚渫工の要領案の検討(CUBE処理対応版)

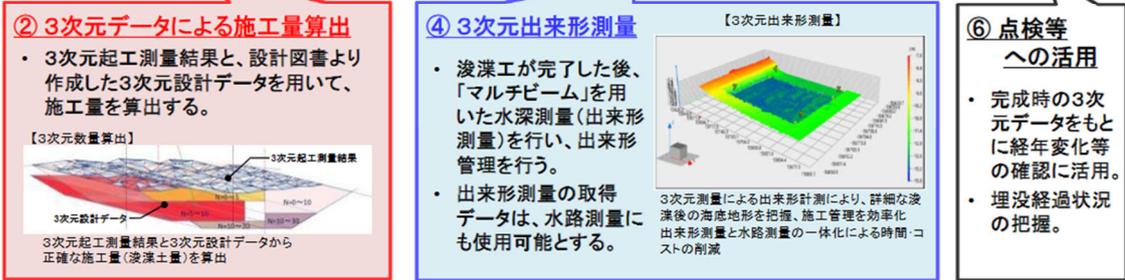


図-2.3 2023年度の浚渫工の要領案の検討(CUBE処理対応版)

(国土交通省:「港湾における i-Construction 推進委員会資料-1, 第7回 説明資料」より抜粋)

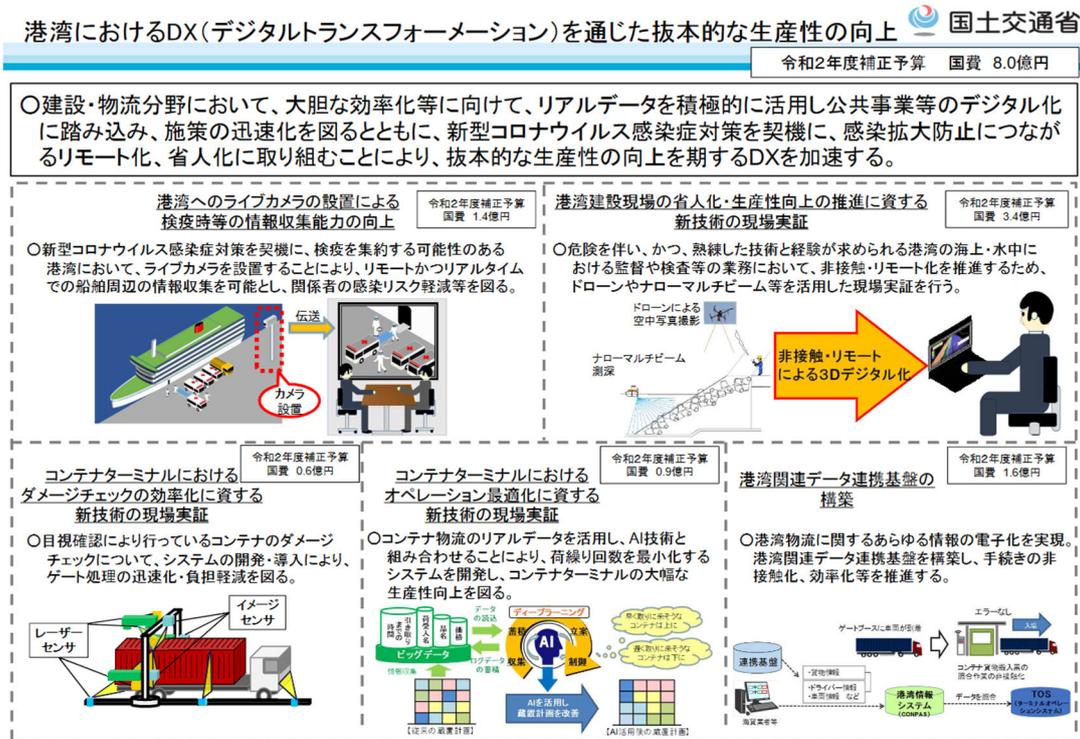


図-2.4 港湾におけるDX推進に向けた取組事例

(国土交通省:「港湾におけるDX(デジタルトランスフォーメーション)を通じた抜本的な生産性の向上の概要」より抜粋)

2.4 関連研究

本研究の背景として、自律航行型小型船舶（USV）を使用した水路測量やグリーンレーザ搭載ドローン（UAV）を使用した浚渫量の計測に関する過去の研究が数多く存在する。本節では、下記項目に示す、本研究テーマに関連する先行研究について整理する。

2.4.1 浚渫工事の施工管理・測量に関する研究

宮崎¹⁴⁾は、国土交通省が推進する i-Construction の一環として、港湾工事における ICT 活用工事について詳しく説明している。具体的には、千葉港葛南中央地区航路の浚渫工事を事例に、従来方法と ICT 浚渫工の比較をすることで、活用効果や課題・今後の対応について考察している。港湾工事においては、工事出来形の確認や、作業の進捗状況の把握のため、水路測量を行うことが必要である。しかし、浚渫工事後の出来形測量と水路測量とで、その測量成果を提出する際には、測量成果の座標系の違いなどによる課題がある。そこで ICT 浚渫を活用した水路測量を兼ねた出来形測量の実施により、1回の測量で済ませることができ、船舶航行への影響を抑えることができたことを報告している。また、従来法によるシングルビーム測深（「線」の測量）を使用した測量と ICT 浚渫工であるマルチビーム測深（「面」の測量）を使用した測量を比較することで、ICT 浚渫工による多くの活用効果が見られた。例えば、船舶航行による測量時間の短縮、測量成果の精度向上、3次元データ活用による施工数量の自動算出や数量算出の効率化実現による生産性の向上などがあげられ、受注者へのヒアリングでは、土量計算にあたり約3時間かかっていた作業が0.5時間でできた旨を確認している。一方で、マルチビーム測深の課題についても述べている。一つ目に、従来方法のシングルビーム測深と比較して、測量機器が高価であり、すべての浚渫工事にマルチビームを適用することが難しいことをあげている。動揺センサ等の周辺機器を含む必要な機材一式が高価なことに加えて、取得する点群データの容量が大きいことにより、高性能 PC や専門ソフトが必要となるため、従来方法に比べて高い費用が必要となる。二つ目に、使用機器の増加による作業性の課題をあげている。マルチビームソナー測深しながらの浚渫作業は機材を多く必要とするため、機材を載せる船舶のある程度のスペースが必要となる他、機材の载荷に多くの時間を要することが課題としてある。今後の課題としては、水路測量用と浚渫出来形測量用の成果品基準の統一化、普及していく中での価格の見直しがあげられている。

また、森木ら²⁸⁾は宮崎と同様に、浚渫工事へのナローマルチビーム深淺測量（NMB：Multi-beam Echo Sounder）について論じているが、深淺測量の導入による生産性の向上を評価する方法を検討・提案していることが相違点としてある。具体的には、以下に記すような ICT 浚渫工の導入の評価を行う際に検討する項目を勘案、八戸港事例²⁹⁾へ適用することで総合的な評価を提案している。1.歩掛（人日）の減少：NMBの導入により、非熟練労働力で対応できるようになり、不要となる熟練労働力の歩掛が減少することを評価する。2.労働時間の減少：対象工程の労働者の労働時間が減少することを評価する。3.総費用の減少：工事全体の費用が減少する可能性を評価する。4.総工期の短縮：工事全体の期間が短縮される可能性を評価する。図-2.5は、SB（シングルビーム深淺測量）とNMB（ナローマルチビーム深淺測量）の上記項目における比較結果のグラフである。歩掛の比較結果の内訳をみると、土量計算においてはSBに比べてNMBが大幅に削減されていることがわかる。SBでは土量計算を平均断面法で行うため、人手が必要だが、NMBでは3DCAD等のPCソフトウェアを使用し、TIN法で一括計算できるため、手間が軽減されると考え

られる。他方で、艀装とその解除及びキャリブレーションでは、NMB のほうが増加している。アナログからデジタルのデータに変わっているにもかかわらず、データ解析の歩掛が増加してしまうのは、NMB のデータに含まれる特定のノイズ除去には人間の判断が必要だからであると考えられる。このようにデータ解析において歩掛が増加したが、他項目において NMB のデメリットがほとんどないことから、本事例における ICT 導入を肯定的に評価できることを示している。一方、NMB の精度向上のための技術的対応が今後必要であると述べている。NMB の公称精度は±10cm 程度であるが、この精度を本均しの検査基準の±5cm に向上させるべきであるとする。

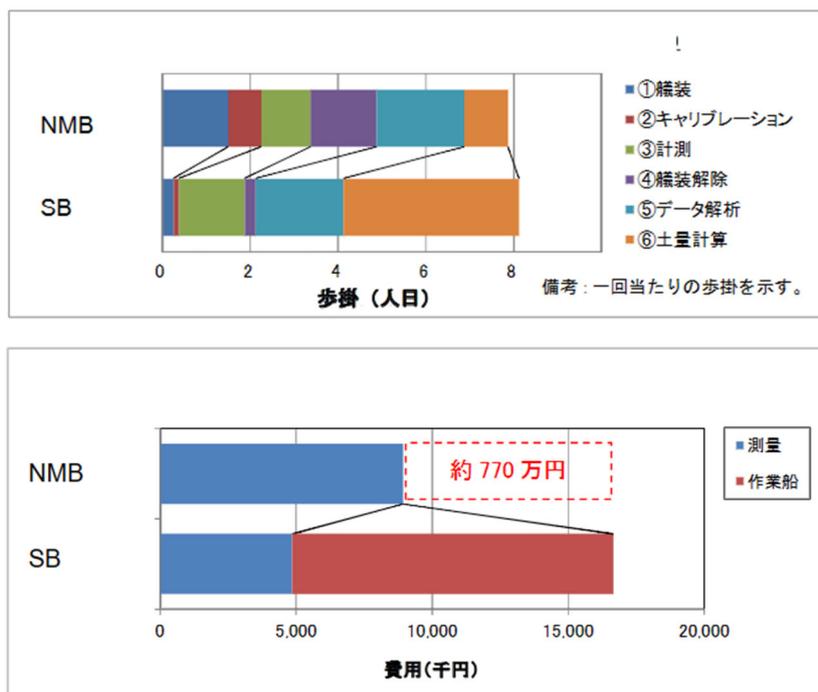


図-2.5 SB と NMB の各項目における比較結果

(森木ら：「港湾浚渫工事への ICT 導入による生産性向上の評価方法に関する基礎的研究」より抜粋)

2.4.2 マルチビームソナーによる水中地形計測

上述のとおり、昨今はマルチビームソナーを用いた深淺測量など、水路測量の技術は着実に進歩しており、海洋空間の正確な把握や安全な航行の実現に向けた重要な進展がなされている。マルチビームエコーサウンダーの広範な使用により、水深のマッピングが迅速かつ正確に行われ、より詳細な水路地図が作成されるようになっている。しかしながら、水路測量士は依然として海底地形の正確な把握やデータのノイズ・エラーの除去などの課題に直面している。住吉昌直ら³⁰⁾は、日本における水路測量の技術的進歩と近年の取り組みについて歴史を振り返るとともに、マルチビーム測深データの利用事例や今技術の課題点や対策について議論している。今報告書は技術発展の歴史的経緯の理解を広げるために内容を以下に整理する。マルチビーム測深機を正しく使いこなすためには、調査海域の測深作業前の事前準備、特に(1)各センサの接続・通信設定の確認、(2)各センサの取付状況の事前入力、(3)測深システム全体の最終動作確認の3点が肝要であると述べている。さらに、現地での測深作業における注意点と一次処理の手順について論じられている。本研究においても良好なデータを取得するために、レンジ等のマルチビーム測深機の設定を適切

に調節し、蛇行せず一定の速度で計画側線上を航走することを心掛けた。詳しくは3章にて後述する。また、二次処理と測量成果作成についても触れており、ノイズ処理の重要性について述べている。現地調査終了後に事務所等で行う測深データの二次処理は以下の工程からなる。(1) 測深データ(RAW)の読み込み、(2) 測位・動揺データの読み込み (TrueHeave 読み込み、POSPac 処理を行った場合のみ)、(3) 潮位補正 (実測値) の適用、(4) 水中音速度補正の適用、(5) 測深データと測位・動揺データ等との統合 (各センサーの取付状況を加味)、(6) 水深データのノイズ処理: 成果作成のため、水深点群データからデータ不良・ノイズを目視で判断して、不要な水深点群データを厳密に除去、(7) 最終的な水深データ (経緯度水深ファイル: LMD ファイル) の作成。住吉らは、ノイズ処理について、マルチビーム測深機で得られる膨大な水深点群データの処理時間と処理を行う技術者の質が今後の課題であると述べている。また、二次処理中にスマイルカーブなど水深データの不具合が見つかった場合、水中音速度の検証・修正が必要になり、通常よりも処理にかかる時間が増大するため、一次処理・補再測の重要性も説いている。これらの処理を経て全測深点である経緯度水深ファイル (LMD ファイル) が作成され、LMD ファイルをもとに海図、水路測量成果が作成される。成果品は、船舶交通の安全な航行を支えるだけでなく、震災後の航路開設や水路測量、科学的基盤データのような多様な目的に活用される。実際に、土屋ら³¹⁾により清水港での有効利用事例が報告されている。また、図-2.6は震災後の水路測量・航路障害物調査において取得された浅海用マルチビーム測深データである。クレーンや乗用車など、これらの海底特異物の正確な状況を把握するために、マルチビーム測深による詳細で広範な水深データが大きく貢献したと言える。一方で、無数の海底特異物の存在する海域では、浅海用マルチビーム測深データを整理するために特異物やノイズを目視で判別する必要があるため、通常以上の時間と労力がかかるという大きな問題が残されている。今後の課題は、浅海用マルチビーム測深の作業と資料整理手法の抜本的な見直しであり、これにより海底特異物の正確な状況把握がより迅速に可能になる可能性が広がると結論付けている。また、報告書の終わりに、前述の課題を解決するマルチビーム測深データの特性に合った統計的なデータ処理手法として、CUBE 処理の本格導入を検討中であると紹介している。

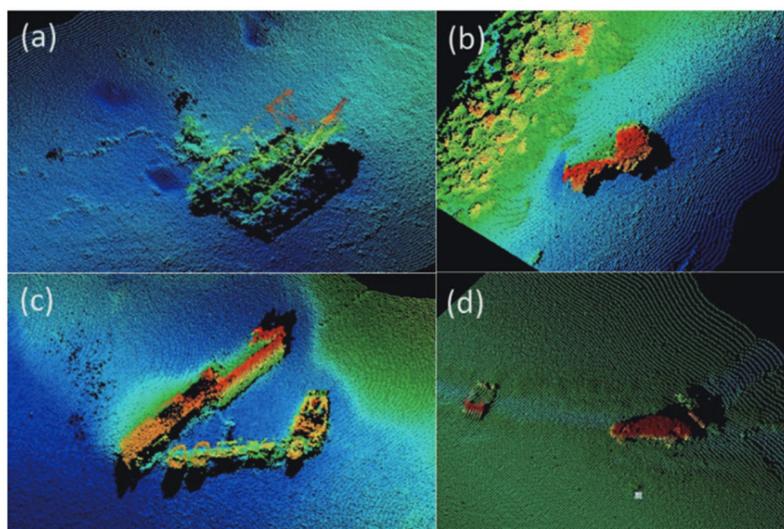


図-2.6 東日本大震災後のマルチビーム水深測量において発見された海底特異物，(a) クレーン，(b) トラック，(c) ダンプカー，(d) 普通乗用車
(住吉ら；「水路測量における技術の進歩と近年の取り組み」図6より転載)

上記でマルチビーム測深についての報告書を整理したが、令和4年(2022年)4月に公開された水産庁漁港漁場整備部による「マルチビームを用いた深浅測量マニュアル(浚渫工編)」³²⁾においても、マルチビームソナーを用いた浚渫工事のための水深測量の手法と実際について詳しく解説されている。測量機器の選定、測量作業の手順、データの解析と成果物の作成、精度管理等の具体的な内容が記載されている。今マニュアルは作業手順の理解に有用なものであり、本研究において参照する。

2.4.3 USVを用いた水路測量の研究

マルチビームソナーを搭載した船舶による水中地形計測のほかにも、マルチビーム音響測深を実施しながら、陸上部においても地形を船舶搭載型レーザースキャナで測定することができる。第1章でも紹介したMMSも、車両に地上移動体搭載型レーザースキャナを搭載し、車が移動しながら地形を測定、3次元データを取得する手法で、近年普及している測定手法の一つである。本研究では、レーザースキャナによる陸上地形の計測は実施しなかったが、今回使用した船舶にもレーザースキャナを搭載することが可能である。友久武司ら³³⁾は、船舶搭載型レーザースキャナを使用して陸地の地形や特徴を3次元で計測する技術について報告している。小樽港内においてレーザースキャナの測定位置精度検証を実施することで、船舶搭載型レーザースキャナの精度検証の重要な知見が示されている。また、この技術が水路測量においてどのように応用されるかについても触れられており、岩内港港湾測量においてレーザースキャナを使用し、海図に描画する海岸線の測定を行った。精度検証の結果として、図-2.7左に示すようにレーザースキャナによる測定の有用性が示され、穏やかな海の状態では、レーザースキャナによって測定された点群データの位置と運動補正GNSSによって測定された海岸線の位置にほとんど差がないことが確認された。一方、荒れた海の状態では、測定精度が低下することが示された。レーザースキャナ測定値の不確かさの要素としては、測位精度、動揺検出器の測定精度、レーザー測定精度、オフセット値測定精度、バイアス値測定精度、潮位観測精度等が考えられ、これらの項目において正確な測定を実施することで、位置精度を向上することができると述べている。さらに、反射テープを用いた反射強度の有用性についても検証し、図-2.7右に示すように、色情報がなくても反射強度の情報から色が異なるターゲット部分の特定が可能であることや、構造物の色の差把握が容易になることを報告している。レーザースキャナは、水にぬれている部分の反射強度が低下するという報告³⁴⁾があるが、本検証結果より、岩礁帯等のアクセスが難しい海岸線においても測定可能になることが示された。前述のことから、レーザースキャナによる測定は波消波ブロックなどの海岸線の精密な測定を可能にし、橋の垂直クリアランスの測定やブイや漁具の位置測定などに応用が期待できると結論付けている。



図-2.7 左：消波ブロックの海岸線の点群データ，右：点群の反射強度差による表示
 (友久武司ら：「船舶搭載型レーザスキャナーの精度検証及び水路測量への応用」より)

2.4.4 マルチビーム水深測量へのCUBE処理の適用

今号では、本研究のデータ処理にて検討・導入した CUBE 処理に関する知見を広げるため、いくつか事例を紹介する。CUBE 処理に関する説明・アルゴリズムは第 3 章 3 節にて詳細を記述する。住吉ら³⁵⁾は、マルチビーム測深において、ノイズ処理の効率化や客観的な処理の推進、品質の劣る測深データの海図水深への防止などの課題が挙げた後、これらに対する解決策の一例として海外で広く普及している CUBE アルゴリズムを解説している。また、CUBE アルゴリズムの利点を実際のデータで実証するため、第三管区海上保安本部所属の測量船「はましお」に搭載のマルチビーム測深装置³⁶⁾で取得した高品質な測深データ(スワス幅±55度かつオーバーラップ率100%)から CUBE 水深を出力しており、結果を図-2.8 に示す。CUBE 水深は、手動によるノイズ処理は全く行っていないものの、重なっている沈船漁礁の詳細な形状まで鮮明に可視化することができた。さらに、CUBE 水深と測深点を同時にプロットすると、CUBE 水深は細かい測深ノイズに影響されず、複数測線で捉えられている比高 20 cm 程度の非常に小さい異物が捉えられていることが分かる。このような高品質かつ高密度なデータを取得すれば、目視判断による仕上げ処理の手間を殆どかけることなく、水路測量の最終成果として即座に使えるレベルの CUBE 水深が得られる。以上から、CUBE 処理は水路測量において高精度な水深データを生成するための重要な手法となり、今後の水路測量においてますます重要な役割を果たすことが期待されている。ただし、住吉らは、CUBE 水深測量成果作成には、ノイズの少ない高品質なマルチビーム測深データを高密度に取得することが前提であり、必ずしも万能ではないと述べており、CUBE による統計処理を有効に機能させるための条件を提案している。

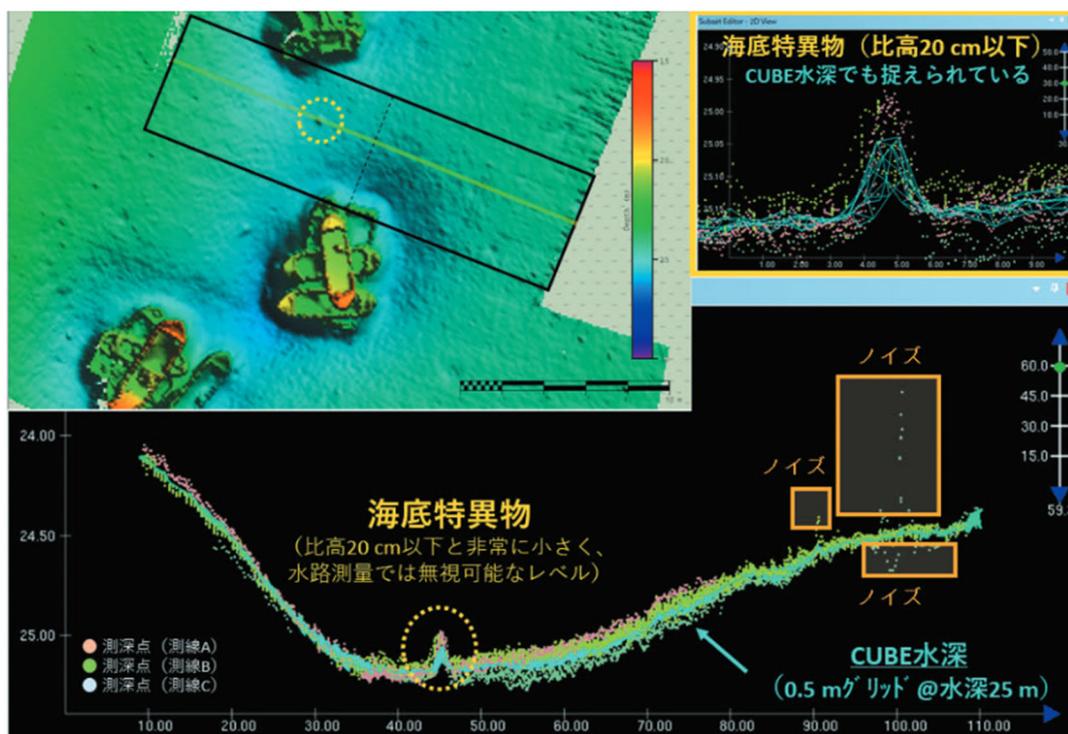


図-2.8 測量船「はましお」による CUBE 水深と CUBE 水深を推定する基となった全測深点
(ノイズ処理は未実施)

(住吉昌直ら：「マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について：海外水路機関における最適化の事例紹介」図 5 より抜粋)

2.4.5 グリーンレーザ搭載ドローンによる浚渫土砂処分場のモニタリング

昨今、港湾の機能を維持するため、船舶の大型化等の港湾整備が進められているが、航路・泊地の増深や維持管理に伴い発生する浚渫土砂の処分場や埋立地が不足しているという問題がある。この課題に対処するためには、圧密沈下による処分場の延命化や受入容量の増加を図る減容化施工が必要である。昨年度、茨木ら³⁷⁾は浚渫土の増加に伴う土砂処分場の受入容量不足が課題であることを踏まえ、減容化施工の効果的なモニタリング手法として、UAV グリーンレーザの計測技術の適用を検証した。検証内容として、調整点による補正なしの状態での精度検証を行った。また、現地土砂処分場で計測を実施し、土砂処分場の水質、底質、濁度の側面から計測結果をまとめ、活用方法並びに今後の課題について考察している。検証結果として、土砂処分場のような調整点の設置が困難な箇所における計測の精度検証として、調整点で未調整の精度を検証した結果、すべての高度で±70mmの精度を満たすことを確認している。このことから、調整点を用いずに、±10cmの精度が要求される減容化施工の起工測量への適用が可能だと考えられる。また、現地処分場における測深結果の標高段彩図および断面図からは、一定の水深で欠測が発生し、水中の中間層のノイズが地形再現に影響を与えていることが観察された。この課題に対処するため、試験プールを使用して水底の点群が取得できない原因について水質、底質、濁度の視点から検証を行った。検証概要を図-2.9に示す。水質の検証においては、河川から海洋に大量に流出する腐植物質であるフミン物質に焦点を当て、フミン酸を含む堆肥を使用して行った検証結果では、堆肥を用いた試験プールで水底の点密度が減少することが確認されている。この結果から、処分場が河口に位置す

る場合、フミン物質によりグリーンレーザが吸収される可能性が考えられる。次に、底質の比較においては、試験プールに沈める資材の色を変えて検証を行ったが、同程度の濁度であっても水底の点密度には差が見られなかった。

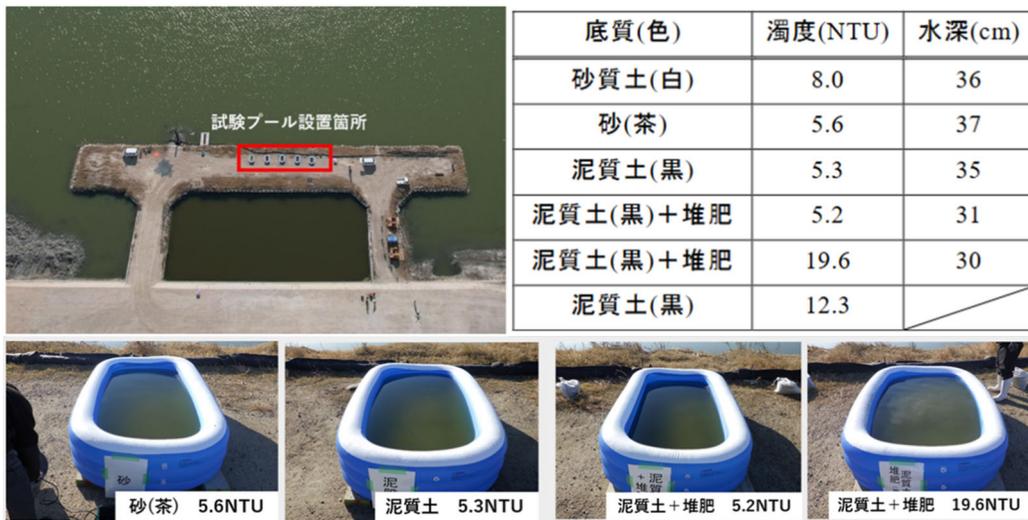


図-2.9 UAV グリーンレーザ計測の試験プールによる検証概要
(茨木 2023 の図を編集)

さらに、濁度の増加に伴う水底点密度の減少と試験プールの点群取得結果から、土砂処分場で水底地形が把握できなかった原因は濁度の影響が大きいと推察される。一方で、図-2.10 に示すように、濁度が 5.3NTU 以下である条件では、水深 35cm 以下の計測に適用できることが確認され、特に減容化施工前の浅い水深の計測や浮遊物質が滞留していない箇所において有効であると考えられる。さらに、対地高度の高度化により測深能力が向上したことから、今後は対地高度、ビーム発散角、測深能力の関係を把握し、減容化のモニタリング手法として適切な計測条件を検討する必要がある。また、水部においては対空標識の設置ができないため、水中の精度の評価が課題であり、水中の精度向上のためには、現地の海水や濁度に適した屈折率の検証も必要であると結論付けている。本年度は、今プロジェクトを継続し、同現場で UAV グリーンレーザ計測を実施する。詳しくは第 4 章にて説明する。

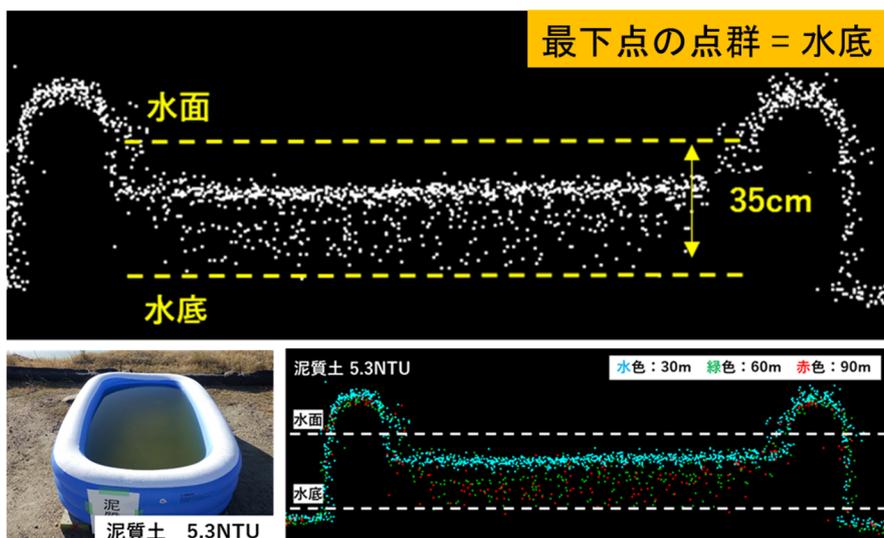


図-2.10 UAV グリーンレーザ計測で取得した点群データと水底地形

2.5 本章のまとめと本研究の位置づけ

本論文はそして章の最後には、これらの整理した既往研究や第1章で述べた背景などをもとに本研究の位置づけや新規性について述べる。

浚渫工における施工管理は、有人船のマルチビーム測量や、測量によって得られた膨大な3次元点群データの処理、土砂処分場においての水位標の経験と勘に頼った目視観測などは、多くの課題がある。その課題解決を目的とした研究を実務検証できることは前例が少ない。より現場を再現した計測・検証ができることが強みで、浚渫現場において今回実施するUSV測量+CUBE処理が従来法(有人船によるマルチビーム測量+手動によるデータ処理)の代替案になり得るのか、施工管理に採用できるのか検証する。

土砂処分場において実施するUAVグリーンレーザ測量は点群取得と濁度の関係を検証する。以上のことは、浚渫工において新たな測量・モニタリング手法の提案ができると考えられる。本研究の新規性は以下に示すとおりである。

新規性

- 実際に浚渫工事が実施された航路での自律航行小型船舶 USV を用いたマルチビーム測深
- 実際の航路を計測したデータへの CUBE 処理の適用
- 双胴船舶 (フロートタイプ)を用いた高精度な水路測量
- 浚渫航路という複雑な環境下での USV の運用制御, データ取得法
- 大量の3次元点群データをリアルタイム処理し, 浚渫量の計測を実現
- 計測結果の精度評価や解析手法
- 実際の土砂処分場での UAV グリーンレーザ測量による計測
- 濁度の変化と点群取得の関係性
- 2種類の UAV グリーンレーザの特性の違い

第3章 自律航行型小型船舶(USV)による深淺測量

3.1 USV技術の概説

本章では、測深方法や自律航行型小型船舶（USV）による深淺測量，また超音波計測調査の概要について述べる。本研究開発は，第1章で述べた浚渫航路のモニタリング技術の可能性を検討するものである。グリーンレーザ搭載ドローンによる計測技術開発については次章にて説明する。第3.2節では計測に関わる諸元，主に使用する計測機器や計測現場，現地作業内容について詳しく説明する。その後，第3.3節ではデータ収集および処理手順に焦点を当てる。最後に，第3.4節では収集されたデータの解析結果とそれに基づく考察を行う。章全体を通して，USVによるマルチソナー測量の手法とその結果について包括的に検討する。

3.2 USVを用いた計測の課題

海底地形を面的かつ詳細に計測するスワス測深には，図-3.1に示すよう，主にミルズクロス方式に代表されるマルチビーム測深と，インターフェロメトリ方式に代表されるインターフェロメトリ測深の2種類があり，3次元点群データの取得にはマルチビーム測深が用いられる³²⁾。スワス測深とは，測量船の左右方向に指向性の鋭い音響ビームを海底に照射し，船の進行とともに一括で多数点の水深値を計測する測深システムである。ミルズクロス方式のビームフォーミングによる音波計測では，音波照射範囲の中心に近い領域ではデータが細くなるが，各角度に対する往復時間の解が1つであるため，岸壁前面や岩礁帯などの凹凸の激しい地形において高い施工精度で計測することが可能である。一方，インターフェロメトリ方式では干渉波を用いるため，音波照射範囲の中心周辺では計測点が極端に少なくなるが，スワス幅はミルズクロスよりも広範囲（水深の8～12倍）にわたり，多くの計測点を得ることができる。特に極浅海域では，マルチビームよりも効率的な測深が期待されるが，岸壁や岩礁帯などの凹凸の激しい地形に対しては，海底面と壁の反射信号が干渉して正確な計測が難しい場合がある。



図-3.1 スワス測深システム（左：マルチビーム，右：インターフェロメトリ）
（「海洋調査技術マニュアルー深淺測量ー（（一社）海洋調査協会）」より転載）

先述のように，港湾の浚渫航路の計測に用いられる手法には，有人船舶，USV，UUV等によるナローマルチビーム測量がある。ナローマルチビームは，音波を細く絞ったナロービームを多数発信するマルチビームソナーであり，広い範囲の海底形状を面的かつ高密度に計測できるため，浚渫航路の精密調査に適している。令和3年3月には，マルチビームの浚渫工への適用に関するマニュアル¹¹⁾が国土交通省港湾局により公開されたが，ASVやAUV等の自律走行型の測量機器活用は想定されていない。これらの測量機器は，迅速・簡便・低コストの測量手法として今後導入され

ていくと考えられ、USV、UUV 適用の課題整理と適用範囲の整理には意義があると考えられる。有人船舶を用いた測量は、操作性や精度に優れる一方で、人件費や安全性の観点から課題がある。USV は GPS や音響測距儀を搭載し、予め設定された航路の自律航行が可能であるものの、通信環境に左右されやすい。UUV は有人調査船に比べて低コストで効率的かつ、人が介在しない完全自律型であるため、将来の測量手法として期待されている。ただし、UUV は水中での電波受信が困難であることなど、深海という過酷な環境下では精度の確保が難しく、航行経路の最適化も困難になるといった課題がある。

そこで本研究では、ナローマルチビーム音響測深機を搭載した小型船舶 USV を用いて計測を実施し、自律航行小型船舶による深淺測量技術について海域での活用に適した高精度化及び実用化に向けた検討を行う。また、現場計測によるデータ処理に CUBE 処理を導入することで、データ処理（自動化）工程確立を目指す。その後、結果や得られた情報をもとに、自律航行型小型船舶を用いたマルチビーム測量の港湾への適用を総合的に評価する。計測作業は、作業を適正かつ円滑に実施するため、事前に密接な連絡・打ち合わせを行った上で作業計画書に沿って実施するものとする。また、作業を実施する海域を管轄する機関に予め許可申請をする。作業内容・安全対策等を説明し、明確にすることで作業許可申請を得る。さらに、測量箇所は大型工場が隣接し大型船入船の可能性が高いため、作業中に大型船と測量船が衝突することを避けるよう細心の注意を払う。具体的な措置としては、事前に作業周知する、船に旗を設置するといったことがあげられる。加えて、センサの設定や測位システムのパラメータを検討し、必要なデータの取得計画を策定する。

図-3.2 に小型無人計測艇による超音波計測の概念図を示す。USV (Unmanned Surface Vehicle) は、小型の無人計測艇であり、自律的に航行・船位保持が可能な船舶である。マルチビーム測深機などの計測機器を搭載するプラットフォームとして使用されており、従来の有人船舶と比較して小型かつ軽量なことが特徴である。USV は通常、電気モーターで推進され、リチウムイオン電池などで動作する。船体は FRP (繊維強化プラスチック) やアルミ合金などの軽量の素材で作られる。船体には水中カメラ、GNSS、慣性航法装置、レーダー、ソナーなどの各種センサーと通信機器が搭載され、これらのセンサーからの情報をもとに統合制御システムが自律航行やデータ収集を行う。加えて、USV の最大の利点は、有人船舶に比べて運用コストが低いことである。燃料費のほかに船員の人件費が不要なため、経済的に長時間の調査が可能となる。また、小型であるため浅瀬などの入り組んだ海域での調査に適している。一方で、通信圏外では自律制御ができないという制限がある。USV は水路測量、海洋観測、洋上風力発電の事前調査、海中管路やケーブルの点検、海洋資源探査など様々な分野で活用されている。特に海底地形の 3 次元マッピングに重宝されており、RTK-GNSS による位置情報の補正や、動揺センサーによる揺れの補正を行うことで、精度の高い 3 次元水中計測を実現している。

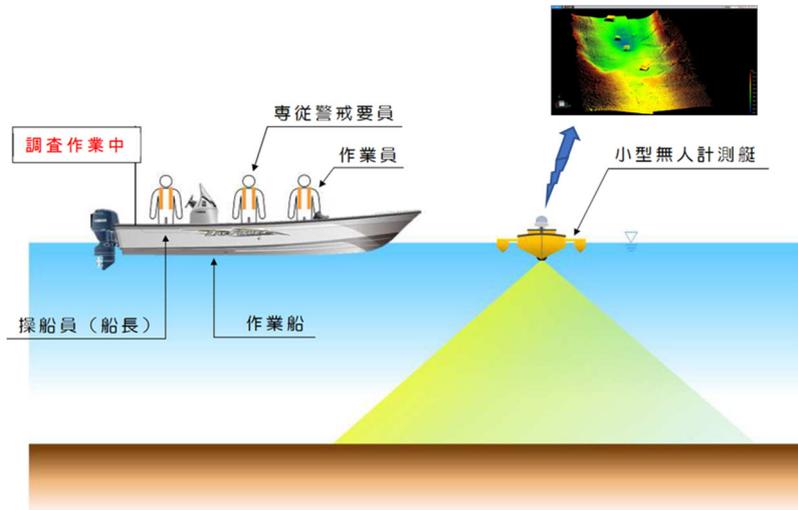


図-3.2 小型無人計測艇による超音波計測の概念図

マルチビーム音波測深機の測定誤差要因として、トンネル効果・スマイルカーブ・クロストーク・キャタピラの4つが主にある。各現象エラーイメージを図-3.3、図-3.4、図-3.5、図-3.6に示す。これらの誤差は地形に依存し、以下にそれぞれの誤差要因について説明する。また、各現象の対処方法についても述べるが、誤差を完全に除去することは困難であるため、誤差要因を理解し、データ処理時に考慮することが重要となる。

1. トンネル効果現象：強い音波は海水中を伝播するときに、理論上の音速よりも速く進む傾向がある。中央の反射強度は強く、その結果、中央付近が実際の海底より深い位置に仮想的な海底面が計測される。この現象をトンネル効果と呼ぶ。また、両端の受信波に反射強度の強い中央付近の信号が入り込み、実際より浅い位置に計測される。トンネル効果は、水深の急激な変化や地形の複雑な領域で特に発生しやすくなる。このような誤差を軽減させるための対処法としては、スワス角の幅を狭め、弱反射エコーとなる範囲を減少させることが考えられる。これに加え、水中音速度の計測回数を増やし正確な水中音速度を得ることや、測深機のキャリブレーションをすることで問題を低減させることが可能である。

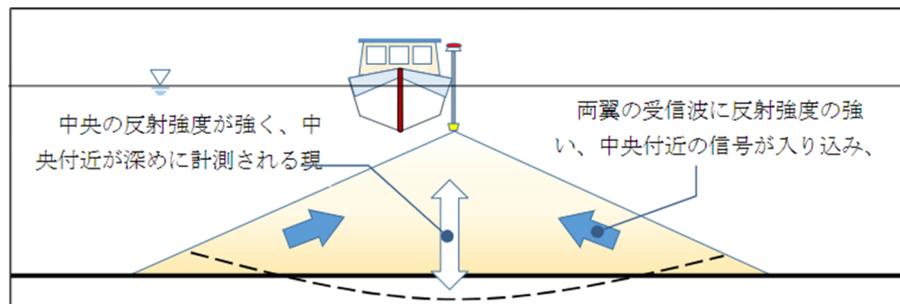


図-3.3 トンネル効果現象エラーイメージ

2. スマイルカーブ現象：送受波器の特性上、ビームの外側ほど音波の出力強度が弱くなる。弱い音波は速度が遅くなるため、音波が発信された位置から放射状に広がり、真の海底面よりも浅い位置に観測される。これにより測定データが両端で曲がり、平坦な海底がスマイルのような曲線状に計測されてしまい誤差が生じる。対処方法は、トンネル効果現象の対

処方法と同様である。

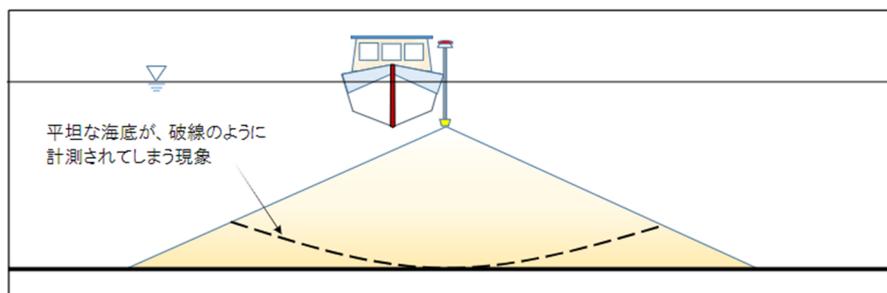


図-3.4 スマイルカーブ現象エラーイメージ

3. クロストーク現象: クロストークは、ビーム間の相互干渉に起因する。隣接する複数のビームが同時に発信され、反射波が互いに影響し合うことで生じる誤差である。これにより、複数のビームが同じ地点を同時に測定するため、その地点の水深が実際よりも深く見積もられる、もしくは本来の海底面よりも浅い誤差が生じるといった現象が起きる。船速を下げ、送信出力を抑えることである程度抑制することができる。

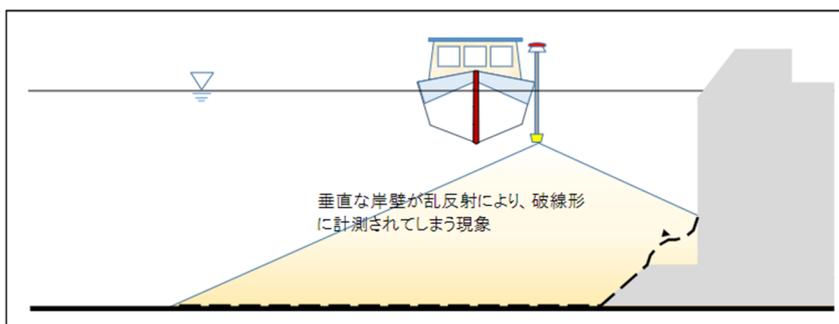


図-3.5 クロストーク現象エラーイメージ

4. キャタピラ現象: キャタピラは、ロール・ピッチ・ヨーの各動揺成分が正しく補正されないことにより、ビームがショット毎に上下左右に動揺し、平坦な海底地形がキャタピラのように凹凸を繰り返したような地形となる現象である。また、音波の発信と受信が同一のソナーヘッドから行われる場合にも誤差が生じる。この場合、音波が水中を伝わる過程で干渉することや、海底地形の凹凸によって複数の反射波が生じることで、水深が実際よりも浅くもしくは深く見えることがある。この現象は、測深作業中には確認が困難であるため、予め動揺センサの各種フィルタ設定を正しく行うことが重要となる。また、海象条件が良好でない場合は速やかに作業を中止することも誤差発生を防ぐ一つの手段である。キャタピラは特に、ソナーヘッドの中心付近で顕著に発生しやすい。

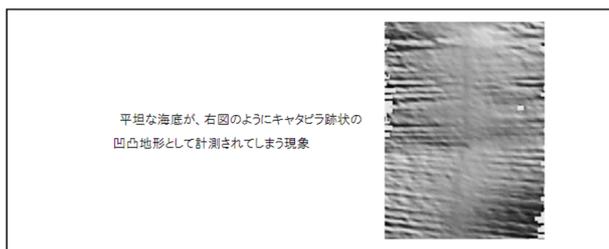


図-3.6 キャタピラ現象エラーイメージ

また、計測時の留意点として未測部が発生する可能性を考慮することがある。海底地形の影や音波が届かない区域だけでなく、航路計画時に重複率が確保されていても図-3.7 に示すような未測部が発生する可能性がある。未測領域を減らす対策としては、事前に岩礁や砂泥質などの地形調査することや、測量時にスワ幅やビーム間隔を考慮することがあげられる。また、測線間隔を密にする、低速での測量、複数方向からの測量を行うといったことで未測領域を減らすことが可能となる。さらに、未測領域が残る場合は、単ビーム音響測深機による真上からの測深で補完することが一般的である。

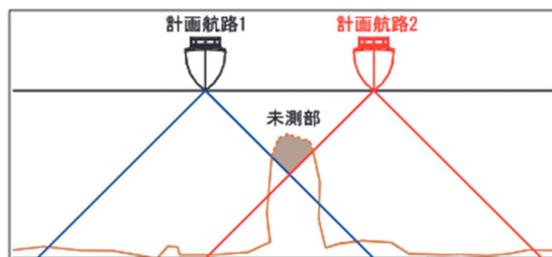


図-3.7 未測発生イメージ図

3.2.1 USV計測のハード仕様

本研究では、図-3.8 に示すマルチビーム音響測深機搭載 USV を用いて計測を行う。表-3.1 に今計測で使用した機器情報、表-3.2 にナローマルチビームの性能を示す。

本計測では、自律航行小型船舶 SEA OTTER へ超高解像度ナローマルチビームソナーシステム NORBIT 社製 WINGHEAD i77h (測位・動揺検出器 Applanix 社製 POS/MV 内蔵) を搭載した計測機器を用いる。このソナーシステム WINGHEAD は、ソナー部と動揺センサ (IMU: Inertial Measurement Unit)、表層水中音速時計が一体となった超高解像度ナローマルチビームであり、カーブドアレーを採用している。そのため、本ソナーはスワ幅が最大 210° まで取得でき、水面ぎりぎりまでデータを取得することが可能である。また、従来のマルチビームで使用されている動揺センサと比較し、品質の高いモデルが使用されているため、安定した信頼性の高い測深が可能となる。さらに、ソナーから発信されるビーム数は、従来の 512 本に比べ、1024 本と高精度のデータを取得できるという利点もある。NORBIT WINGHEAD 構成図を図-3.9 に示す。

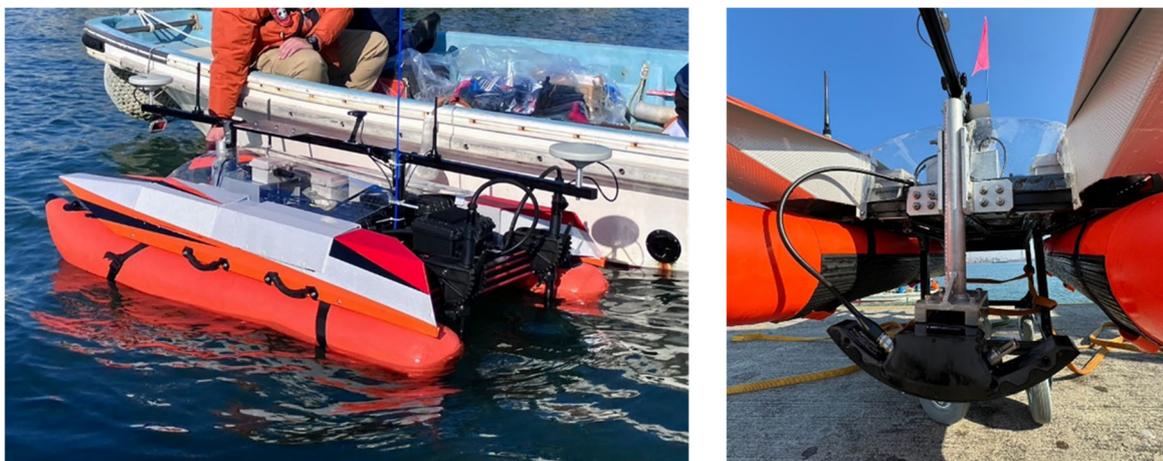


図-3.8 左：マルチビーム音響測深機搭載 USV の外観，右：マルチビーム音響測深機

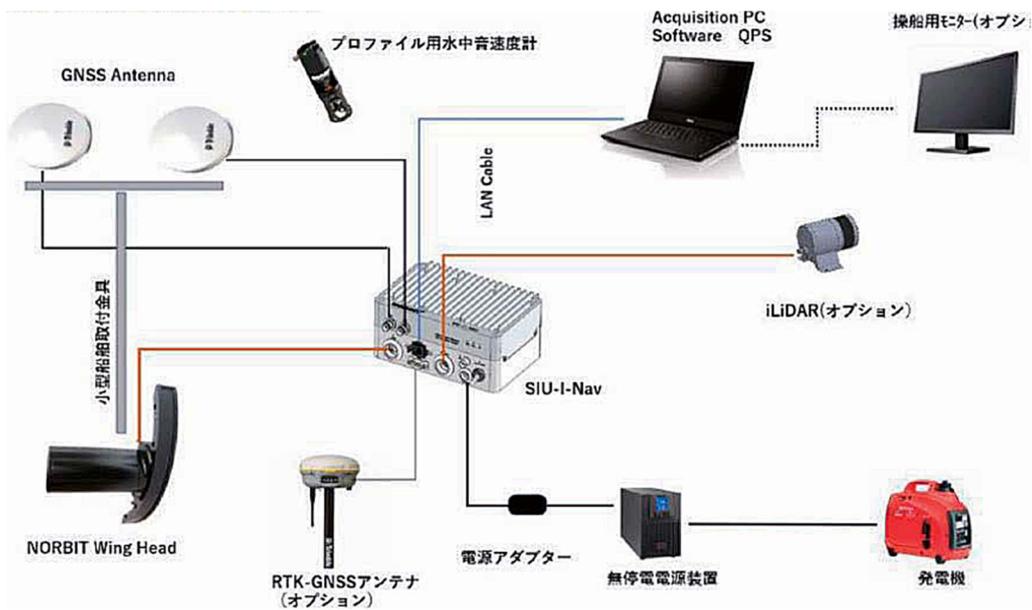


図-3.9 NORBIT WINGHEAD 構成図

表-3.1 機器情報

名称	性能	用途
自律航行小型船舶 	SEA OTTER タイプ : フロートタイプ 寸法 : 全長約 2.10m : 船幅約 1.08m : 全高約 0.91m : 喫水約 0.15m 重量 : 約 80 kg 運航速度 : 0.0~2.0 m/s 航行時間 : 5 時間 動力 : 600W エレキモーター2 基	測 深
マルチビーム音響測深機 GNSS 測量機 動揺補正装置 方位計 	NORBIT WINGHEAD i77h 可測深度 : 0.2~ 300m 周波数 : 200~700kHz (計測は400kHz) ビーム幅 : 0.5° × 0.9° 受信ビーム数 : 256, 512, 1024点 (計測は512点) 探査範囲 : 20~210° (計測は110°) データ更新間隔 : 最大50 回/秒 (水深に依存) POS/MV (APPLANIX) 内蔵	測 深 船位決定

	<p>測位精度</p> <p>水平位置：±8mm+1ppm×DISTANCE (FROM RTK DISTION)</p> <p>垂直位置：±15mm+1ppm×DISTANCE (FROM RTK DISTION)</p> <p>ロール及びピッチ：0.01°</p> <p>ヒーブ：ヒーブ振幅の5% or 5cm 真方位：0.02°</p>	
<p>水中音速度計</p> 	<p>AML-3 音速度計 (AML SV-Xchange™)</p> <p>測定精度：±0.025m/s 分解能：0.001m/s 測定範囲：1375m/s～1625m/s</p> <p>圧力計 (AML P-Xchange™)</p> <p>測定精度：0.05%FS 分解能：0.02%FS 測定範囲：100m</p>	測深
<p>表面音速度計</p>	<p>AML SV-Xchange™</p> <p>音速度計 測定精度：±0.025m/s 分解能：0.001m/s 測定範囲：1375m/s～1625m/s</p>	測深

表-3.2 ナローマルチビームの性能

サイズ	ソナー	H447mm×L296mm×W101.9mm
	船上ユニット	H83mm×L200mm×W140mm
重量	ソナー	7.4kg (空中), 4.0kg (水中) ※ブラケット含む
		6.9kg (空中), 3.8kg (水中) ※ブラケット無し
	船上ユニット	2.5kg
周波数	200～700kHz	
スワス角	20～210°	
受信ビーム数	256, 512, 1024 点	

3.2.2 計測現場と計測作業の概要

本項目では、本研究で実施した計測現場について概説する.図-3.10 に計測範囲，測量場所を示す.岡山県倉敷市玉島乙島の水島港のうち，赤枠（四角）で囲まれた範囲で USV によるマルチビーム深淺測量を実施した.今区画は，水島港国際物流ターミナルにおける大型船入港可能な浚渫航路として機能しており，実際の浚渫工事（計画水深 12m）後，令和 5 年 5 月 18 日に有人船舶によるマルチビーム測深（出来形測量）が行われた海域である.USV による調査位置図を図-3.11 に示す.図中 a 点，b 点，c 点，d 点で囲まれた領域内で，緑の矢印線のようなルートで走行した.具体的な区画座標を表-3.3 に示す.また，5 月 18 日に実施された出来形測量の施工範囲と深淺図を図-3.12，図-3.13 に示す.

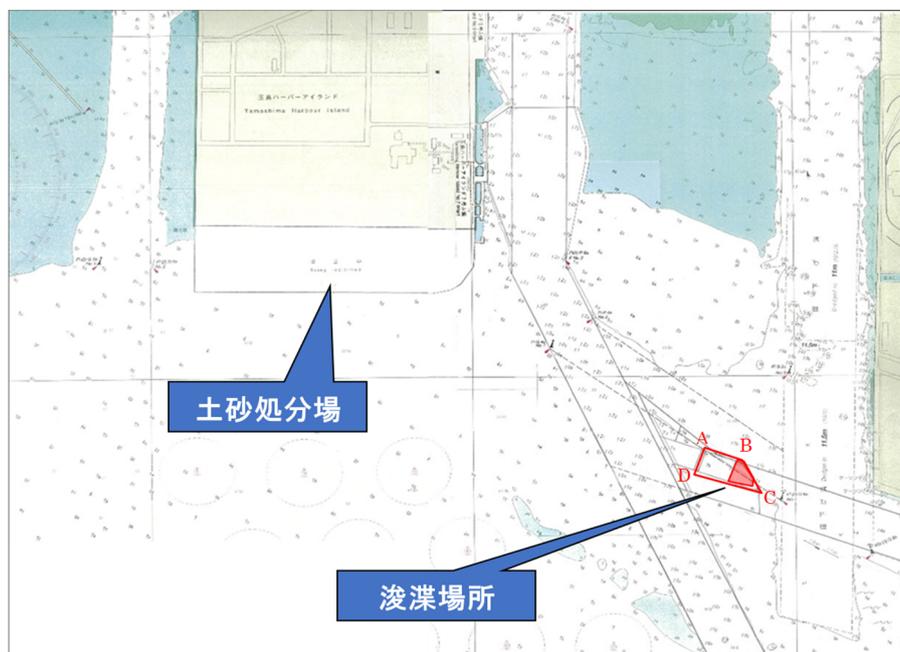


図-3.10 作業範囲

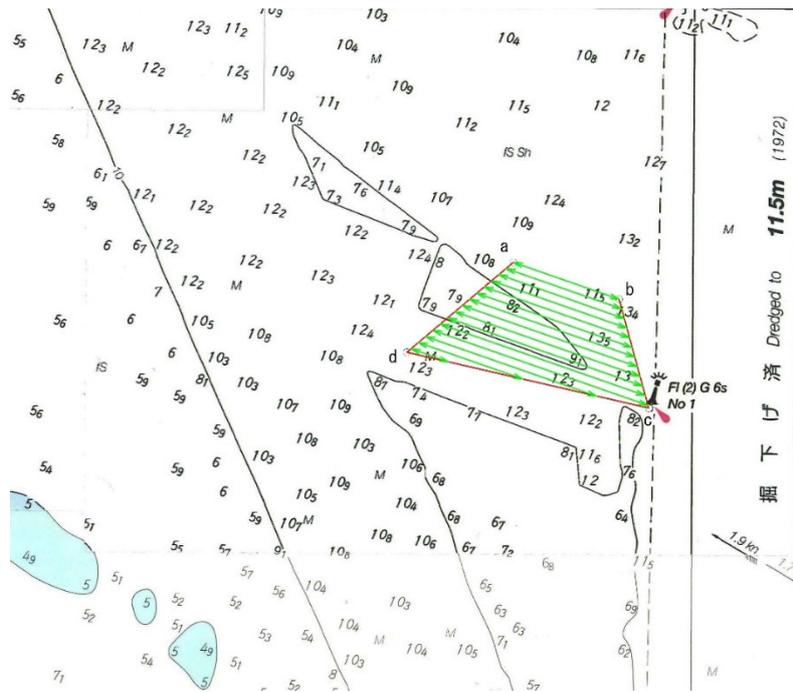


図-3.11 調査位置図

表-3.3 計測範囲座標 (世界測地系 WGS84)

地点	座標	
a点	東経133度41分48.20秒	北緯：34度28分45.58秒
b点	東経133度41分54.81秒	北緯：34度28分43.54秒
c点	東経133度41分57.24秒	北緯：34度28分37.77秒
d点	東経133度41分41.46秒	北緯：34度28分41.17秒

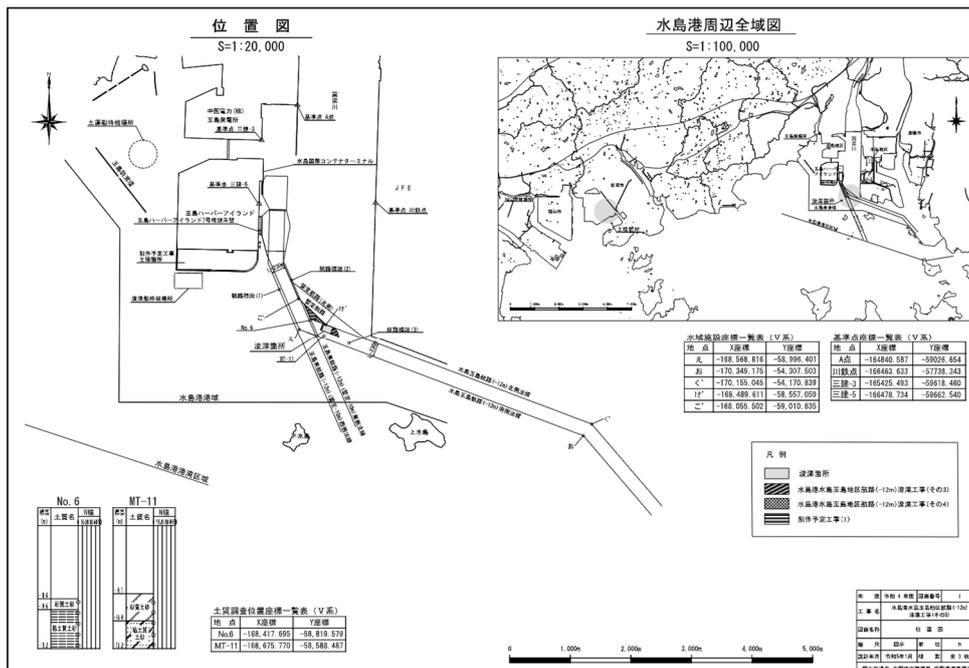


図-3.12 浚渫工事(その3)施工範囲

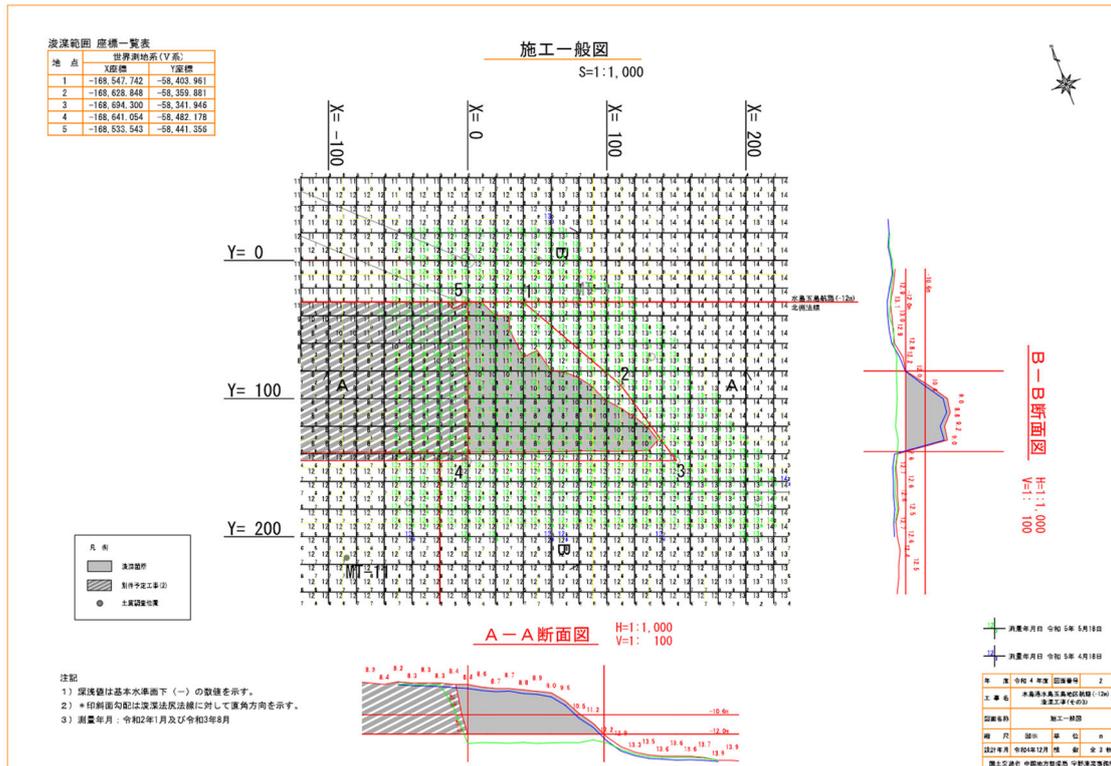


図-3.13 浚渫工事(その3)深淺図

3.3 計測作業の概要

計測は、令和5年(2023年)12月4日に実施した。当日の天気は、雨風のない良好な天気であった。図-3.14に示す作業フローに従い、計測作業を進める。各作業の詳細は後述する。また、送受波器装着図を図-3.15に、計測条件の概要を表-3.4に示す。計測条件は、計測データの必要な精度をクリアし、また精度を向上させるため、測量区域の水深、海底地形、有効測深幅を考慮して、未測深箇所が生じないように測線を設定する必要がある。今回は、CUBE処理を実施するため、準細則に示されるよう、以下(1)~(4)の条件すべてを満たす必要がある。(1) マルチビーム音響測深機により取得した測深データであること、(2) スワス角 $\pm 55^\circ$ (全角 110°) 以内で、左右スワスが100%以上重複した測深データであること、(3) 海上位置測量には、原則としてネットワーク型RTK法又は後処理キネマティック法若しくは同等以上の測定精度の手法を用いていること、(4) 送受波器の各種バイアス値が0.01度位まで求められていること。これらにより、適切な測深が実施されデータの信頼性が確保される。また、取得点密度は、スワス角、水深、船速、周波数、および重複度合いの組み合わせによって決定されるものである。船速が遅いほど、データの密度を高くすることが可能であり、測深時の船速が速すぎると誤差が生じやすくなる。また、データ間隔が粗くなる可能性もある。そのため、事前の測量計画段階で船速の上限が決定され、測深時には船速に注意を払う必要がある。ただし、最低限の船速を確保する必要もある。

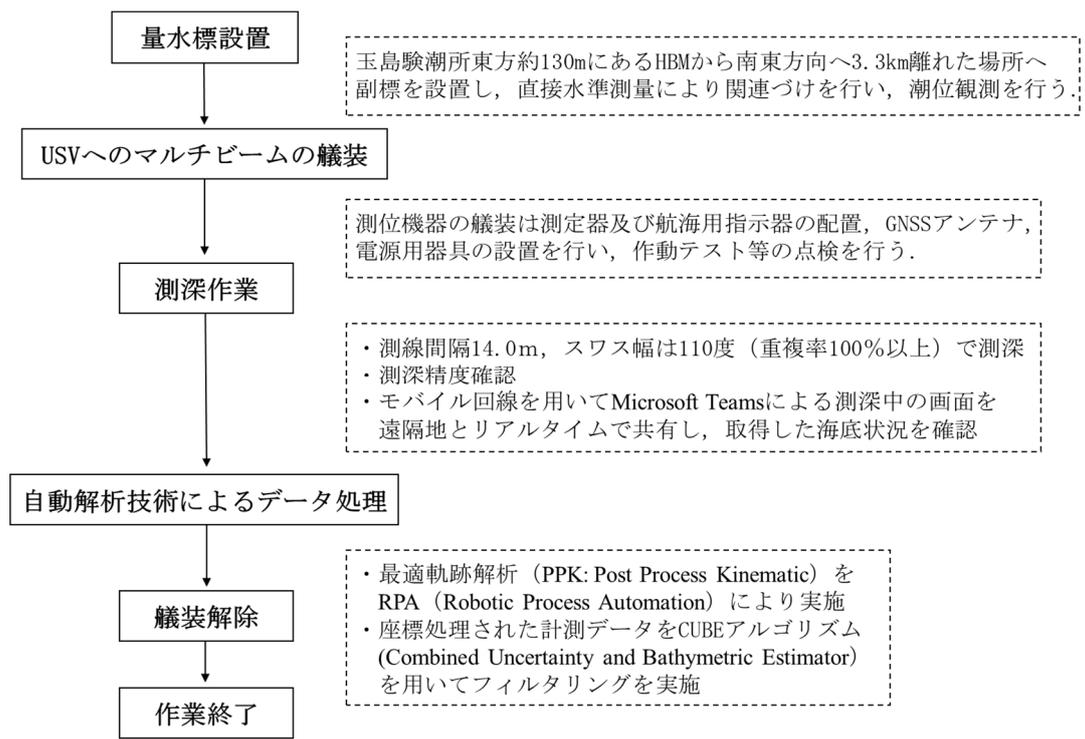


図-3.14 作業フロー

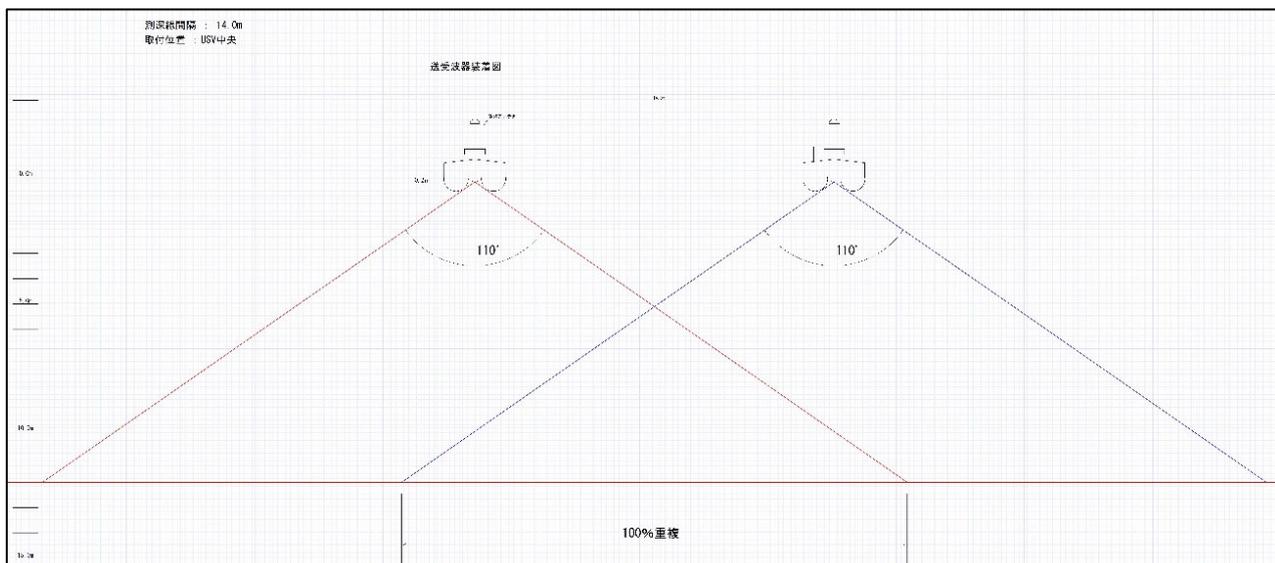


図-3.15 送受波器装着図

表-3.4 計測条件

測線間隔	14.0m	計画水深	12.0m
未測深幅	0.0m	重複率	100%以上
スワス幅	110°	喫水	0.2m
周波数	400khz	ビーム幅	0.5°×0.9°
ビーム数	512	フットプリント	直下: 0.10m 最外: 0.31m

① 量水標設置による潮位観測

玉島験潮所東方約 130m にある HBM (金属標)から南東方向へ 3.3km 離れた場所へ副標を設置し、直接水準測量により関連付けを行い、潮位(潮汐)観測を行う。水準測量と量水標設置による潮位観測の様子を図-3.16 に示す。

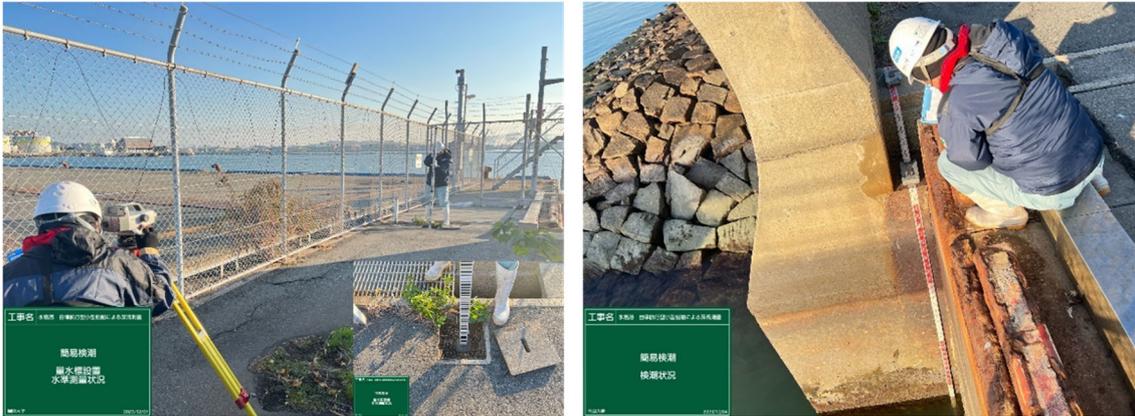


図-3.16 左：水準測量の様子，右：検潮の様子

マルチビーム測深においては、高さ方向に関して海面からの測定を行うよう海上保安庁により定められている³⁸⁾。そのため計測の前段階として、潮位変動の観測や水深データの基準化を行うために量水標を計測対象海域に設置する。量水標は潮位の基準点として機能し、潮位情報と組み合わせることで、潮汐や潮流、海面変動の影響を考慮して計測を行うことが可能となる。設置された量水標と周辺地点の高さを水準器を用いて測量する水準測量を行うことで、量水標が地上の標高に関連付けられ、地上の基準点からの正確な水深が計算可能になる。これらにより、海域内でのマルチビーム測深データがより正確で一貫性のあるものとなり、地形データの精度向上が期待される。なお、地域によって公設の検潮所が公表するリアルタイムでの潮位データを使用する場合もあるが、水島港の場合は県の検潮所が存在するものの、データが公表されていないため、量水標を使用し水面観測を実施する。

今測量では、基準となる高さに海上保安庁が公表している HBM (水準点) を使用する。具体的には、前述のとおり玉島験潮所東方にある HBM (金属標) が測定の基準として告示されている。しかし、計測を実施する現場から玉島験潮所が離れた場所に位置していた (測定現場：玉島ハーバーアイランド東側、玉島験潮所：玉島ハーバーアイランド西側に位置する) ため、潮時差の影響を考慮し、現地に近い玉島ハーバーアイランドの東側に量水標を設置し、水面観測を行う。最低水面は、「平成 14 年海上保安庁告示第 103 号 平均水面、最高水面及び最低水面一覧表」³⁹⁾ (以下、一覧表と記載する。) に記載の“玉島験潮所東方約 130m にある HBM (金属標) 頂下 4.52m” を使用するものとする。 Z_0 は一覧表記載の 2.00m (玉島) を使用する。潮高改正は、直接水準測量により HBM と関連付けた副標による観測資料を使用する。また、測深当日の測深前、測深後に仮 BM から副標頂間の高差を点検し観測基準面に変動がないことを確認する。最低水面の算出は以下のように行う。

基準水準標高から算出した観測基準面上 $DL : DL = (II) + (I) - (III)$

なお、Ⅰ：副標～HBMの高低差（水準測量より）、Ⅱ：副標長、Ⅲ：玉島験潮所東方約130mにあるHBM（金属標）頂下4.52mとする。今測量では、副標長4.165mを使用し、量水標の値をそのまま使用できる仕様にしたため、最低水面は「玉島験潮所東方約130mにあるHBM（金属標）頂下4.52m」「副標観測基準面上0.00m」とし潮高改正を行うこととする。実際の測量中は、このDL0の位置から量水標のメモリを読み取り、その差分が測定する潮位となる。実際の水位（潮位）補正は②艀装・テスト(2) マルチビーム測深の補正方法において行う。

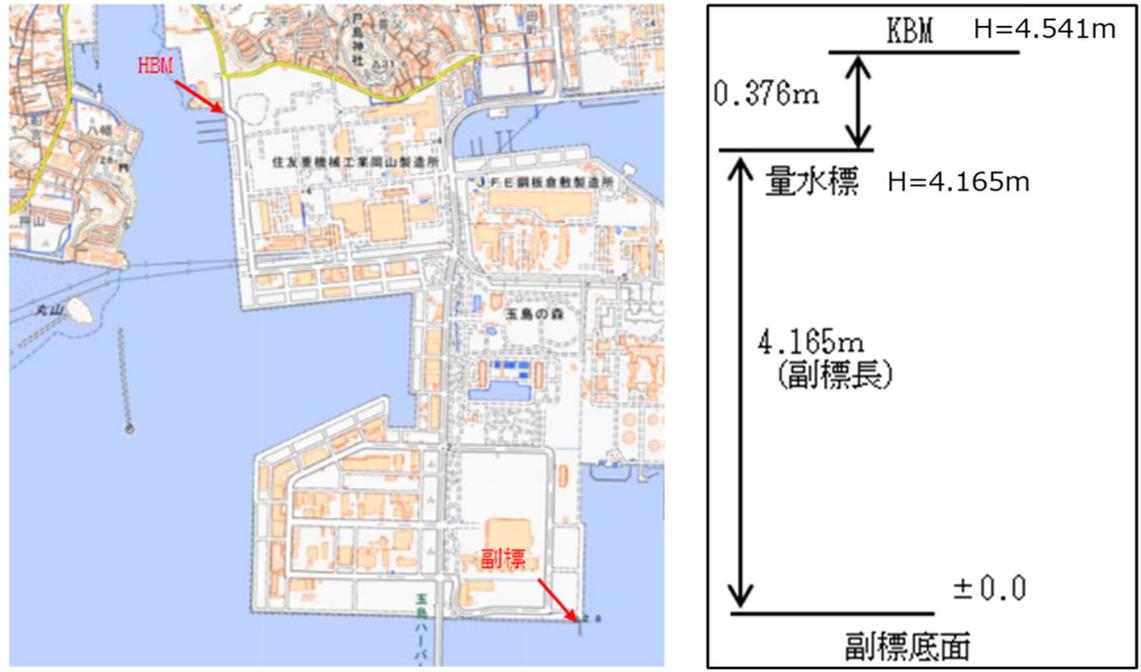


図-3.17 左：位置図，右：潮位関係図

② 艀装・テスト

測深ノイズが可能な限り生じない高精度なデータ取得のためには、測深作業前の事前準備とマルチビーム測深機を正しく使用することが肝要である。測位機器の艀装は測定器および航海用指示器の配置、GNSS アンテナ、電源用器具の設置を行う。艀装完了後は、風や波等の天候の確認、各機器の作動確認や測量船の走行といった作動テスト等の点検を行い、点検簿に記入しながら各機器の正常動作を確認する。また、パッチテスト及びバーチェック作業に適する場所等の確認をする。インストラクションの測定後の艀装状況を図-3.18 に示す。

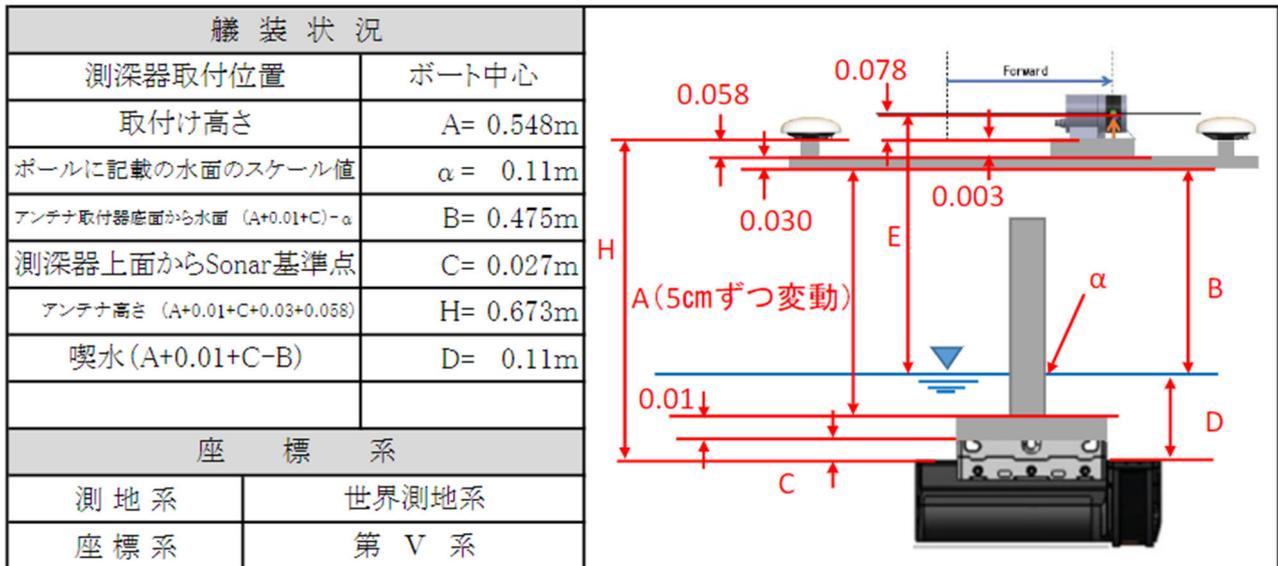


図-3.18 艀装状況

(1) USV へのマルチビームの艀装

艀装の様子を図-3.19 に示す。測量船の点検実施後、測量船にマルチビーム測深機器本体および周辺機器を装備・設置し、機器の位置関係（オフセット値）を明確にしたうえで、測深中も位置関係が変化しない様にロープ、テープ等で強固に固定する。また、ケーブルの干渉にも注意する。



図-3.19 艀装の様子

艀装、始業前点検を行った後、図-3.20 赤丸で示す USV 上下架場所（土砂処分場東側棧橋）よりクレーン付きトラックを使用して USV を下架する。



図-3.20 左：USV 上下架場所，右：クレーン付きトラックによる機材荷下ろし

(2) マルチビーム測深の補正方法

測儀装テストとして，測量船にマルチビーム測深機器本体および周辺機器の動作確認等を実施し，キャリブレーションを行う.マルチビーム測深機から得られたデータは，送受波器と海底間の音波の往復時間から，仮定音速 1500m/秒として求めた水深値である.そのため，真の水深値を求めるには以下のような補正を行う必要がある.これらの取得したデータにノイズ処理や水中音速度補正，測位・動揺補正，潮位補正等を行うことで，最終成果物を作成することができる⁴⁰⁾.

1. 喫水補正：喫水とは，船底から水面までの垂直距離である.喫水は船の重量や積載状況によって変化し，マルチビーム装置の水深計測に影響する.そのため，喫水目盛の読み取値を併用して，計測開始前に水面から送受波器までの深さをバーチェック法により値を求めて補正をする.バーチェック法とは，水面を基準とし，反射板を吊り下げ数メートルの高さで固定した後，ソナーヘッドから反射板までの距離をマルチビーム測深機で計測・記録する手法である.水面を基準とした吊り下げ長から，計測されたソナーヘッドと反射板の距離を差し引いたものが，喫水値となる.この喫水の確認作業を3回繰り返し，その平均値を求めると最終的な喫水値とする.今測量では，図-3.18 に示す艀装状況における $D=0.11\text{m}$ が喫水値となる.
2. 水位（潮位）補正：海水面の高さは潮の干満によって変動する.音波の往復時間から求めた水深は，変動する実際の海面からの水深ではないため，測位データや近隣の水位局の観測データ等を用いて補正し，実際の水深にする処理が水位補正である.今測量では，①で実施した量水標設置による潮位観測結果を用いて，潮位補正を行う.
3. 動揺補正（パッチテスト測定）：マルチビーム測深システム（送受波器）は，水面に対して可能な限り水平，垂直に艀装することを基本とするが，船の動揺を完全になくすことは極めて困難であり，音波の射線方向がずれて水深に誤差が生じる.この動揺を動揺センサにより観測し，そのデータをもとに音波の方向を補正するのが動揺補正である.また，船の形

状や固定ワイヤーの張り具合により必ず取り付け誤差が生じる.送受波器に対し3方向(前方(X)・右舷(Y)・下方(Z))における取り付け角度の誤差をバイアス値と呼び、各機器の収録遅延のことをレイテンシーと称する.これらの影響を低減させるため、パッチテスト測定による取り付け角度の誤差補正を行う.バイアス値の種類⁴⁾を図-3.21に、パッチテスト測定方法について図-3.22に示す.

バイアス値の種類

Roll (ロール) : 船の進行方向に対して横方向の取付け角度

Pitch (ピッチ) : 船の進行方向の取付け角度

Yaw (ヨー) : 進行方向に対する送受波器の向き

Latency (レイテンシー) : 遅延時間 (機器に対してデータ転送などを要求してから、返送されるまでの収録遅延)

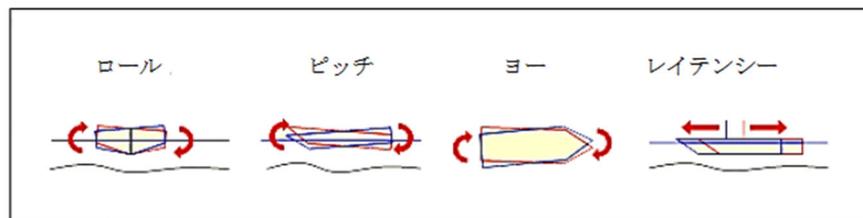


図-3.21 バイアス値の種類

(水産庁漁港漁場整備部 : 「マルチビームを用いた深淺測量マニュアル (浚渫工編)」 図-2.2 より転載)

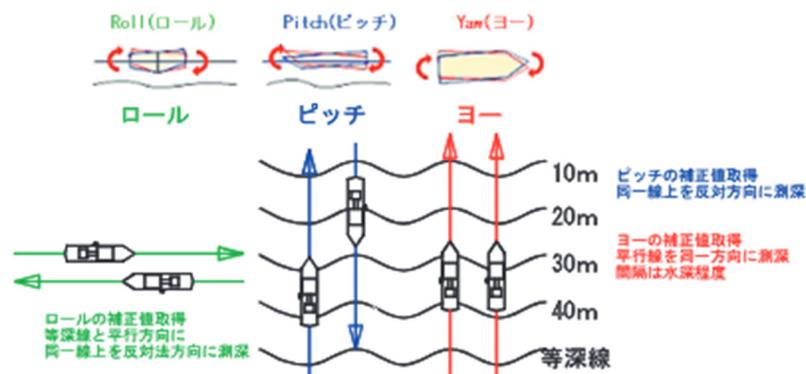


図-3.22 パッチテスト測定方法

(寺松孝浩ら : 「ナローマルチビーム (NMB) の特性を踏まえた計測・解析技術と応用について」 図3 より転載)

パッチテスト

パッチテストは、送受波器の取り付け誤差の補正に有効な統計処理手法である.平行測線、往復測線を基本とし必要に応じて交差測線等を実施する.パッチテストを実施する場所は、岩礁地帯など凹凸の激しい海域は避け、砂浜や港内等の安定したデータが取得できる場所

が望ましい。また、可能な限り海底の傾斜のある箇所を選び、300m 程度測深する。さらに、パッチテストは周辺機器と送受波器の位置関係が変化していないことが前提である。以下に測定条件について述べる。Roll (ロール)の補正值取得のためには、等深線と平行方向に同一線上を反対方向に測深する。Pitch (ピッチ)については、同一線上を反対方向に測深し、Yaw (ヨー)については、水深程度の間隔を空けて平行線を同一方向に測深することで補正值を得られる。Latency (レイテンシー)の補正值取得するためには、同一線上を同一方向に速度を倍以上変えて (3knot と 6knot 程度) 測深する。パッチテストの結果を表-3.5 に示す。バイアス値は概ね 0.05 度単位まで決定する。

表-3.5 パッチテスト結果 (単位: 度)

	ソナー
Roll (ロール)	0.10
Pitch (ピッチ)	0.22
Yaw (ヨー)	0.47
Latency (レイテンシー)	0.000

4. 水中音速度測定: 水中音速度とは、水中での音波速度であり、水温・塩分濃度・水圧等により音速度が変化するため、水質が変化する水域 (音波の屈折率が変わる箇所) で測定し、補正情報を反映する。マルチビームは水中において標準的に 1500m/s の音速度を仮定しているが、水温等の影響で音波の伝達遅延等による誤差を含むため、補正する必要がある。作業中、水中音速度計による音速度測定を行う。音波屈折概要図を図-3.23 に示す。測定位置については、測量海域の中央付近で可能な限り深い地点とする。今測量では、④で実施した水中音速度測定結果を用いて補正を行う。

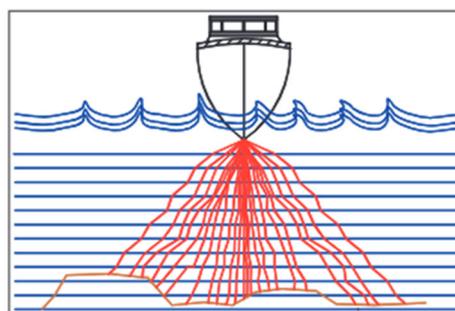


図-3.23 音波屈折概要図

(寺松孝浩ら:「ナローマルチビーム (NMB) の特性を踏まえた計測・解析技術と応用について」図 2 より転載)

③ 測深作業

測線間隔 14.0m, スワス幅 110° (重複率 100%以上), 周波数 400kHz (波長約 3.8m), ビーム数

512 本でマルチビーム測深を行ながら，測深精度を確認する.実際の計測の様子を図-3.24 に示す. 現地での測深作業においては，ノイズの少ない良好なデータを取得するため，マルチビーム測深機の設定を適切に調節することに注意を払い，可能な限り蛇行せず一定の速度で，計画測線上を航走することを心掛ける.測深作業中，大規模なデータ不良箇所・未測域が生じた場合は安全性や作業効率等を適切に考慮して速やかに補再測を実施する.また，計測中は図-3.25 に示すようにモバイル回線を用いて Microsoft Teams による測深中の画面を遠隔地とリアルタイムで共有し，現地にいなくとも取得した海底状況を確認することを実現した.



図-3.24 実際の計測の様子



図-3.25 左：USV 船首に搭載のフロントカメラ，右：Web 会議配信用の現地 PC

④ 水中音速度測定

図-3.26 に示すよう水中音速度の測定を水中音速度計により実施する.航跡図を図-3.27，記録した水中音速度測定結果を図-3.28 に示す.測定位置については，測量海域の中央付近で可能な限り深い地点とし，海況が変化する海域では適切に測定点を配置する.水中音速度計の降下時と引上げ時の測定結果から，最低 1m 毎の平均値に取りまとめ，その結果を収録し解析ソフトウェアで使用できる形式で作成する.作成した水中音速度データを解析ソフトに取り込み適用する.



図-3.26 水中音速度計測の様子

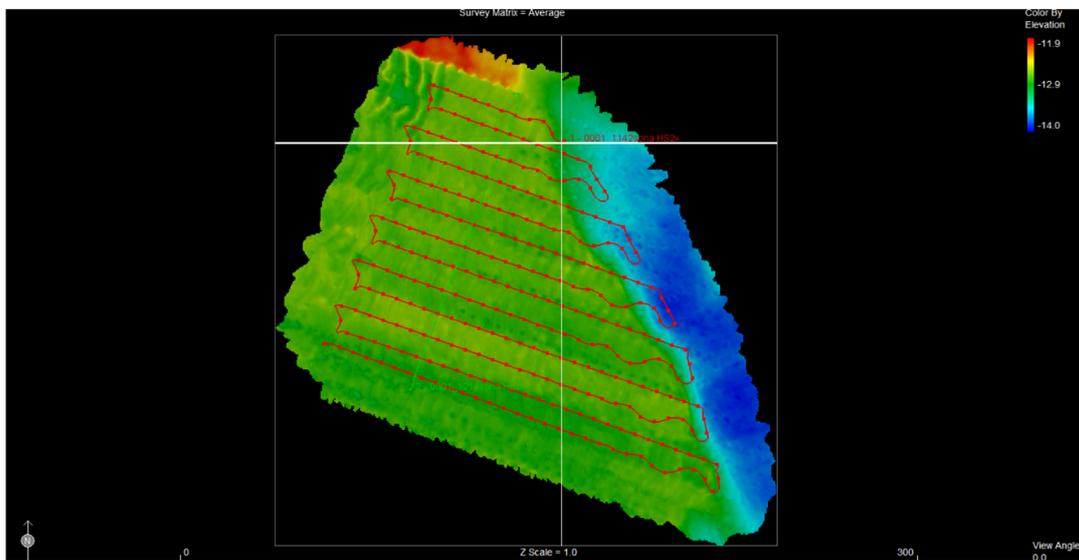


図-3.27 航跡図

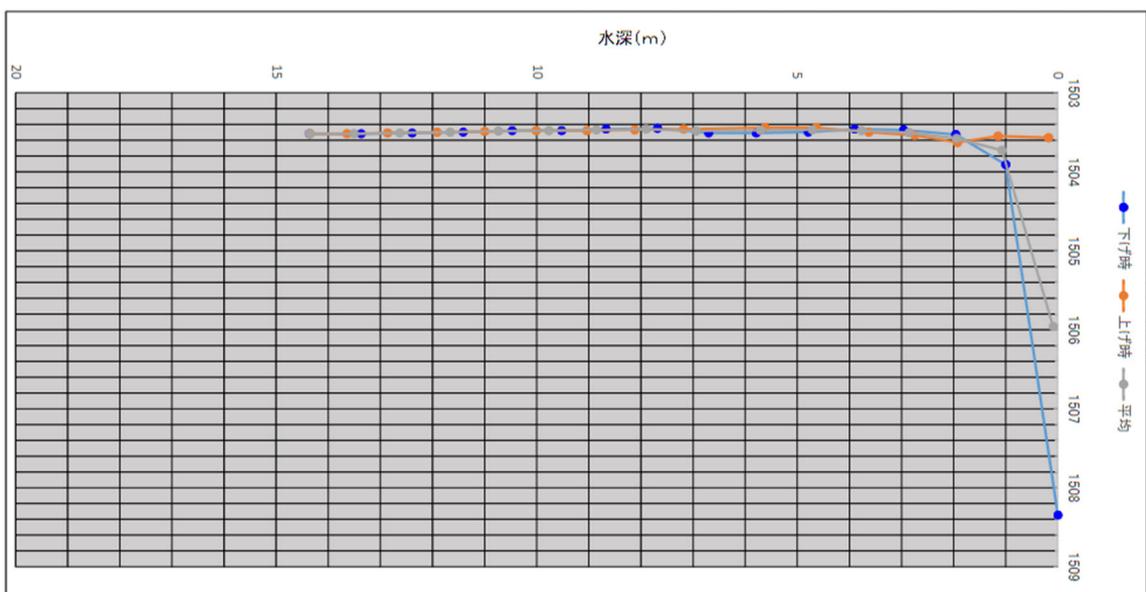


図-3.28 水中音速度計測の様子

⑤ 自動解析技術によるデータ処理と艀装解除

測深作業終了後、艀装解除班とデータ解析班とに分かれて作業を行う。USV を下架した箇所と同様図-3.20 赤丸で示す USV 上下架場所（土砂処分場東側棧橋）よりクレーン付きトラックを使用して USV を上架し、艀装解除を行う。データ解析については、現地において、収録データを指定フォルダに格納することにより、RPA (Robotic Process Automation)で最適軌跡解析(PPK: Post Process Kinematic)を POSPac MMS により実施する。また、座標処理された計測データを CUBE 処理アルゴリズム(Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator)を用いてフィルタリングを実施する。詳細については次節で説明する。

水深データの収録処理においても使用している統合型水路測量用ソフトウェア HYPACK (HYPACK 社製) を使用し収録するとともにデータ処理を行う。RPA (Robotic Process Automation) により最適軌跡解析を行った後、座標処理された計測データを CUBE アルゴリズム (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator)を用いてフィルタリングを実施する。最適軌跡解析は、後処理キネマティック測位・動揺解析ソフトウェア POSPac MMS (カナダ Applanix 社製) による PPK (Post Processing Kinematic)処理を行い、後処理キネマティック等の高精度測位を使用する。

3.4 最適軌跡解析

海上測量において、位置精度は国土交通省により水平 5m 以内と定められている。なお、水路測量において高さは水面からと定められているため、水平位置のみ採用される。測量時の画面に表示される船舶の位置や収録後のデータ座標位置は、SBAS(Satellite-based augmentation systems)による測位であり約 1m 弱の誤差をもつといわれている。これは、GNSS 単独測位では 10m 程度の精度のものを SBAS による静止衛星からの補正情報を加えることで 1m 程度に改善されたものを使用する。デファレンシャル状態の測位でも十分な位置精度の許容値内であるが、最適軌跡解析を適用することで、船の位置精度は SBAS による従来のメートル級から、水平で±5cm 程度まで向上させることが可能となる。このような後処理による高精度測位・動揺データをマルチビーム測深データに適用することにより、マルチビーム測深データの測深精度・再現性が更に向上し、海底特異物の微細な形状まで鮮明に捉えて海底状況を確実に把握できるようになる。

3.5 CUBEアルゴリズムの概要

3.5.1 CUBE処理の概要

CUBE 処理は、Calder & Wells⁴²⁾ によって開発された CUBE アルゴリズムに基づき、観測値であるマルチビーム測深の全測深点群データと各々の不確かさを入力値として、統計的かつ自動的に求められた高密度水深グリッド（以下、CUBE 水深）を基盤とした水深測量成果を作成するための資料整理手法である。CUBE 水深を全測深点群から生成する際、空間分解能の性能限界であるビームのフットプリント程度のグリッドサイズを用いることで、CUBE 水深はマルチビーム測深データの品質が基本的に保持される。CUBE 処理の導入により、目視点検するといった伝統的なノイズ処理から解放され、膨大な数の全測深点群を CUBE アルゴリズムにより自動的に処理することが可能となる。その結果、自動的に可視化された水深・属性情報マップを利用して海底特異物のみを対象とする目視点検が実現できる。これにより、無駄なデータや複雑な構造、不要な情報を排除し、客観性の高い迅速な資料整理が可能となる。マルチビーム測量が抱えるデータ後処理の課題と

CUBE 処理の導入による利点をまとめた表を表-3.6 に示す。例えば、従来のノイズ処理手法では、熟練の技術者が測深データを HYPACK 等の処理ソフトウェアを使用して手動で行われ、成果物の品質が技術者の経験に依存していたことが、CUBE 処理を適用することで均一なデータ品質を得ることが可能となる。また、従来の手動処理で要していた大きな労力と時間を短縮させることができる。

表-3.6 CUBE 処理適用の利点

比較項目	従来の手動処理	CUBE処理適用後
データ品質	成果物が技術者の経験則に依存し、データ品質が不均一	成果物がコンピュータによる統計処理により作成されるため、データ品質が均一
作業時間	手動での処理により多くの時間・労力がかかる	自動的に統計処理が行われるため、時間や労力を省力化できる
精度管理	計測精度を考慮しないため、スワス端の精度が悪い値を採用する傾向があり、測深データの精度管理が難しい	CUBE処理は測深機器固有の不確かさを定量化し、データの内在的なランダム性を考慮して真の水深を推定する。これらの不確かさは定量的に記録される。

日本では、平成 21 年度（2009 年度）から海上保安庁による海洋情報部研究報告において CUBE アルゴリズムの導入が議論され⁴³⁾、平成 27 年（2015）には菊池ら⁴⁴⁾により、CUBE アルゴリズムが日本語文献として紹介された。平成 26 年度（2014 年度）頃には CUBE アルゴリズムの導入が検討されたが、本格的な実現には至っていない。一方で、米国・英国・カナダ等の水路測量分野の先進国では、平成 14 年（2002 年）頃から CUBE 水深が水路測量成果として既に採用されている⁴⁵⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾。現在、これらの先進国においては、CUBE アルゴリズムを用いた水路測量におけるマルチビーム水深測量が成熟しており、測深ノイズの少ないデータ取得から浅所トップの目視判断による仕上げ作業が施された CUBE 水深の水深測量成果としての採用までの効率的かつ客観性の高い一連のデータワークフローが、既にパッケージ化されている⁴⁶⁾⁴⁷⁾。このため、米国 Chesapeake Technology 社製 SonarWiz、カナダ Teledyne CARIS 社製 HIPS & SIPS や米国 HYPACK 社製 HYPACK、海洋先端技術（株）社製 Marine Discovery 等、多くの市販ソフトウェアにて既に実装されている。加えて、CUBE 水深は統計水深であるため、従来の LMD ファイルと比較して容量が軽く、扱いやすい特性を有している。また、グリッド格子のノード上で計算されるため、ベクター形式（水深点群）だけではなく、カラーマップ等のラスタ形式（平面画像）としての性質も持つため、GIS ソフトウェアを使用して手軽に可視化・解析が可能である。このため、住吉昌直ら³⁵⁾は、“国内外の技術動向を踏まえて、将来的には、従来の LMD ファイル形式に拘らず、例えば GIS の汎用ラスタ形式である GeoTiff 形式や NetCDF 形式や BAG 形式⁴⁸⁾のような、より利用しやすい水深データの形式を検討する余地はあると思われる。”と述べている。

これまで CUBE の利点を述べてきたが、CUBE アルゴリズムが苦手とする水路状況も存在する⁴⁹⁾⁵⁰⁾。具体的な例として、図-3.29 に示すような、沈船の船首のように、深い領域に密集したデータの中に浅い測深点が 1 つしかない場合があげられる。アルゴリズムでは浅い点を裏付ける測深

点が 1 つである場合が多いため、統計的に誤差が生じる可能性がある。水路学的な留意事項として、この浅いポイントを適切なマーキングで保存することが必要である。このように、水路状況を正しく認識し、後処理を担当する作業者が必要であれば臨機応変に対応することが大事である。また、CUBE 処理を効果的に行うためには、マルチビーム測深作業を見直し、統計処理に適した手法を採用することが重要である。特に船舶交通の重要な海域では、ノイズの少ない良好な高密度データの取得と、スワ幅を 100% 重複させる測深作業を実施することで、海底特異物の見落としを確実に防ぎ、目視点検が必要な海底特異物やノイズの判別をより迅速に行うことができる。総括すると、高度な統計処理により得られる CUBE 水深または処理方法は、現行のマルチビーム測深に関わる多くの問題を解決する有望な手法であり、従来多くの労力を有した小さな測深ノイズの大部分を除去する作業を省くことができるという大きな利点がある。このため、今後の研究開発において CUBE 水深の点検校正・審査に焦点を当て、導入の検討を進めていくべきである。

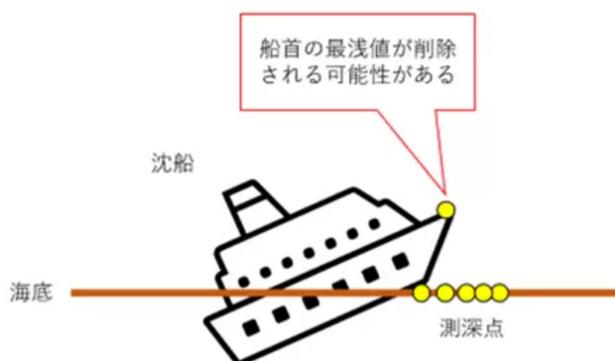


図-3.29 統計処理を行う上で誤りやすい水路状況

(東陽テクニカ：「マルチビーム測深：CUBE 処理とは何か？」図 5 より抜粋)

3.5.2 CUBE アルゴリズム

CUBE (Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator)とは、マルチビーム測深の特性である直下と斜のデータ品質の違いを考慮した上で、マルチビーム測深で得られた大容量の全測深点群データと不確かさ(Uncertainty)から、統計的に尤もらしい高密度の CUBE 水深を出力するアルゴリズムである。以下、CUBE アルゴリズム開発者 (Calder & Wells (2007)) による文献⁴²⁾⁵⁰⁾、住吉昌直ら³⁵⁾の知見に基づき、CUBE アルゴリズムについて解説する。

CUBE では、測定誤差の原因は系統誤差 (Systematic miscorrection)、測定対象に関与しないデータ (Blunders)、不確かさ(Uncertainty)に区別される。系統誤差は、ある原因によって測定値が偏って出力される誤差を指し、具体的な例としては、ソナーと GPS アンテナの間のレバーアームのオフセットが適切でない場合などが挙げられる。CUBE は、全てのシステム構成機器が正確にオフセット入力されているという前提のもとで機能しており、オフセット修正を行われない。他方で、不確かさとは、取得したデータがもつ値のばらつきである。この系統誤差などの人為的に起因する誤差を除いた計測システムがもつ不確かさが、CUBE データ・データ処理の考え方において重要となる。CUBE で使用する不確かさ(Uncertainty)については、国際水路機関が刊行する S-44 第 5 版⁵¹⁾によって定められる各測深点の精度評価の指標である総伝播不確かさ TPU (TPU: Total

Propagated Uncertainty) が一般的に使用される. TPU は, 測深誤差の確率的期待値の推定量であり, 鉛直成分 TVU(TVU: Total Vertical Uncertainty)と水平成分 THU(THU: Total Horizontal Uncertainty) から成り立っている. この指標は, ソナーの測深精度, 潮位の観測精度, 音速プロファイルの観測精度, 測位・動揺検出器の計測精度など, さまざまな誤差要因が考慮される. CUBE 水深は, TPU に基づく重み関数を用いた統計処理により導かれるため, マルチビーム測深の特性である直下と斜のデータ品質の違いやブランダーが自動的に考慮される. ブランダーとは, マルチビーム測深システム (MBES) によって生成される海底面の中で, 正確に表現されていないものを指す. これは, 魚からの反射や MBES のサイドローブ受信などが原因としてある. CUBE では, データが海底近傍に密集することや, ノイズ (ブランダー) が低密度で点在するという仮定に基づき, 前述のとおり, 海底を正確に判定するためのアルゴリズムが組み込まれている. このため, 高品質の直下データが有効的・優先的に利用され, かつブランダーを考慮した処理が行われる. この結果, 図-3.30 に示すように, 最浅選択処理とは異なり, 相対的に品質の劣る斜近傍のデータやノイズが不当に優先的に使用されることを回避できる.

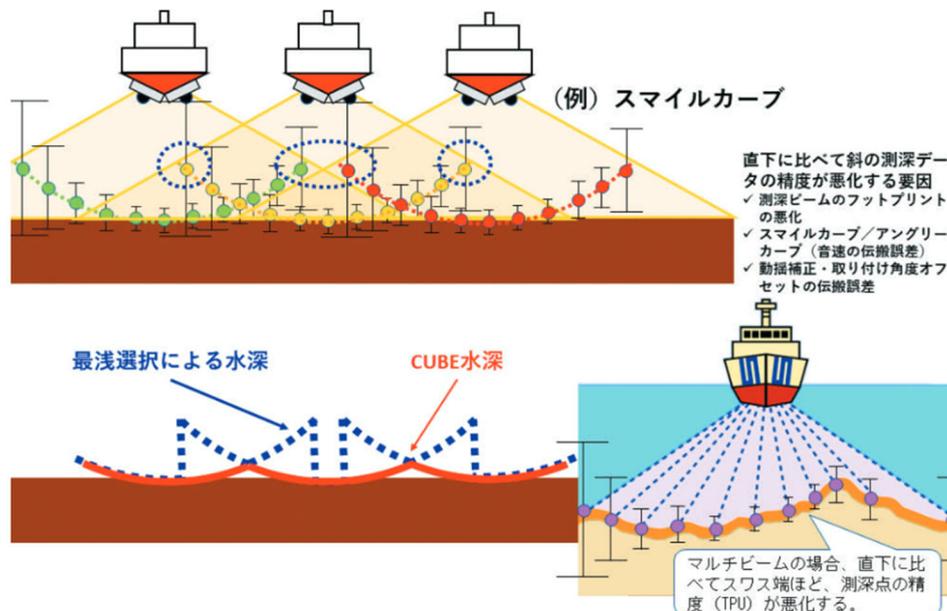


図-3.30 直下と斜におけるマルチビーム測深のデータ精度の違い及び CUBE 水深 (データ精度を考慮して推定された) と最浅水深の違いに関する概念図

(住吉昌直ら: 「マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について: 海外水路機関における最適化の事例紹介」 図 3 より抜粋)

CUBE アルゴリズムにおいては, 全測深点と TPU に基づく重み関数を利用して CUBE 水深を取得する過程で, ノード (Node) と呼ばれるグリッド化された格子の節を設定する必要がある. この CUBE 水深の求めるプロセスでは, まず各ノード上で, ある範囲に含まれる測深点と各点の重み関数から統計的に仮説水深 (Hypothesis) を計算する.

$$\sigma_p^2 = \sigma_v^2 \left(1 + \left[\frac{dist + hes * \sigma_h^2}{node_spacing} \right]^{de} \right) \quad (3.1)$$

ここで、 σ_p^2 は各測深点の伝播不確かさであり、この逆二乗が重み関数である。この不確かさが、あるノードにおけるキャプチャー距離*²に含まれた測深点に対して計算される。また、 σ_v が各測深点の TVU、 σ_h が各測深点の THU、 $node_spacing$ はノード間隔（グリッドサイズ）*¹、 $dist$ はあるノードから各測深点の距離、 hes （horizontal error scalar）と de （distance exponent）はパラメータである。 hes と de の値は、デフォルト設定で、 $hes = 2.95$ （99%CL信頼区間）、 $de = 2.0$ を用いる。ただし、米国 NOAA では異物の浅所トップが CUBE 仮説として捉えられるように、 $hes = 1.96$ （95%CL）を採用している⁴⁵⁾。準細則では特に規定はないが、異物を逃さず判断するために米国 NOAA の設定値が指針となっている。通常、図-3.31 に示すように、各ノードには一つの仮説水深が割り当てられ、この算出された仮説水深が CUBE 水深として採用される。しかし、ノード近傍の測深点が統計的に有意に異なる複数のグループに分かれる場合は、一つのノードに複数の仮説水深が得られることがある。この場合、CUBE 水深を自動的に導出するには、複数の仮説水深から有力なものを一つ選択する必要がある。これは、ノードの仮説水深に属する測深点数やノードの周囲の仮説水深から最も有力な仮説水深を選択するプロセスであり、これを曖昧さ除去（Disambiguation）*³ と呼ぶ。このように、CUBE 水深の統計処理では、測深データ中の極端な外れ値（Outlier）の影響を除外できるため、通常の統計平均とは異なり、測深ノイズによって水深が過度に深く出力される、逆に浅い測深ノイズにより水深が不当に浅く出力されることが原理的にない。この性質により、CUBE 水深の出力結果は、マルチビーム測深に適したものとなる。

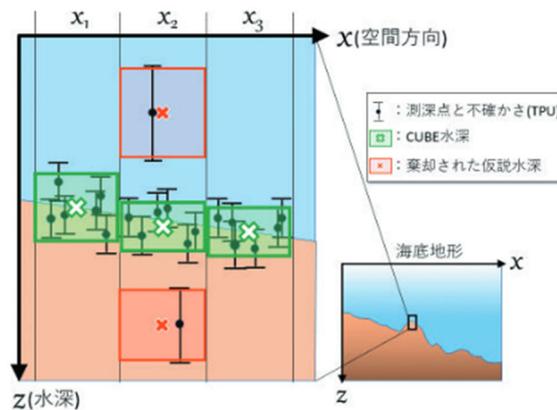


図-3.31 CUBE 仮説水深と曖昧さ除去

（住吉昌直ら：「マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について：海外水路機関における最適化の事例紹介」図 4 より抜粋）

以下に、CUBE アルゴリズムにおける CUBE 水深を出力する際に必要な設定値のうち、*で記した重要なパラメータについて説明する。

1. ノード間隔（Node Spacing / Resolution：グリッドサイズ）：ノード間隔は、CUBE 水深のグリッド解像度を決定する上で極めて重要なパラメータである。一般的に、統計処理の有効性を確保しつつ、測深データの空間分解能（解像度）を損なわずに、十分な独立データ数が得られるよう適切に設定する必要がある。マルチビーム水深測量では、測深データの空間分解能は主にビーム幅と水深に比例するフットプリントに依存し、直下ビームのフットプリントを基準にノード間隔を設定することが考えられる。現代のマルチビーム測深機で

は、適切なスワ幅（発信レートとスワ密度）とオーバーラップ率を用いた高密度測深の実施により、送受波ビームのフットプリント内に十分な測深点密度を得ることが容易となる。通常、ノード間隔は、ビーム幅 1 度の測深機における直下ビームのフットプリントを基に設定され、具体的には、水深 20 m で 0.35m、水深 40 m で 0.7m である。海外では、水深域に応じて固定グリッドサイズが採用されている。例えば、米国 NOAA では水深 0–20m で 0.5m、18–40m で 1m が採用されている⁴⁵⁾。これらの適切なノード間隔の設定により、効果的で客観的な CUBE 水深の生成が可能となる。

2. キャプチャー距離（Capture Distance）：各ノード上で CUBE 水深を生成する際には、各ノードからどの程度の距離を離れた範囲内の測深点を使用するか指定する必要がある。この設定値をキャプチャー距離（Capture Distance）と呼ぶ。米国 NOAA では、図-3.32 に示すように、キャプチャー距離をノード間隔の 0.707 倍（ $=1/\sqrt{2}$ 倍）とし、各ノードのグリッド内の測深点と CUBE 水深を求める際に使用した測深点をほぼ同一視するように定めている⁴⁵⁾。

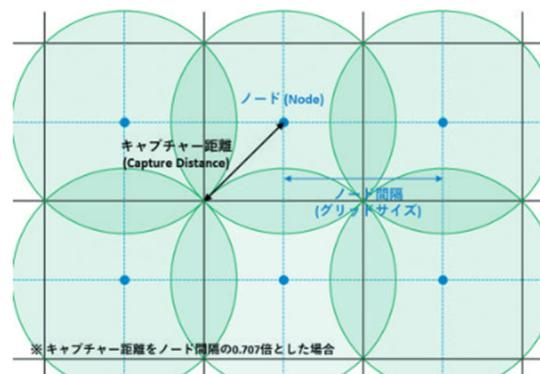


図-3.32 キャプチャー距離をノード間隔の概念図

（住吉昌直ら：「マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について：海外水路機関における最適化の事例紹介」図 6 より抜粋）

3. 曖昧さ除去（Disambiguation）：CUBE アルゴリズムの過程で、複数の仮説水深(Hypothesis) が得られた場合、これらから一つの有力な仮説水深を自動で選ぶプロセスを、曖昧さ除去（Disambiguation）と呼称する。この自動選択手法には、主に以下の 3 つのオプション(1) Density, (2) Locale, (3) Density & Locale が存在している。具体的には、(1) ではノード内の測深点が最も多く含まれた仮説水深が選択され、(2) では周囲のノードと最も無矛盾な仮説水深が採用され、(3) では(1)と(2)を組み合わせる総合的に最も確からしい仮説水深が選択される。米国 NOAA 沿岸測量部では、(3) Density & Locale が採用されており⁴⁵⁾、特に明確な要因がなければ(3)を使用する。

3.5.3 CUBE処理によるデータ解析

第 3 章 計測作業の概要で触れた CUBE 処理を行う場合の計測条件を満たすよう計測を実施し、CUBE 処理を行う。水深区分に応じたグリッドサイズにおいて、1 グリッド当たりの測深点数が 5 点以上（達成率 95%以上）となるように調整する。CUBE 水深のグリッドサイズは、水深 30m 以浅の浚渫工の場合、表- 3.7 に示す水深区分に応じたグリッドサイズとする。上述のキャプチャー

範囲に含まれるよう設定した測深点について、入力する機器の誤差、精度、条件などの“不確かさ(Uncertainty)”を用いて解析ソフトにより CUBE 水深を計算する.CUBE 水深（正データ）は、1 グリッドに 1 点とし、1 グリッドに 1 点得られた CUBE 水深を利用して、出来形管理を行うものとする。

表-3.7 CUBE 水深のグリッドサイズ

水深区分	グリッドサイズ
0～10m	0.25m
10～20m	0.5m
20～30m	1.0m

3.6 解析結果と考察

マルチビーム測深データから、3次元点群データおよびオリジナルデータの作成は、精度検証の後、主に最適軌跡解析、点群作成、CUBE 処理の行程で行う.USV による計測データから、手動によるデータ処理後の点群データと、CUBE 処理による点群データを取得した.令和 5 年 5 月に実施された有人船舶マルチビーム測深データを手動によりデータ処理した手法を従来手法とし、USV マルチビーム測深により取得した点群データ（手動による処理後の点群データと、CUBE 処理による点群データ）と従来法とを比較することで考察を行った.標高段彩図の作成は TREND-POINTO, Autodesk の Recap で行い、断面抽出等の解析作業や点群データ解析は Cloud Compare, TREND-POINTO を使用する。

3.6.1 精度検証結果

マルチビームによる深浅測量の測定結果を検証し、規定の精度を確認する.収録データの検証は、「水路測量業務準則施行細則」⁵²⁾で定められた測深精度の検証方法に準じ、測定誤差の限度は「平成 14 年海上保安庁告示第 102 号」⁵³⁾で定められたとおりとする。

ビームフォーミングによる測深精度は、砂地の平坦な海底を利用して測量船を停船させ 200 ピング以上を取得し、そのビーム毎の水深の平均から標準偏差を算出し、標準偏差の 2 倍(誤差)の値が下記判定基準、告示別表二の事項「水深」の項目「深さの測定の誤差の限度」以内であることとする.検証結果を表-3.8 に示す.標準偏差の 2 倍値が 0.11 であり、 $0.11 < 0.25$ と精度以内だったことから、判定を良とする。

$$\text{深さの測定の誤差の限度} : \sqrt{a^2 + (bd)^2}$$

なお、水域区分は特級、 $a = 0.25m$ 、 $b = 0.0075$ 、 $d =$ 平均水深とする。

表-3.8 ビームフォーミングによる測深精度検証結果

測定総数	220
平均値	6.76
分散	0.00

標準偏差	0.05
標準偏差の2倍値	0.11
判定値	0.25

現地作業における測深精度を検証するため、起伏のある海域において左右のビームが100%重複するように2本の平行な測深線（井桁のような測深線）を走行（以下「井桁走行」という）しデータを取得する。井桁計測で既知の水深の場所を格子状に設定し、そこでの測定値と真値の差を記録する。マルチビーム測深機精度管理は、複数のビームを送受信できるマルチビーム測深器で水深測定を行う際に、その測定精度を確認するために行う井桁計測の結果を記録するものである。なお、精度管理 $\sqrt{a^2 + (bd)^2}$ 、 $a = 0.5m$ 、 $b = 0.013$ 、平均水深 = -12.76m、格子間隔は1.0m、実施側線は測線1~4とする。評価基準は±0.52mに対して適合率が90%以上であることとする。マルチビーム測深機精度管理図を図-3.33に示す。適合率は100%であったため合格とする。

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.02
8	-0.03	-0.01	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02
7	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.02	-0.01	-0.02	-0.03
6	-0.02	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02
5	-0.02	-0.01	-0.03	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.01	-0.02	0.00
4	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.02
3	-0.04	-0.02	-0.03	-0.01	-0.03	-0.01	-0.04	-0.01	-0.02	-0.01
2	-0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01
1	-0.03	0.00	-0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-0.05	-0.01
0	-0.02	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.04	-0.01

52cm以下 ...青
52cm以上 ...赤

図-3.33 マルチビーム測深機精度管理図

3.6.2 PDOP (Position Dilution of Precision) 位置精度

PDOP (Position Dilution of Precision)のグラフを図-3.34に示す。PDOPとは、計測時の人工衛星の配置による精度低下率を表す。PDOPに関しては、国土地理院で一般的な測位可能の目安は6.0以下と言われている。グラフから、PDOPの値は3.0以下で計測されており精度よく計測された。計測現場が仰角15度以上に海上空に向かって360度障害部物が全くないフィールドであったため、衛星状況は非常に良好であったと考えられる。

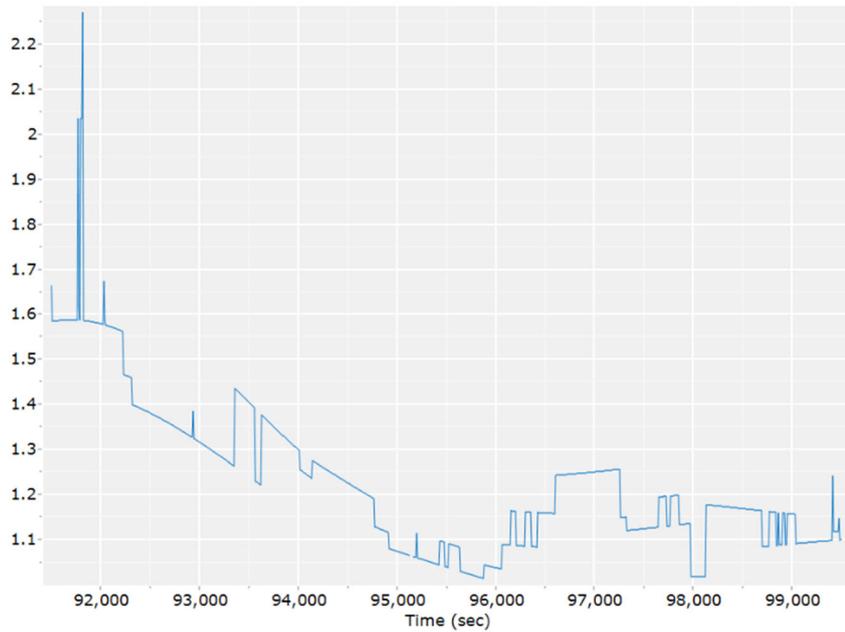


図-3.34 PDOP (USV)

3.6.3 最適軌跡解析結果

USV マルチビーム測深によるデータを用いた、最適軌跡解析後の結果を図-3.35、図-3.36 に示す。マゼンタ色が生データ（デファレンシャル状態での±1mの位置）、緑色が解析補正後の結果を示している。東西方向に幅が約80cm補正されたことがわかる。また、南北方向については、約3m航跡がずれており、レファレンシャル状態でも測位が取得できていなかったが、最適軌跡解析により位置が改善された。このように、後処理を行うことで測位精度を向上させることができた。

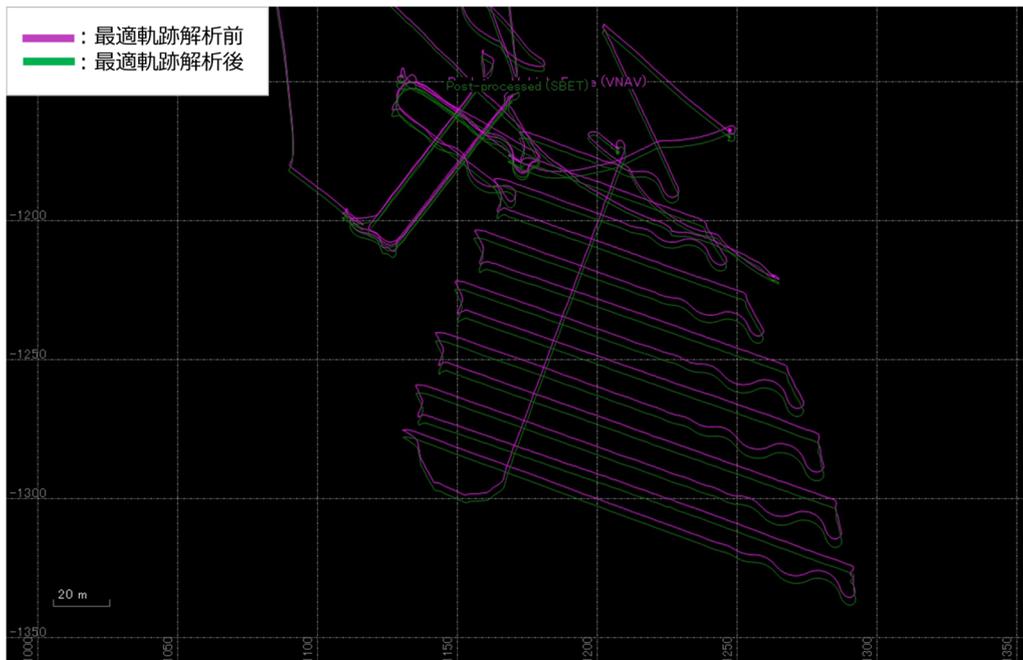


図-3.35SV 時の POS 処理結果

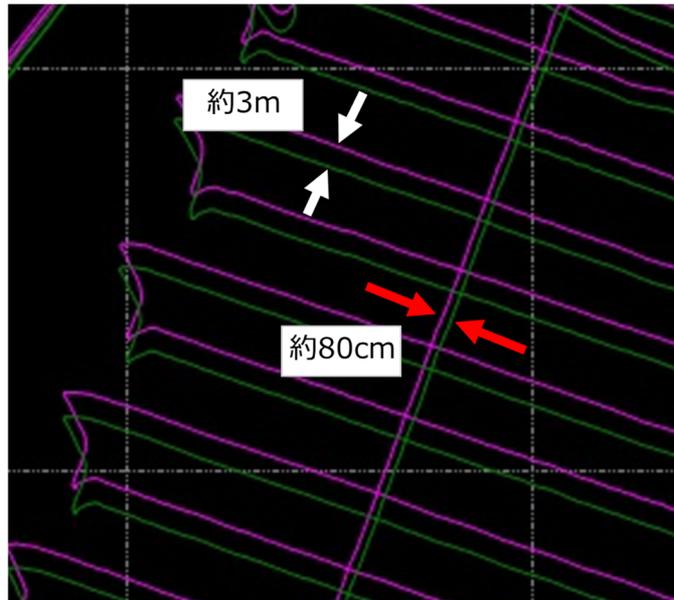


図-3.36 USV 時の POS 結果拡大図

3.6.4 計測データによる3次元モデル作成結果

(1) ノイズ除去処理

取得した3次元点群データには、ノイズと呼ばれる解析において不要な点群が存在する。水中音速度計測結果、潮位観測結果を適用し補正を行った後、電氣的ノイズや水中浮遊物、魚群等のエラーデータを除去した上で、海底地形を適切に表現した点群データを作成する必要がある。ノイズには音響的、電氣的なもののほか、浮遊物、魚群、泡など海中を浮遊する物体などがある。ノイズの除去は、特定の点群の平均距離と点群全体の平均距離の標準偏差に基づいて統計的な外れ値を除去するSOR(Statistical Outlier Removal)といったフィルタによるフィルタリングや、解析ソフトによりある程度削除することが可能だが、必要なデータが誤判断により除去されてしまう問題や、統計的な処理では限界があるといった問題があるため、最終的には手作業による除去作業を行う必要がある。除去作業の際、判断に迷う記録に直面した際は、画像や他測線の記録などを参考に総合的に判断する。USV計測により取得した3次元点群データの、点群処理前、点群処理後(手動)、点群CUBE処理後を図-3.37に示す。図-3.37上図中赤枠で示すノイズを、点群処理により除去した。CUBE処理により得られた点群データにおいても、系統誤差等によるノイズはみられず、適切にノイズ処理が行われていることが確認できた。

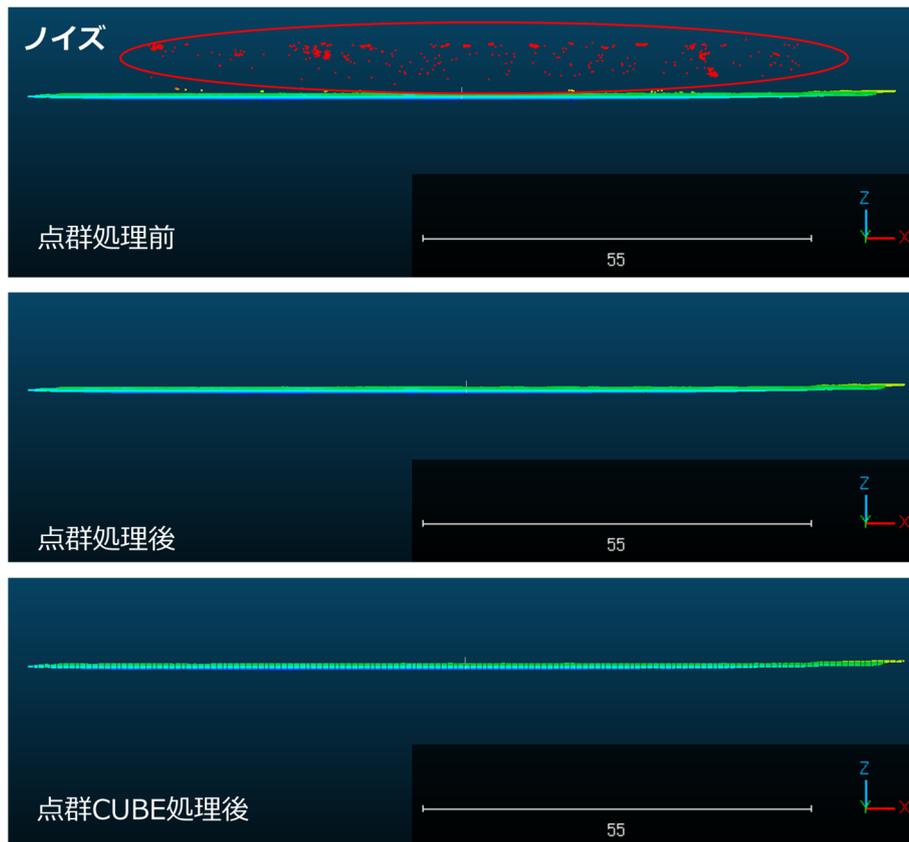


図-3.37 上：点群処理前，中：点群処理後，下：点群 CUBE 処理後 (USV データ)

(2) 標高段彩図

従来手法と USV 測量(手動によるデータ処理)のフィルタリング後の 3 次元計測データから作成した標高段彩図(陰影表示)を図-3.38, 図-3.39 に示す.測量範囲の全域において,水深,海底を計測できており,欠測は見られなかった.標高段彩図を作成し陰影表示をすることで,地形の起伏や高低を視覚的に表現でき,地形の特徴や水深の違いを視覚的に把握することが可能となった.標高のヒストグラムから,従来手法と USV によるデータのうちどちらも計測範囲において,水深が約 13.0m~12.6m の範囲内であることがわかった.このように,目視では把握が困難な海底状況や水深をマルチビーム測深を用いることで取得した 3 次元モデルにより定性的に確認することができた.マルチビーム測深機を用いることで効率的なモニタリングが期待できると考えられる.

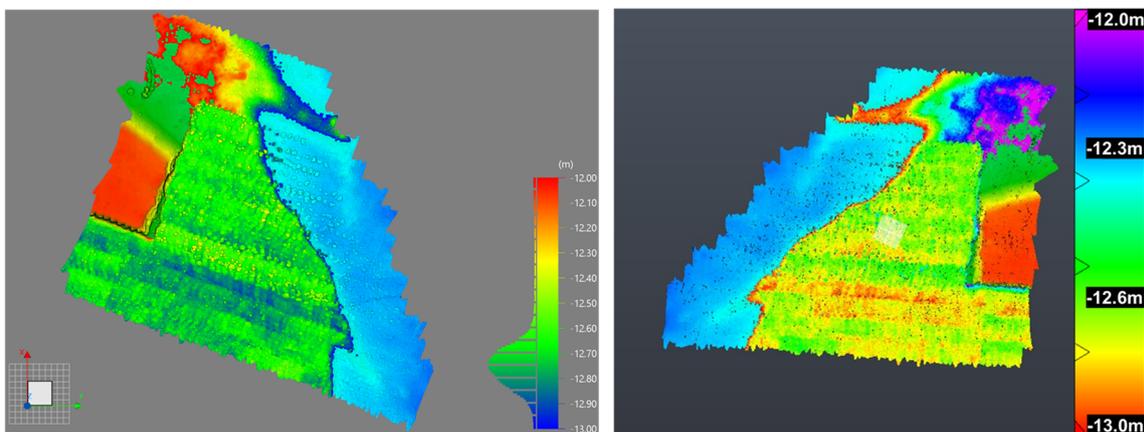


図-3.38 従来法によるデータの標高段彩図 (左：TREND-POINTO, 右：ReCap で作成)

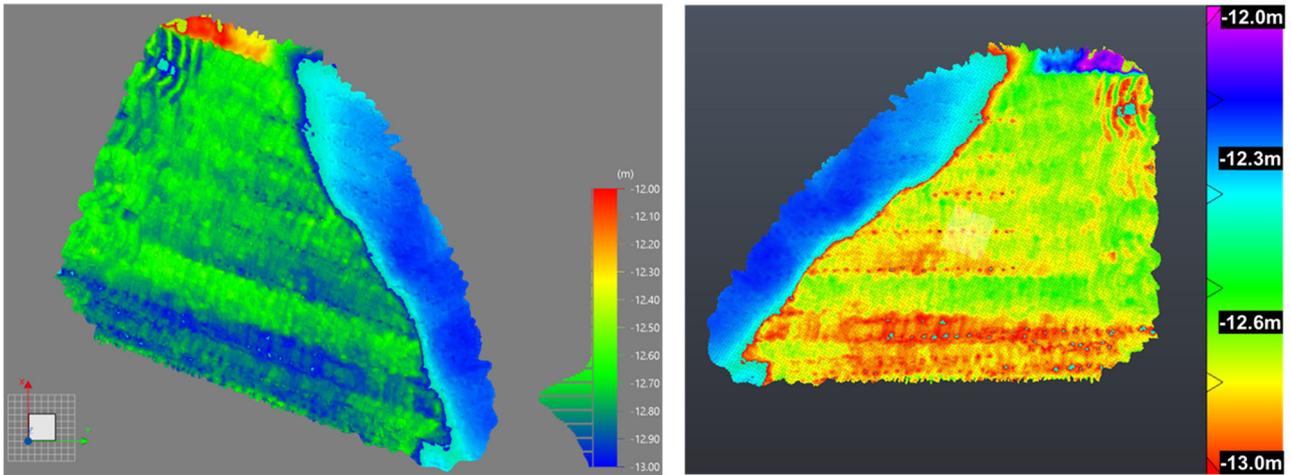


図-3.39 USV データ(手動処理)の標高段彩図 (左 : TREND-POINTO, 右 : ReCap で作成)

(3) 海底地形の 3 次元モニタリング

作成した 3 次元モデルから、従来手法と USV 両方において、一列に並んだ円形のくぼみが確認された。図-3.40 に従来手法による 3 次元モデルの一部，図-3.41 に横断図とくぼみを抽出した様子を示す。点群データを高度別に色を変えて表示させることで，周囲と比較して直径約 1.2~1.5m の円形の，約 1.1m のくぼみがあることがわかった。このように海底に穴が開いたように見えるのは，海底に打ち込まれたスパッドの跡であると考えられる。スパッド (spud) とは，浚渫工事において船舶や浮体構造物を固定するために使用される垂直な支柱やポールである。実際の浚渫工事の様子を図-3.42 に示す。今浚渫工事では，長さ 38m，直径 π 1300mm のスパッドが設置された浚渫船ビックブルーが使用された。これらのスパッドは，通常船体を貫通するかたちで取り付けられ，海底や河底に適切な深さまで打ち込まれる。これにより，船舶がスパッドを使って固定され安定し，浚渫作業が効率的に行われる。浚渫作業は，図-3.43 に示すようなモニタ画面をみながら，扇状に浚渫されていく。浚渫船はスパッド位置を変えながら，船尾側に向かって作業が進められる。図-3.41 の横断図からは，USV (手動処理) の 3 次元モデルではくぼみが浅くなっていることがわかる。これは，5 月 18 日に実施の従来手法による出来形測量から，約半年経過後に USV による測深が行ったことから，海底がなだらかになったと考えられる。このように，3 次元図では一目で海底の詳細な様子を確認することが可能である。

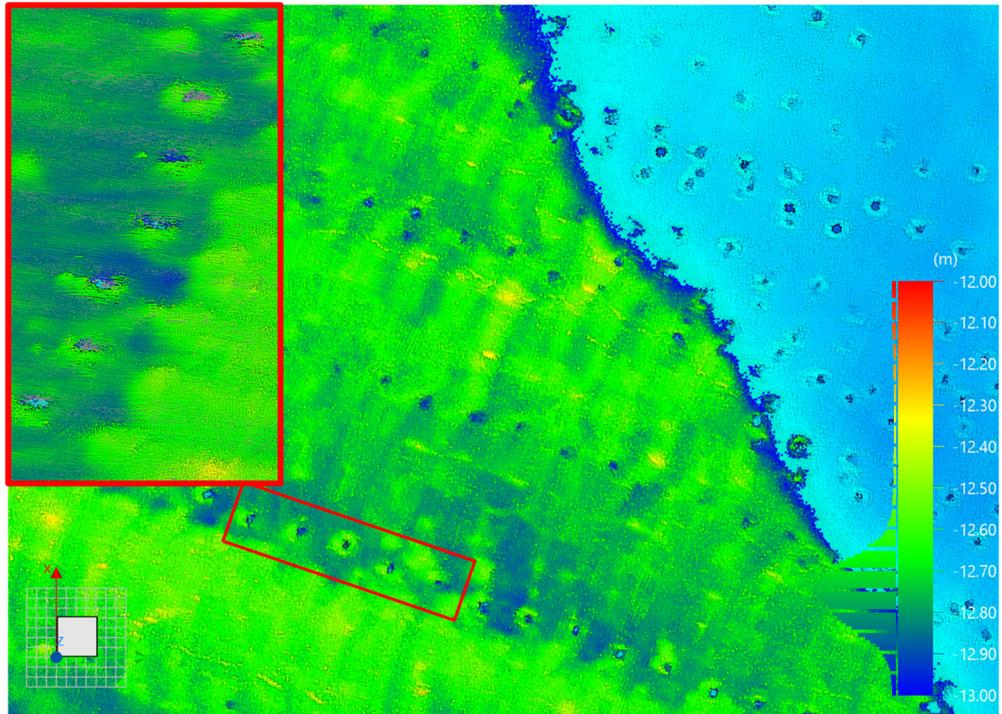


図-3.40 3次元モデルの一部（測量船）

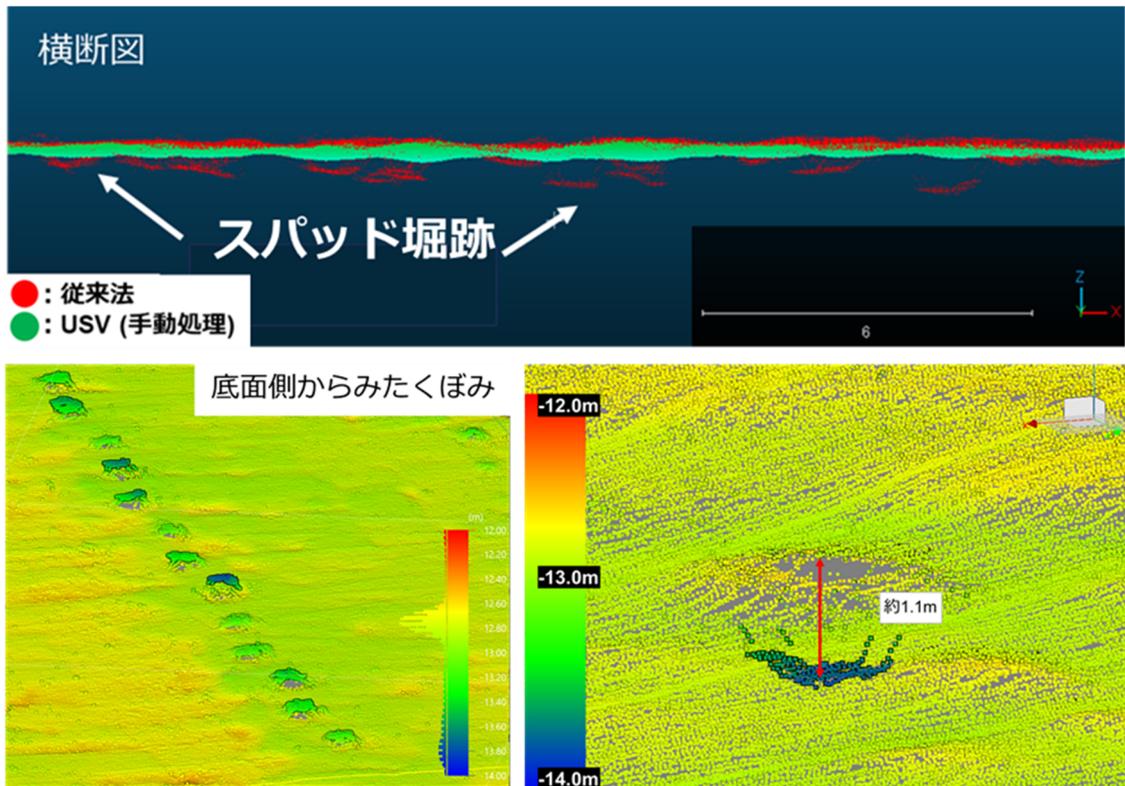


図-3.41 上：3次元モデルの横断図，下：スパッド形状（測量船）



図-3.42 実際の浚渫工事に使用した浚渫船

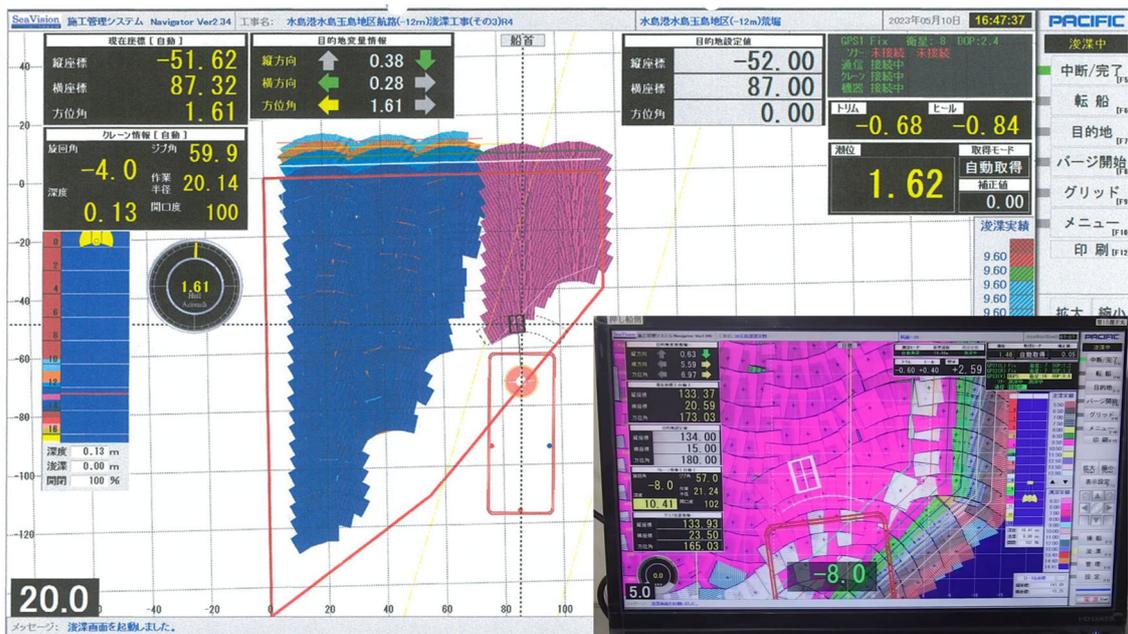


図-3.43 実際の浚渫時のモニタ画面

(4) 計測抽出断面

断面形状を把握するため、断面抽出を行った。従来手法並びに USV (手動処理)によるデータの縦横断面抽出箇所(3D)、縦横断面抽出箇所 (上空)を図-3.44 に示す。図中 BP-EP を中心とした A-A', B-B', C-C'における断面を抽出した。縦断面図を図-3.45, 横断面図を図-3.46 に示す。1m グリッドで表示するものとする。横断面図から、掘り下げ (浚渫) 区域内で特に差異が大きい箇所を抽出した。測量船による測深結果が、A-A'での横断面図では最大約 13.2cm, B-B'での横断面図では最大約 22.7cm, 浅いことが確認された。掘り下げ (浚渫) 区域外である C-C'での横断面図は、最大約 17.0cm, 浅いことが確認された。抽出された断面を比較することで、点群データの一致度や相違点を分析し、海底地形の変化を把握することが可能となる。地形の変化や浚渫の必要性を分析することで、航路の

安全性や効率性を評価することが重要である。

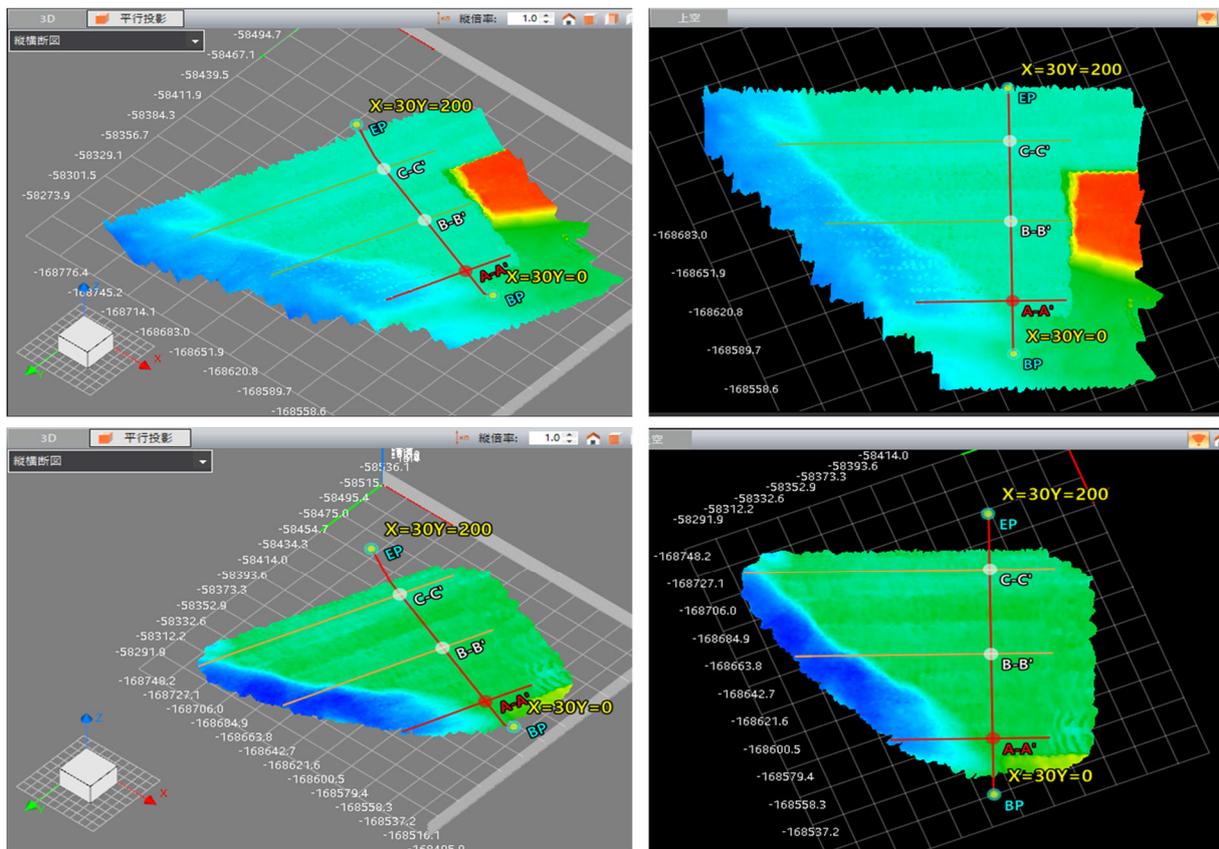


図-3.44 縦横断面図抽出箇所（左：3D，右：上空）

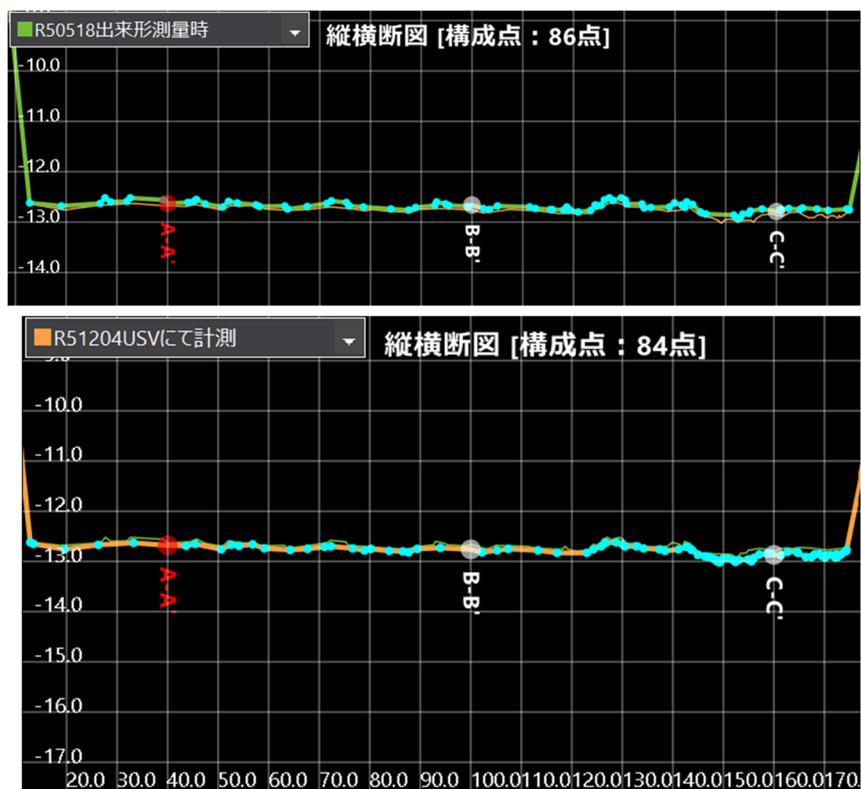
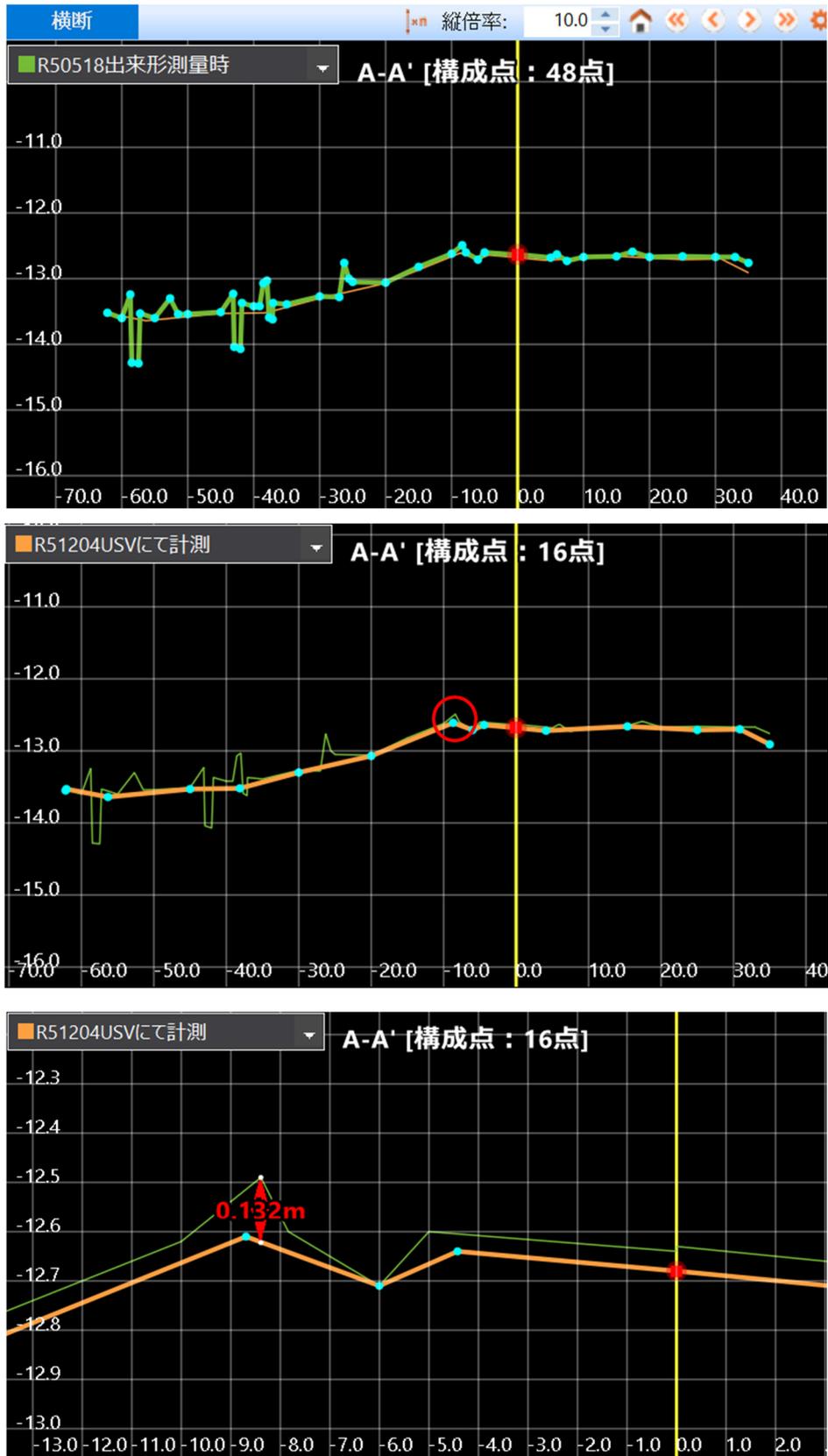
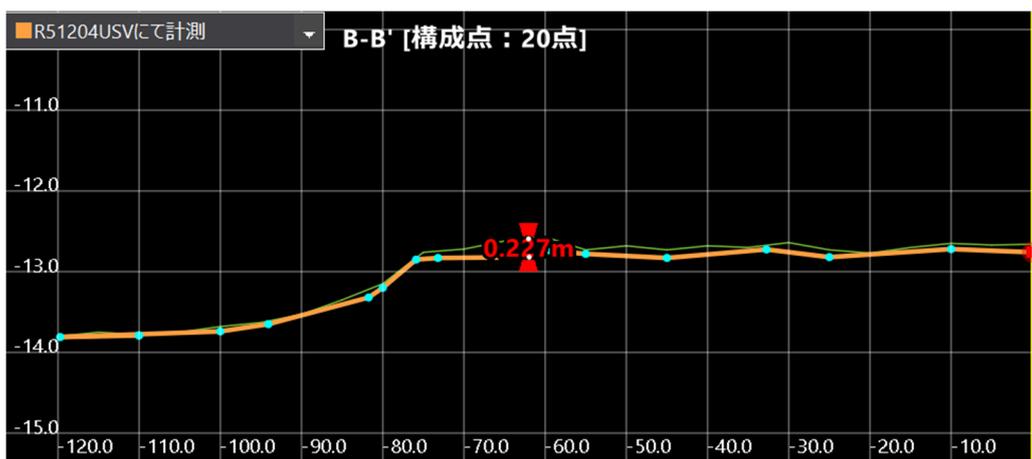
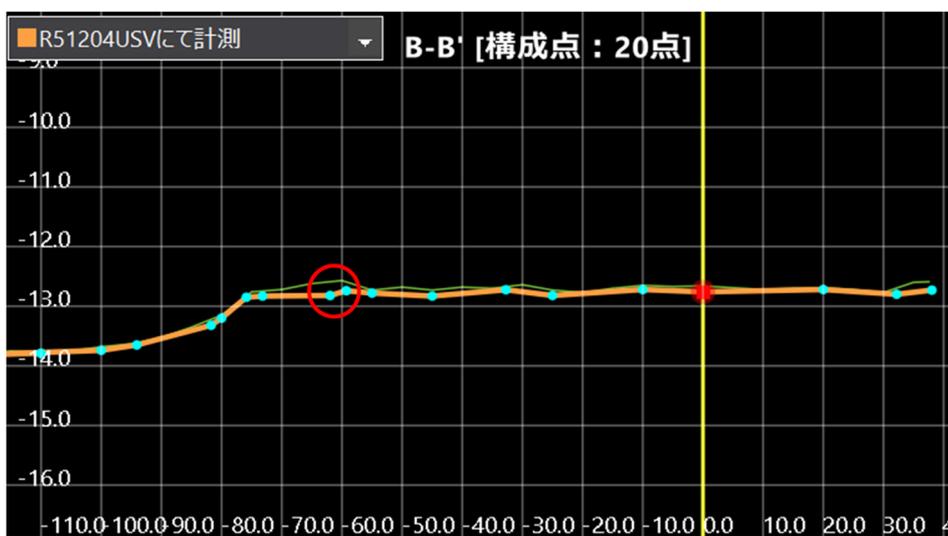
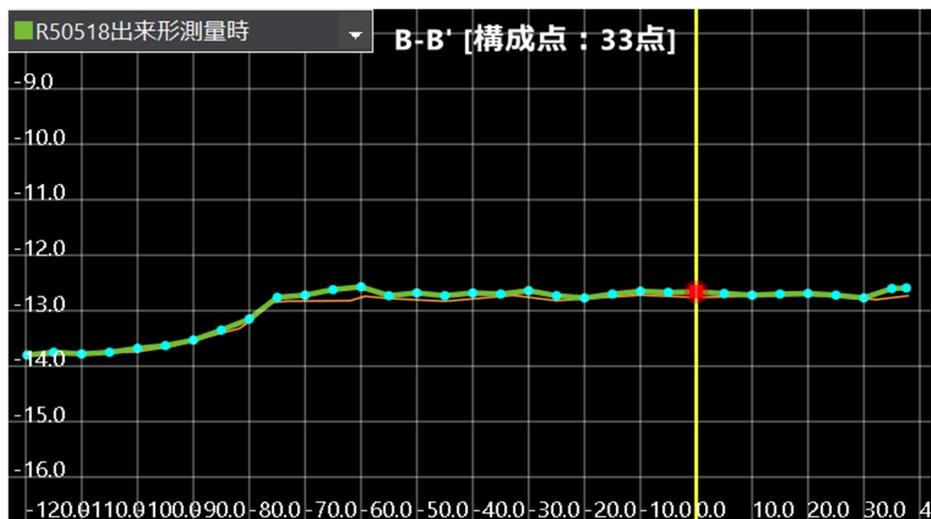


図-3.45 データの縦断面図（上：従来手法，下：USV（手動処理））





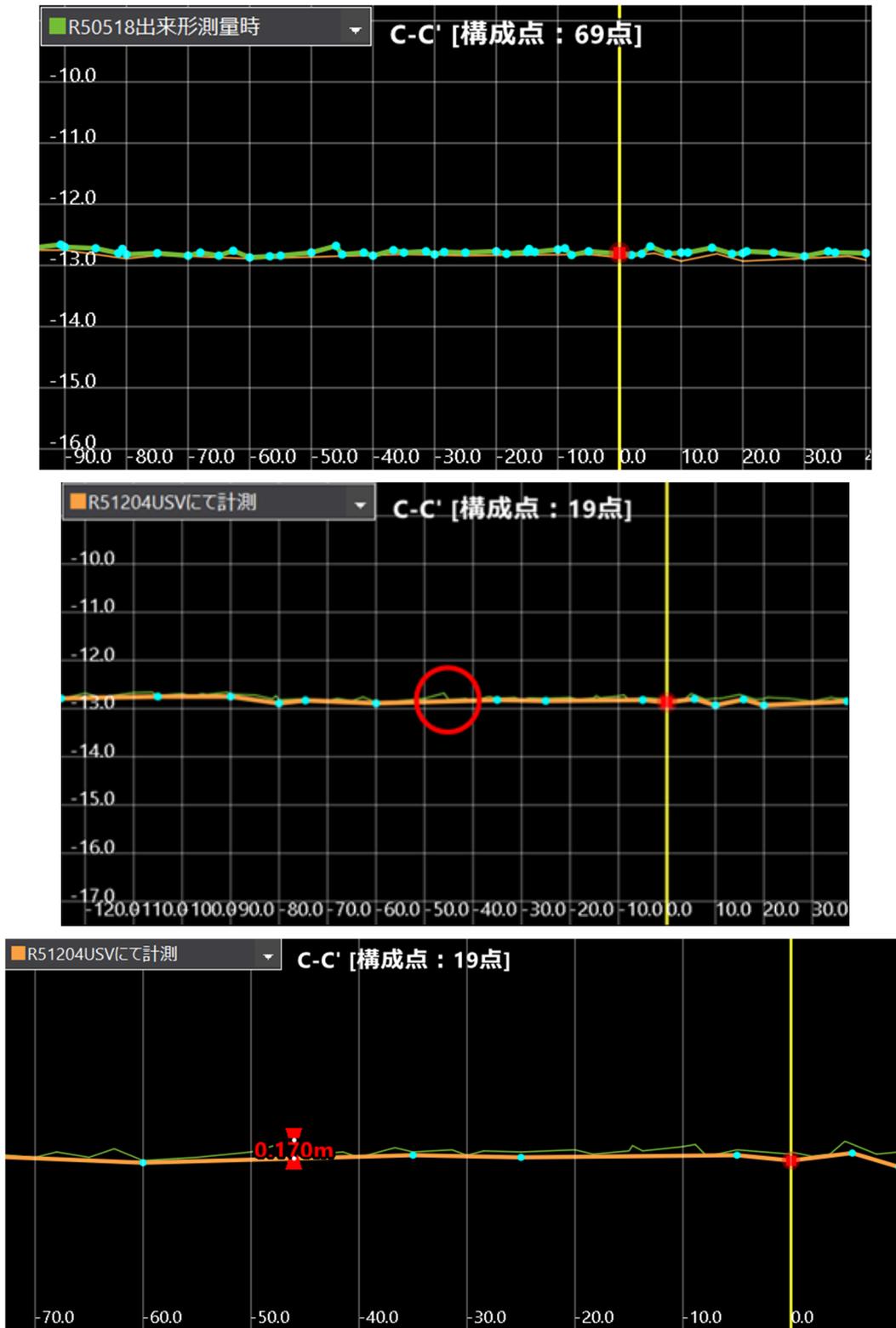


図-3.46 従来法, USV (手動処理)によるデータの横断面図(上 : A-A', 中 : B-B', 下 : C-C')

(5) 水路測量図（5月従来手法による出来形測量から作成）との比較による生成精度検証

① 水路測量図と従来手法の出来形測量による3次元データの生成精度について

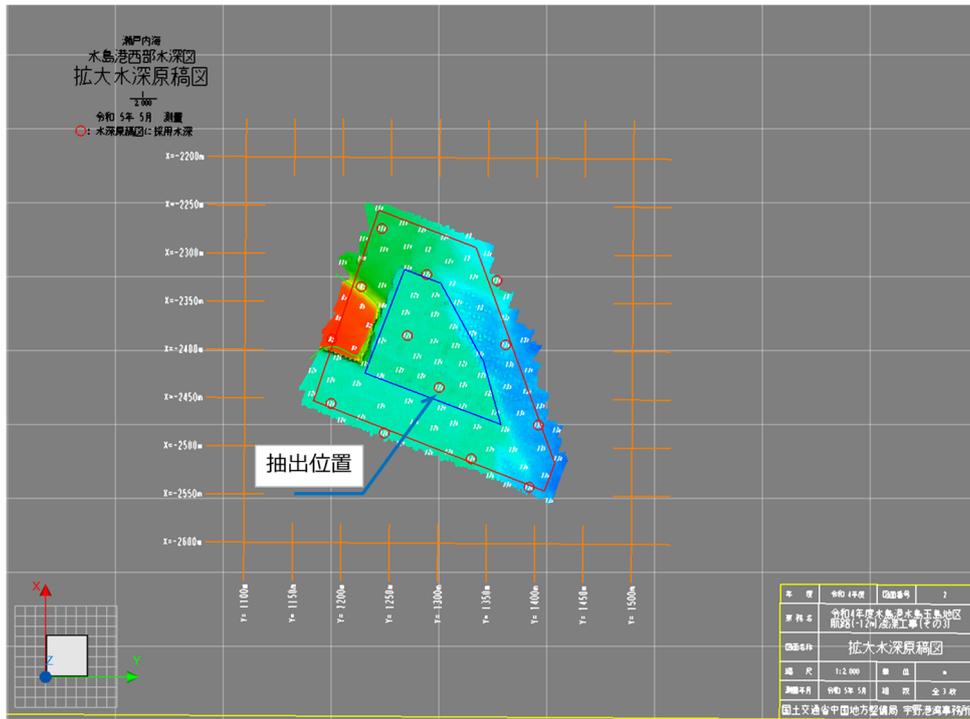


図-3.47 拡大水深原稿図と測量船による3次元モデル

図-3.47の抽出位置において、直径10m間での最浅値を抽出した。図-3.48に示すように、-12.2mの水路測量図面に対して-12.27mと7cm深い値を示した。なお、水路測量図では最浅値で切捨て(0.1m単位で切り捨て)の為誤差は無いものとする。

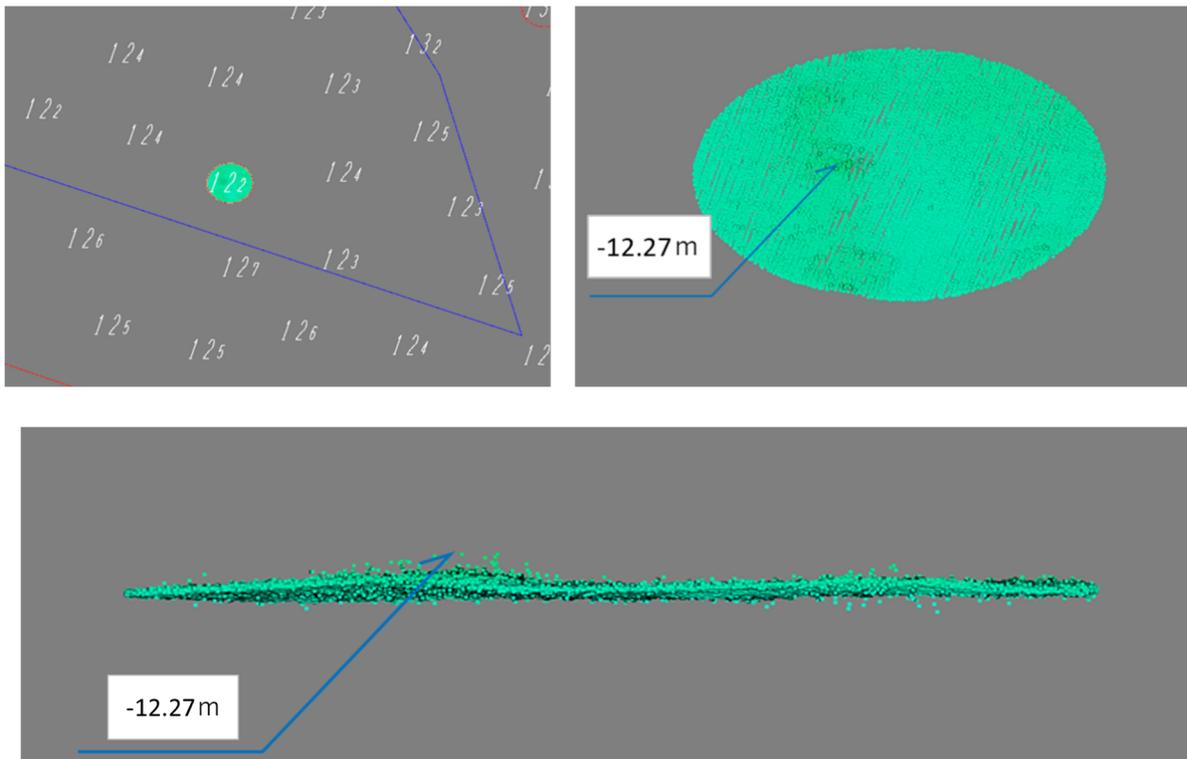


図-3.48 左：水路測量図と抽出位置，右：斜めキャプチャー，下：真横キャプチャー

② 水路測量図（5月従来手法による出来形測量から作成）と CUBE 処理 (USV 測量)との比較による 3 次元データの生成精度について

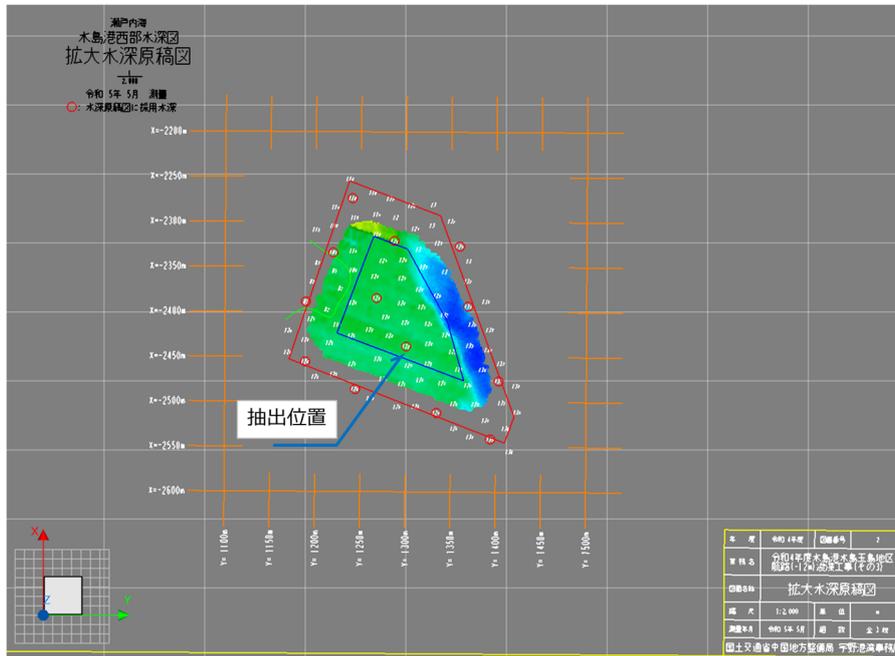
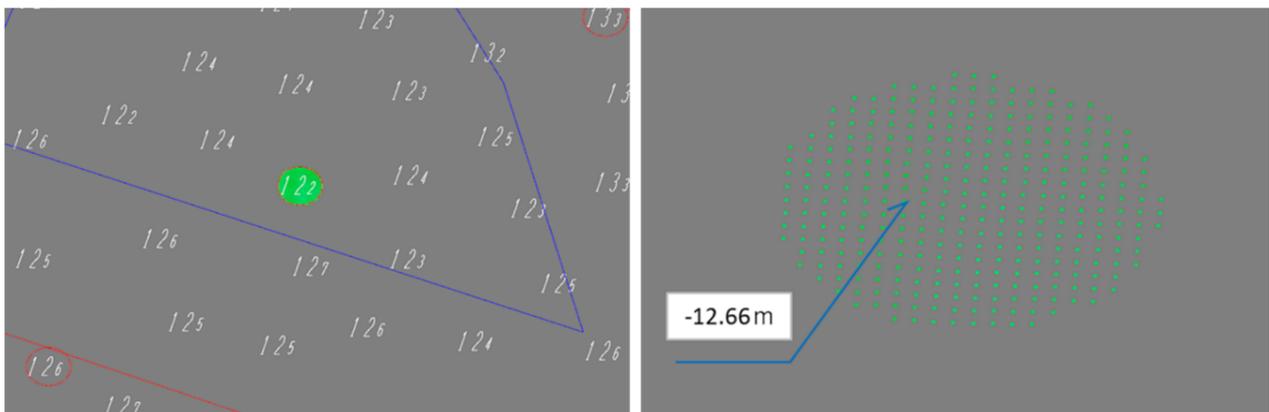


図-3.49 拡大水深原稿図と CUBE 処理後の 3 次元モデル

図-3.49 の抽出位置において、直径 10m 間での最浅値を抽出した.図-3.50 に示すように、-12.2m の水路測量図面に対して-12.66m と 46 cm 深い値を示した.なお、水路測量は 0.1m 単位に切り捨てられるため、CUBE 処理の方が 0.4m 深い結果となった.従来の熟練技術者による解析は、安全側で処理され、スワス外側の密度の薄い高めに計測された点についても採用する.CUBE 処理では外側の浮いた点や密度の薄い点は採用されないことから、従来法よりも深く評価されることがある.この CUBE 処理による水深値がより正確な値に近づいていると考える.



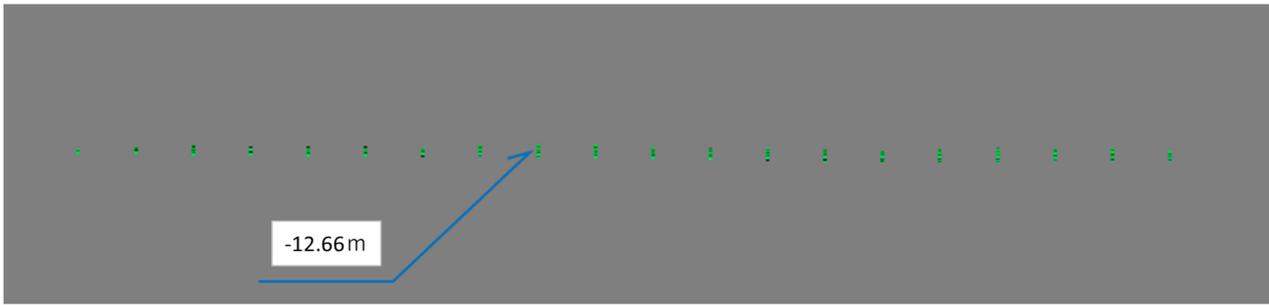


図-3.50 左：水路測量図と抽出位置，右：斜めキャプチャー，下：真横キャプチャー

3.6.5 精度比較

① ヒートマップによる精度比較

ヒートマップを図-3.51 に示す。従来手法にて求めた 3 次元データと CUBE 処理にて求めた 3 次元データを比較したところ、従来手法にて求めた 3 次元データの方が平均 14.3 cm 浅い結果となった。最高標高は-11.820m、最低標高が-13.729m、最大標高差は、9.7cm、最小標高差は-71.3cmであった。最小標高差の値が大きい要因として、上述のスパッドによる跡が影響していると考えられる。従来手法による出来形測量が行われた 5 月時点では、スパッド堀跡の横の盛り上がりが存在しデータとして記録されたことがわかる。また、図-3.52 に示す断面抽出図からも、USV で取得したデータ（手動処理）よりも従来手法による海底が全体的に約 10cm 程浅くなったことがわかる。これは、精度誤差要因によるもの、主に潮汐等の誤差によるものだと考えられる。USV 測量時は、上げ潮で東から西方向に流れており、検潮所から見れば測量場所は潮上方向に位置していた。一方、5 月 18 日の測量は下げ潮で反対であった。この事から USV 測量時は深く測深され、5 月測量時は浅く測深される傾向にあった。また、5 月実施の測量から約半年経っており、海底地形、特にスパッド堀跡がなだらかになったことも要因として考えられる。さらに、今回の計測では、走破性とスピードを上げるために、ソナーヘッドを船首側、モータを船尾側に設置した。そのため、走行時の喫水と停泊時の喫水とで、走行時はフロント側が少し浮くように（角度がつくように）設定されていたため、持ち上げられた状態が平常時とみなされ、船が浮いた分データが深く測深されたのではないかと考える。

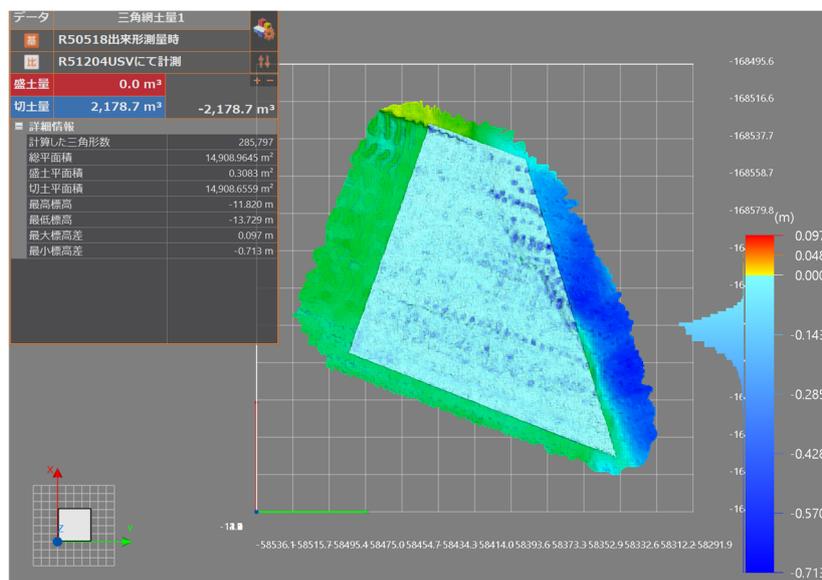


図-3.51 ヒートマップ

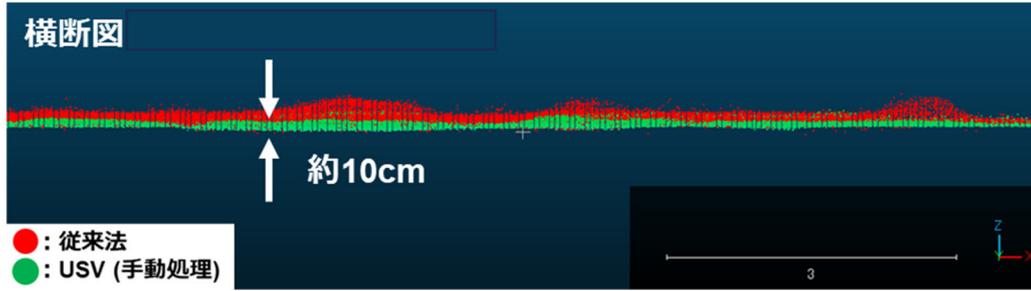


図-3.52 断面抽出図

3.6.6 データ間の変状抽出

本項目では、従来法によるデータと USV によるデータ間での変状抽出を行った。取得した点群データのうち、図-3.53 に示す掘り下げ (浚渫) 区域を中心とした、約 115m×約 100m の範囲で変状を把握するために ICP (Iterative Closet Points) と呼ばれるアルゴリズムを応用した変状抽出を試みた。

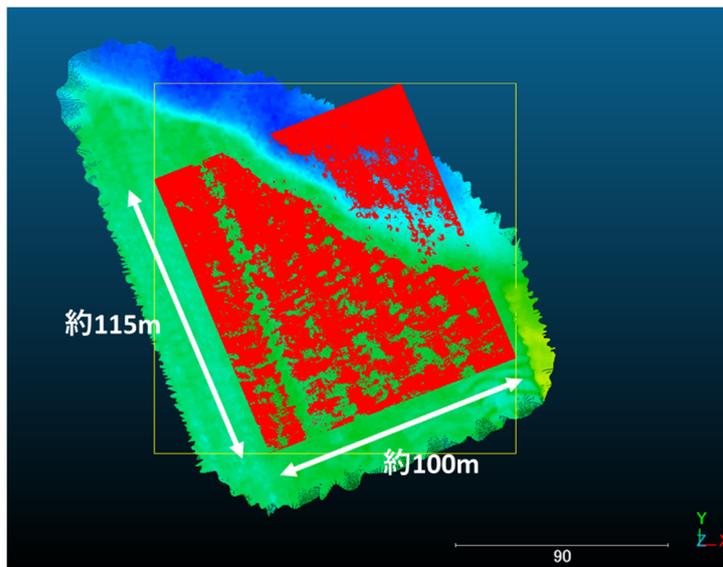


図-3.53 変状抽出区域

変状抽出は ICP と呼ばれるアルゴリズムを応用する。ICP とは Iterative Closest Points の略称で、SLAM 技術を用いたスキャンマッチングのアルゴリズムの 1 つである。スキャンマッチングとは、2 つのスキャン(点群)の形状が合致するように位置合わせをする技術のことで、ICP は 2 つのスキャン(現在スキャンと参照スキャン)の間でスキャン点の対応付けと位置の最適化を交互に繰り返すことで点群のマッチングを行う方法である。つまり ICP とは 2 つの点群が整合するように、その位置姿勢の関係を調整する方法の一つである。繰り返し計算に基づいて、段階的に位置姿勢を調整する。

図-3.54 にマッチングの過程を示す。ICP アルゴリズムによる点群マッチングの過程について、(1)~(3)の順に概説する。ICP は繰り返し計算であるため、その繰り返し数を k で表し k 回目の繰り返しにおいて最適化した位置を x_k^i で表すこととする。

(1) データの対応付け

k-1 回目の繰り返しでの位置 x_t^{k-1} において、スキャン S_t の点とスキャン S_{t-1} の点を対応付ける。まず k 回目の位置 x_t^k が得られたとして、その位置での現在の各スキャン点 p_i^k は次の式で計算される。 R^k は x_t^k の回転ベクトルであり、 t^k は x_t^k の並進ベクトルである。

$$p_i^k = R^k p_i + t^k \tag{3.3}$$

次に、 p_i^k から最も近い参照スキャン S_{t-1} の点 $q_{j_i}^k$ を次の式で求める。ICP のデータ対応付けの基準は多くの場合、ユークリッド距離を用いる。すなわち、ユークリッド距離が近い点同士を近づけている。 $\operatorname{argmin} = f(x)$ は $f(x)$ を最小にする x を表す関数である。この式から p_i^k からのユークリッド距離が最も小さくなる点を探して $q_{j_i}^k$ とする。ここで j_i はスキャン S_t の点番号 i に対応するスキャン S_{t-1} の点番号 j を表す。対応付けの結果は、 S_t と S_{t-1} の各点番号のペアの集合 $C_k = \{(1, j_1), \dots, (N, j_N)\}$ で表す。ただし、 N は点の個数である。

$$q_{j_i}^k = \operatorname{argmin} \|p_i^k - q_i^k\| \tag{3.4}$$

(2) 最適化位置の推定

(1) で求めた対応付けにおいて、コスト関数が最小となる x_t^k を求める。以下の式で各点間の距離の二乗平均を求める。コスト関数とはその入力値がよい値かどうかを評価する関数でコスト関数が最小(極小)となる入力が最も良いと判断されるようにする。ICP におけるコスト関数は位置 x_t^k を入力して、対応付けされた転換の位置誤差の平均を返す関数 $G_1(x_t^k)$ である。つまり、2 つのスキャン間のずれ(各点の位置誤差)が小さいほど尤もらしい位置だと判断する。位置の推定では $G_1(x_t^k)$ が最小となる x_t^k を求める。

$$G_1(x_t^k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|(R^k p_i + t^k) - q_{j_i}^{k-1}\|^2 \tag{3.5}$$

(3) 繰り返し

位置合わせのスコアが変化しなくなるまで、(1)と(2)を繰り返す。k 回目の $G_1(x_t^k)$ の最小値と k-1 回目の $G_1(x_t^{k-1})$ の最小値の差が閾値以下になったら繰り返しを終了する。

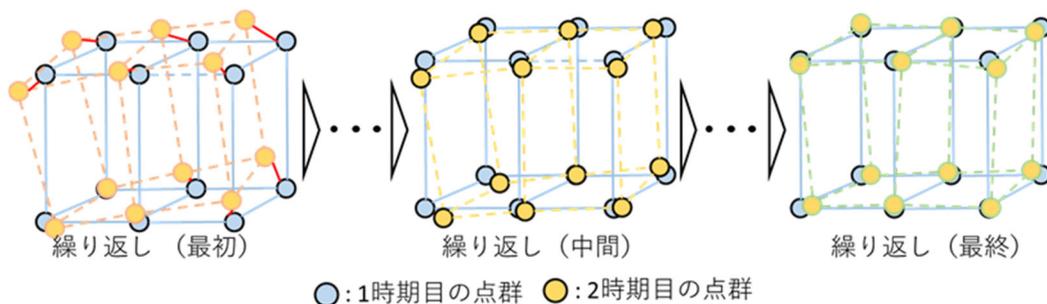


図-3.54 ICP における繰り返し計算の過程

次に ICP アルゴリズムによる変位量抽出について述べる.図-3.55 左に変位量抽出理論の概略図を示す.ICP のアルゴリズムは近傍点を対応付けから最適化を行う過程で, 点の移動が回転と平行移動の行列で産出されるため, 点の移動をベクトルで表すことができる.このベクトルを応用し, マルチビームで計測した 2 時期の点群データに対して ICP アルゴリズムを適用すると, 2 時期で動いていない点については移動量が算出されないが, 動いた点については点の移動を向きと量で算出することができるため, この移動量を変位量とみなすことができる.

点群に対して ICP で変位量抽出を行う際, 全点群に対して点群マッチングを行うのではなく, 正方形の範囲に区切ったメッシュごとに解析を行う.図-3.75 右にメッシュサイズを表した図を示す.そして, メッシュ内の点群の移動量と向きの平均値を用いて, 変位ベクトルを算出する.このメッシュの大きさをメッシュサイズと定義する.また, メッシュについて点群マッチングを行う際, どの点群までをマッチングの対象とするか決める必要がある.図-3.56 に示すこの範囲のことをブロックレンジと定義する.

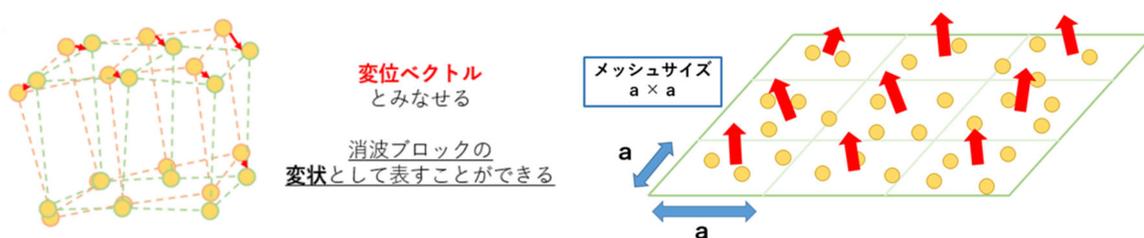


図-3.55 左 : ICP における繰り返し計算の過程, 右 : ICP 解析におけるメッシュサイズ

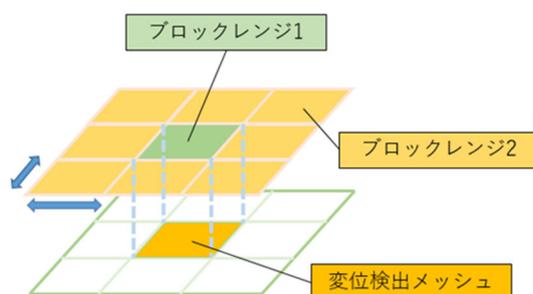


図-3.56 ICP 解析におけるメッシュサイズ

3.6.7 変位抽出手法の概要

従来法(測量船)によるデータを参照データとし, USV によるデータの変位抽出を行う.まず, 従来法によるデータと USV のデータの位置合わせを CloudCompare で行う.位置合わせでは, USV によるデータを基準として, 従来法のデータをマッチングした.マッチング前後のデータを図-3.57 に示す.次に任意の大きさにメッシュカットを行い, ICP を用いて, メッシュ内の変位の平均値を算出する.本検証では, ブロックレンジは 1 とした.また, 各メッシュ内の変位の平均値をカラースケールで表し, Z 方向 (標高方向) の結果を示す.

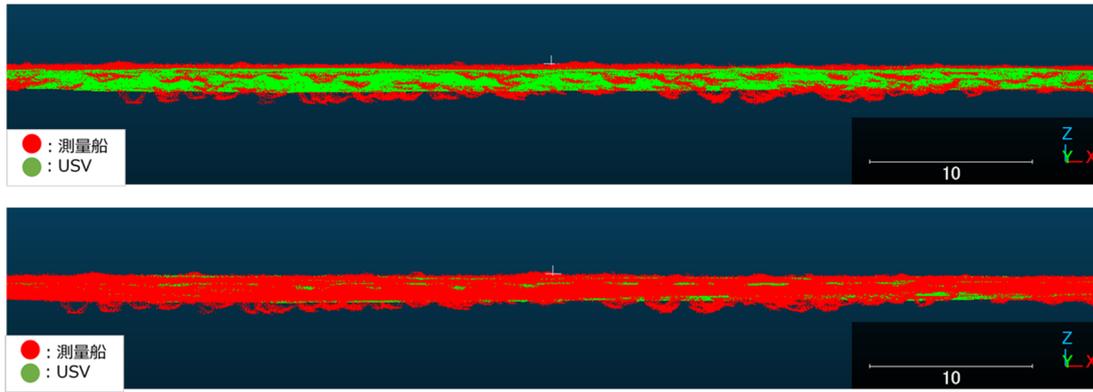


図-3.57 マッチング前後

変状抽出結果を図-3.58 に示す.変状抽出結果, 全体的に 0.1m の差異が見られ, 特に赤枠 (点線) で囲まれた領域において約 0.1~0.2m の大きな変状が見られた.今箇所は, 図-3.59 に示すようなスパッド地形が顕著にみられた領域であったため, 変状が周囲に比べて大きく見られたと考える. 変状が約 0.5m と大きく見られた箇所は, 5月出来形測量が実施された後, 他事業として浚渫工事が行われたため, 掘り下げ区域境界が図-3.60 のような起伏が激しい地形となり, 急激な変化が見られたと考えられる.これらの結果より, ICP 技術の応用によって, 定量的に変状発生箇所を表現できたことから, リアルタイムに航路の局所的な変状発生箇所を把握することが可能である.

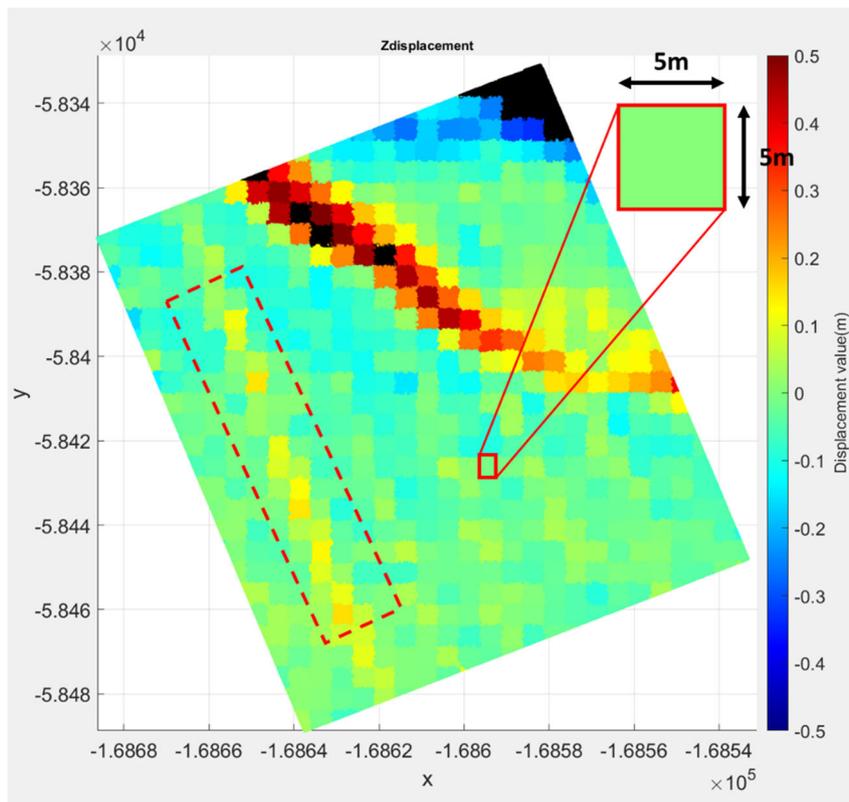


図-3.58 変状抽出結果

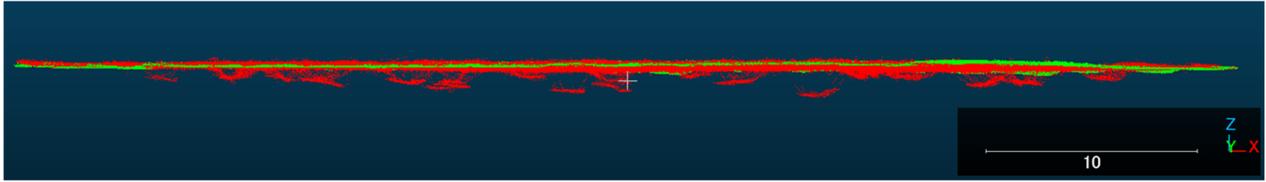


図-3.59 赤枠（点線）抽出断面図

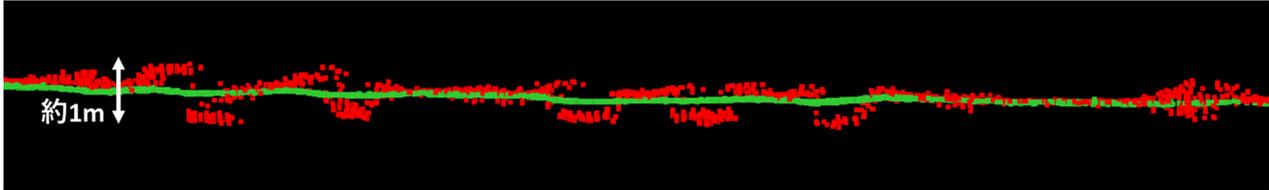


図-3.60 掘り下げ区域境界付近の起伏

3.7 従来工法との比較

本項では、マルチビーム測深を実施するにあたりかかった費用を、今手法 (USV マルチビーム測深+CUBE 処理)と従来手法 (有人船舶マルチビーム測深+手動によるデータ処理)とで比較する。なお、今回計測を実施した面積 0.02km^2 あたりで、国土交通省の積算基準に準じて積算した金額を使用し、また今手法については今計測で用いた最適軌跡解析 (RPA)と CUBE も考慮する。まず今手法と従来手法との総費用比較を表-3.9、図-3.61 に示す。今手法で測量を実施した際にかかった総費用は、1,880 千円である。一方で、従来手法による測量を実施した場合は、3,860 千円であり、差額は1,980 千円で2.05 倍の増加である。

表-3.9 面積 0.02km^2 あたりの USV と有人船舶の総費用比較 (単位：千円)

単位：千円	
測量方法	費用 (消費税込み) / 0.02km^2
マルチビーム深淺測量 (今手法)	1,880
マルチビーム深淺測量 (従来手法)	3,860
差額	(1,980)



図-3.61 面積 0.02km^2 あたりの USV と有人船舶の総費用比較 (単位：千円)

工程の内訳による費用比較を図-3.62 に示す。測量準備 (機材運搬・艀装・艀装テスト等)、マルチビーム測深、データ解析 (報告書作成) の3つの工程と直接経費、間接測量費をUSVと測量船で

比較することで評価する.3つの工程のうち、特に測量準備、データ解析の工程、また直接・間接測量費において、従来手法より今手法のコストが少ないことがグラフからわかる.USV 測量時、測量準備にかかった費用が少なかった原因として、今回、測量船によるマルチビーム測深実施にあたり艀装テストを行ったことに対して、USV の艀装テストに費用がかからなかったことが要因の一つである.しかし、艀装テストの項目を除いて積算した場合も、USV 測量に要した費用は測量船と比べて低い結果となっている.また、測量準備に要した人員の差による差額も大きな要因の一つである.測量準備に要した員数を 1.00 式で示し金額を表したものを表-3.10、表-3.11 に示す.今手法の測量準備に要した員数が 3.75 に対し、従来手法の測量準備に要した員数は、7.50 と今手法の員数の 2 倍である.USV は無人船であり、自動化された測深システムを使用することができる一方で、有人船舶は USV と比べて多くの機材の設置や運搬等、有人で手動での操作が必要である.この自動化の違いが今手法の測量準備員数を減らし、効率を高めていることがわかる.他方で、データ解析の工程においては、今研究で CUBE 処理を使用したため大幅に費用削減できたと考える.費用だけではなく、作業時間も大幅に削減することができた.手動による作業時間は最低でも約 3 時間かかるといわれているが、今回適用した CUBE 処理は約 10~20 分で即座に解析処理することができた.なお、間接測量費は、諸経費や法定福利費を含む直接測量費によって変動するものである.

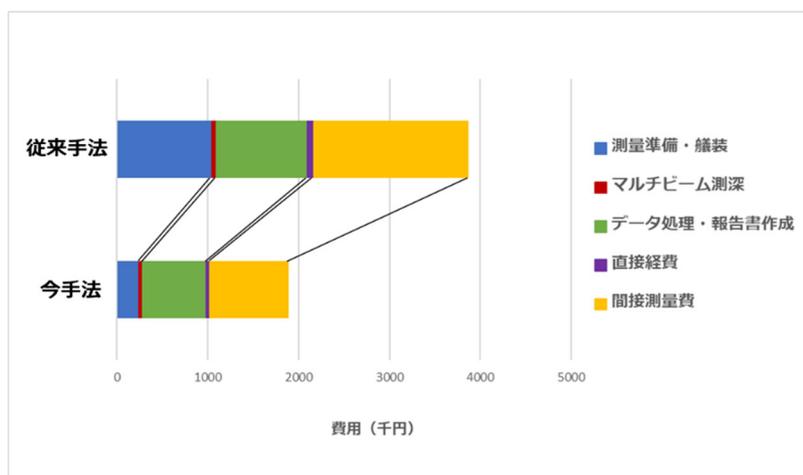


図-3.62 費用内訳 (単位: 千円)

表-3.10 USV の測量準備費用 (単位: 円)

今手法 (USV)					1.00式	単位: 円	
作業工程		測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量助手	員数	金額
		51,000	44,000	34,300	32,200		
測量準備	外業	0.500	0.750	0.500		1.750	75,650
測量準備	内業	0.500	0.750	0.500	0.250	2.000	83,700
工数計		1.000	1.500	1.000	0.250	3.750	
金額計		51,000	66,000	34,300	8,050		159,350

表-3.11 有人船舶の測量準備費用（単位：円）

従来手法 (有人船舶)						1.00式	単位：円
作業工程		測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量助手	員数	金額
		51,000	44,000	34,300	32,200		
測量準備	外業	1.000	1.500	1.000		3.500	151,300
測量準備	内業	1.000	1.500	1.000	0.500	4.000	167,400
工数計		2.000	3.000	2.000	0.500	7.500	
金額計		102,000	132,000	68,600	16,100		318,700

また、マルチビーム測深に要した員数と金額を表したものを表-3.12 に示す。員数は USV が 4.00 に対して、測量船が 5.50 と僅かに多く USV より費用がかかったことがわかる。

表-3.12 マルチビーム測深費用（単位：円）

								1.00式	単位：円
作業工程		ライトバン運転[2L 69kW:運転2h]<4>	調査船(借上)運転[1 名船員FRP D 70PS型 3.0t 51kW]<5>	測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量助手	員数	金額
		3,261	70,722	51,000	44,000	34,300	32,200		
マルチビーム測深 (USV)	外業	1.000	1.000		1.000	1.000		4.000	152,283
マルチビーム測深 (有人船舶)	外業	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500	5.500	219,383

総合的な評価としては、今手法を用いることでマルチビーム測深にかかる費用を、従来手法と比較して大きく削減することが可能であることが示唆された。他の項目についてもデメリットがほぼないことから、ICT 浚渫への今手法の導入を肯定的に評価できることを示した。

第4章 UAVによる減容化工事のモニタリング技術の検討

4.1 概説

本章では、2つ目の研究開発テーマである、グリーンレーザ搭載ドローン(UAV)による浚渫土砂処分場(揚土場)の計測技術の検討を行う。初めに、計測概要を述べ、その後検証・計測結果について議論する。最後に、計測結果に対する原因分析を行い、それについて考察をする。

4.2 モニタリング実験の概要

本節では、本研究での使用機器並びに計測場所・作業の概要について述べる。また、水部の精度検証、濁度・底質・水質の影響の検証のために計測範囲内に設置した試験タンクの概要についても説明する。

4.2.1 計測機器

本研究では、2種類のグリーンレーザスキャナを用いて計測を行っており、計測日は2023年11月30日と2023年12月6日の2日間である。図-4.1左には11月30日に用いた計測機器の外観を示しており、これはFreefly Systems製のAlta XというドローンにRIEGL社製のVQ-840-G(以下「レーザ1」とする)を搭載したものである。まず、表-4.1にレーザ1の性能を示す。レーザ波長は532nm、スキャン速度は最大100走査/s、全レーザ光を合わせた角度の範囲である視野角(FOV)は40°となっている。また、このレーザスキャナの特徴は、一つ一つのレーザ光の広がり角であるビーム発散角や反射してきたレーザを受け取るレシーバーの範囲であるレシーバー視野角(以下「受光角」とする)、レーザの強さに関わる発射レートを計測現場の状態や特徴をもとに設定可能というところである。既存研究でビーム発散角の拡大の有効性が示唆されており、このレーザ1を用いることでビーム発散角を拡大した計測が実現可能となる。また、このレーザは約12kgとほかのレーザに比べて重量が重く、それに合わせたドローンを使用する必要がある。そのため今回は表-4.2に性能を示した15.9kgまで搭載可能なドローンを用いた。



図-4.1 左：UAVグリーンレーザ（11月30日使用）の外観，右：UAVグリーンレーザ（12月6日使用）の外観

表-4.1 VQ840-G の仕様

レーザ波長	532nm
発射レート	設定可能 (50~200kHz)
スキャン速度	最大 100 走査/s
視野角 (FOV)	40° (±20°)
重量	約 12kg
ビーム拡がり角	設定可能 (1mrad~6mrad)
レーザクラス	3B

表-4.2 Alta X の仕様

動力方式	バッテリー
サイズ	展開直径 1415 mm×高さ 387 mm
重量	10.4 kg (バッテリー搭載なし)
飛行時間	22 分 (10 kg 搭載時)
最大速度	120 km/h
最大積載可能重量	15.9 kg

また、図-4.1 右に 12 月 6 日の計測に用いた計測機器を示す。これは AMUSE ONESELF 製の HYBRID DRONE-GLOW.H というドローンにグリーンレーザスキャナ AMUSE ONESELF 製 TDOT3GREEN (以下「レーザ 2」とする) を搭載したものである。表-4.3 にはレーザ 2 の性能を示しており、レーザ波長は $523 \pm 1\text{nm}$ 、スキャン速度は 30 走査/s、視野角 (FOV) は 90° 、ビーム発散角は 1.5mrad である。

このレーザは既存研究で使用されていたものと同じでありビーム発散角の設定を変えることができない。しかし、重量が約 2.7kg と軽量であることから重量が重い場合よりも 1 回の飛行時間が長くなり効率的な計測が行えるという特徴がある。また、ドローンは表-4.4 に性能を示したものをを用いた。このドローンは電気自動車の走行距離を延ばすために開発されているエクステンダーを搭載したハイブリッド式で、ガソリンによりエンジンを動かすことで常に内蔵バッテリーを充電しながら飛行する仕組みとなっている⁵⁴⁾。そのため従来のバッテリー式ドローンではグリーンレーザスキャナを搭載すると約 20 分程度飛行でバッテリーの交換が必要であったが、ハイブリッド式ドローンではグリーンレーザを搭載して飛行した場合にも約 2 時間の飛行が可能となった。そのため、12 月 6 日の計測はこれらの機器を用いることで 1 回の飛行で広範囲の計測を行うことができた。

表-4.3 TDOT3GREEN の仕様

レーザ波長	$532 \pm 1\text{nm}$
発射レート	60, 000Hz
スキャン速度	30 走査/s
視野角 (FOV)	$90^\circ (\pm 45^\circ)$
重量	2.7kg
ビーム拡がり角	1.5mrad
レーザクラス	3R

表-4.4 HYBRID DRONE-GLOW. H の仕様

動力方式	ハイブリット
サイズ	ローター間距離 900×900mm×高さ 450mm
重量	8.8kg (バッテリー, 燃料搭載なし)
飛行時間	2 時間 (TDOT3 GREEN 搭載時)
最大積載可能重量	3 kg (燃料除く)
使用燃料	無鉛レギュラーガソリン, 2 サイクルオイル (混合)

4.2.2 計測現場と計測作業の概要

計測は、図-4.2 に示す岡山県倉敷市の玉島ハーバーアイランド 4 号泊地土砂処分場で行った。本土砂処分場では主に水島港国際物流ターミナル整備事業において行われている航路や泊地の整備の際に発生する浚渫土の搬入が行われている。また、浚渫土の受入容量の増加を図るため、令和 2 年から令和 5 年 3 月まで PDF 工法（フロート式プラスチックボードドレーン工法）等による減容化工事が行われた。その後、水島玉島航路の水深 12m の浚渫工事で発生した土砂が搬入されており、これからも土砂が運び込まれることで圧密沈下がさらに促進されていくと考えられる。

今回は減容化施工後の令和 5 年 11 月 30 日と 12 月 6 日の 2 度の UAV グリーンレーザ計測を行った。計測範囲を図-4.3 に示しており、約 50m×約 300m の赤枠部分が 11 月 30 日の計測範囲、黄色の枠線で示した約 400m×約 700m の部分が 12 月 6 日の計測範囲である。



図-4.2 計測場所の外観



図-4.3 計測範囲

計測条件の概要を表-4.5 に示す.11月30日の計測では対地高度を120m, 飛行速度を5m/s, コース間の重複度を表したサイドラップを50%, レーザの強さに影響する発射レートを50kHz, レーザ光の広がり角であるビーム発散角を2.0mradとした.受光角についてはVQ840-gの計測設定仕様において大きく設定する方が濁った水に適していると記載されている⁵⁵⁾ため, 今回の計測では受光角を6mrad, 9mrad, 12mradと変化させて計測を行った.計測時間について受光角ごとの3回の計測それぞれで約12分であった.

12月6日の計測では対地高度を50m, サイドラップを50%, 飛行速度を3m/s, ビーム発散角1.5mrad, 発射レートを60kHzとして計測を行った.計測時間はハイブリッド式のドローンを用いたことから約70分の長時間となっており, 計測範囲内約0.28km²を1回で計測した.

しかし, 両日ともに試験タンク上のみは, 水部の精度検証において十分な点密度を得られるように, 表-4.1に示した計測条件より低高度での飛行を行った.また, グリーンレーザは目に当たると網膜を傷つけてしまうことがあり, 計測は安全に考慮して行われる.そのため, それぞれのレーザの出力や計測現場の状態などを踏まえながら, 対地高度やビーム発散角などの計測条件を決定した.

表-4.5 計測条件

計測日	2023年11月30日	2023年12月6日
対地高度	120m	50m
サイドラップ	50%	65%
飛行速度	5m/s	3m/s
ビーム発散角	2.0mrad	1.5mrad
発射レート	50kHz	60kHz
受光角	6mrad,9mrad,12mrad	設定なし
飛行時間	約12分×3回	約70分×1回

4.2.3 試験タンクの概要

今回は現地土砂処分場の計測に加え、土砂処分場の特性である濁度・底質・水質が UAV グリーンレーザ計測に与える影響に関する検証を行うために図-4.4 に示す場所に試験タンクを設置した。試験タンクの概要を図-4.5 に示しており、①～⑤の試験タンクにおいて濁度による計測への影響の検証、⑥・⑦のタンクで底質の影響、⑧・⑨のタンクで水質の影響について検証を行った。また、①～⑤の試験タンクについては水部の精度検証を行うため、図-4.6 に示す直径 50 cm 高さ 10 cm の円形の対空標識をタンクの底に設置した。精度検証の際に、対空標識上の点が周辺の点群と区別できるように底上げをした対空標識を用いた。



図-4.4 試験タンク設置場所

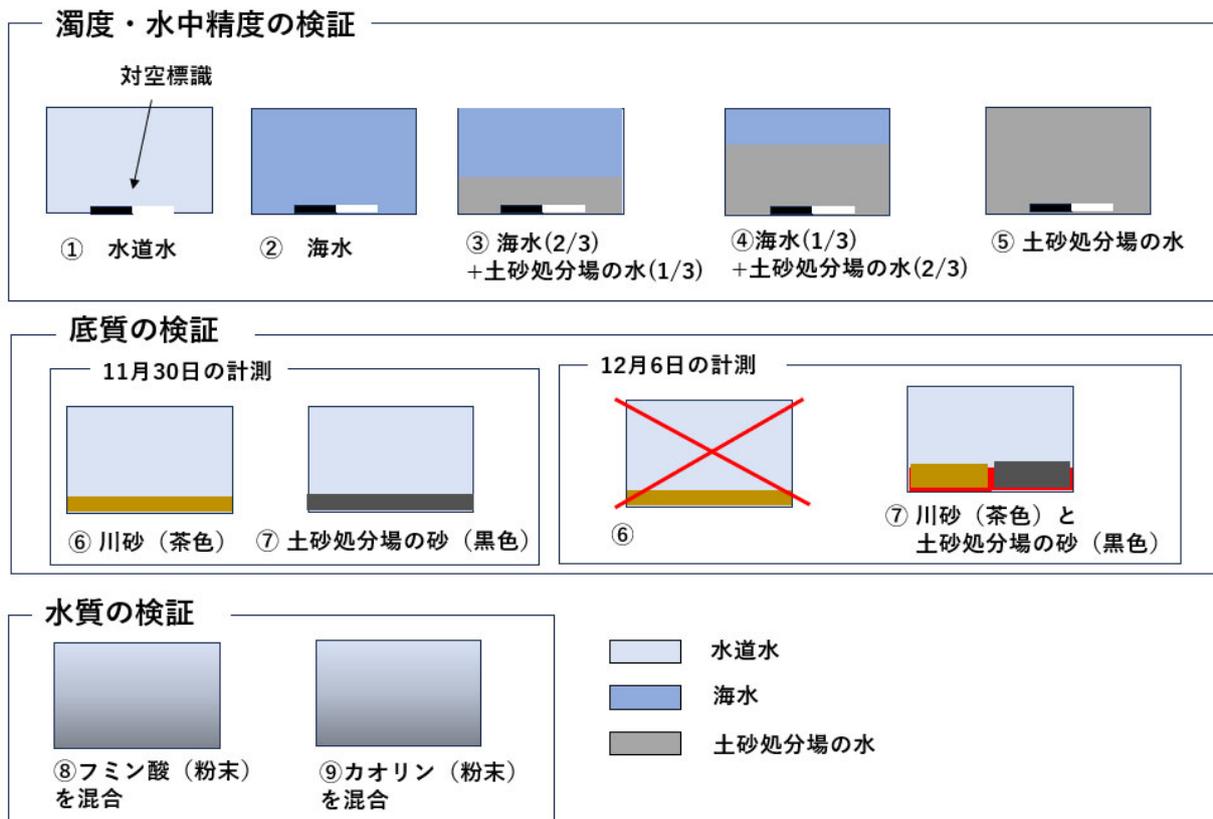


図-4.5 試験タンクの概要



図-4.6 水部の対空標識

4.2.4 濁度の指標

試験タンク内の水がUAVグリーンレーザに影響を及ぼす濁度について図-4.7に示す4つの計測方法から最適なものを選定する。

透明度調査 航空レーザ測探機の推奨の方法であるが、水槽の水深が1 mしかないので該当しない。濁度調査 精水1 Lに粘土鉱物1 mgが含まれた水を濁度1 NTUとして資料を比較対比して測定する方法が市販の濁度計を用いて計測できるため、定量的な判断ができるので採用する。透視度調査は二重線で書かれた十字が目視できる時の水槽の高さを判定するものであるが、個人差が出ると予想される。また浮遊物質(SS)調査は室内試験を要する為、簡便性に劣る。よって本研究は濁度計による濁度調査を採用し、濁度の指標を単位 NTU で表し、数字が大きければより濁っている状態を表す。

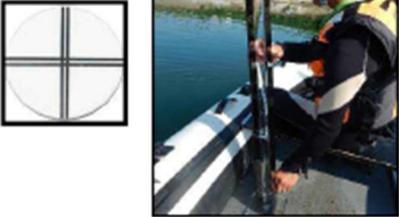
調査項目	調査方法	補足説明
透明度調査 	直径 30cm の白色盤（セッキ板）を沈め、目視できる水深を測定。この水深を 1 セッキと呼ぶ。	航空レーザ測深機メーカー推奨の方法であるが、淵等の深場でボートによる調査を要し手間を要す。
濁度調査 	精水 1L に粘土鉱物 1mg が含まれた水を濁度 1 として試料を比較対比して測定。	簡易の計測機器も市販されており、調査は比較的容易。
透視度調査 	透明な管に試料を入れて上部から透視。白色の標識板に太さ 0.5mm、間隔 1mm の二重線で書かれた十字が目視できるときの水層の高さを測定。	市販の透視度計には、30 cm、50 cm、100 cm の 3 種類がある。航空レーザ測深用には 100 cm を使用することが多い。調査は比較的容易。
浮遊物質（SS）調査 （室内試験による）	採水した試料を試験室に持ち帰り、水中の懸濁物質を濾紙で濾過したものを乾燥させて、その重量を測定。	室内試験を要するため、簡便性に劣る。

図-4.7 水部の対空標識

航空レーザ測深器を用いた公共測量マニュアル(案)P.40 参照

4.3 検証・計測結果と議論

本章では計測結果を概説する。まず、1 項において陸上と水部のそれぞれで精度検証を行い、2 項では試験タンクを用いた濁度・底質・水質の影響の検証を行う。そして最後の3 項では現地土砂処分場でのグリーンレーザの測深能力について考察を行う。

4.3.1 精度検証結果

(1) 陸上精度

陸上精度の検証は地上測量で計測した検証点の座標値と UAV グリーンレーザ測量の座標値を比較することで行った。本計測では図-4.8 に示すように調整点及び検証点を5 点設置した。また、設置箇所に使用した対空標識を図-4.9 に、TS による調整点測量結果を表-4.6 に示す。国土地理院から公開されている「作業規程の準則」の第4 編の第4 章では、精度検証について UAV グリーンレーザ計測で取得したデータ（オリジナルデータ）の位置及び標高の精度を検証及び調整するために、調整点を設置するものとするとし、調整点を複数設置する場合には計測範囲内に偏りなく配置するとしている⁵⁶⁾。しかしながら、今回の計測のように計測範囲に水部が多く含まれる場合には均等に調整点を設置することが難しい場合もある。そのため、調整点を用いた補正を行わない場合と補正を行った場合の両方について要求精度を満たすことができるのか検証を行った。



図-4.8 調整点及び検証点の設置箇所

Google



図-4.9 対空標識

表-4.6 TS調整点測量結果

測点	X	Y	Z
TK1	-167240.128	-60372.678	5.991
TK2	-167239.968	-60304.59	6.022
TK3	-167239.801	-60219.264	5.509
TK4	-167281.62	-60162.322	4.332
TK5	-167245.676	-60098.779	6.035

精度検証は各検証点とオリジナルデータで得られたデータの較差平均と RMS (Root Mean Square:二乗平均平方根) 誤差を求めることで行った.RMS 誤差の計算方法は式 (4.1) に示すように座標値の差の二乗を平均し, その平方根をとった値のことで, 値のばらつきを表す指標である.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (4.1)$$

ここで, x_i : オリジナルデータの値, \hat{x}_i : 検証点の値, n : 検証点の点数とする.

計測後のデータの補正方法は以下のとおりである.まず, 計測時に取得した GNSS データを PPK 方式 (Post Processing Kinematic: 後処理キネマティック方式) で補正する.PPK 方式とは記録したデータを後から基準点で取得したデータで補正する方法のことである.レーザ 1 の計測では計測現場の近くに位置する電子基準点「倉敷2」(図-4.10)を, レーザ 2 の計測では周囲の電子基準点から求めた仮想基準点(図-4.11)を使用して補正を行った.そして, GNSS のデータ補正が完了したらその GNSS データと IMU で取得した姿勢の情報取得点群データに紐づける.次に, コース間マッチングを行う場合にはコースごとの点群データの形状を見ながら 1 つのデータにしていく.さらに, 調整点に設置した対空標識上の点群データの標高平均と TS 測量結果との差を求め, の差分の調整を行う.また, 水中はレーザの屈折の影響があるため, 水面下の部分は屈折補正を行う.このような流れで計測データの補正が完了する.調整点による調整がないデータはこの流れの中の調整点による補正の部分を省いて行う.



図-4.10 電子基準点「倉敷2」
(国土地理院 基準点成果等閲覧サービス参照)

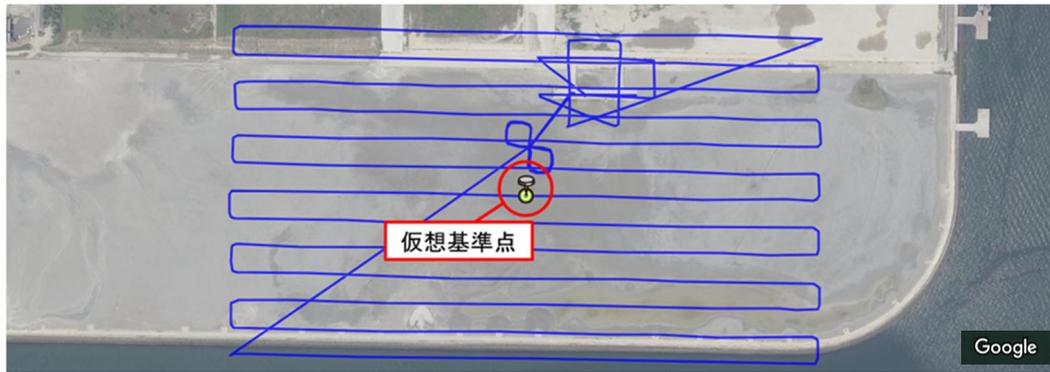


図-4.11 仮想基準点

11月30日の計測は、調整点を2点(TK2, TK4)、検証点(TK1, TK3, TK5)を3点とし、受光角を6mrad, 9mrad, 12mradと変化させて実施した。しかしながら、12mradの場合の計測データは欠損が多く、精度検証を行うことが出来なかった。そのため、6mrad, 9mradの2つの条件で、調整点による補正あり、補正なしの場合の合計4つのデータで精度検証を行った。精度検証の結果を表-4.7、図-4.12に示す。調整点による補正なしの場合には、6mradの場合が平均較差、RMS誤差ともに9.5cm, 9mradの場合は11.4cmであった。一方、調整点による補正ありの場合、6mradでRMSが0.7cm, 9mradで1.6cmと、補正なしの条件と比べて精度が9~10cm程度よくなっている。「作業規程の準則」の第4編の第4章 UAV グリーンレーザ測量においては3次元点群データの要求精度が10cmとされており⁵⁶⁾、調整点による補正なしのでは、基準の精度を満たすことができなかった。誤差が10cmを超えた原因としては、検証点の真値の計測における誤差が含まれていることが考えられる。検証点及び調整点の測量は、与点となる基準点をVRS(Virtual Reference Station)単点観測法により設置し、TSによる放射観測で求めたものである。このため、UAV グリーンレーザによる計測誤差に加え、検証点誤差として標高で3cmから5cm程度発生する可能性がある⁵⁶⁾。

また12月6日の陸上精度検証結果を表-4.8、図-4.13に示しており、TK1~TK5の5点を調整点、検証点の両方に用いた。検証結果を見ると調整点による補正を行わなかった場合にも平均較差が5.2cm, RMS誤差が8.1cmとなっており、「作業規程の準則」に記載されている精度を満たしている。これらのことから、レーザ1の6mradの場合、レーザ2の場合には要求精度10cmを満たしたが、レーザ1の9mradのように要求精度を満たさない場合もあったため、調整点による調整を行う必要があると考えられる。一方、各検証点間の較差のばらつきは最大で1.8cmであり、計測範囲内に調整点を均等に配置できない場合でも、離着陸場所での調整点1点による調整を行う事が有効と考える。

表-4.7 陸上精度（レーザ 1）

単位：m	点名	TS測量結果	オリジナルデータ	較差	平均較差	RMS誤差
6mrad	TK1	7.116	7.212	0.096	0.095	0.095
	TK3	6.712	6.805	0.093		
	TK5	7.186	7.284	0.098		
6mrad（調整あり）	TK1	7.116	7.127	0.011	0.005	0.007
	TK3	6.712	6.722	0.010		
	TK5	7.186	7.179	-0.007		
9mrad	TK1	7.116	7.233	0.117	0.114	0.114
	TK3	6.712	6.833	0.121		
	TK5	7.186	7.289	0.103		
9mrad（調整あり）	TK1	7.116	7.112	-0.004	-0.011	0.016
	TK3	6.712	6.710	-0.002		
	TK5	7.186	7.158	-0.028		

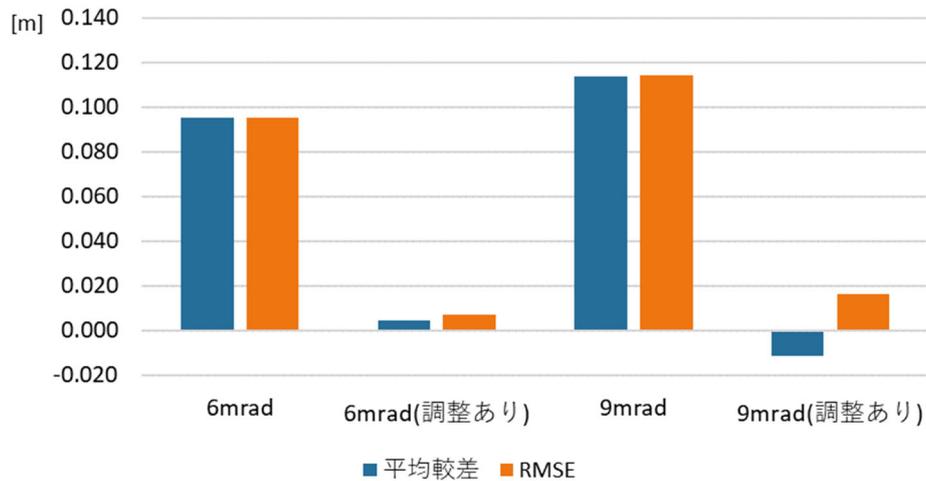


図-4.12 陸上精度（レーザ 1）

表-4.8 陸上精度（レーザ 2）

単位：m	点名	TS測量結果	オリジナルデータ	較差	平均較差	RMS誤差
補正なし	TK1	7.116	7.172	0.056	0.052	0.081
	TK2	7.106	7.251	0.145		
	TK3	6.712	6.673	-0.039		
	TK4	5.592	5.675	0.083		
	TK5	7.186	7.203	0.017		
補正あり	TK1	7.116	7.127	0.011	0.007	0.052
	TK2	7.106	7.211	0.105		
	TK3	6.712	6.629	-0.083		
	TK4	5.592	5.629	0.037		
	TK5	7.186	7.153	-0.033		

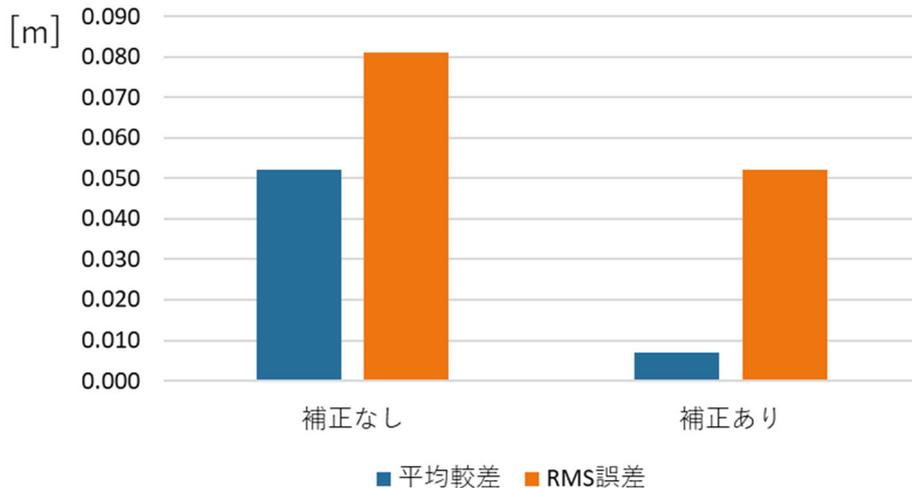


図-4.13 陸上精度（レーザ 2）

(2) 水中精度

水中の精度検証は試験タンク 1～5 のタンク内に設置した 5 つの検証点を用い、TS 測量の結果と UAV グリーンレーザ測量の座標値を比較することで検証を行った。図-4.14 には、計測日ごとの試験タンク濁度を示しており、濁度の計測は NTU 単位で表示される東亜ディーディーケー(株)のポータブル濁度計を使用した。計測結果を見ると、試験タンク 1 から 5 まで徐々に濁度が高くなっていることが分かる。まず、レーザ 1 の精度検証結果を表-4.9、表-4.10、図-4.15、図-4.16 に示す。結果を見ると受光角 6mrad, 9mrad の両方の場合で、試験タンクの近くに位置する陸上の TK4、タンク 1 とタンク 2 は±1 cm 程度と非常に小さくなっているが、タンク 3 から 5 にかけては 3 cm 程ずつ増加していき、試験タンク 5 においては約 10cm 誤差が出ている。このような結果が得られた原因としては、レーザの遅延・屈折が関係していると考えられる。グリーンレーザ計測においては水面下について一定の補正が行われている。しかし、土砂処分場の水は濁りが強く、水中の懸濁物質が非常に多い。そのため、海水よりも密度が高くなっており、通常の補正よりも実際の遅延・屈折率が大きく、レーザが反射した位置が正確に捉えられていなかったのではないかと考えられる。また、レーザ 2 の精度検証結果を表-4.11、図-4.17 に示すが、レーザ 2 の場合は試験タンク 5 の水底の点群が取得できておらず、試験タンク 4 までしか精度検証が行えていない。結果については、タンク 1 で誤差が大きくなっているが、タンク 2～4 の間ではレーザ 1 と同様に濁度の増加に伴い、誤差が増加している。

これらの結果から、精度の評価を行う。土砂処分場での深浅測量に関する要求精度については決められていないため、「河川定期縦横断測量業務 実施要領・同解説」を参考にすると、深浅測量の要求精度として、表-4.12 が記載されている。水深 1m の場合では、要求精度が暖流において±20cm、湖・ダムにおいてが±11 cm、海岸においてが±21 cmとなる⁵⁷⁾。今回最も濁度が高く誤差が大きかったレーザ 1 の 9mrad タンク 5 (18NTU) の場合は誤差が 10.5 cm である。また、陸上の精度として約 1cm のずれがあるので、実質水中の誤差は 11.5cm となる。つまり、湖・ダムにおいての精度を満たすことができていない。また、濁度が大きいほど誤差が大きくなる傾向がみられたため、18NTU よりも濁度が高い場合にはさらに水部の精度が悪くなる可能性がある。したがって、土砂処分場での計測において水部の精度を高めるには、濁度ができるだけ小さい時期に計測を行うべ

きだと考えられる。

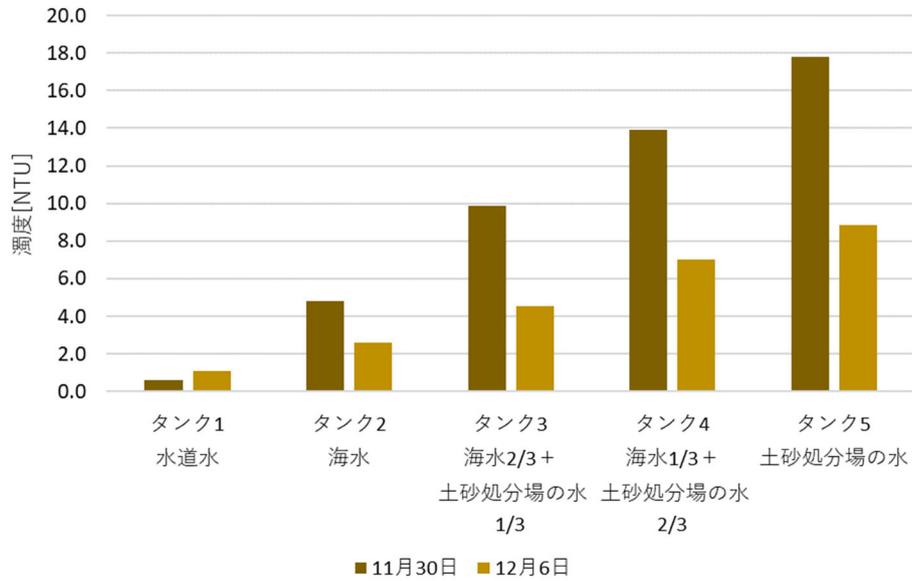


図-4.14 試験タンクの濁度

表-4.9 水中精度 (レーザ 1 6mrad)

単位：m	陸上 (TK4)	タンク 1	タンク 2	タンク 3	タンク 4	タンク 5
点群の標高平均	5.599	4.583	4.572	4.529	4.486	4.392
TS測量	5.592	4.585	4.574	4.559	4.548	4.486
較差	0.007	-0.002	-0.002	-0.030	-0.062	-0.094

表-4.10 水中精度 (レーザ 1 9mrad)

単位：m	陸上 (TK4)	タンク 1	タンク 2	タンク 3	タンク 4	タンク 5
点群の標高平均	5.603	4.590	4.577	4.521	4.484	4.381
TS測量	5.592	4.585	4.574	4.559	4.548	4.486
較差	0.011	0.005	0.003	-0.038	-0.064	-0.105

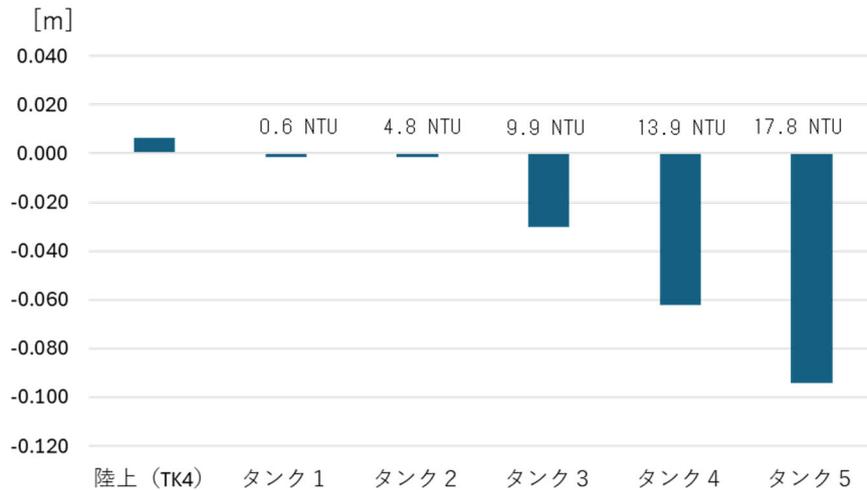


図-4.15 水中精度検証結果（レーザ1 6mrad）

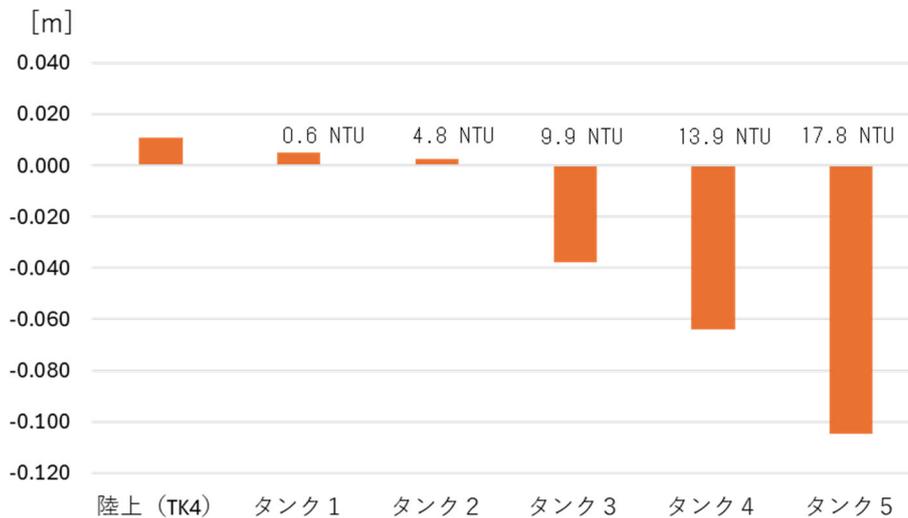


図-4.16 水中精度検証結果（レーザ1 9mrad）

表-4.11 水中精度（レーザ2）

単位：m	陸上 (TK4)	タンク 1	タンク 2	タンク 3	タンク 4	タンク 5
点群の標高平均	5.629	4.540	4.561	4.531	4.505	取得点群なし
TS測量	5.592	4.585	4.574	4.559	4.548	4.486
較差	0.037	-0.045	-0.013	-0.028	-0.043	—

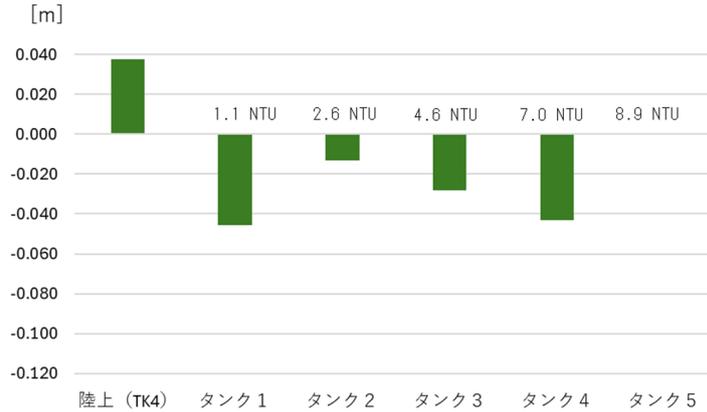


図-4.17 水中精度検証結果（レーザ 2）

表-4.12 深浅測量の要求精度

種別		精度	摘要
定期横断、流量観測量横断		±15cm	距離精度 L/300。Lは中心杭等と末端見通杭の測定距離(m 単位)
その他の横断	急流	±30cm	
	緩流	±20cm	
湖・ダム		±(10+h/100)cm	hは水深(cm 単位)
海岸		±(20+h/100)cm	

4.3.2 土砂処分場の特性による測深能力への影響

(1) 検証概要

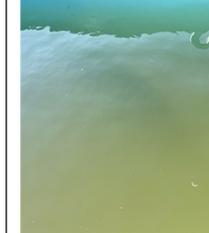
4.2.2.1 試験タンクの概要に記載した条件を変えた試験タンクを用いて、土砂処分場の特性の濁度、底質、水質のグリーンレーザの測深能力への影響について試験タンクの底の点密度を比較することで、検証を行った。試験タンクの大きさは内寸 2000×900×1200(mm)のものを使用した。現地土砂処分場では水深 1m 以上の時には残容量を把握することが出来なくても浚渫土を十分に投入することが出来るため、残容量のモニタリングが求められるのは水深 1m 以下になった頃である。そのため試験タンク内で水深 1m を確保できるように 1.2m の高さの試験タンクを用いた。

(2) 濁度の影響

土砂処分場はこれまでグリーンレーザによる計測が行われている河川や海岸に比べ濁りが強い。そのため浮遊物質によるレーザの散乱が懸念される。そのため、今回は濁度を調整した試験タンクを準備し、試験タンクの底の点密度を比較することでグリーンレーザ計測における濁度の影響の大きさについて評価を行った。濁度は水道水、海水、土砂処分場の水の割合を変えることで、5段階に変化させた。タンク 1 は水道水のみを、タンク 2 は海水のみ、タンク 3 は海水を 3 分の 2 と土砂処分場の水を 3 分の 1、タンク 4 は海水を 3 分の 1 と土砂処分場の水を 3 分の 2、タンク 5 は土砂処分場の水のみを入れたものである。試験タンクの概要を表-4.13 に示しており、タンク 1 から

5にかけて濁りが強くなっている.濁度の数値が11月30日と12月6日で異なっているのは、試験タンクの設置からの経過時間が異なることが考えられる.11月29日に試験タンクの設置を行っており、12月6日の場合は設置から1週間ほど経過していた.そのため、12月6日の計測前に試験タンク内を攪拌したが11月30日に比べ浮遊物質の沈殿が起こっていたと考えられる.図-4.18に水底の点群の反射強度について示しており、タンク1の場合が最も反射強度が高く、濁度が高い試験タンクほど反射強度が低くなっていることが分かる.また、点密度の計算結果を表-4.14に、点密度と濁度の関係を図-4.19、図-4.20に示す.試験タンク1から5については水部の精度検証を行うために白色の対空標識を使用しているため、通常の場合よりも点群が取得しやすくなっているそのためその部分を取り除いた水底部分の点密度を求めた.点密度の結果を見ると点密度も濁度の大きさが大きくなるにつれて小さくなっていることが分かる.また、レーザ1の場合については濁度10NTU ごろまでは点密度が大きく変化はしないが、10NTU を超えると大きく減少し18NTU では水深1m の場合の水底を捉えることが出来ていない.また、レーザ2においても濁度が高くなるにつれて点密度が減少しており、9NTU になると水底を捉えることが出来ていない.レーザ1のような水部の計測に特化した性能を持つレーザの場合は天候が良好で濁度が18NTU を上回っていない時期、レーザ2のような従来型のグリーンレーザの場合は9NTU を上回っていない時期に計測を行うとよいと考えられる.

表-4.13 試験タンク1~5の概要

		タンク1	タンク2	タンク3	タンク4	タンク5
種類		水道水	海水	海水2/3+ 土砂処分場の水1/3	海水1/3+ 土砂処分場の水2/3	土砂処分場の水
濁度(NTU)	11月30日	0.6	4.8	9.9	13.9	17.8
	12月6日	1.1	2.6	4.6	7.0	8.9
外観	11月30日					
	12月6日					

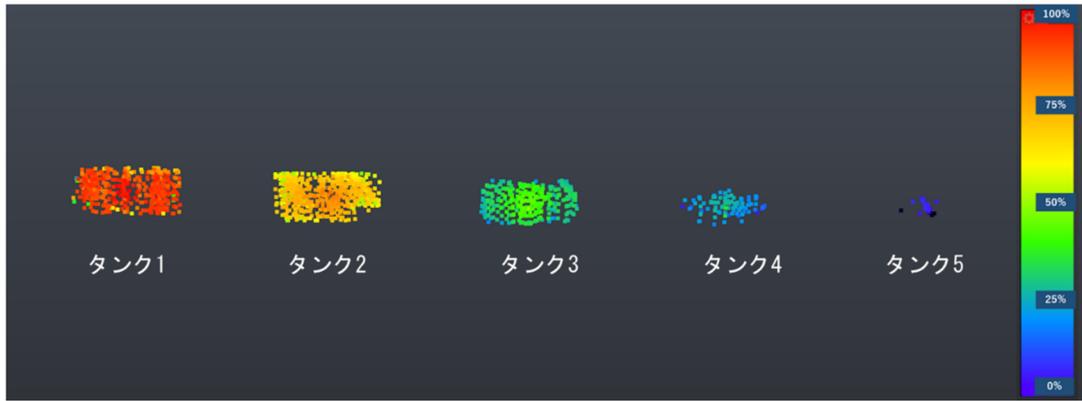


図-4.18 反射強度（試験タンク 1～5）

表-4.14 水底の点密度（試験タンク 1～5）

		タンク1	タンク2	タンク3	タンク4	タンク5
点密度 (点/m ²)	レーザ 1 (6mrad)	327	452	225	47	0
	レーザ 1 (9mrad)	498	231	260	119	0
	レーザ 2	1005	322	474	10	0

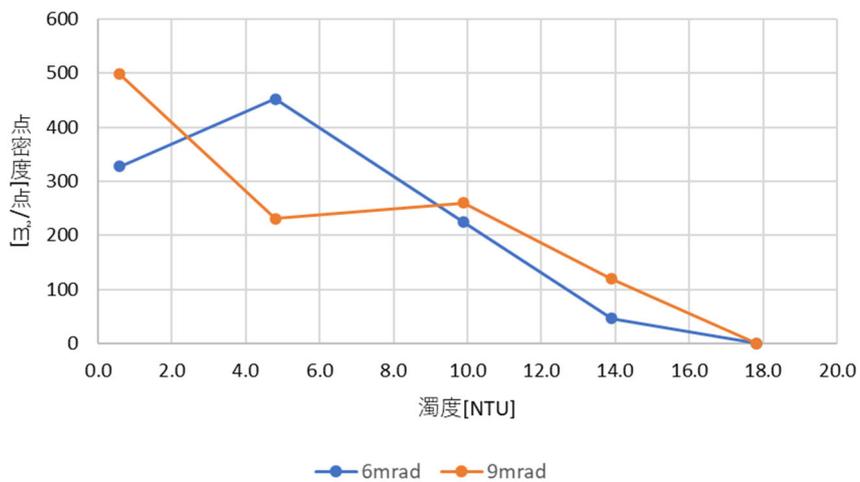


図-4.19 濁度による水底の点密度の変化（レーザ 1）

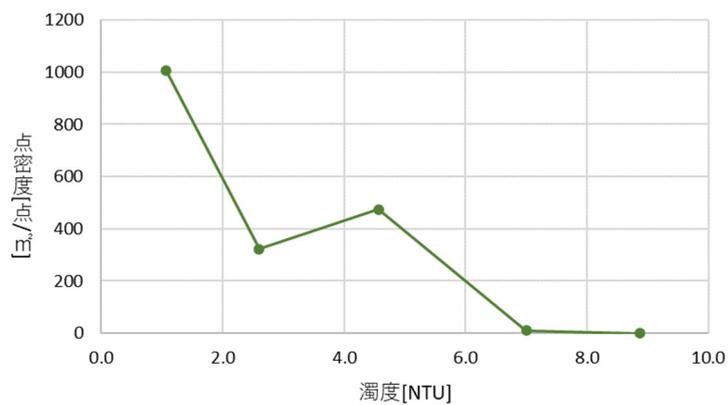


図-4.20 濁度による水底の点密度の変化（レーザ 2）

(3) 底質の影響

浚渫土砂処分場の底質は黒色の泥質土であり、海岸や河川の底質とは異なる特性を持っている。黒いものはレーザー光を吸収しやすいといわれており、土砂処分場の土砂も黒色であるため底質の色の影響を検証する必要がある。そのため、11月30日の計測では茶色の川砂と土砂処分場の黒色の砂を試験タンクの底に10cm程敷き、図-4.21に示すようにその上から水道水を投入した。そのため、砂が舞い上がってしまい、表-4.15の濁度の計測結果と外観からもわかるように、濁度の差が大きく出てしまった。反射強度の結果を図-4.22に示しており、点群の数も反射強度も大きく異なっていることが分かる。このように、11月30日の検証においては濁度の影響を統一することが出来なかったため、底質による影響を正しく検証ができなかった。

これらのことから12月6日の計測においては濁りによる影響を避けるために、図-4.23のトレーにそれぞれの砂を敷き詰めたものを、1つのタンクに入れることで濁りの状況を同等とした。水底の反射強度を図-4.24に示しており、トレーの大きさ(38.5cm×65cm)より、水底の点群から川砂、土砂処分場の砂それぞれの部分を切り取ると図-4.25のようになる。表-4.16にそれぞれの点数と点密度を示す。点数には大きな差はみられない。そのため、今回の計測では底質の色による影響は大きくないと考えられる。

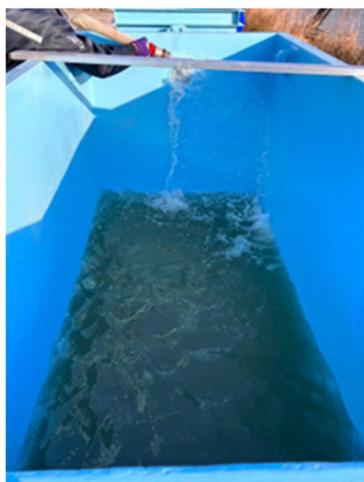


図-4.21 水道水投入の様子

表-4.15 試験タンク 6, 7 概要 (11月30日)

	タンク6	タンク7
底質	川砂 (茶)	土砂処分場の砂 (黒)
濁度(NTU)	4.1	18.9
外観		

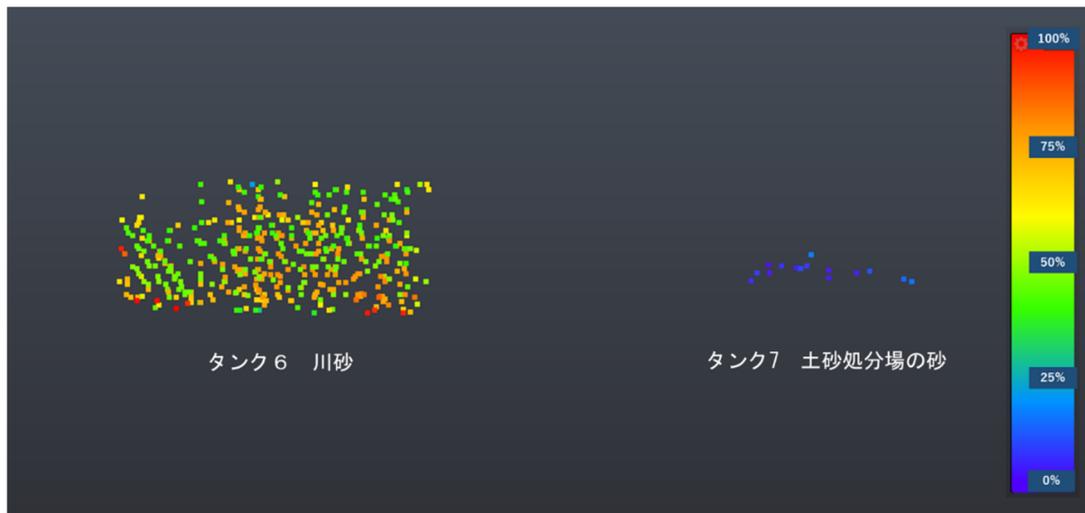


図-4.22 試験タンク 6, 7 の水底の反射強度 (11 月 30 日)



図-4.23 2種類の砂 (12月6日使用)

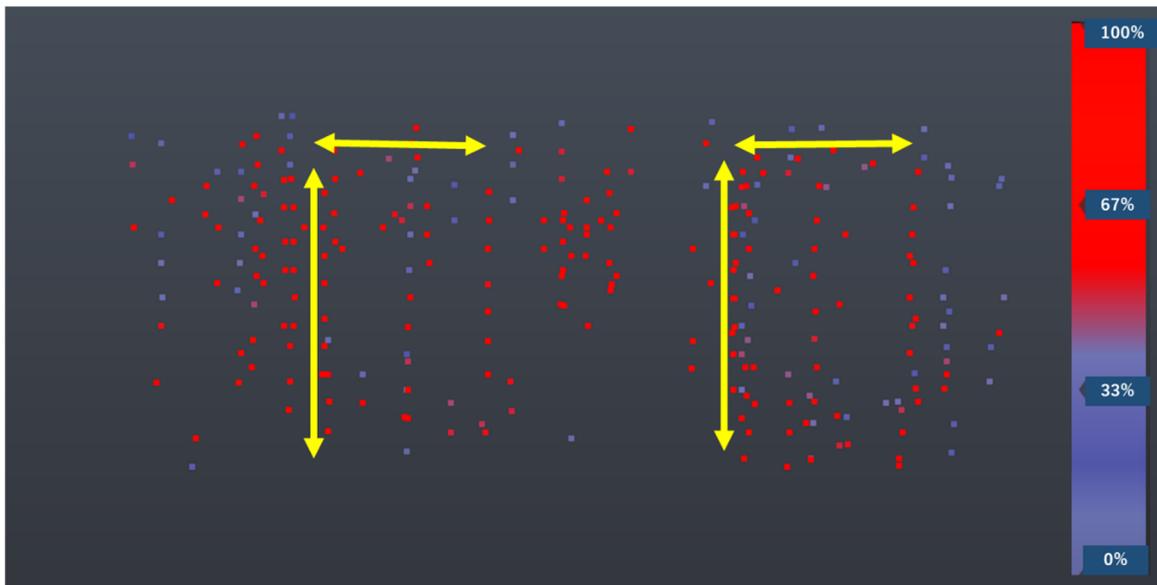


図-4.24 水底全体の反射強度（12月6日）

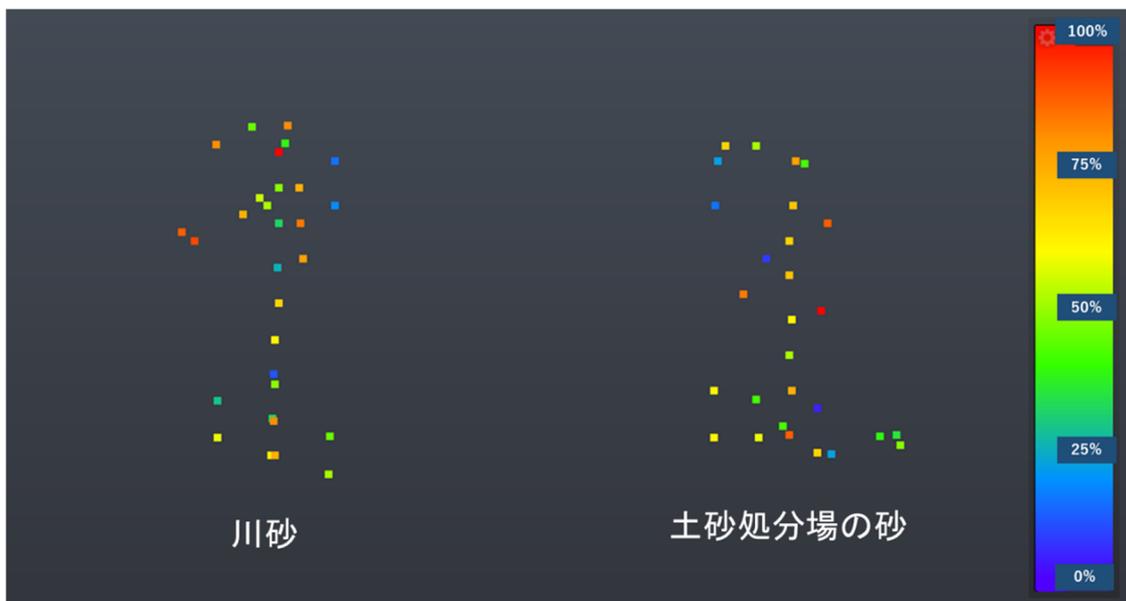


図-4.25 砂上の部分のみの反射強度

表-4.16 底質による点密度の比較

	川砂	土砂処分場の砂
点数（点）	30	28
点密度（点/m ² ）	134	125

(4) 水質の影響

図-4.26 に示すように本土砂処分場は高梁川の河口付近に位置しており、運び込まれる土砂はその付近の浚渫土砂が中心となっている。令和5年度に運び込まれた土砂も高梁川の河口付近での浚渫工事の際のものである。そのため、運び込まれる土砂の多くは河川によって運ばれてきたフミン酸などの有色依存有機物を含んでいる。また、フミン酸は短波長の光を吸収する光学的特性を持っており⁵⁸⁾、グリーンレーザを用いた土砂処分場の計測においてもフミン酸によるレーザの吸収による影響が懸念される。これらのことから試験タンク8と9を用いてフミン酸によるレーザ吸収の影響の検証を行った。

試験タンクの概要を表-4.17 に示しており、タンク8には水道水にフミン酸の粉末を、タンク9にはカオリンの粉末を混合させた。11月30日においては濁度を両方のタンクで同様になるように粉末の量を調節した。しかし、見た目の濁り具合に関しては同等ではなくフミン酸の方が高く見えた。そのため、12月6日の計測では透視度を図-4.27 に示した透視度計を用いてそろえた。また、試験タンク8と9は赤褐色であったことから、取得点密度が試験タンク1～5の水色の場合よりも水底の点群が取得されにくいと考えられた。そのため、図-4.28 に示すようにホワイトボードシートを1枚ずつ水底に設置した。11月30日の計測における反射強度の比較を図-4.29 に、水底の点密度の比較を表-4.18、図-4.30 に示す。反射強度を見るとタンク8の方がタンク9よりも反射強度が小さくなっていることからフミン酸によってレーザが吸収されたと考えられる。しかし、点密度について見てみると6mradの時はタンク8の方が点密度が低くなっているが、9mradの場合にはタンク9の方が点密度が低くなっている。

また、12月6日の計測における反射強度の比較を図-4.31 に、点密度の比較を表-4.19 に示した。反射強度について見ると、11月30日の結果と同様にフミン酸が入ったタンクの方が反射強度が小さくなっており、点密度についてはフミン酸の方が点密度が大きくなっている。

したがって、フミン酸はレーザを吸収するが点密度には大きく影響を与えないと考えられる。しかし、今回は水道水に溶かしてフミン酸のみの影響を見られるように検証を行ったため水底の点密度に影響が出なかったが、実際の土砂処分場では懸濁物質による散乱の影響も同時に生じるため、フミン酸によるレーザの吸収が水底の点密度に影響を与える可能性も考えられる。



図-4.26 土砂処分場付近の地形

表-4.17 試験タンク 8, 9 概要

		タンク 8	タンク 9
混合物質		フミン酸	カオリン
濁度(NTU)	11月30日	4.4	4.4
	12月6日	5.5	8.8
透明度(cm)	12月6日	48	47.5
外観	11月30日		
	12月6日		

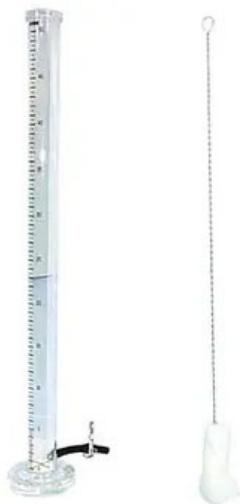


図-4.27 透視度計



図-4.28 ホワイトボードシート

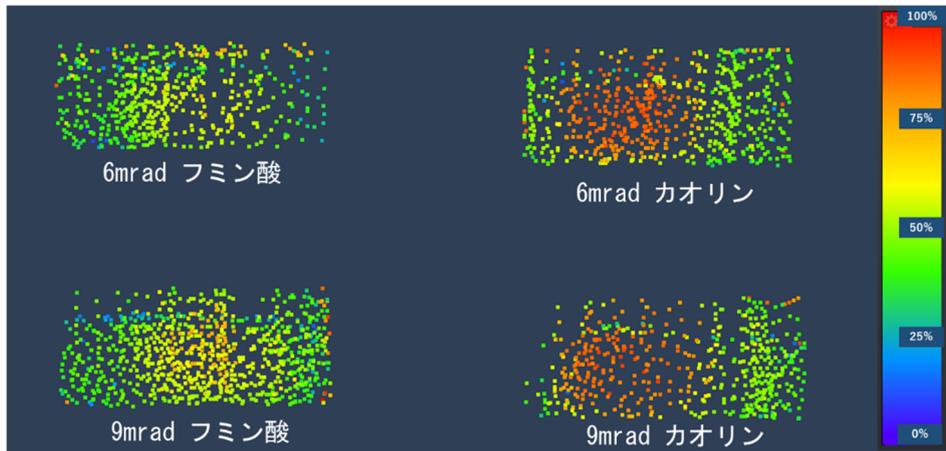


図-4.29 水質における反射強度の比較（11月30日）

表-4.18 水質による点密度比較（11月30日）

		タンク8（フミン酸）	タンク9（カオリン）
点密度（点/m ² ）	レーザ1（6mrad）	400	477
	レーザ1（9mrad）	544	327

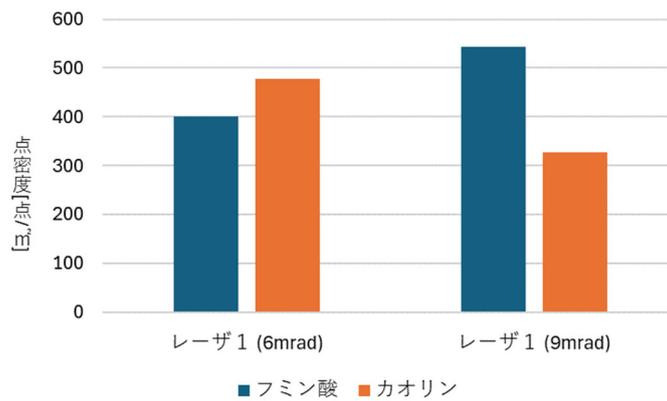


図-4.30 水質における点密度の比較（11月30日）



図-4.31 水質における反射強度の比較（12月6日）

表-4.19 水質における点密度比較（12月6日）

	タンク8（フミン酸）	タンク9（カオリン）
点密度（点/m ² ）	227	177

4.3.3 現地土砂処分場計測結果

本項では、現地土砂処分場の計測結果を示し、測深能力について分析を行った。

4.3.3.1 現地計測結果

まず、土砂処分場における濁度の計測場所を図-4.32、計測結果を表-4.20に示す。濁度の計測は11月28日、11月29日、12月6日の3日間、図に示す3カ所で行った。11月30日のUAVグリーンレーザ計測時には濁度の計測が行えていないが、11月28～30日の間はともに風が強く天候に大きな差はなかったため同程度の濁度であると考えられる。また、12月6日は風があまり強くなかったため、水底の砂が舞い上がっておらず比較的濁度が低くなっていたと考えられる。



図-4.32 濁度計測場所

Google

表-4.20 濁度計測結果

	1	2	3	平均
11月28日	32.8	47.1	24.7	34.9
11月29日	36.1	49.8	20.9	35.6
12月6日	9.5	11.4	16.1	12.3

次に、土砂処分場の水底の点密度を図-4.33に示す赤枠範囲約100m×25mの範囲で求めた点密度の計算結果を表-4.21に示しており、レーザ1の場合には450点/m²程度、レーザ2は27点/m²となっている。また、レーザ1の6mrad、9mradそれぞれの場合とレーザ2の場合の測深能力について確認するため、点密度を求めた範囲と同様の範囲で水底の点群を切り取り水面との標高差を求めることで水深を面的に示した。しかし、レーザ2については水面が計測できていなかったため、レーザ1の水面を用いて水深を求めた。また、レーザ2は図-4.34に示す通りノイズが多く水底が分からない部分があったため、レーザ1の水底の形状を参考に切り取りを行った。結果を図-4.35～図-4.37に、そのうちの最大水深を表-4.22に示す。これらの結果を見ると、レーザ1の6mrad、9mradの場合には全体的に偏りなく高密度で計測が行えており、約0.7mまで水底が捉え

られている。また、レーザ 2 についてはレーザ 1 と同様の水深およそ 0.7m までレーザが到達しているが、赤枠範囲内の半分以上が欠測となっている。

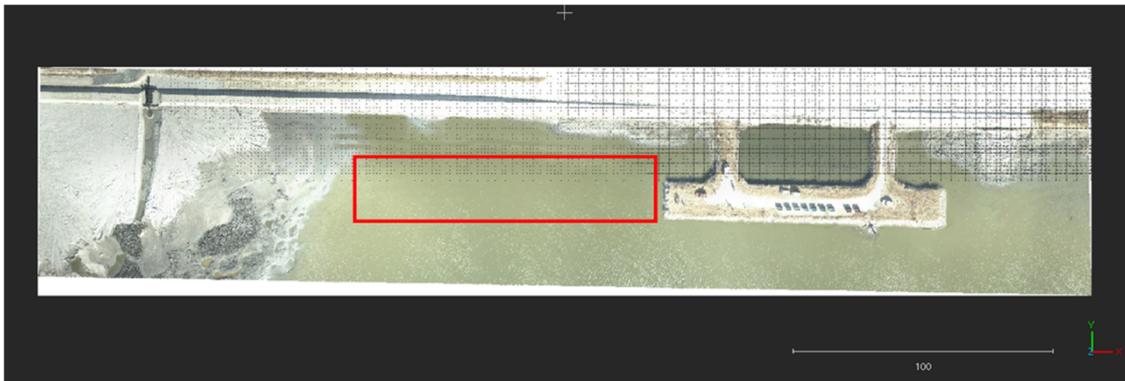


図-4.33 点密度（点群抽出箇所）

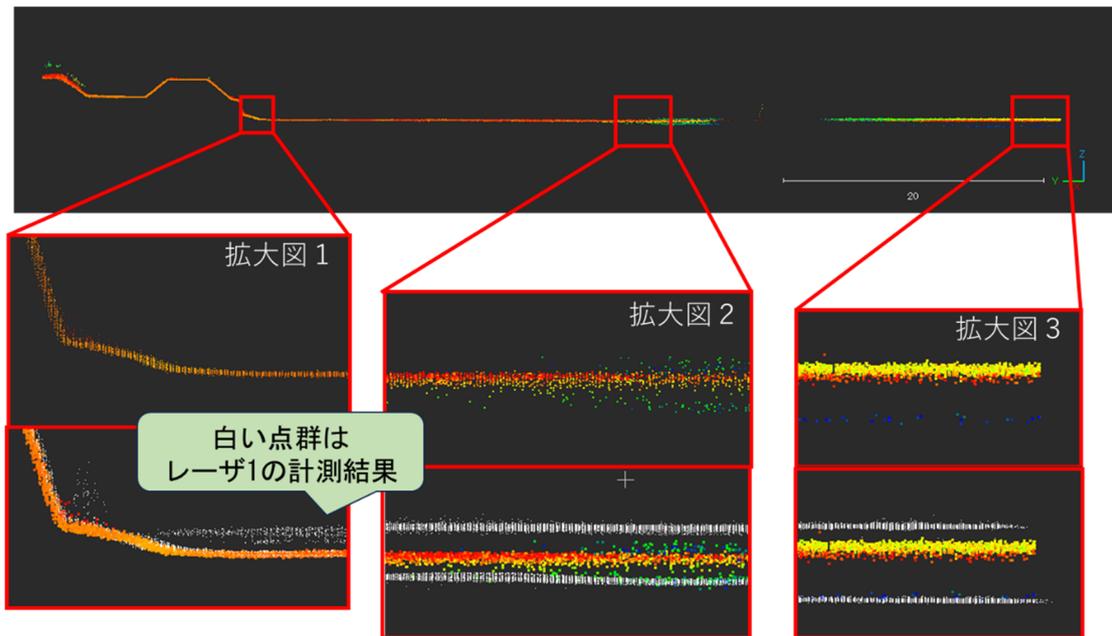


図-4.34 レーザ 2 断面図

表-4.21 点密度

	レーザ1(6mrad)	レーザ1(9mrad)	レーザ2
点群数(点)	1,179,634	1,174,135	70,148
面積(m ²)	2638	2638	2638
点密度(点/m ²)	447	445	27

表-4.22 最大水深

	レーザ1(6mrad)	レーザ1(9mrad)	レーザ2
最大水深 (m)	0.719	0.739	0.694

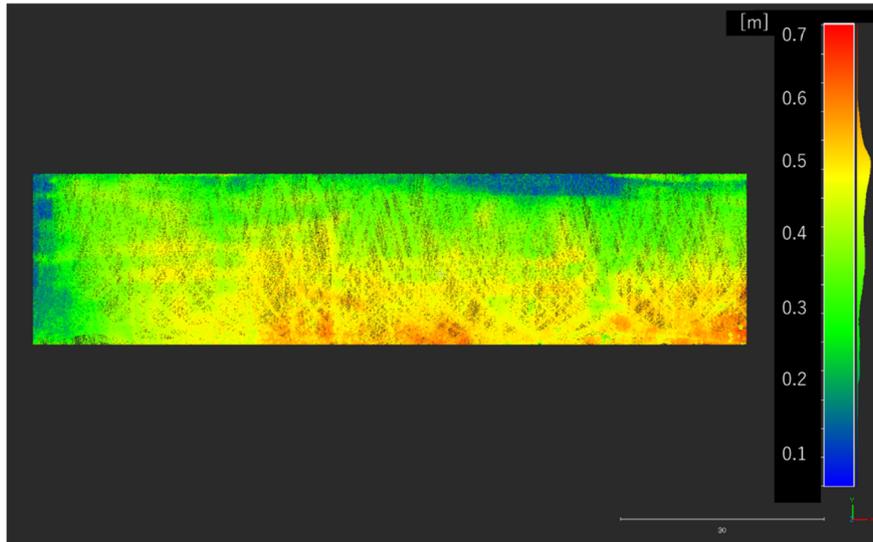


図-4.35 赤枠範囲内水深（レーザ 1 6mrad）

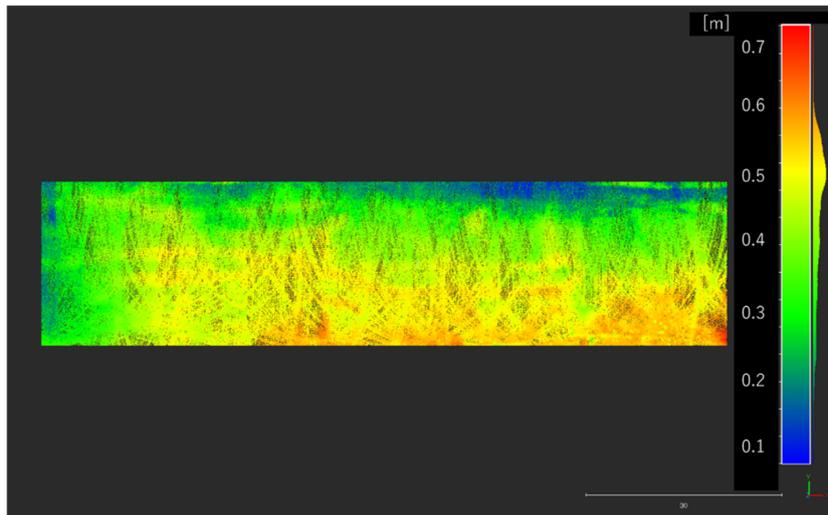


図-4.36 赤枠範囲内水深（レーザ 1 9mrad）

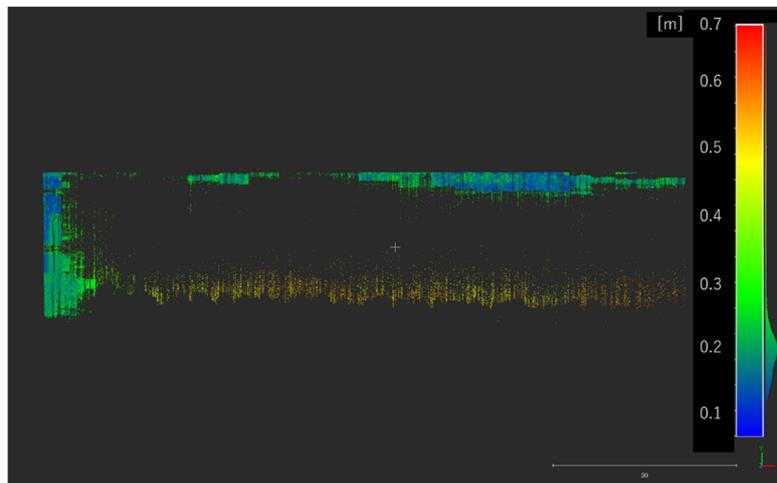


図-4.37 赤枠範囲内水深（レーザ 2）

そして、レーザ 2 については広範囲の計測を行ったため、図-4.38 に示す部分の中で水底と考えられる部分を切り抜き、深度を図-4.39 に示した。水深を求める際にはレーザ 2 では水面が取得できていないため、レーザ 1 で計測が行っている範囲の水面を延長することで水深を求めた。結果を見ると水深およそ 1.0m まで測深できていることが分かる。また、中央部が欠測しているのは水深が深くなっているからであると考えられる。

これらのことから 11 月 30 日の計測においてはレーザ 1 を用いて、濁度およそ 35NTU の時に計測範囲の最大水深である 0.7m まで欠測なく面的に水底を把握することができた。また、12 月 6 日の計測では、濁度 12NTU の時に水深およそ 1.0m まで計測を行うことができたが欠測が多く、点群が帯状に点々した箇所が多かった。

そこで次項では、レーザ 2 において欠測が多く確認されたのに対して、レーザ 1 が高密度で欠測なく計測が行えた要因について、ビームスポット径の大きさとレーザの照射方法の違いから考察を行う。



図-4.38 切り抜き範囲

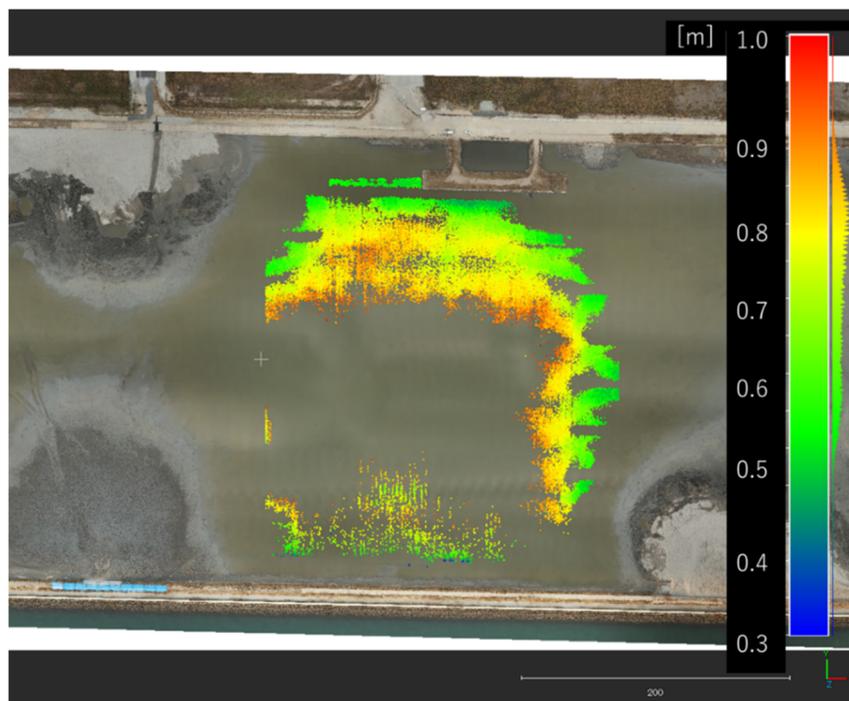


図-4.39 レーザ 2 水底部分

4.3.3.2 計測結果の考察

(1) ビームスポット径の大きさから分析

レーザ 1 について高密度で欠測なく土砂処分場の水底を計測できた要因の一つとしてはビームスポット径の大きさが関係していると考えられる。ビームスポット径とはレーザが計測地点に到着するときの大きさのことであり、レーザは広がりながら進行するため、対地高度とビーム発散角の大きさが大きくなるほどビームスポット径が大きくなる。ここで、航空レーザ計測（ALB）においては、対地高度が高くビームスポット径が大きくなるため、図-4.40 に示すように一部のレーザが反射してしまったとしても残りのレーザが地表面に到達することができるようになっていく。このことが土砂処分場における計測にも当てはまり、ビームスポット径を大きくすることで、懸濁物質に反射することなく通過するレーザの割合が増加するのではないかと考えられる。しかし、対地高度を大きくしすぎるとそもそもの面積あたりに照射されるレーザの数が減ることや、ビームスポット径が大きくなると必然的に単位面積当たりのレーザの強さも減少してしまうことからそれぞれのレーザに合わせて条件を決めていかなくてはならない。今回使用したレーザ 1 は水部の計測のために作られたものでレーザの出力も高く、スキャン速度も最大 100 走査/s となっており、対地高度を高くしても点密度の確保が可能で、ビームスポット径が大きくなることによりレーザの強さが弱くなってしまったとしても、もとの出力が高いため大きく問題は生じない。しかし、レーザ 2 においてはもともと水部の計測に特化してつくられたものではなく水陸同時に計測や、近赤外線レーザでは欠測となってしまう濡れた地面でも計測に用いるために開発されたものであるため、ビーム発散角を大きくすると精度が落ちてしまうことから小さく設計されている。また、レーザの出力もレーザ 1 に比べると弱く、スキャン速度も 30 走査/s となっていることから、ビームスポット径が大きくなるように高高度の設定にするとその分、点密度やレーザの強さが小さくなり、逆に欠測の原因になることも考えられる。

これらのことを加味し今回の計測では、レーザ 1 は対地高度 120m、ビーム発散角を 2mrad、レーザ 2 は対地高度 50m、ビーム発散角 1.5mrad として計測を行った。ビームスポット径の大きさを計算すると表-4.23 のようになる。結果を見ると、レーザ 1 の場合が 240mm、レーザ 2 の場合が 75mm とレーザ 1 が 3 倍ほど大きくなっている。よって、ビームスポット径の大きさがレーザ 1 が水底に到達し易かった一つの要因だと考えられる。

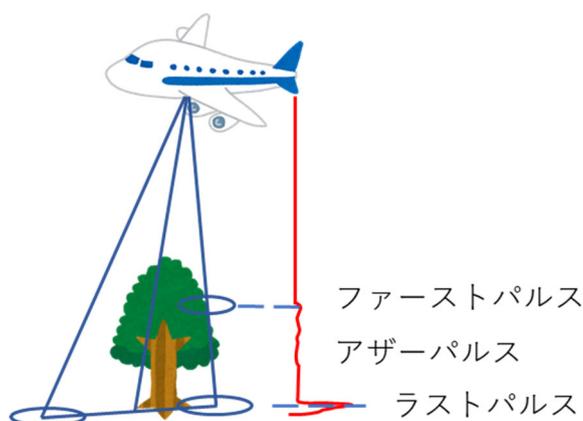


図-4.40 ALBにおけるビームスポット径の影響

表-4.23 ビームスポット径の大きさ

	レーザ1	レーザ2
対地高度 (m)	120	50
ビーム発散角 (mrad)	2	1.5
ビームスポット径 (mm)	240	75

(2) レーザスキャン方法から分析

レーザ1が高密度で水底を計測することが出来た要因として、スキャン方法も考えられる。レーザ1は従来のラインスキャンではなく、図-4.41に示すALBと同じ円形スキャンの方式を採用している。円形スキャンにすることで水面への入射角が一定となることから屈折率による精度補正を安定させ、精度のばらつきが少ないより正確なデータを得られるという特徴をもつ。一方で、図-4.36に示すラインスキャンの方式で計測を行うと端から出るレーザと直下に発射されるレーザとでは動きに差が出る。そのため、レーザが計測地点に到達するときにはレーザの強さやビームスポット径の形などが様々となり、欠測が生じやすい箇所が多くなるのではないかと考えられる。実際にレーザ2の計測結果図-4.42に関しては点密度に偏りが生じている。これらのことから、土砂処分場などの濁りが強い水部では一定のレーザの質や精度が確保しやすい円形スキャンを用いる方が欠測により点密度が偏ることなく計測が行えるのではないかと考えられる。

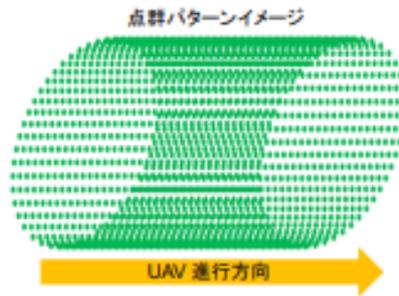


図-4.41 円形スキャン時のレーザの軌跡

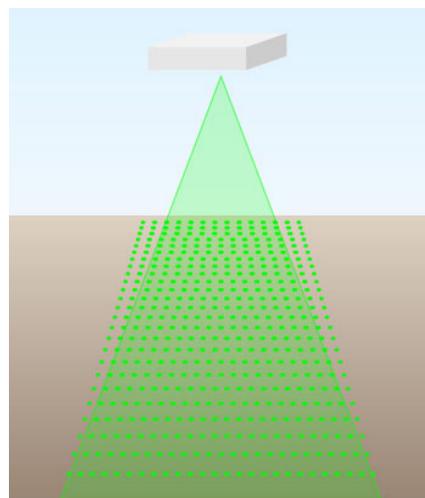


図-4.42 ラインスキャンの場合のレーザの軌跡

(RIEGL JAPAN 「UAV グリーンレーザースキャナー計測事例」より抜粋)

(3) 受光角の違いによる測深能力について分析

最後に受光角を変化させたときの現地土砂処分場での点群取得状況について考察を行う。

受光角を大きくすると返ってきたレーザを受け取れる範囲が広がり測深能力が向上するため、VQ-840-G の仕様書によると濁った水では大きく設定することが適しているとされている。一方で受光角を大きくすることで受け取る光の数が多くなることになりノイズが増加することや、受け取り可能な光の強さを超えると受信機の保護のためにレーザスキャナが一時的にシャットダウンする可能性も考えられる。また、レーザは広がりながら進行し、水中で屈折するため図-4.43 のように底で反射し返ってくる時にはさらにビームスポット径が大きくなる。そのため受光角はレーザの発射時の広がり角であるビーム発散角の 3 倍以上とすることが推奨されている。これらのことから、今回の実験ではビーム発散角を 2mrad としたため、受光角を 6mrad, 9mrad, 12mrad と変化させ計測を行った。それぞれの点群取得データを図-4.44～図-4.46 に示す。これを見ると 6mrad, 9mrad の場合には計測範囲内の点群が満遍なく点群が取得できているが 12mrad の場合には欠測部分が多くあり、反射強度の情報も上手く取得できていない。12mrad での計測で、欠測が多くなった原因としては受光角を大きくしたことで太陽光の反射などの発射したレーザ以外の光も受け取ってしまい、受け取る光の量が多くなりすぎたことが考えられる。

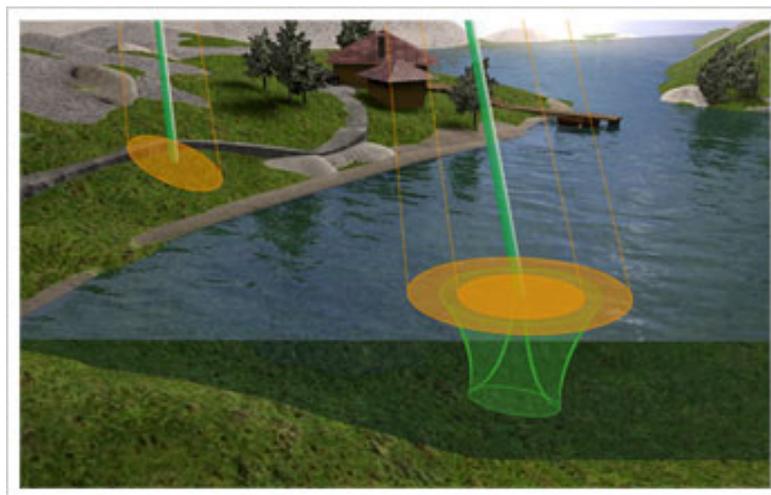


図-4.43 レーザの水中での進み方

(RIEGL JAPAN 「UAV グリーンレーザースキャナー計測事例」より抜粋)

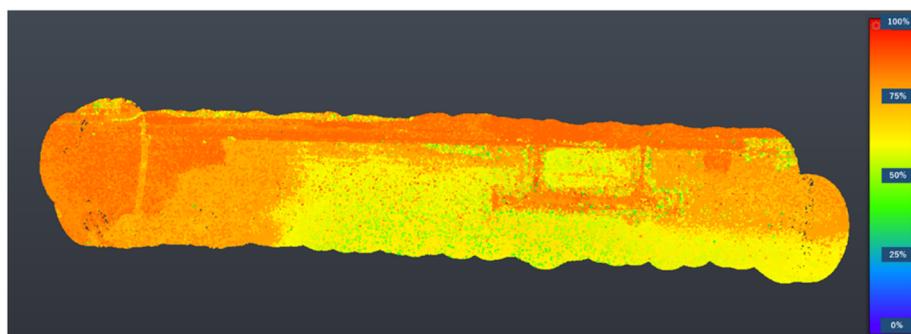


図-4.44 反射強度（レーザ 1 6mrad）

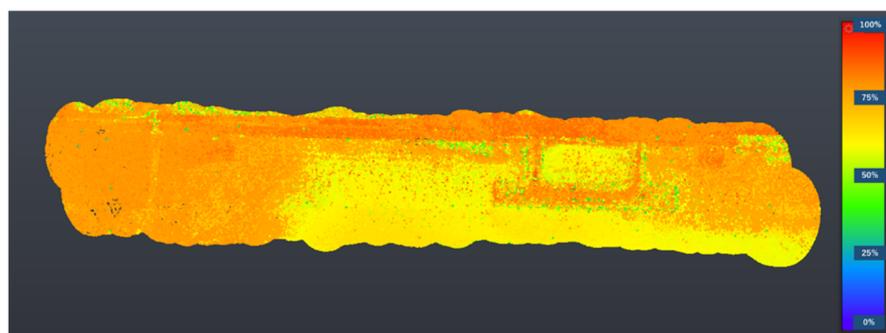


図-4.45 反射強度（レーザ 1 9mrad）

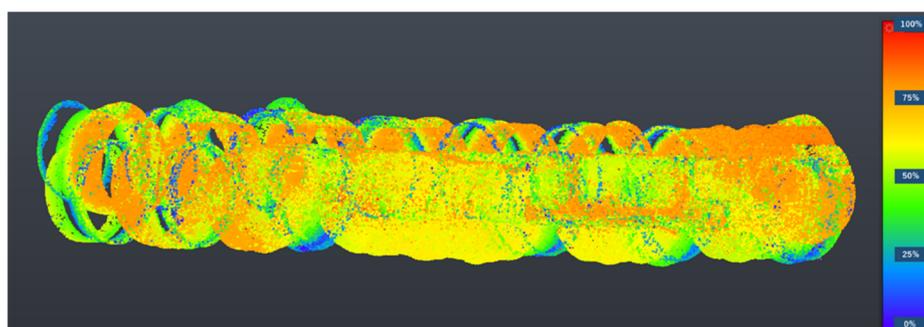


図-4.46 反射強度（レーザ 1 12mrad）

また、図-4.44 と図-4.45 に示した 6mrad、9mrad のデータについてさらに図-4.47 の赤線部分で断面を抽出して比較を行った。赤線部の上部は土砂処分場の淵の陸地であり、下に進むにつれて土砂処分場の中心へと向かう。受光角 6mrad の場合を図-4.48 に、9mrad の場合を図-4.49 に示す。断面を見ると、大きく 2 つの線が見える。上の線が水面、下の線が水底を示しており、だんだんと水深が深くなっていることが分かる。6mrad の場合も 9mrad の場合も点群が途切れることなく、0.7m 程度までレーザが到達している。しかし、6mrad の場合に比べて 9mrad の場合には、ノイズが多くなっており、これも 12mrad の時と同様に受光角が大きく太陽光や懸濁物質からの反射光などの水底や水面以外からの光を多く受け取ってしまっているからだと考えられる。

これらのことから、計測時に太陽が出ている場合には太陽光の影響でノイズが発生し悪影響を大きく受ける可能性があるため、受光角を大きくすることは必ずしも効果的ではないと考えられる。しかし、今回の計測範囲では 6mrad、9mrad の両方の場合において計測範囲内の最大水深である 0.7m の計測を行えていたため、測深能力の違いについては比較することができなかった。その

ため、今後さらに深い中心部分の計測を行い、受光角の大きさと測深能力の関係について明らかにしていく必要がある。



図-4.47 6rad, 9rad の比較（抽出箇所）

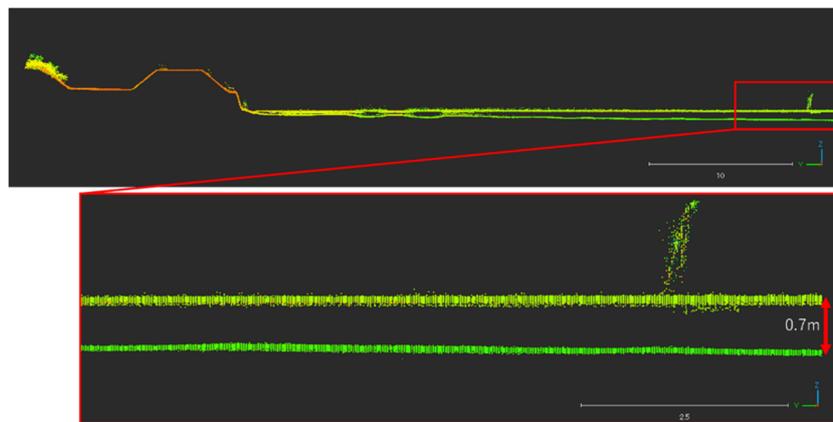


図-4.48 受光角 6rad の場合

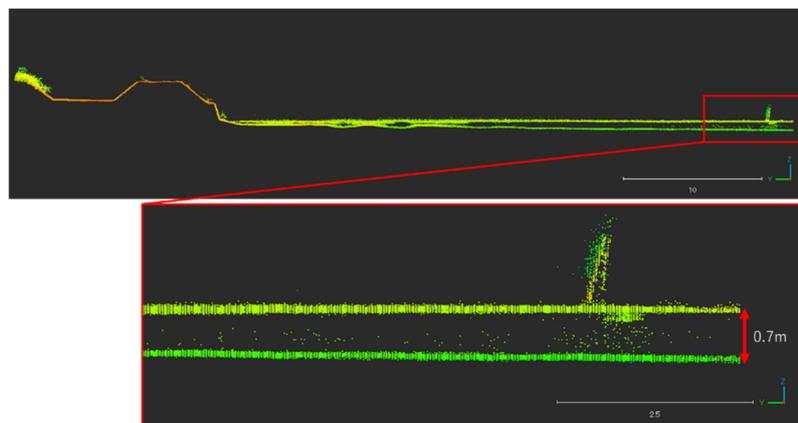


図-4.49 受光角 9rad の場合

しかしながら、土砂処分場の残容量の把握に必要な点群数はいくらなのか.どの程度レーザ 1 とレーザ 2 で残容量の把握数量が違うのか考察する必要がある.図-4.36 が先述したレーザ 1 で取得した点群を示したものであるが、この点群を使用して、仮想+5.0mラインまでの残容量の計算を行った.計算を行う上で、TIN の形成が必要となるが、図-4.50 図-4.51 を見ると TIN が細かく表示されていることがわかる。

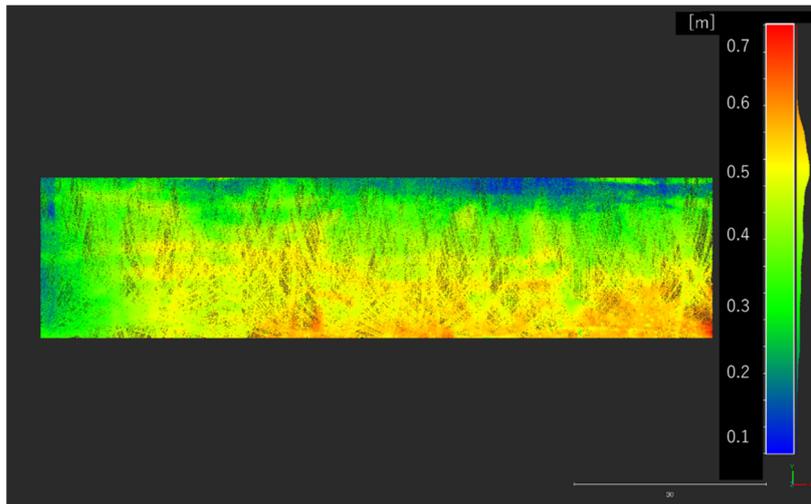


図-4.36 赤枠範囲内水深（レーザ 1 9mrad）

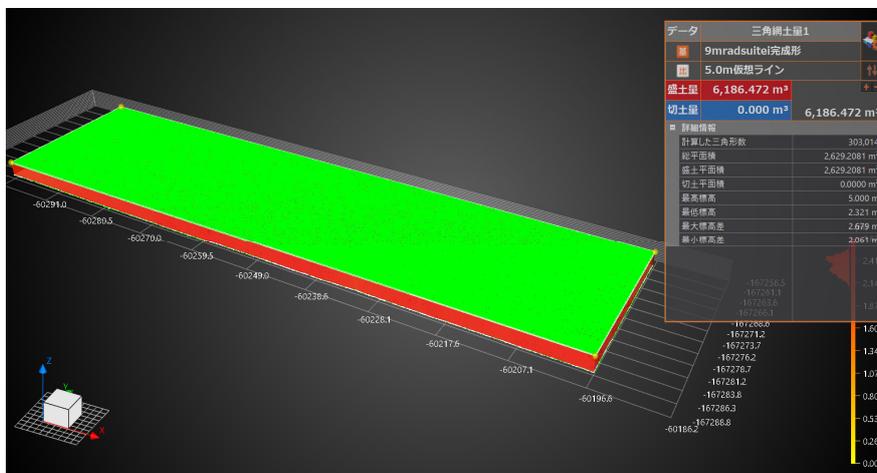


図-4.50 TINの形成全体図（レーザ 1 9mrad）

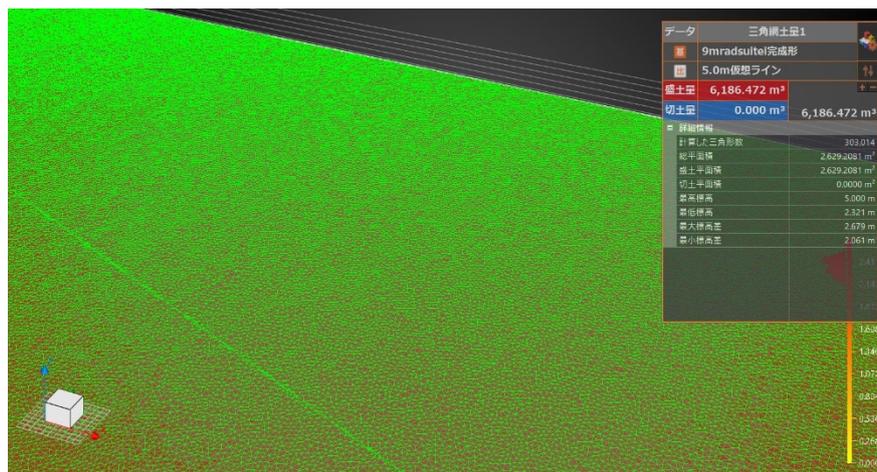


図-4.51 TINの形成詳細図（レーザ 1 9mrad）

一方で、図-4.37 がレーザ 2 で取得した点群を示したものである。こちらも同様に仮想+5.0m ラインで残容量の計算を行い、TIN の形成を行った。図-4.52 図 4-53 を見ると TIN が大きく形成されていることがわかる。

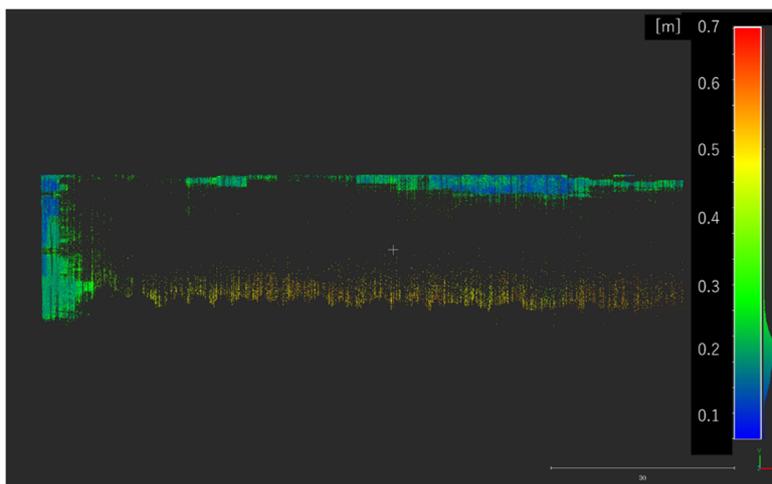


図-4.37 赤枠範囲内水深（レーザ 2）

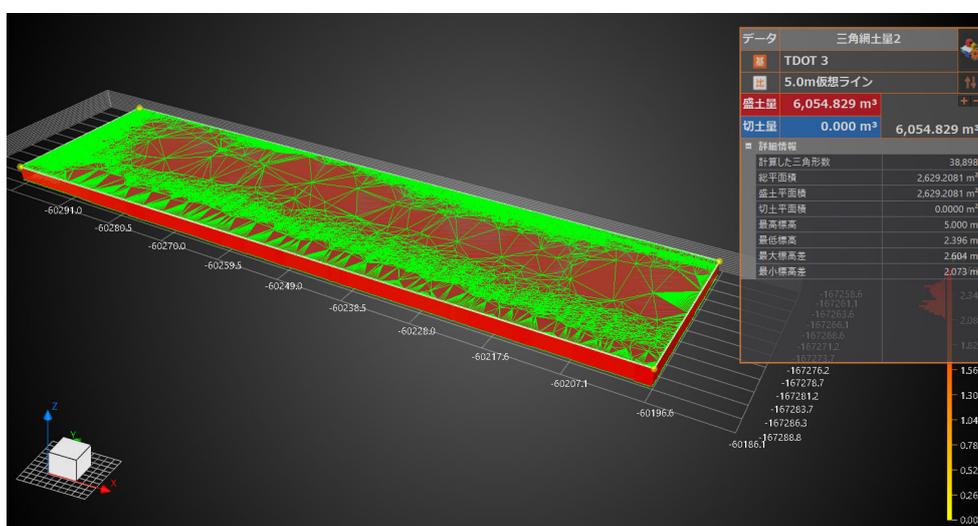


図-4.52 TINの形成全体図（レーザ 2）

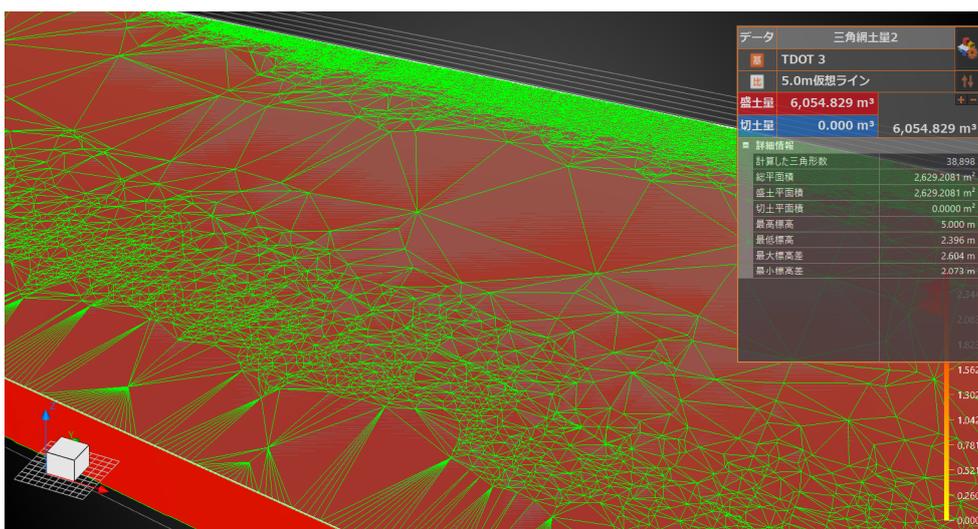


図-4.53 TINの形成詳細図（レーザ 2）

次に数量計算の結果の違いを示す。数量計算の結果、レーザ 1 9mrad 6186m³ とレーザ 2 6054m³ となった。この結果から 130m³ 程度の差は全体の 2%の誤差であり、面積は 2630m²、高さとしても 5 cm程度の誤差となる。この誤差は、土砂処分場内における残容量の把握に影響を及ぼすもの

ではないと考える.よってレーザ 1 もレーザ 2 も土砂処分場の残容量把握の為に必要な条件を満たしていると考え.

表-4.24 数量計算の結果

レーザ 1 9mrad	レーザ2	差	割合
6186m ³	6054m ³	132m ³	2%の誤差

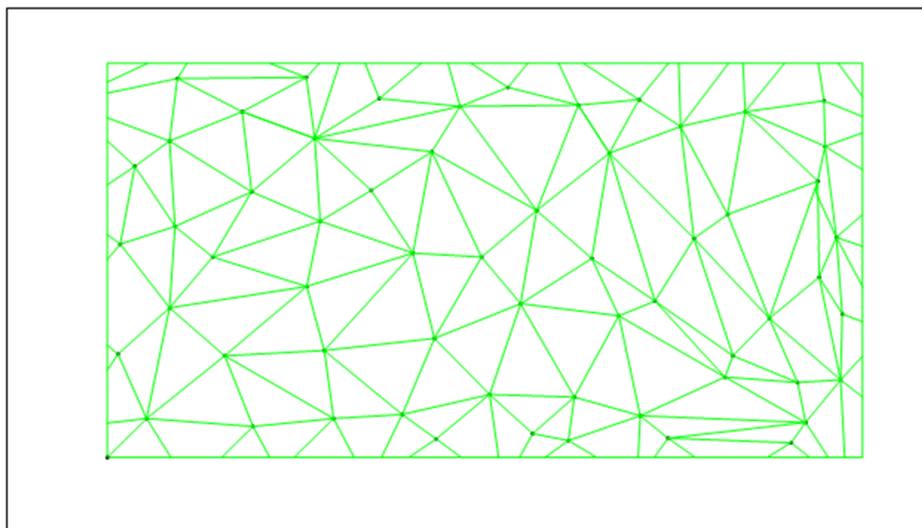


図-4.54 TINの形成イメージ図(レーザ1)

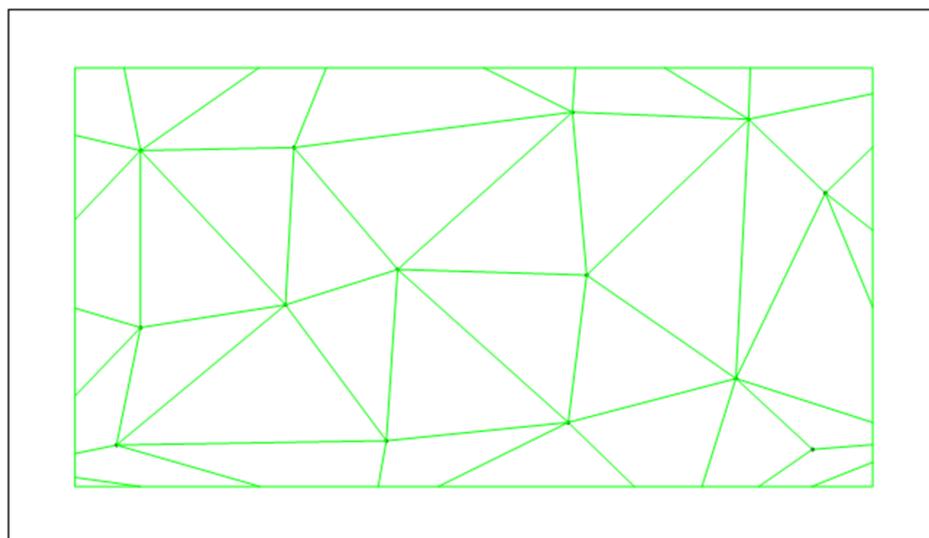


図-4.55 TINの形成イメージ図(レーザ2)

図-4.54, 図-4.55 に TIN の形成イメージ図を示す.一見点群の密度に違いが見えるが, TIN を形成し計算を行うと 2%程度の誤差であり, レーザ 1 のような点群密度であると, 土砂処分場の凹凸やなどが確認できると考察する.またレーザ 2 でも全体の形状や大まかな地形としての把握はできると考察する.

4.4 従来工法との比較

これらのことから、UAV グリーンレーザなどの面的な計測を行う以前の浚渫土土砂処分場を計測する技術は主にレッド計測、シングルビーム音響計測、レベルによる水中水準測量など3つが挙げられる。これらの計測手法を用いることにより、ある地点での深さを測定することで水底地形を把握していた。以下に3つの計測手法について特徴をまとめる。

4.4.1 レッド測量

レッド測量とは、船の上から鉛の錘に目盛りが付いたロープを海底面に垂らし、ロープを張った状態で海面の目盛りを読み取り水深を図る手法である。海底面の把握が手の感触に頼る部分があり、人為的誤差を生みやすいのが欠点である。



図-4.50 レッド測量状況



図-4.51 レッド測量器具

4.4.2 シングルビーム音響計測

シングルビーム音響計測とは、小型船舶を走行させながら直下の水面に超音波を発信し、海底からの反射音を連続的に記録するという方法で、一回の発信ごとに一点の深度を測定したデータを、計測と同時に専用の記録用紙に記録することができる方法である。しかし、シングルビーム音響計測は、小型船舶に機装する必要がある為、今回の土砂処分場における計測は対象外とする。今後、小型無人リモコンボートなどで、シングルビームやマルチビームを搭載できるようになることを期待する。

4.4.3 レベルによる水中水準測量

レベルと呼ばれる器具を用いて2点間の高低差やある地点における地盤高を測定するために行う測量である。レベルとともに標尺と呼ばれる長く大きなものさしを使い、2人一組で行われる。土砂処分場の中を小型ボートで移動し、ボートの上から標尺を立てて測量が可能と思うが、処分場が広い為、レベルを覗いても標尺の数値を読み取ることができないと思われる。

これらのことを鑑み、従来工法としてレッド測量を想定して本研究手法との比較を実施する。

費用を算出する為に現場条件を設定し、費用を算出する。作業工程は、準備→測量→解析の順序で行い、費用についても工程ごとに算出する。

対象の現場を岡山県倉敷市玉島地内にある水島港の土砂処分場とし、その大きさは図-4.52に示すように1400m×400mである。従来工法のレッド測量は点群ではなく、ある地点の高さを計測し、その地点を平均して残容量を図る為、メッシュの大きさが重要となってくる。今回は20mメッシュで設定し、従来工法の費用の算出を行う。1400m×400mを20mメッシュで区切ると1470点の計測が必要で、1ヶ所当たり移動を含め15分で考えると8時間労働換算で46日間の計測が必要である。概要を表-4.24に示す。次に解析にかかる時間を見積もる。1470点の計測した高さを入力し、仮想高さまでの高低差の平均を算出する。熟練者と初心者で解析時間が異なるが、今回は1点3分とした。

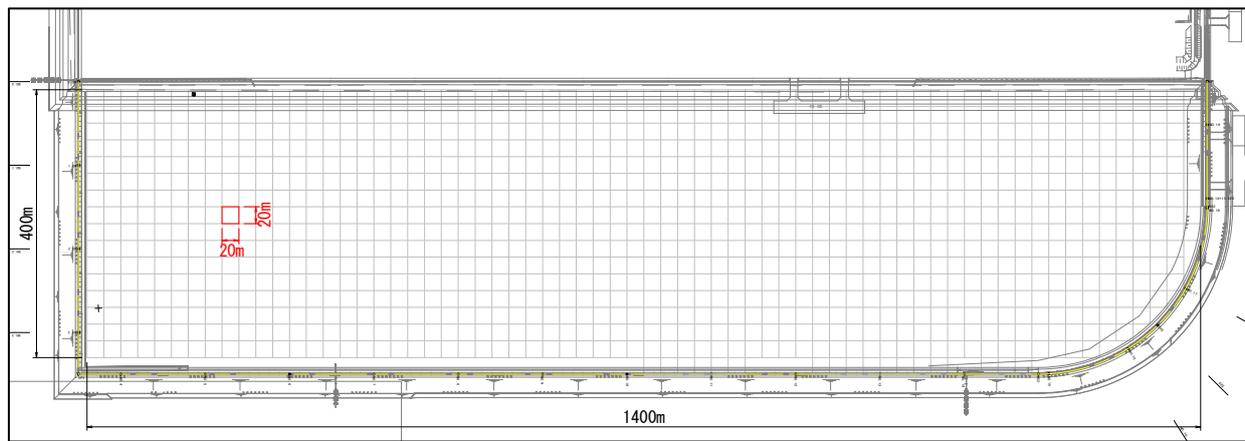


図-4.52 土砂処分場：レッド測量計測箇所イメージ図

次に各作業における労務費の区分を設定する。表-5.1に示す。

- 準備 測量主任技師 測量技師補 2名測量
- 測量 測量主任技師 測量技師補 測量補助員 測量操縦士 4名
- 解析 測量技師 1名

表-4.24 作業工程における労務費区分(1日作業当たり)

作業工程	測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量補助員	測量助手	測量船操縦士
準備	0.1		0.1			
測量		1	1	1		1
解析					1	

ここに示した現場条件を基に直接工事費を算定した。表-4.25に土砂処分場における1470点を想定したレッド測量の費用を示す。作業日数は55日、延べ作業人数は193名、費用は742万であった。土砂処分場をレッド測量により残容量の把握をするには作業日数、作業人員ともに多大となることがわかる。次にUAVグリーンレーザ工法の費用と対比することで迅速で簡便なことを証明する。

表-4.25 土砂処分場 レッド測量にかかる費用 1470 点

	時間(日)	人数	時間×人数	金額(万円)
準備	0.10	2	0.2	1
測量	46	4	184	690
解析	9	1	9	51
合計	55	7	193	742

図-4.53 示す UAV グリーンレーザ工法における測量業務の積算基準は、現段階では策定されていないが、UAV レーザ測量の標準歩掛が 2022 年 4 月に策定され、標準積算基準の改定が行われているが、面積が 0.2 km² までを適用することとなっている。今回の処分場は 0.56km² であり、標準積算基準に該当しない為、実施工見積りを採用する。

第1編 測量業務

11-3 UAVレーザ測量
(1) 標準歩掛等

標準作業量	作業工程	所要日数					編成				延べ人数				計				
		測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量助手	測量補助員	測量主任技師	測量技師	測量助手	測量補助員	測量主任技師	測量技師	測量助手	測量補助員					
1 業務当り	作業計画	1.3	1.2	0.6			内	1	1	1			3	1.3	1.2	0.6		3.1	
0.1km ² 当り	調整点および検証点の設置		4.7	2.5	2.7		外				1	1	1		3	4.7	2.5	2.7	9.9
	UAVレーザ計測		3.1	2.0	2.9		外				1	1	1		3	3.1	2.0	2.9	8.0
	点群編集		11.8	10.3	10.4		内				1	1	1		3	11.8	10.3	10.4	32.5
	三次元点群データファイルの作成		1.8	3.3			内				1	1			2	1.8	3.3		5.1
	数値地形図データファイルの作成		3.7	5.9			内				1	1			2	3.7	5.9		9.6
内	外業計		7.8	4.5	5.6		外									7.8	4.5	5.6	17.9
	内業計	1.3	18.5	20.1	10.4		内									1.3	18.5	20.1	50.3
	合計	1.3	26.3	24.6	16											1.3	26.3	24.6	82.2

(注) 1. 本歩掛の適用範囲は測定面積 0.2km²以下とする。
 2. 本歩掛には、関係機関協議資料作成及び関係機関打合せ協議に係る作業時間も含む。
 3. 調整点および検証点の設置については対空標識の設置・撤去を含む。
 4. 基準点測量（基準点の設置）は、別途計上する。
 5. 機械経費、通信運搬費等、材料費については別途計上する。
 6. 本歩掛のうち作業計画については、UAVレーザ測量の作業計画に係る費用以外は含まない。

図-4.53 UAVレーザ測量 標準積算基準抜粋

表-4.26 に作業工程における労務費区分を示す。次に作業工程は、(1)~(6)に示す。(1)作業計画(2)調整点・検証点の設置(3)UAVによるレーザ測量(4)点群編集(5)三次元点群データファイルの作成(6)数値地形図データファイルの作成となる。比較しやすいように準備から測量、解析に歩掛をまとめたものを表-4.26・27に示す。作業日数は13日、延べ作業人数は40名、費用は212万であった。測量費用を3分の2削減できる結果となった。の価格や人数で計測できる結果となった。

表-4.26 作業工程における労務費区分(0.56 km²作業当たり)

作業工程	測量主任技師	測量技師	測量技師補	測量助手
準備		4.5	3.5	1.0
測量		1.0	1.0	4.0
解析		10.5	14.5	0.0

表-4.27 土砂処分場 UAV グリーンレーザ測量にかかる費用(0.56 km²作業当たり)

	時間(日)	人数	時間×人数	金額(万円)
準備	2	4.5	9	38
測量	1	6	6	23
解析	10	2.5	25	103
機械損料				48
合計	13	13	40	212

従来工法と UAV グリーンレーザ工法の費用の比較を図-4.54 に示す。全体の費用を UAV グリーンレーザ工法により 3 分の 2 の削減となった。準備と測量のみで考えても従来工法より、UAV グリーンレーザ工法の方が 12 分の 1 の費用となり、大幅な削減結果となった。これは UAV グリーンレーザ工法が計測は従来工法より、迅速で簡便であることを証明している。UAV グリーンレーザ工法の解析については従来工法より 2 倍の費用がかかっているが、これは点群という膨大なデータを解析していく為に必要なことであり、今後の課題としての効率化を考えなければならないことであるが、施工者として土砂処分場のモニタリングを準備から計測までを 2 日間で完了することができることは、技術の進歩である。本研究の濁度による影響を調べ、点群の取得状況を整理することで、新しい技術として示すことができた。

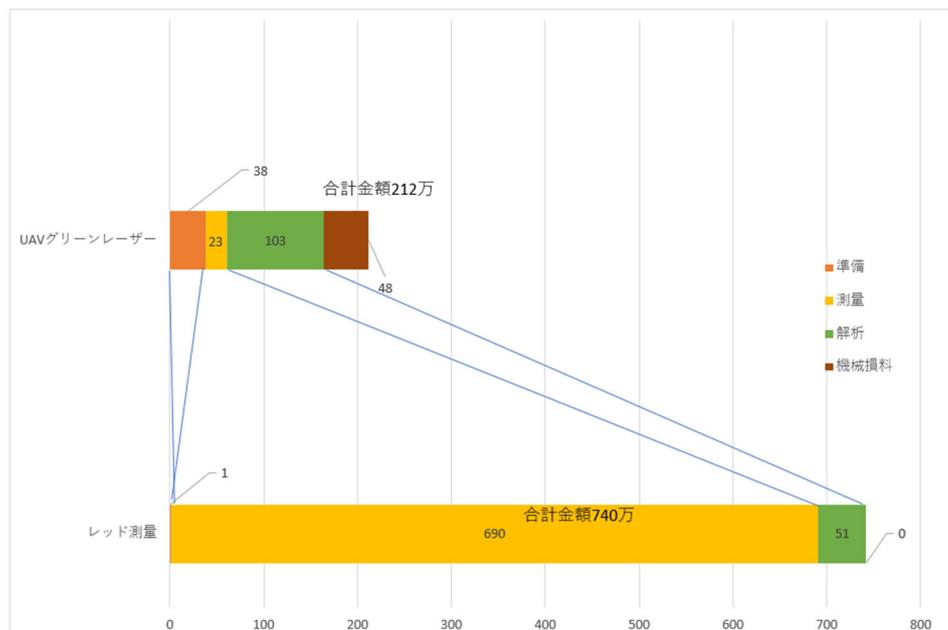


図-4.54 UAVグリーンレーザとレッド測量との費用の比較

第5章 浚渫工における3次元点群データの4次元モデルへの活用

5.1 4次元モデル活用への背景

建設生産プロセスにおける3次元モデルの連携による生産性向上を目的として、BIM/CIM (Building/ Construction Information Modeling, Management) を国土交通省が推進していることは1章でも述べたが、国土技術政策総合研究所では、3次元モデルに時間情報を加えた4次元モデルを用いた設計-施工間の情報連携を検討している。今後は、必要に応じて4次元モデルを用いることにより、施工者が発注者や地元住民に効率的かつ正確な設計意図の伝達が期待できる。

5.2 4次元モデル活用への目的

BIM/CIM において、事業段階をまたいで3次元モデルや属性情報を適切かつ効率的に伝達し、前工程で作成した情報とICTを活用した仕事の進め方に移行することで、後工程での生産性向上を図っていくことを狙いとしている。しかし、従来のBIM/CIM 試行事業において、3次元モデルを用いた設計-施工間での情報連携がなされた事例は、ほとんど見られないのが実状である。港湾工事においても4次元モデルを利用した事例は少ない。この要因として、発注者が設計者からどのような3次元モデルを受け取れば施工者にとって有用なのかを把握していないためと考えられる。そのため、BIM/CIM 試行業務にて、発注者から設計者に適切な指示が行えず、結果として、設計者と施工者の情報連携に課題が生じていた。4次元モデルとは、3次元モデルに時間情報を付与したものである。4次元モデルを用いて施工ステップを可視化する事例を図5-1に示す。

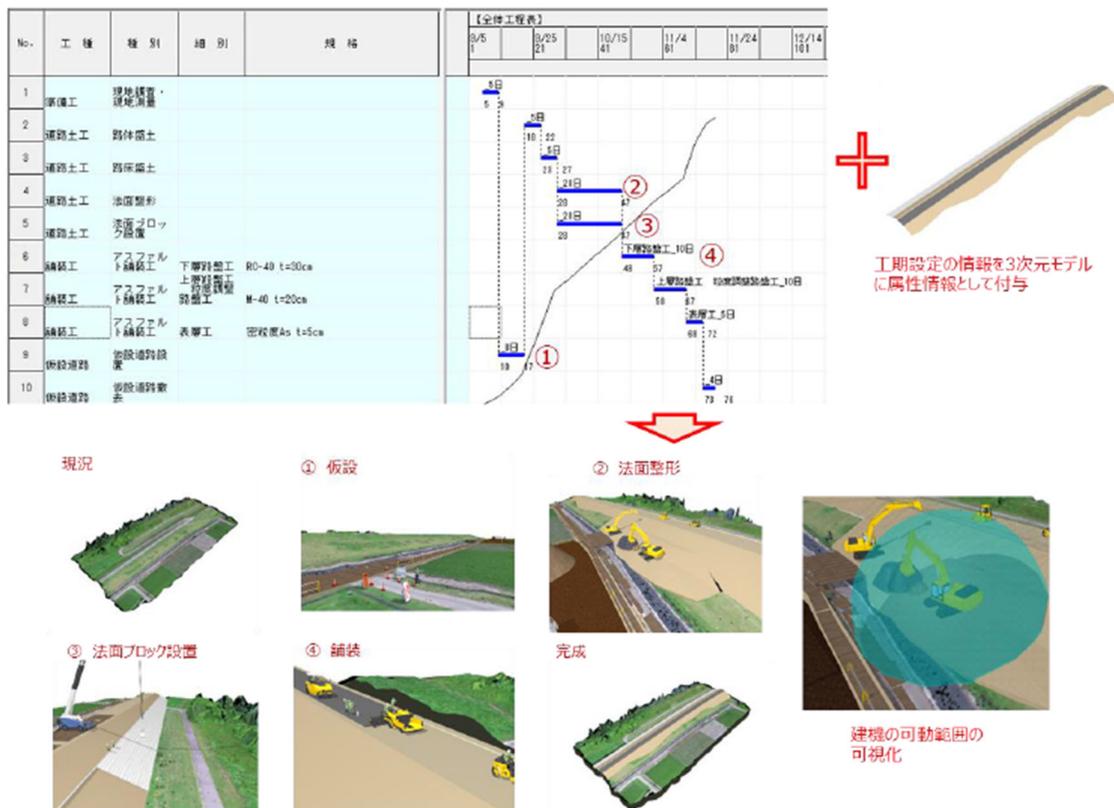


図 5-1 4次元モデルによる施工計画の可視化

(国土交通省：設計・施工間の情報連携を目的とした4次元モデル活用の手引き(案))

この図は、陸上工事の一連の施工ステップを表したものである。

6月5日揚土開始(内水位+5.00m)

日付	国交省工事(A) 循環式		国交省工事(B) 循環式		岡山県工事 -		全体				内水位				備考
	205,000m ³		100,000m ³		130,000m ³		435,000m ³		500,000m ³		+2.284m上昇		+1.750m上昇		
	揚土量		揚土量		揚土量		揚土量		揚土+添加水量		循環式なし		循環式あり		
	日計	累計	日計	累計	日計	累計	日計	累計	日計	累計	日計	累計	日計	累計	
7月3日(月)	4,000	84,000			3,500	3,500	7,500	87,500	9,250	89,250	+0.039	+5.459	+0.032	+5.312	
7月4日(火)	4,000	88,000			3,500	7,000	7,500	95,000	9,250	98,500	+0.039	+5.499	+0.032	+5.345	
7月5日(水)	4,000	92,000			3,500	10,500	7,500	102,500	9,250	107,750	+0.039	+5.538	+0.032	+5.377	
7月6日(木)	4,000	96,000			3,500	14,000	7,500	110,000	9,250	117,000	+0.039	+5.578	+0.032	+5.410	
7月7日(金)	4,000	100,000			3,500	17,500	7,500	117,500	9,250	126,250	+0.039	+5.617	+0.032	+5.442	
7月8日(土)		100,000				17,500		117,500		126,250		+5.617		+5.442	
7月9日(日)		100,000				17,500		117,500		126,250		+5.617		+5.442	
7月10日(月)	4,000	104,000			3,500	21,000	7,500	125,000	9,250	135,500	+0.039	+5.656	+0.032	+5.474	
7月11日(火)	4,000	108,000			3,500	24,500	7,500	132,500	9,250	144,750	+0.039	+5.696	+0.032	+5.507	
7月12日(水)	4,000	112,000			3,500	28,000	7,500	140,000	9,250	154,000	+0.039	+5.735	+0.032	+5.539	
7月13日(木)	4,000	116,000			3,500	31,500	7,500	147,500	9,250	163,250	+0.039	+5.774	+0.032	+5.571	
7月14日(金)	4,000	120,000			3,500	35,000	7,500	155,000	9,250	172,500	+0.039	+5.814	+0.032	+5.604	

図 5-4 従来の内水位のシミュレーション

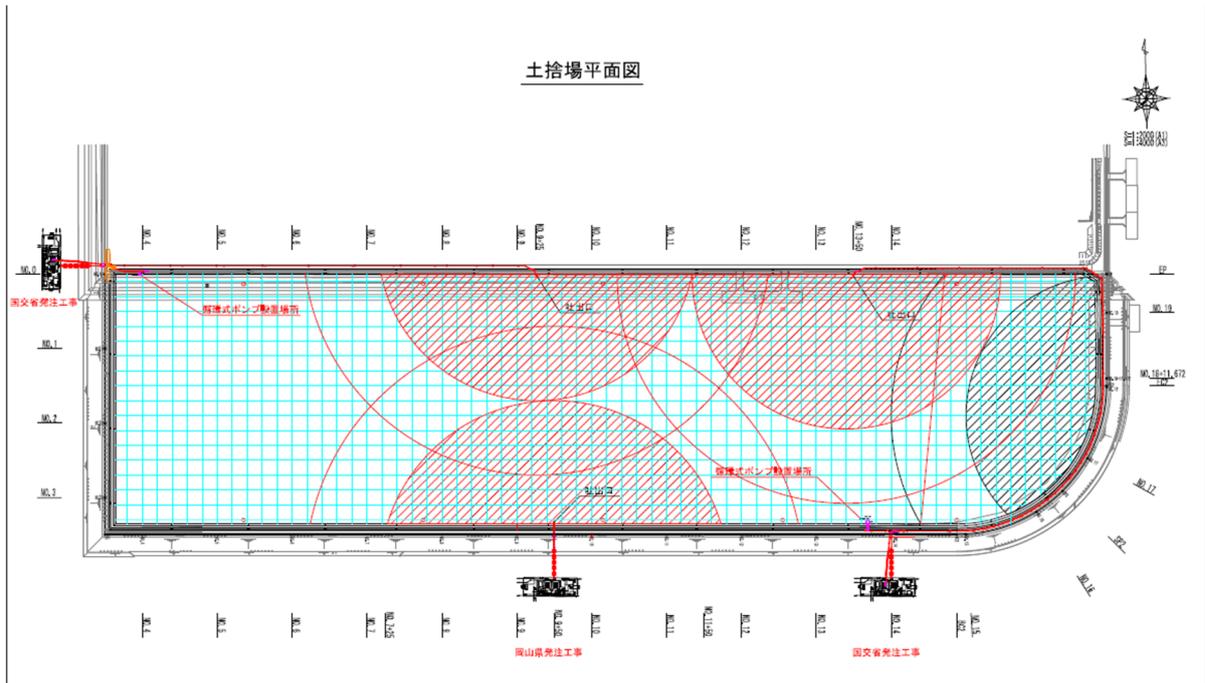


図 5-5 従来の揚土シミュレーション

情報の伝達が不十分なため、施工段階での検討に時間を要したり、設計意図の理解不足により施工時に手戻りが発生したりすることもある。施工者にとって有用な情報の一つとして、設計時に検討される施工計画がある。3次元モデルでわかりやすく表現された施工計画が提供されれば、設計意図に則した施工計画の立案や、円滑な受発注者協議を実施することができる。そこで発注者から提供されることを待つのではなく、浚渫工の施工者として4次元モデルを作成し、主体的に4次元モデルを活用する為に、本研究での浚渫工における測量機が取得した3次元点群データを利用し、4次元モデルが作成できるかを検証する。

5.4 4次元モデル活用への検証

浚渫工における施工ステップと各測量機器から取得した3次元点群データを活用するイメージを図5-3に示す。

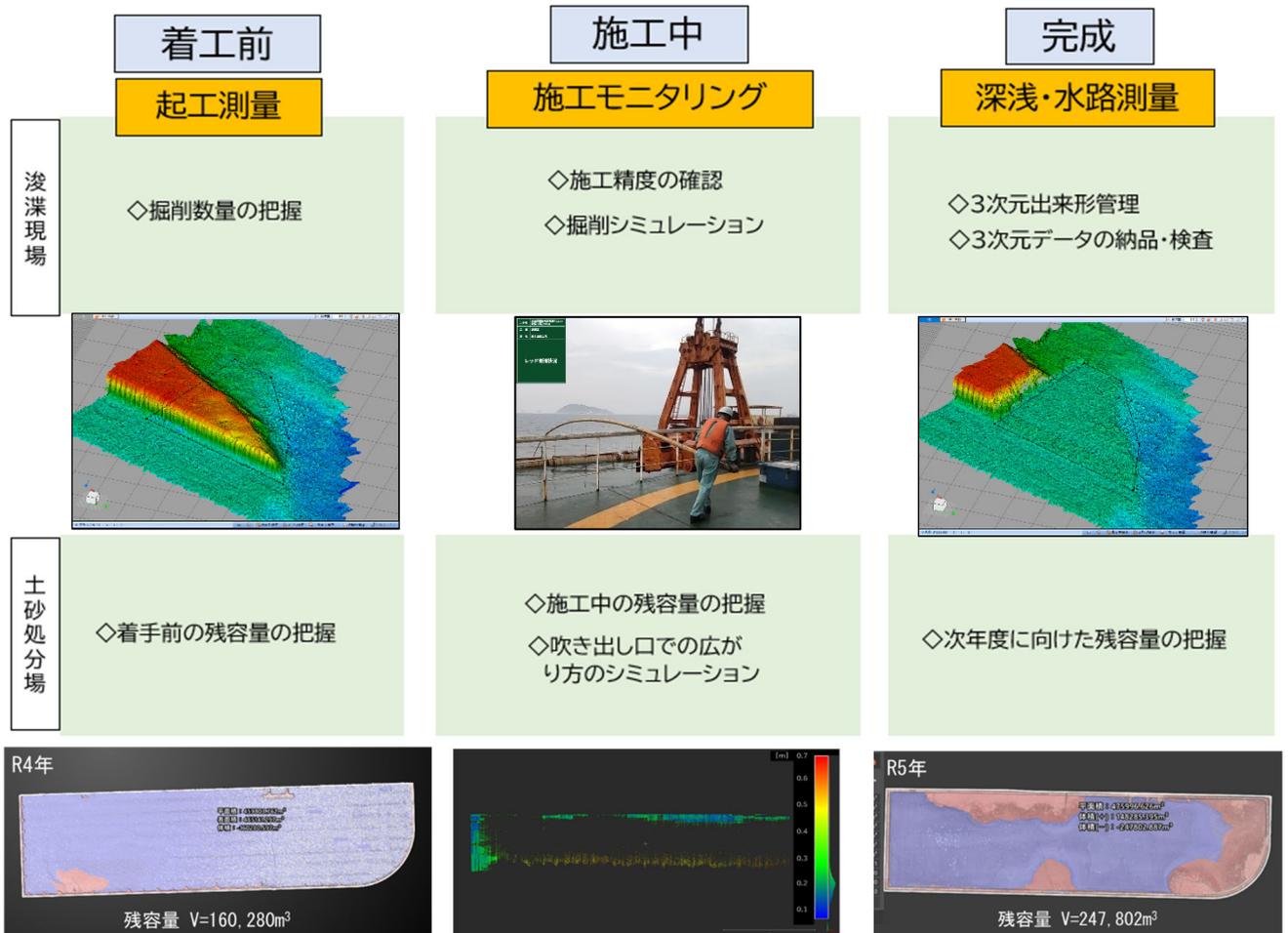


図5-3 3次元点群データを活用した4次元モデルの適用イメージ図

着工前においては、浚渫現場で起工測量や土砂処分場では着手前の残容量の把握に3次元点群データが利用できる。また施工中においても浚渫現場では施工性の確認や掘削のシミュレーションに、土砂処分場では施工中の残容量の把握や吹き出し口での広がり方のシミュレーションで3次元点群データを活用することができる。工事が完成すると浚渫現場では、3次元出来形管理と3次元データの納品や検査に使用し、土砂処分場においては次年度に向けた残容量の把握に活用することができる。よってどの施工ステップにおいても本研究で使用した測量機器が取得した3次元点群データを活用することができるということを検証できた。

5.5 4次元モデル活用へのまとめ

浚渫工における4次元モデルが3次元点群データを活用し、時間情報を付与した4次元モデルが形成できることがわかった。図5-3から浚渫現場や土砂処分場のどの施工ステップにおいても、UAVグリーンレーザ計測とUSVマルチビーム計測により3次元点群データが取得され、その3次元点群データを4次元モデルに活用することで、施工計画の可視化が実現でき、受発注者間でのより効率的な情報共有が可能となる。さらに、土砂投入の施工モニタリングへ活用により浚渫

表-5.1 点密度

	レーザ1(6mrad)	レーザ1(9mrad)	レーザ2
点群数(点)	1,179,634	1,174,135	70,148
面積(m ²)	2638	2638	2638
点密度(点/m ²)	447	445	27

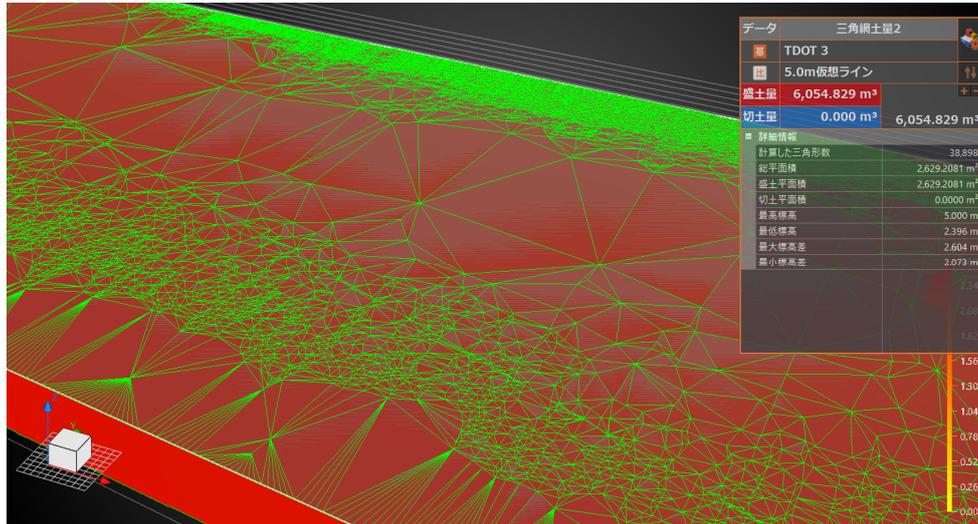


図 5-4 TIN の形成詳細図 (レーザ 2)

工事の効率化や高度化が期待できる。また土砂処分場において表-5.1のレーザ2の1m²当たり27点の点群密度においてもTINの形成することで、数量の把握には問題ないことも立証した。これは土砂処分場において、4次元モデルを形成する為にグリーンレーザのレーザ性能を問わず、活用できることとも言い換えることができる。よって、容量の把握が時系列で可視化されれば、吹き出し口の設置の立案や長期的な計画にも役立つことができ、今後の受注にもつながることができる。

第6章 結論

6.1 研究成果のまとめ

本研究では、実際の航路と土砂処分場の2ヶ所において浚渫工における施工管理の効率化を実現する手法として期待されている、USV マルチビーム測深と UAV グリーンレーザ計測を用いて新しい施工モニタリング技術の検討を行った。以下に本研究の成果①から③にまとめる。

① USV マルチビーム音響測深機を用いた浚渫航路の効率的なモニタリング手法の検討

(1)従来技術である有人船舶によるマルチビーム測量と USV 測量の測量結果の比較が全体的に 10 数cm程度 USV 測量が深くなる傾向であった。様々な補正を行うことで得られた値が近似していくこともわかり、補正の重要性が示された。また深くなる傾向は CUBE 処理の特性の傾向と同様のため従来技術と新技術の測量結果はほぼ同程度の結果となることを立証した。

(2)データ解析による検討は従来の手動での解析は3時間程度かかるものに対し、CUBE 処理を用いた解析の自動化によって10分から20分で解析を終えることができた。先述の通り、得られた結果は同程度の結果であれば、大幅な作業時間の削減を実現した。

(3)新技術の誤差要因を考察すれば、ソナーヘッドを船舶の取り付け位置、(通常は有人船舶の場合は真ん中) 潮汐による検潮所と現場との差異など考えられるが、従来法でも様々な要因があることから、水深結果を左右するとは限らないため、データは有人船舶と遜色ない状態であると結論づける。

(4)ICT 導入の初期において総費用は一般的に増加するとの認識がある⁵⁹⁾が、USV や CUBE 処理を導入することで約 217 万円コスト削減されるなど、費用評価からコスト面においても USV によるマルチビーム測深は有効な計測手法であるといえる。これは施工者のみならず発注者にとってもコストの削減や施工発注数量の増加につながる結果となった。

(5)USV 測量が簡便で生産性の向上につながることを立証され、浚渫工における浚渫現場での施工管理には十分に使えると判断する。

② グリーンレーザ搭載ドローン(UAV)による計測技術の検討

(1)陸上の精度検証においては、調整点による補正なしでは要求精度を満たすことが出来なかったため、要求精度を確保するには調整点の設置が必要だと考えられる。

(2)土砂処分場特有の濁度・水底・水質の測深能力への影響を検証から、底質の色の影響、フミン酸の影響について確認すると同時に、濁度の影響については定量化を行うことができた。

(3)レーザ1が35NTUの時、0.7mまでレーザ2が12NTUの時、1.0mまで水底を捉えることができた。点密度のばらつきは確認できたが、土砂処分場での残容量の把握の為の密度はどちらのレーザも満たしていると考えられる。

(4)UAV グリーンレーザ測量は従来のレッド測量との費用の比較で530万の削減ができた。これは新技術が大幅に費用を削減できていることを示し、土砂処分場での新しい技術として地位を確立することができたことを示している。

(5)UAV グリーンレーザ測量が簡便で迅速で生産性の向上につながることを立証され、浚渫工における土砂処分場での施工管理、残容量の把握ができる技術と判断する。

③ 浚渫工における3次元点群データの4次元モデルへの活用

(1)図5-3のイメージ図より、2つの計測機器で取得された3次元点群データは4次元モデルの作

成に即座に対応し、4次元モデルへの深みをもたらす結果が得られた。この結果は、今後の浚渫工を新しいステップに進む為の大きな成果である。

6.2 今後の展望と提案

3次元モデルに時間軸が付いた4次元モデルへの活用は、結論で述べたが、実際の浚渫現場において施工前段階から4次元モデルを作成し、実際の施工管理に活かしてみたい。4次元モデルには様々な有効性が考えられる為、ここに提案する。

施工計画として浚渫や揚土の1日当たりの施工をシミュレーションすることで、施工手順の不備や最適な掘進方法の確認ができる。作業船の配置を可視化することで、大型船の通行や航路への影響を確認することができる。土砂処分場での揚土シミュレーションをすることで、浚渫土の広がり方が可視化され、吹き出し口の配置の計画が容易になる。また圧密沈下と計画揚土量から処分場での残容量の把握が容易になる。

進捗管理として実際の浚渫状況をUSV測量により、4次元モデルと照らし合わせることで、進捗が確認でき、遅れがある場合、対策を立てやすい。また掘削深度が正確に規格値に適合しているか施工中に確認することができる。手戻りが容易で、より正確な施工が行える。

安全管理としての4次元モデルの作成は潮位や潮流を考慮すると土運船が浚渫船への接弦を行うときに最適な接弦ルートを計画することができる。また高潮や強風時の作業船が安全に運航できる避難経路を可視化することで作業員と経路共有ができ安全に迅速に行動することができる。

発注者や地元の住人との合意形成として4次元モデルを活用するとどのエリアでどのタイミングで施工されるかが伝えやすく、不測の事態にも対応しやすい。また現場における難所や危険箇所、施工のポイントを伝えやすい。漁業関係者には平面図や横断図での説明では理解しにくいのが、4次元モデルを活用することで理解しやすく、漁業関係者の気になるポイントがわかりやすい。

この様に4次元モデルを作成することで様々な有効性があり、今後浚渫工における4次元モデルが作成され施工に有効利用されることを期待する。

また国土交通省は、都市計画および道路分野において、に示すPLATEU等のプラットフォーム上で、すべてのデータを一括管理する取り組みを推進している。同様に、に示すように、港湾分野でも本研究で活用された3次元データを基に、誰もが容易にアクセス可能なデータ共有プラットフォームの構築を提案する。これにより、従来の作業プロセス（データ入力、書類作成、現場確認など）を効率化し、作業効率の向上が期待される。また、浚渫航路の測量実績を蓄積することで、マルチビーム測量のマニュアルやUSV等の無人機の運用マニュアルといった基準統一化への活用を提案する。例えば、小型船舶のサイズや条件は海域に応じて適切にクラス分類する等、適切な操作方法を示すことが求められる。今研究では実際の浚渫航路での作業許可が取得できたが、通常その判断基準は明確ではなく、安全面からも許可取得が困難である。船舶の安全性や回避能力などの指標を整備すること、統一された基準で運用することが今後重要になると考える。今計測をひとつの事例として活用、改善することで実現に近づけられると考える。以上から、港湾分野における作業プロセスの合理化と安全性の向上が期待される。

Project PLATEAUとは

日本全国の3D都市モデルを整備し、そのオープンデータ化を進めるプロジェクト

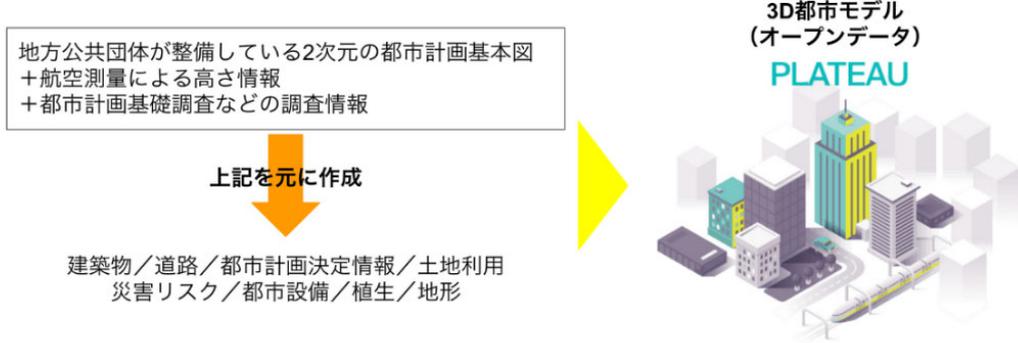
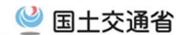


図-6.1 PLATEAU の概要

港湾におけるi-Construction・DXの推進に向けた取組



- 港湾の建設現場において、ICT施工や3次元データを導入し、各種作業の効率化、監督・検査の遠隔化等により、生産性向上や労働環境の改善等を図る。
- 令和5年度は、ICT施工について引き続き試行工事を実施するとともに、マルチビームソナー測深データのリアルタイム処理システムの構築等を行う。また、3次元データの活用について、BIM/CIMプラットフォームの構築や各工種への適用について検討を行う。

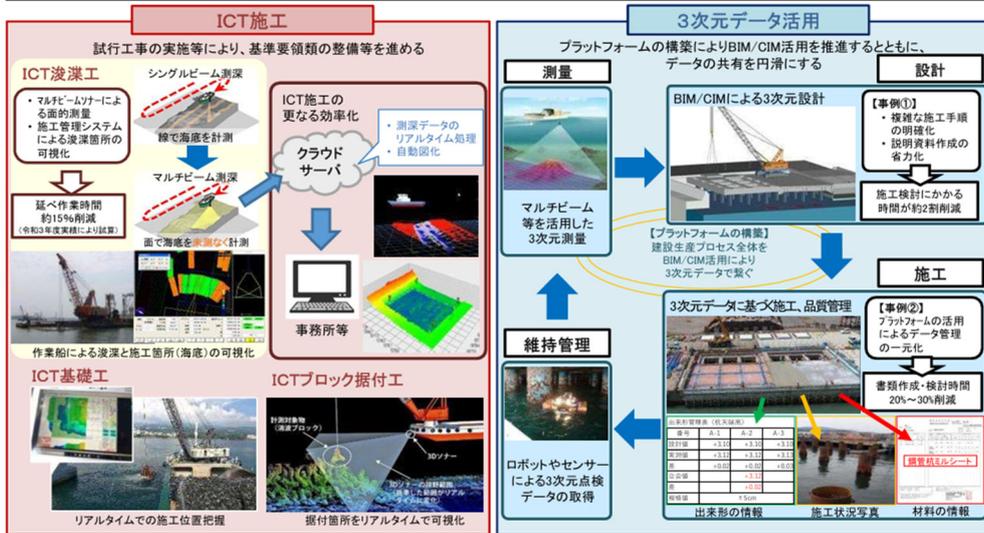


図-6.2 港湾分野におけるDXの取組の概要

謝 辞

最後に、本論文の審査に当たり、主査である岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域・吉田圭介准教授には、お忙しいところ本論文の審査を行っていただき誠にありがとうございました。また本論文の執筆にあたり貴重なご意見ありがとうございました。

副査である岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域・木本和志准教授には、お忙しいところ本論文の審査を行っていただき誠にありがとうございました。

副査である岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域・西山哲教授には授業の講師や見学会開催の調整、学会発表などの役割を与えていただき、自分自身が成長することができました。また国土交通省の皆様との間に入らせていただき、通常業務では知り得ない人たちとの交流によって貴重な経験をさせていただき、本当にありがとうございました。社会人学生でありながら、本当の学生であったと思います。ありがとうございました。

株式会社セトウチ田中浩二様，廣谷幸二様には、本論文の執筆にあたり UAV グリーンレーザ計測に関して多くのご教授をいただきました。お忙しいところ何度も説明していただき本当にありがとうございました。

西山研究室 茨木克博くん，伊藤千夏さん，坂本奈温子さんは研究活動を共にを行い，何度も打合せや現地での調査を行い，議論を重ねることで共に切磋琢磨できたこと，本当にありがとうございました。

国土交通省中国地方整備局の関係各位には、この研究に理解を示していただき、実施に当たっては多くのご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

天野産業株式会社代表取締役社長には、本論文の執筆活動にも理解をいただき、多くの配慮をいただいたことで集中して執筆することができました。また入学の際には快く、理解していただいたこと、ここに感謝申し上げます。

西山研究室の社会人の皆様には、大変お世話になりました。様々な方面で活躍されている皆さまとの意見交換は自分自身、いい刺激を受けることができました。本当にありがとうございました。

最後に、人生において、とても貴重な時間を大学生生活に費やす為に協力してくれた妻、息子たちに心より感謝します。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局京浜港湾事務所：港の機能・役割（ホームページ）
<https://www.pa.ktr.mlit.go.jp/keihin/function/index.html>
- 2) 国土交通省港湾局：国際バルク戦略港湾の選定結果について，
<extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.mlit.go.jp%2Fcommon%2F001289329.pdf>， 2011.
- 3) 国土交通省中国地方整備局：「事業再評価」水島港 国際物流ターミナル整備事業，
extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.cgr.mlit.go.jp%2Fcginfo%2Fkoukyouhyouka%2F2023%2Fpdf%2FR5-2-4-5_mizushimakou.pdf， 2023.
- 4) 社会法人日本埋立浚渫協会：Marine Voice21 マリンボイス 21 Spring，平成 24 年 4 月 11 日発行，Vol.277，2012.
- 5) 岡山県産業労働部：水島臨港工業地帯の現状，pp.44，2023.
- 6) 香川雄一：高度経済成長期の水島における工業都市化とロカリティの変容，地学雑誌，Vol.110，No.3，pp.314-338，2001.
- 7) 三菱自動車工業（株）水島製作所：地域経済に貢献する水島コンビナート，www.mizu-com.jp.
- 8) 世界に通じる，未来へ通じる「港湾」の話編集委員会編 国土交通省港湾局監修：世界に通じる，未来へ通じる「港湾」の話，日本経済新聞出版，2018 年 10 月 03 日，pp.18.
- 9) 国土交通省：港湾における ICT 導入検討委員会，2016.
- 10) 浅田昭：マルチビーム音響測深の原理，水路部技報，Vol.15，pp.73-93，1997.
- 11) 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)，3 月 2021.
- 12) 浚渫工事における ICT の活用効果と 今後の活用について関東地方整備局 千葉港湾事務所 保全課 安倍 庸祐
- 13) 岡部晃，坂本奈温子，西山哲，照屋市朗，中原浩実：浚渫土砂処分場における地盤改良工の有用性の検討，岩盤力学に関するシンポジウム講演集 自由投稿論文.
- 14) 宮崎兼治：ICT を活用した浚渫工事における課題と対応について，国土交通省 関東地方整備局，https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000746671.pdf.
- 15) 国土交通省：港湾における ICT 導入検討委員会 第 7 回委員会資料，2 月 15 日，2019.
- 16) 国土交通省 大臣官房技術調査課：インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション（DX）施策，2021.
- 17) 国土交通省：国土交通省白書 2021，2021.
- 18) 国土交通省：インフラ分野の DX アクションプラン 2，2023.
- 19) 国土交通省：設計-施工間の情報連携を目的とした 4 次元モデルの考え方(案)，2019.
- 20) 国土交通省：設計-施工間の情報連携を目的とした 4 次元モデル活用の手引き(案)，2020.
- 21) 国土交通省港湾局：港湾の高度情報化研究会 報告書，1997.
- 22) 国土交通省港湾局：港湾の ICT 化・スマート化について，2019.
- 23) 港湾研究部長 渡部富博：港湾分野における I C T 進展・D X に関わる研究動向.
- 24) 山本勝志：港湾 IoT/AI に向けた技術開発の動向と展望，2021.
- 25) 自動運転ラボ：海の自動運転モビリティ解説（2023 年最新版），https://jidounten-lab.com/u_41788.

- 26) 国土交通省：港湾における i-Construction 推進委員会 資料-1, 第 7 回説明資料, 11 月 20 日, 2023.
- 27) 国土交通省：港湾における DX (デジタルトランスフォーメーション) を通じた抜本的な生産性の向上の概要, https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk3_000031.html
- 28) 森木亮, 大野正人, 小黒章二, 岩波光保, 泉誠司郎, 加藤訓生：港湾浚渫工事への ICT 導入による生産性向上の評価方法に関する基礎的研究, 沿岸域学会誌, Vol.31, No.3, pp.17-27, 12 月 2018.
- 29) 国土交通省東北地方整備局 (一財) 港湾空港総合技術センター：平成 28 年度港湾分野における CIM 技術活用検討業務報告書, 3 月 2017.
- 30) 住吉昌直, 佐伯達也, 大久保匡騎, 森雄基, 森弘和, 吉澤信, 長野勝行, 栗田洋和, 鐘尾誠, 安原徹, 長澤亮佑：水路測量における技術の進歩と近年の取り組み, 海洋情報部研究報告, Vol.59, 3 月 19 日, 2021.
- 31) 土屋主税, 橋本崇史, 鈴木充広, 山内明彦：10 m メッシュと 50 m メッシュによる津波シミュレーションの比較—清水港を例として—, pp.98, 2016.
- 32) 水産庁漁港漁場整備部：マルチビームを用いた深淺測量マニュアル(浚渫工編), 4 月 2022.
- 33) 友久武司, 高畑亮太, 森弘和：船舶搭載型レーザースキャナーの精度検証及び水路測量への応用, 海洋情報部研究報告, Vol.61, 3 月 17 日 2023.
- 34) 丹治史哉, 三浦太佳也, 後藤光亀：地上型 3 次元レーザースキャナにおける被測定物と反射強度の関係, 平成 22 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 土木学会東北支部, 仙台市, 2010.
- 35) 住吉昌直, 栗田洋和, 安原徹, 橋本崇史, 小川遥, 長澤亮佑, 長野勝行, 吉澤信, 眞保智彦, 秋山裕平：マルチビーム水深測量成果における CUBE 水深の採用について：海外水路機関における最適化の事例紹介, 2020), 海洋情報部研究報告, Vol.58, 3 月 19 日 2020.
- 36) 澤信, 住吉昌直, 長野勝行, 大泊理八, 井田壮太, 梅垣裕至, 畠山豊, 阿部周平, 塚本真由美：27 メートル型測量船「はましお, 海洋情報部研究報告, Vol.57, pp.43-61, 2019.
- 37) 茨木克博：浚渫土の減容化施工を支援するモニタリング技術の研究, 3 月 15 日 2023.
- 38) 海上保安庁 海洋情報部：平均水面, 最高水面 及び 最低水面の高さに関する告示, 平均水面, 最高水面及び最低水面の高さに関する告示, <https://www1.kaiho.mlit.go.jp/TIDE/datum/>.
- 39) 海上保安庁 海洋情報部：平均水面, 最高水面 及び 最低水面一覧表, (令和 6 年 2 月 9 日現在) .
- 40) 寺松孝浩, 堀江利明：ナローマルチビーム (NMB) の特性を踏まえた計測・解析技術と応用について, NiX Technical Report, 2022-2023.
- 41) 水産庁漁港漁場整備部：マルチビームを用いた深淺測量マニュアル(浚渫工編), 4 月 2022.
- 42) Calder & Wells：Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator, 2007.
- 43) 小野寺健英：最近の MB (マルチビーム) 測深データ処理ソフト, 平成 21 年度海洋情報部研究成果発表会, 2 月 16 日 2010.
- 44) 菊池眞一：新しい電子海図と水深カバレッジ, 季刊水路, Vol.173, pp.16-23, 2015.
- 45) National Oceanic and Atmospheric Administration：Field Procedures Manual, NOAA-OCS, USA, April 2014.
- 46) National Oceanic and Atmospheric Administration：Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, NOAA-OCS, USA, April 2018.

- 47) Canadian Hydrographic Service : CUBE Bathymetric Data Processing and Analysis, CHS, Canada, 2012.
- 48) Calder, B., et al. : Description of Bathymetric Attributed Grid Object (BAG), Version 1.5.1, University of New Hampshire, US, 2013.
- 49) 東陽テクニカ EMC 特機技術部 : マルチビーム測深 : CUBE 処理とは何か?, toyo.co.jp.
- 50) CUBE User's Manual, version 1.13, Brian Calder Center for Coastal and Ocean, Mapping and NOAA/UNH Joint Hydrographic Center University of New Hampshire.
- 51) International Hydrographic Organization : IHO Standards for Hydrographic Surveys Special Publication No.44, 5th Edition, IHO, Monaco, 2008.
- 52) 海上保安庁 : 水路測量業務準則施行細則, 保水海 Vol.13, 4月27日, 1983, 保海沿 Vol.184 (R4.3.8) 一部改正.
- 53) 海上保安庁 : 海上保安庁告示第 102 号,
https://www1.kaiho.mlit.go.jp/GIJUTSUKOKUSAI/SHIDOW/site0013/_userdata/annex2.pdf.
- 54) AMUSE ONESELF : FEATURE GLOW.H の特徴 (ホームページ),
<https://amuse-oneself.com/product/glowh>.
- 55) RIEGL JAPAN : UAV グリーンレーザスキャナー計測事例 (ホームページ),
<https://www.riegl-japan.co.jp/about/green.html>.
- 56) 国土交通省国土地理院 : 作業規程の準則, 2023.
- 57) 国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課河川保全企画室 : 河川定期縦横断測量業務 実施要領・同解説, 2018.
- 58) 比嘉紘士, 福田智弘, 宮下寿哉, 中村由行, 鈴木崇之 : 有色溶存有機物の光学特性を利用した静止海色衛星による東京湾の塩分分布推定に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No2, I_1242, 2017.
- 59) 国土交通省 : i-Construction 委員会 i-Construction ～建設現場の生産性革命～ (報告書および資料一式), <http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>, 4月2016.