

船外環境付加情報の計測技術の 実証実験について

～ ご報告 ～

2024年 3月 6日
富士通株式会社

はじめに

1. 衛星画像(光学)を用いた計測に関する技術
2. 離着棧港の3Dモデル化に関する計測技術

■ 目的

- ・ 自動運航の普及促進には、機器開発に加え船外・船内のデジタル環境整備も重要
- ・ ここでは特に船外デジタル環境に着目し、船舶の輻輳度・海象・離着棧港3D情報等の地図への情報付加は、船舶の自動運航でも有用と考えられる。また、付加情報の取得方法・情報利用の権利関係が課題

■ 計測技術に関する実証実験

- ・ 付加情報の取得方法として期待される衛星画像を利用した計測技術、並びに離着棧港3Dモデル化に関する計測技術について、実証実験を実施

衛星画像(光学)を用いた計測に関する技術

離着棧港の3Dモデル化に関する計測技術

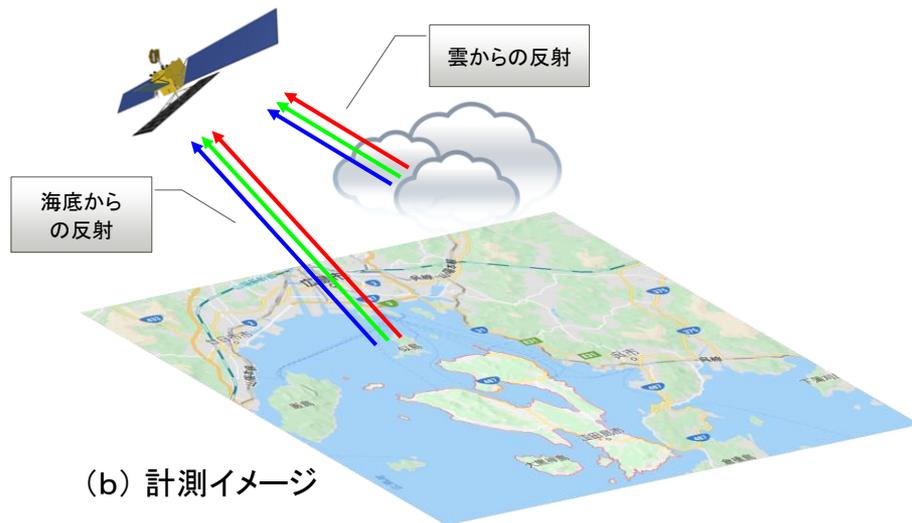
1. 衛星画像(光学)を用いた計測に関する技術

■ 背景

- ・ 日本水路協会「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究(平成26-28年度)」をベースに、近年著しく増加している**小型衛星の活用、研究の進展**等を考慮した最新の技術動向を調査
- ・ さらに、小型衛星の活用において、解析条件、精度、対象衛星、観測条件、衛星画像提供ベンダとのインターフェイス、コスト等の評価及び課題を調査



(a) 調査研究報告書



(b) 計測イメージ

図1-1. 衛星画像を用いた計測に関する技術

1100 衛星画像からの海底計測実証 (山口大学 保有技術)

1110 解析対象の選定 : 海域、気象条件、衛星画像(解像度、計測バンド等)、水深データ有無を考慮

1120 学習データ作成 : 計測バンド、解像度を考慮し、衛星画像から学習データを作成

1130 水深推定AI : 上記学習データを用いて、海底計測AI構築・評価を実施

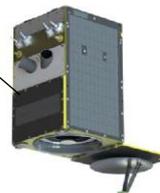
1140 解析アプリケーションによる評価 : 海域、気象条件、衛星画像(中・高解像度)による比較評価

WorldView



(a) 高解像度衛星の例(解像度 50cm)

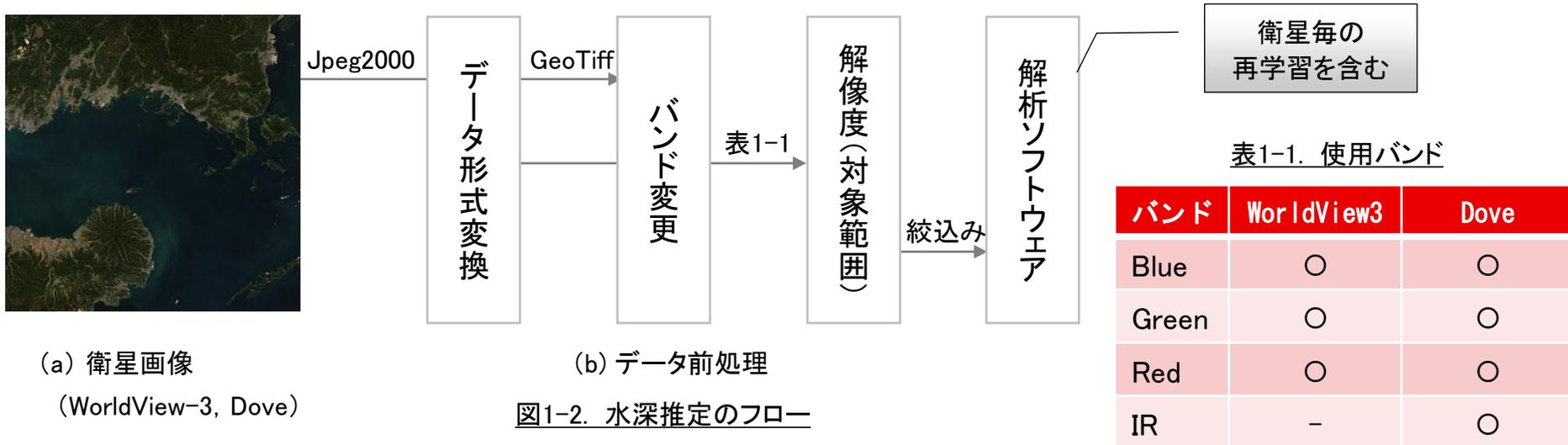
Dove



(b) 中解像度衛星の例(解像度 3m) 小型衛星

■ 学習データの作成と処理フロー

- ✓ データ形式、バンド波長帯、解像度の違いに対応し、解析ソフトウェア(モデル化+AI)に入力
- ✓ 正解データとして、海上保安庁から対象海域の**実測水深データ**を提供(総数 14.96万点、学習 8,400点)



■ 解析結果 (千葉県南房総市岩井)

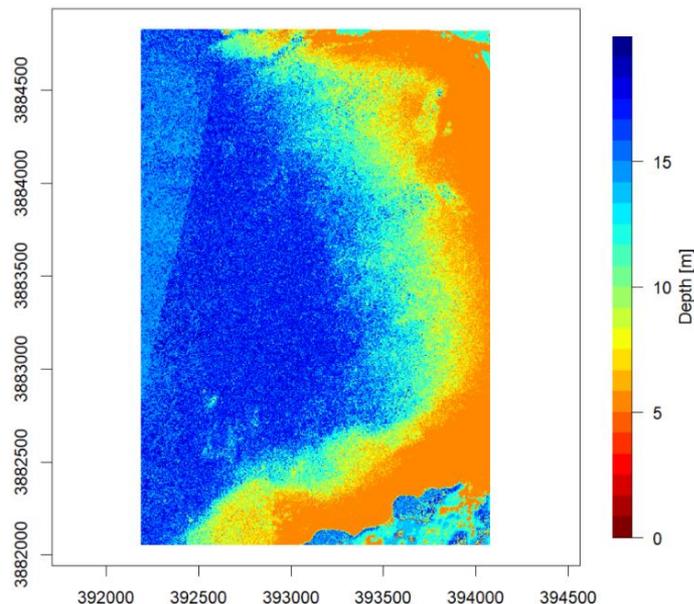
✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/12/13 00:37:32 UT



図1-3 (a) 衛星画像と水深推定結果(右)

※ 衛星画像は解像度30mに加工済

Water depth map by nnet



決定係数 : 学習時 0.70306、推論時 0.65790

■ 解析結果 (千葉県岩井)

✓ 高精度衛星 WorldView-3、撮影日時 2023/12/21 01:16:04



Water depth map by nnet

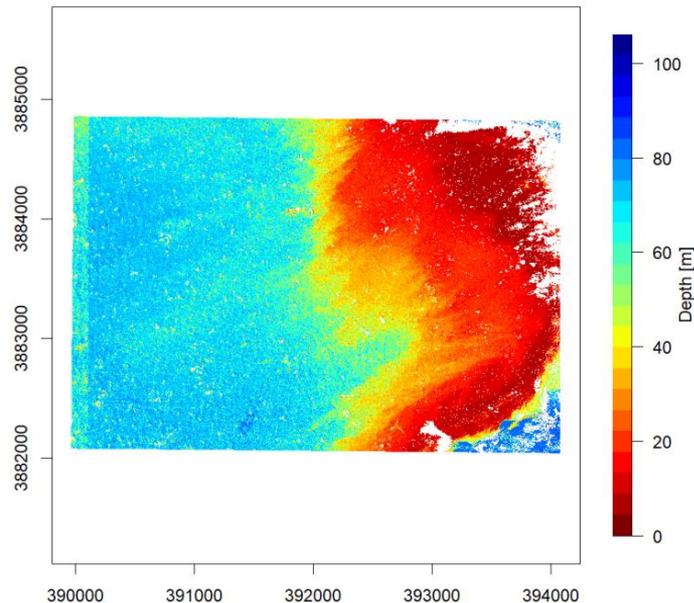


図1-3 (b) 衛星画像と水深推定結果(右)

■ 解析結果 (千葉県館山市)

✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/12/13 00:37:32 UT

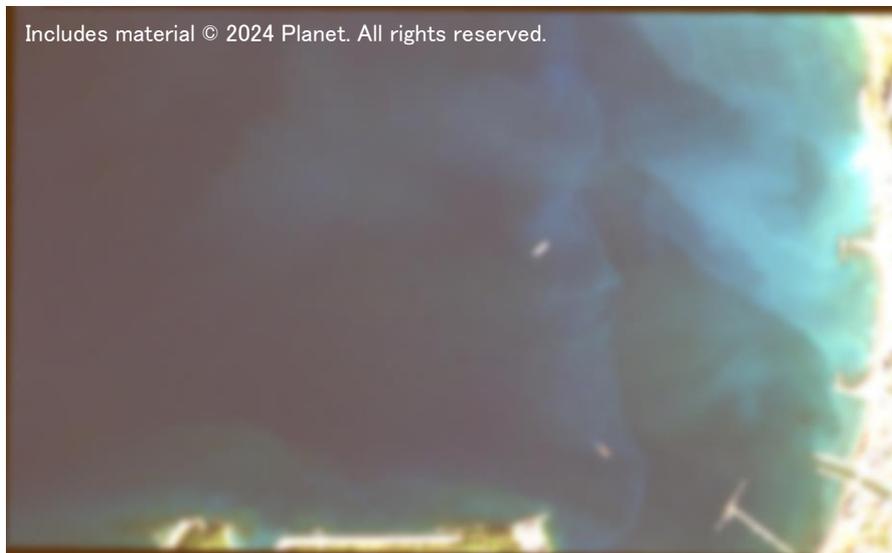
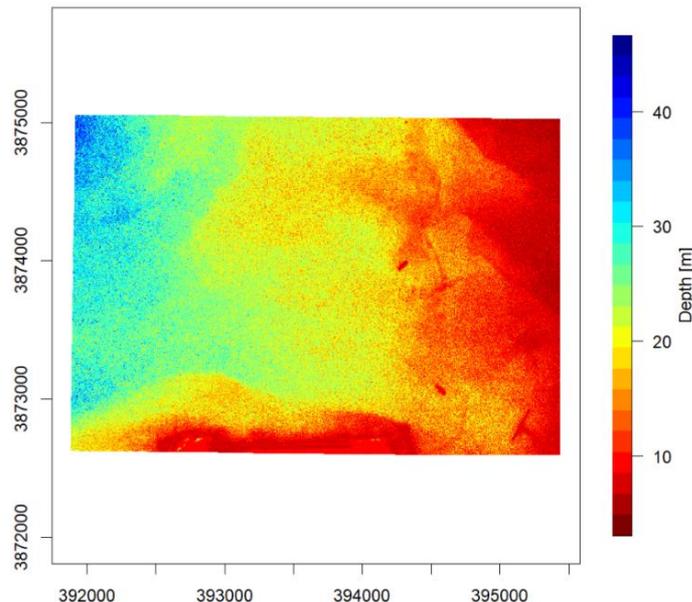


図1-3 (c) 衛星画像と水深推定結果(右)

※ 衛星画像は解像度30mに加工済

Water depth map by nnet



決定係数 : 学習時 0.59790、推論時 0.54640

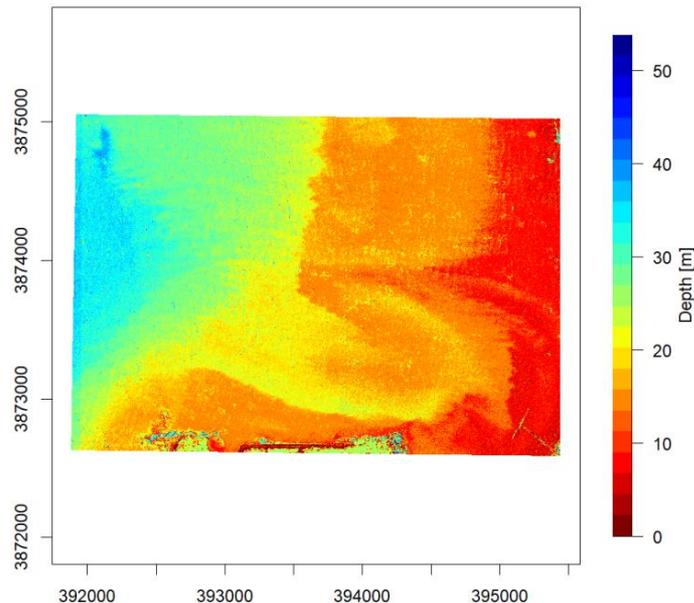
■ 解析結果 (千葉県館山市)

- ✓ 高精度衛星 WorldView-3、撮影日時 2023/12/21 01:16:04 UT
- ✓ 海水の濁り分布が推論結果に影響を与えている。



図1-3 (d) 衛星画像と水深推定結果(右)

Water depth map by nnet



決定係数 : 学習時 0.65551、推論時 0.62575

© 2024 FUJITSU LIMITED

■ 解析結果 (沖縄県琉球村)

- ✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/12/19 02:00:38 UT
- ✓ 図1-4 (e)の青い海域(サンゴ礁)は、細かい起伏が多く精度に影響あり

Water depth map by nnet

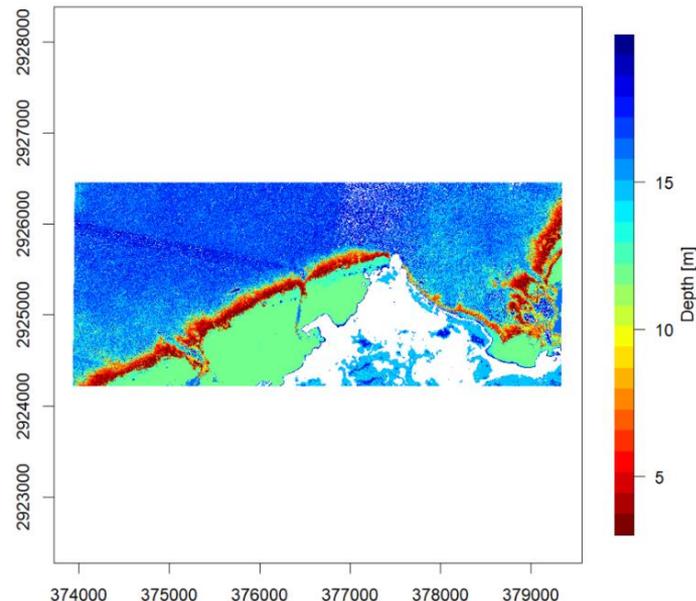


図1-3 (e) 衛星画像と水深推定結果(右)

決定係数 : 学習時 0.64155、推論時 0.61441

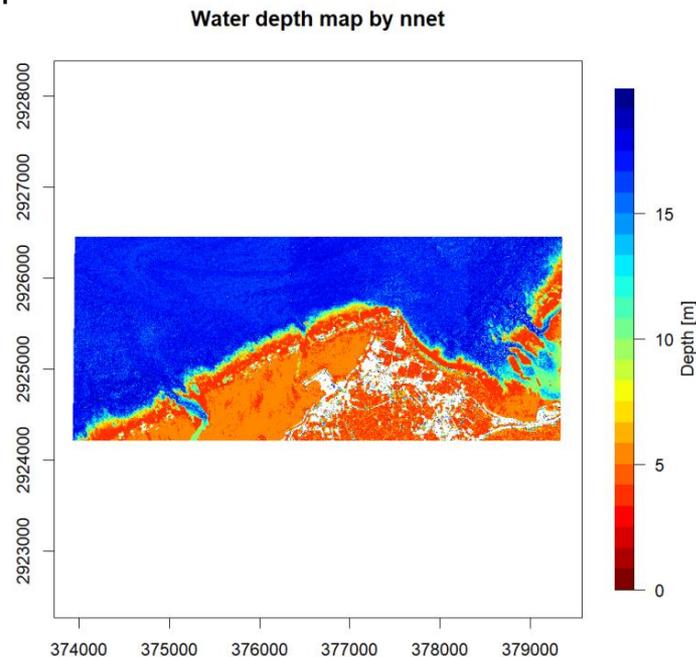
※ 衛星画像は解像度30mに加工済

■ 解析結果 (沖縄県琉球村)

✓ 高精度衛星 WorldView-3、撮影日時 2024/01/02 02:01:21 UT



図1-3 (f) 衛星画像と水深推定結果(右)



決定係数 : 学習時 0.83281、推論時 0.78520

■ 解析結果 (沖縄県那覇市)

✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/11/20 01:20:27 UT

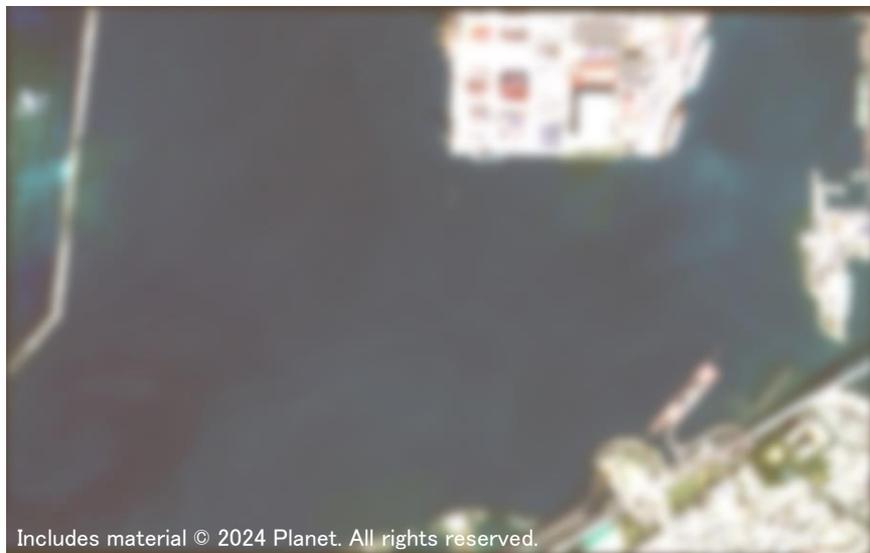
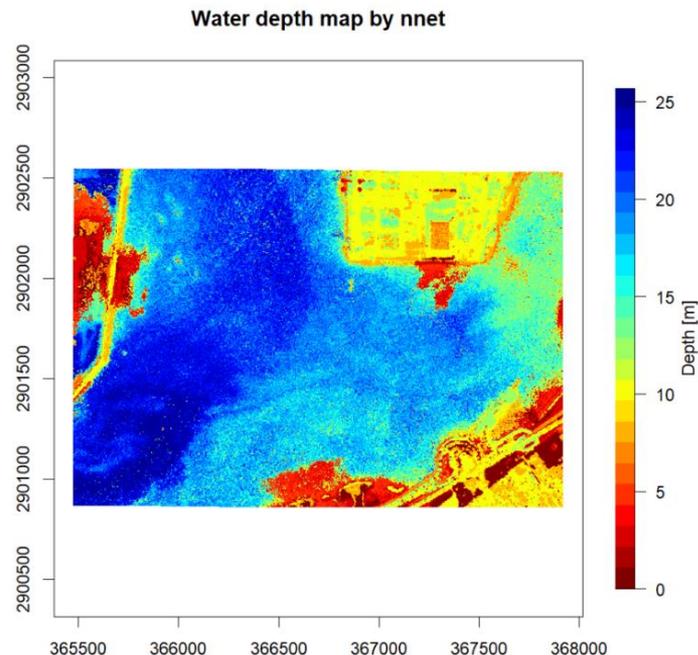


図1-3 (g) 衛星画像と水深推定結果(右)

※ 衛星画像は解像度30mに加工済



決定係数 : 学習時 0.68939、推論時 0.55120

■ 解析結果 (沖縄県那覇市)

✓ 高精度衛星 WorldView-3、撮影日時 2024/01/02 02:01:32 UT

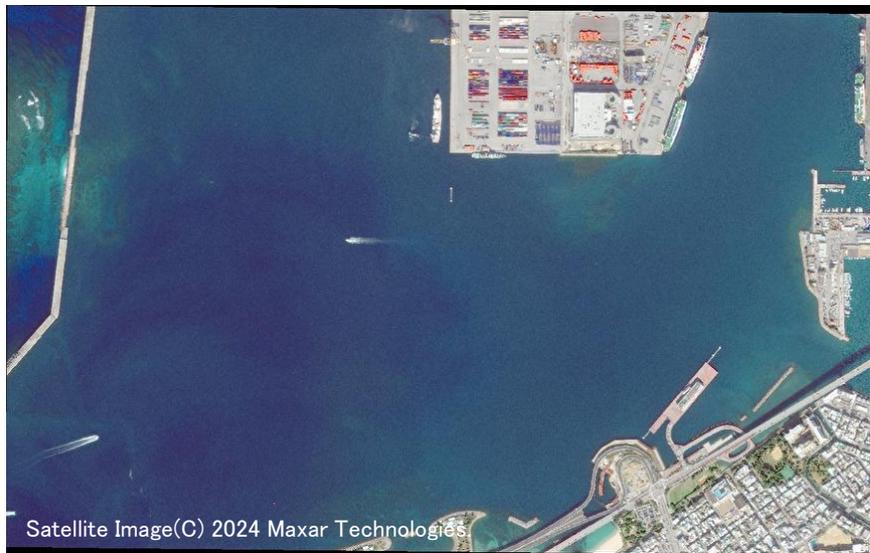
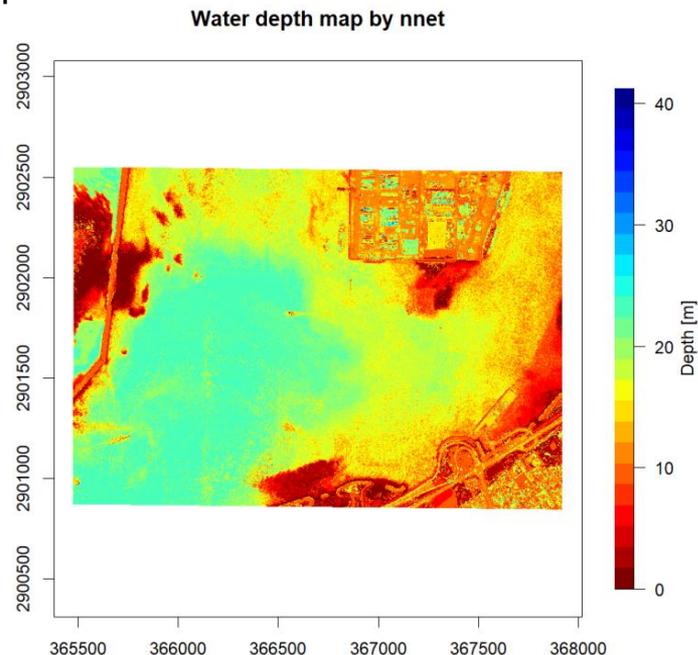


図1-3 (h) 衛星画像と水深推定結果(右)



決定係数 : 学習時 0.71421、推論時 0.74036

■ まとめ

- ✓ 高解像度衛星 WorldView-3、観測機会の多い小型衛星 Dove の衛星画像から、水深推定を実施
- ✓ ベースとなる山口大学 神野先生の解析アプリケーション(AIを含む)をカスタマイズし、各衛星に対応
- ✓ 海上保安庁 海洋情報部より、AIの正解データとして、選定海域の水深データを提供
- ✓ 入力データとして、衛星画像のRGBバンド情報を使用、小型衛星についてはIRバンドを追加
- ✓ 出力データは、衛星解像度毎の水深を推定
- ✓ フィージビリティスタディのため、検証ケースとして、良いケースと悪いケースを実施
- ✓ 学習時、推論時の決定係数は、諸条件からは想定した範囲
- ✓ 悪いケースにおける要因は、以下の条件が想定される。
 - ① 学習用衛星画像の少なさ
 - ② 水深データのメッシュと衛星解像度のずれ
 - ③ 解析アプリケーションのカスタマイズ対象範囲

1200 衛星画像からの筏、定置網検出

1210 検出対象の選定

: 対象とする筏、定置網の選定
(大きさ、海水面上の構造を考慮)

1220 学習データ作成

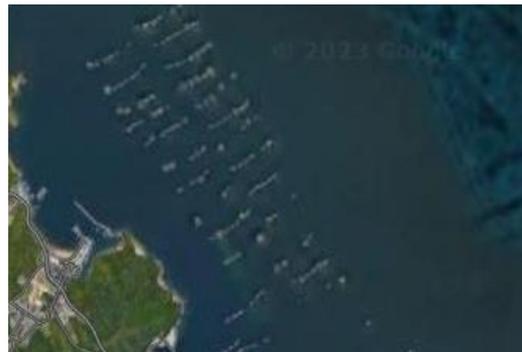
: 計測バンド、解像度を考慮し、衛星画像から学習データを作成

1230 検知AI構築

: 上記学習データを用い、筏、定置網検出AI構築・評価を実施

1240 GISによる表示

: 検出した筏、定置網をGISに表示



(a) 広島沖 かけ筏の例 (Googleより)



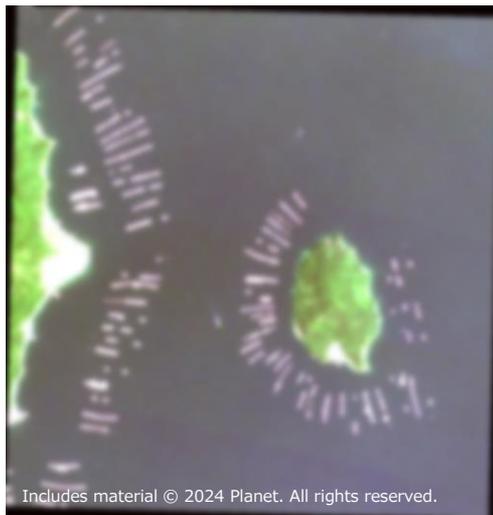
(b) 定置網の例 (Googleより)

■ 解析結果 (広島市似島)

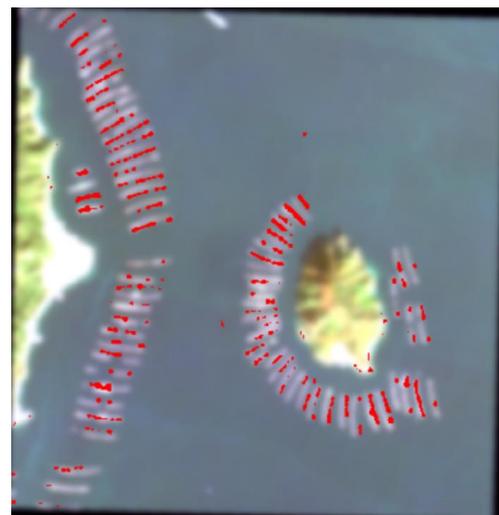
- ✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/06/19 01:01:39 UT
- ✓ 検出手法 : セグメンテーションAI



(a) 撮像海域 (似島付近)



(b) 衛星画像

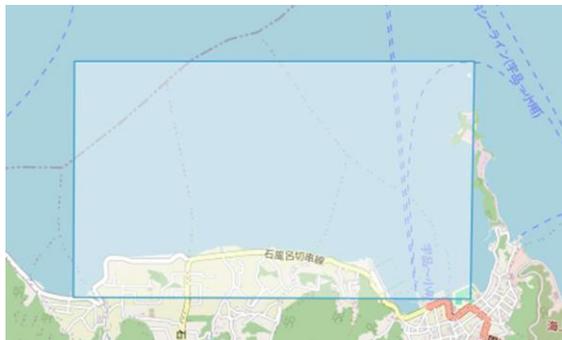


(c) AIによる筏検知結果

図2-1. 衛星画像からの筏検出 (衛星画像は解像度30mに加工、AI検知は解像度3mのまま)

■ 解析結果 (広島市江田島)

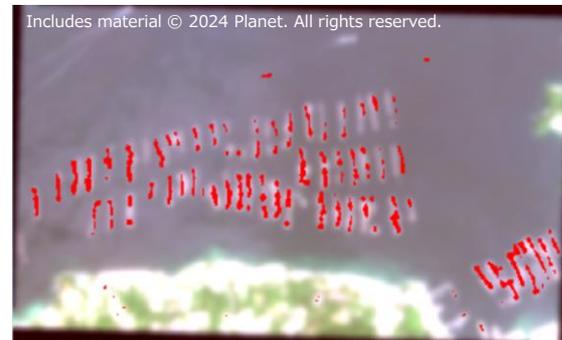
- ✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/07/27 01:36:02 UT
- ✓ 検出手法 : セグメンテーションAI



(a) 撮像海域 (江田島付近)



(b) 衛星画像 (解像度30mに加工)

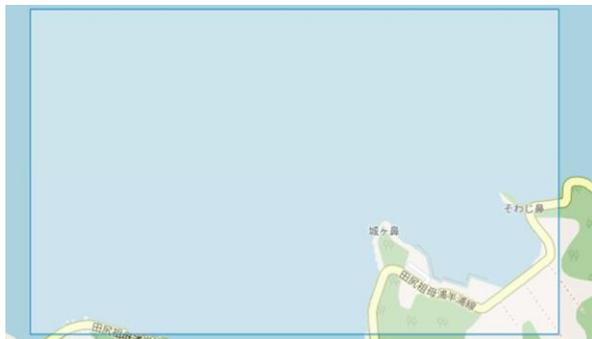


(c) AIによる筏検知結果

図2-2. 衛星画像からの筏検出 (衛星画像は解像度30mに加工、AI検知は解像度3mのまま)

■ 解析結果 (石川県能登島)

- ✓ 小型衛星 Dove、撮影日時 2023/12/09 00:47:19 UT
- ✓ 検出手法 : セグメンテーションAI



(a) 撮像海域 (能登島付近)



(b) 衛星画像画像 (解像度30mに加工)

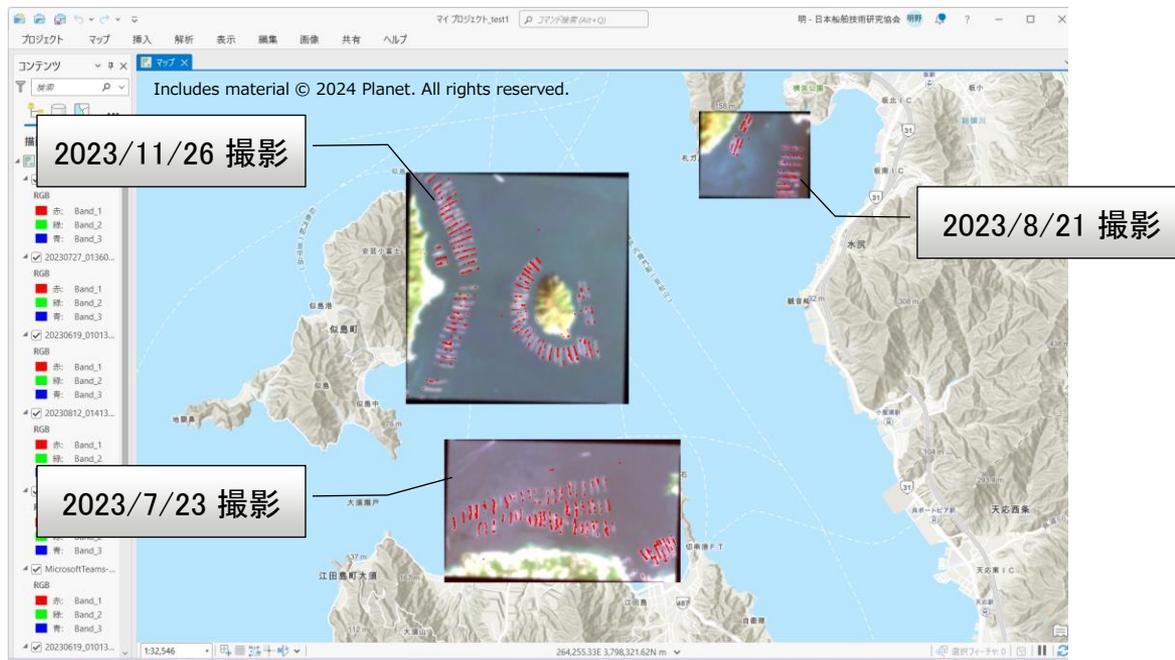


(c) AIによるブイ検知結果

図2-3. 衛星画像からの定置網検出 (衛星画像は解像度30mに加工、AI検知は解像度3mのまま)

■ 広島湾における筏検出とGISによる表示例

✓ 利用例として、蠣の成長に応じて筏の場所を変更するため、季節毎の位置を把握するのに有効



■ まとめ

- ✓ **高解像度衛星** WorldView-3、**観測機会の多い小型衛星** Dove の衛星画像から、**筏、定置網を検知**
- ✓ 画像処理は、筏、定置網の形状が多様なため、**セグメンテーションAI**を実施
- ✓ 解像度の異なる衛星 (WorldView-3 : 50cm、Dove 3m) につき、共通のAIモデルを構築
- ✓ 両方の衛星とも、**筏、定置網の検出は可能** (大きさに依存するが、定置網のブイも検出)
- ✓ **ArcGIS**に以下の情報をレイヤー表示することにより、**筏、定置網の位置把握**に有効
- ✓ 特に、**小型衛星は観測機会**が多いため、場所によっては**日単位の準リアルタイム観測**が可能
 - ① 衛星画像 (元データ)
 - ② セグメンテーションAIの出力結果 (筏、定置網の抽出結果)
 - ③ ①と②の重畳画像
- ✓ 学習用衛星画像が少ないため、**小型船舶も筏として検知**。複数の検知結果の比較により、船舶は除外可能

2. 離着棧港の3Dモデル化に関する計測技術

■ 背景

- 船舶の自動離着棧に必要な情報として、**離着棧港の3Dモデル化**に関する計測技術(衛星・航空測量、LiDAR、カメラ等)について、最新の技術動向の調査を実施
- 昨年度の調査結果から、**港湾岸壁の3D計測**等の実証試験を実施
- 船舶、ドローンに搭載した各種センサ(カメラ、LiDAR、水中ソナー等)を用いた計測

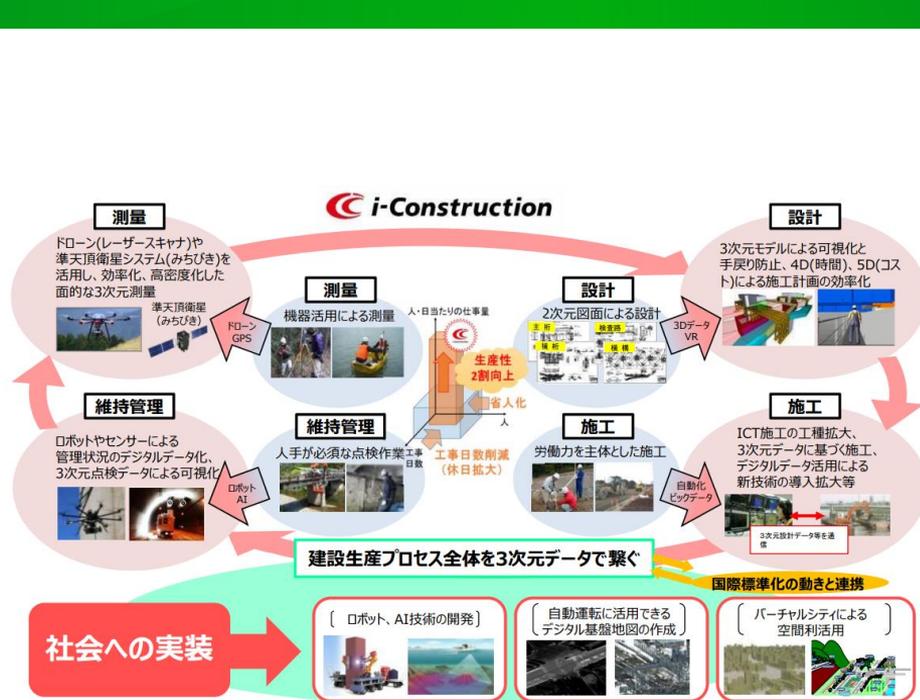


図3-1. 離着棧港の3Dモデル化に関する計測技術
(国交省 i-Construction 資料から)

2100 計測技術の実証実験

2110 計測方法の選定

: カメラ、LiDAR、水中スキャナーを想定
(岸壁の海面上、海中をシームレスに)

2120 計測アルゴリズム

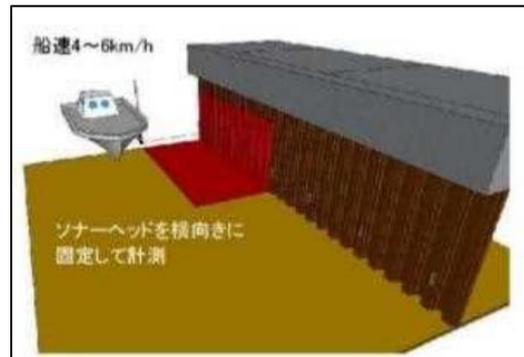
: 3Dモデル化アルゴリズム
(カメラ画像、LiDAR、水中スキャナー)

2130 実証実験

: 対象岸壁を選定し、上記センサによる
計測、3Dモデル化、評価、課題出し

2140 評価およびGIS表示

: プラットフォームのプロトタイプとして、
GIS を用意し、各種計測データ表示
を試行



(a) 水中スキャナーの例(国交省資料より)



(b) ドローンによる3Dモデル(国交省資料より)

■ 港湾設備の計測対象および成果物

計測対象	計測方法			担当	備考
	センサ	設置個所	成果物		
ふ頭、港湾設備	カメラ	船舶	3D マップ	岩根研	CV 法 (Camera Vecor)
		ドローン	SfM モデル	山口大学	セルフキャリブレーション用 多方向撮影
	フュージョンセンサ (カメラ・LiDAR 一体型)	船舶	点群データ (3D モデル)	京セラ	カメラ、LiDAR 光軸一致 (キャリブレーション不要)
水中構造物	マルチビームソナー	船舶	点群データ (3D モデル)	KAITO	レーザによる水上構造物の 同時計測
	グリーンレーザ	ドローン	点群データ (3D モデル)	Ace-1	
潮流	ソナー	ふ頭岸壁	潮流 (速度、方向)	ハイドロ システム開発	

- 車両に搭載したカメラから対象物を移動しながら撮影し、3Dモデルを生成する手法 (CV: Camera Vector)

カメラベクター技術とは



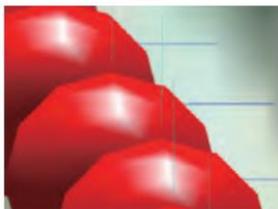
移動する各カメラの位置と姿勢 (CV 値) を高精度に求めます

特許取得済

複数のフレームで複数の特徴点をトラッキング



6変数を持つ CV 値



■ セルフキャリブレーション用多方向撮影

- ✓ ドローンに搭載した**光学カメラによるSfM**において、**カメラの焦点距離や歪みを精密に推定**（セルフキャリブレーション）
- ✓ カメラを同じ向きに向けた**従来型の平行光軸撮影**ではなく、被写体に対して**多様な向きで撮影**するよう設計される撮影

■ 条件、利点

- ✓ RTKドローンを用いると**対空標識を少なく**できる（通常ドローンでも標識を増やせば可）

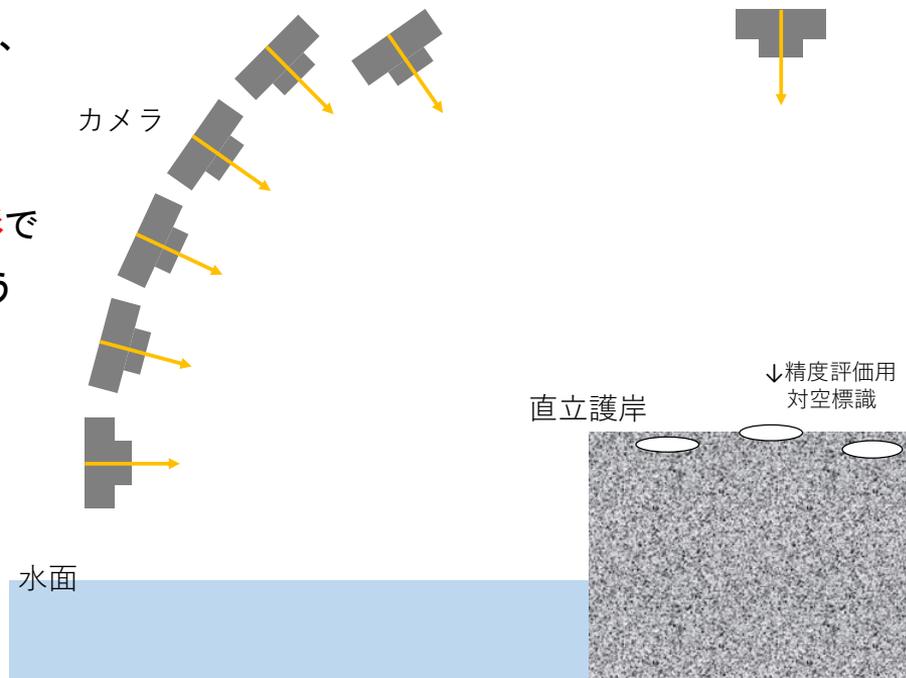


図3-2. セルフキャリブレーション用多方向撮影

■ カメラ、LiDAR の両方を内蔵し、両者の光軸を合わせたフュージョンセンサ（京セラ製）

- ✓ 前提：カメラ、LiDAR の両方活用
- ✓ 利点：カメラ、LiDAR の光軸が同一のため、オクルージョンがなく、光軸ずれのキャリブレーション不要

カメラで撮影した対象物
までの距離を取得



(a) カメラ画素単位のLiDAR測距



(b) カメラ画像、LiDAR測距データから生成された3Dモデル例

図3-3. フュージョンセンサ撮影例

■ 船舶にマルチビームソナーを艀装し、水中構造物を計測

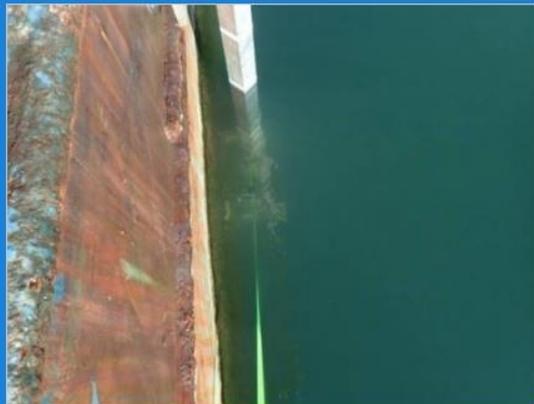
▷ マルチビームソナー

マルチビームソナーは、送波器から扇状の音響ビームを海底に向けて発信し、直交して配置した受波器で現側方向に鋭い指向性をもつ多数の受波ビームを形成し、海底からの反射波を受信することで一度に広範囲かつ多数の点を精度よく計測できる音響測深器です。

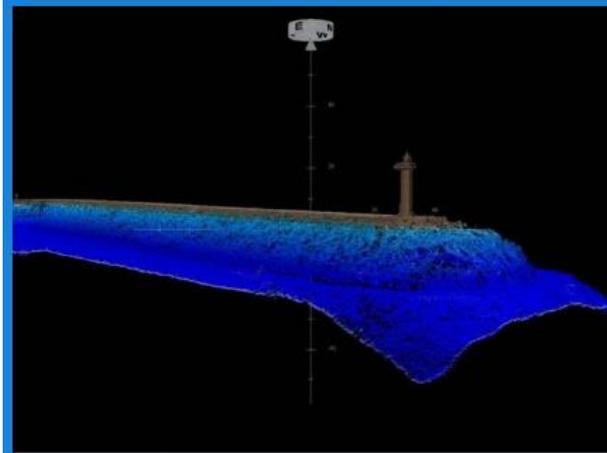
Sea Bat T20 - P



艀装状況



観測結果



■ ドローン搭載レーザによる浅水域計測

■ 対象水域、対象

- ✓ 富士見埠頭 浅水域
- ✓ 栈橋支柱 (水中)

■ ドローン搭載グリーンレーザ

- ✓ ASTRALiTe edge LiDAR

項目	仕様
計測精度	5cm
レーザレンジ	40 m
計測点数	40,000 点
取得パルス数	2
システム重量	5 kg

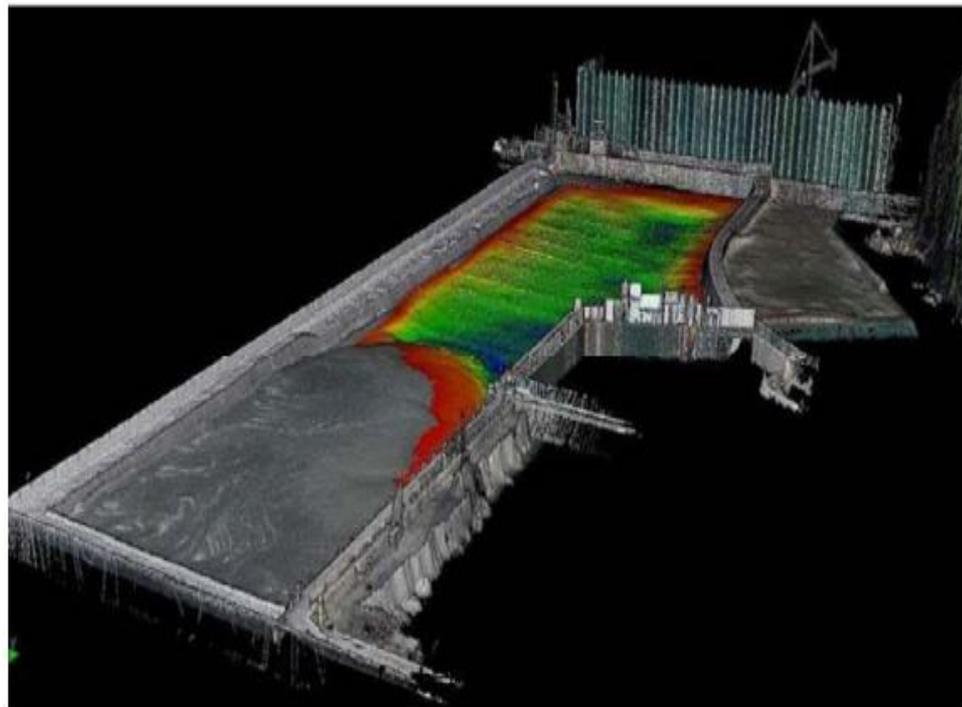


図3-4. 計測結果イメージ(出典 : 国交省)

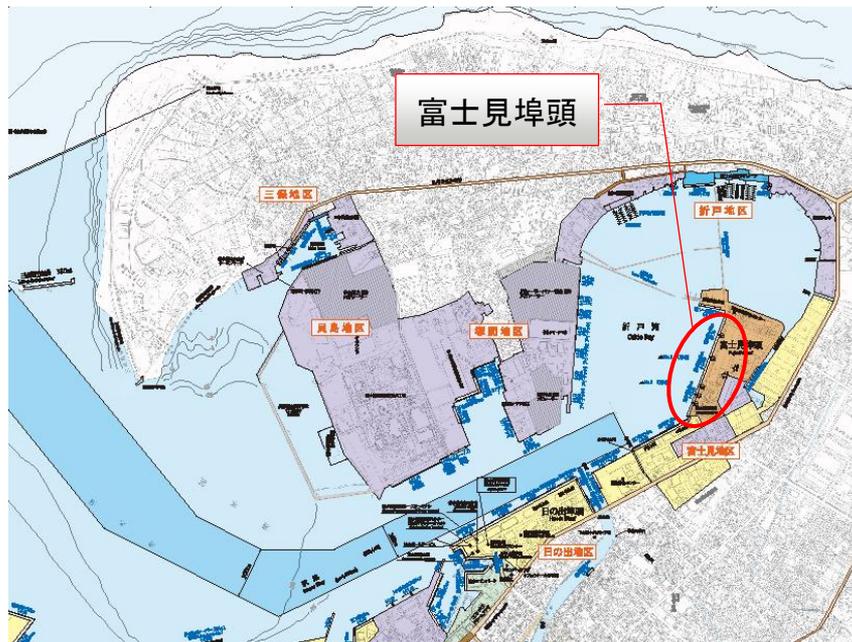
■ 離着棧港の3Dモデル化に関する計測技術

■ 計測機器と対象港湾の組み合わせ（案）

搭載 (計測機器)	担当	対象港湾			制約条件
		東京湾	清水港	その他	
船舶 (カメラ)	岩根研	◎ (海洋大)	○ (KAITO)	△ (船舶準備)	東京湾の要望が多いと思われる。
船舶 (LiDAR)	京セラ				
ドローン (カメラ)	山口大学	△ (申請)	△ (申請)	○ (許可不要)	都市周辺(飛行禁止区域)は国交省に申請 港湾管理者申請 LiDAR搭載時の高さ調整、墜落対策
ドローン (LiDAR)	山口大学 京セラ				
船舶 (スキャナー)	KAITO ^o	△	◎	△	清水港以外は費用増 計測船舶:定員 8-12人、3-4m ホールドあり 東京湾のデータ購入のみ可

■ 清水港における実証実験

- 計測場所：清水港 折戸湾 **富士見埠頭**
(人口集中地区、水中構造物)
- 計測方法：**ドローン**、**船舶搭載センサ**による計測
- センサ：光学カメラ、LiDAR、水中スキャナー
グリーンレーザ、潮流系
- 計測対象：埠頭(水面上、水面下)
ビット、フェンダー(防舷材)
荷役機械、荷さばき地、野積場など
- その他：(一財)マリンオープンイノベーション機構
静岡県清水港管理局の支援あり
- 実施時期
 - ✓ 2023/12/16(土)~18(月)



出典：静岡県清水港管理局

■ 船舶搭載機器による港湾設備計測

- ✓ 各社センサは、左舷に設置（岩根研は両舷設置）



(a) 計測機器を搭載した作業船



(b) 富士見ふ頭の計測状況（左舷からふ頭を計測）

図3-5. 船舶実証状況

■ ドローン搭載機器による港湾設備計測



(a) 標準点 (3点設置)



(b) 小型ドローン (カメラ搭載)



(c) 中型ドローン (グリーンレーザ搭載)

図3-6. ドローン実証状況

■ 撮影機材

- ✓ 作業船「なんせい」に艀装
- ✓ 左舷に機材設置（全天球カメラは両舷）

表3-2. 機材構成

機材	台数
全天球カメラ (LB5P)	2
レーザースキャナー (VLP-16)	1
8Kビデオカメラ (R5C)	6
GNSS/IMU (SPAN CPT7)	1
PC、UPS	各1
リチウム電池	2

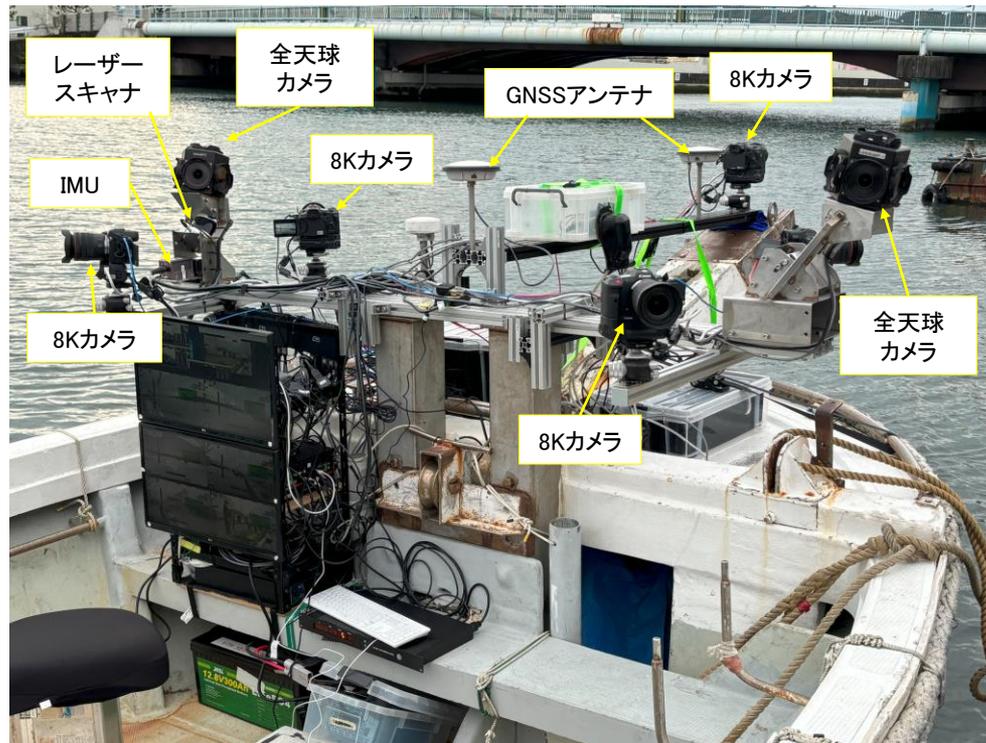


図3-7. 撮影機材艀装状況

■ 3Dマップ生成用データ

- ✓ 天候、撮影環境が良好であった12/18(月)本番計測(撮影)で取得したデータを使用
- ✓ CV方式3Dマップは、右図に示す護岸、2つのブイ周辺を作成
- ✓ 8Kビデオカメラは、左舷に設置した魚眼カメラ装着の映像をリンク

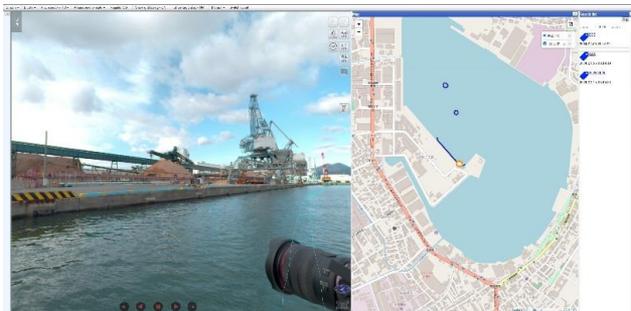


図3-8. 全天球カメラの撮影例



図3-9. 作業船航跡と撮影対象(富士見ふ頭護岸、沖合のブイ)

■ 3Dマップ(成果と課題)

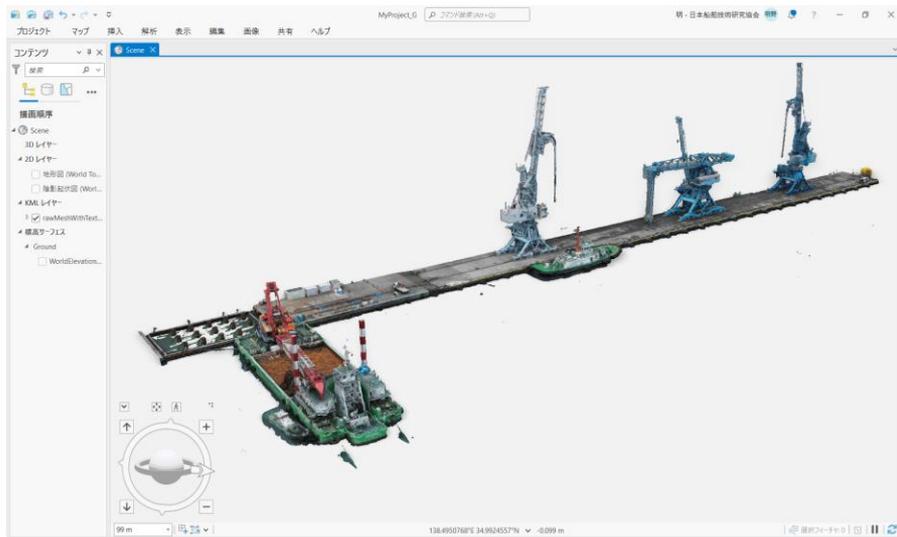
- ✓ 護岸部分は、所期の目的(仕様)を達成(マップ内対象物の3次元座標を取得可、ビューア機能にて、タグ付け、距離／面積計測等が可能)
- ✓ ブイは固定されていないため、高精度の3Dマップは生成されなかったが、補足処理により一定の成果あり
- ✓ 計測計画により、対象が左舷に集中した為、8Kビデオカメラ映像は左舷カメラのみ使用。必要により他のカメラ映像をリンクすることも可
- ✓ 2台の全天球カメラの設置場所が最適では無く(共通のトラッキングポイントが得にくい)、2台設置のメリットを充分活かすことが出来なかった。



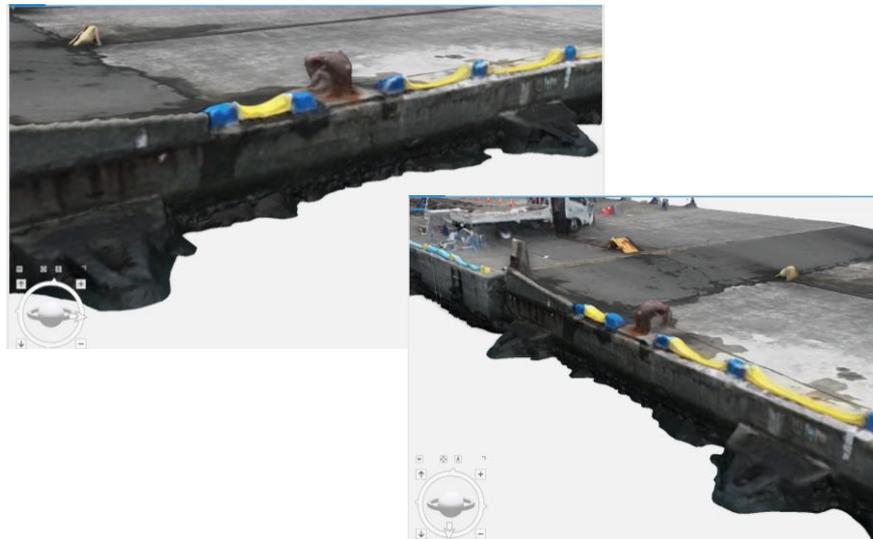
図3-10. 生成した3Dマップ画面と機能一覧

■ プラットフォーム ArcGIS による表示 (SfM)

- ✓ ドローン搭載カメラで撮影した港湾設備から生成したモデルをArcGISにて表示



(a) 富士見ふ頭全景



(b) 同一ビッドの視線を変えた表示

図3-11. ドローン実証状況

■ 従来の方法の課題

- ✓ 従来の方法(平行光軸撮影)は、SfMによって**焦点距離を推定できない**(焦点距離が数学的に不定となる)
- ✓ **レンズ歪みを十分な精度で推定できない**

■ 今回の方法の利点

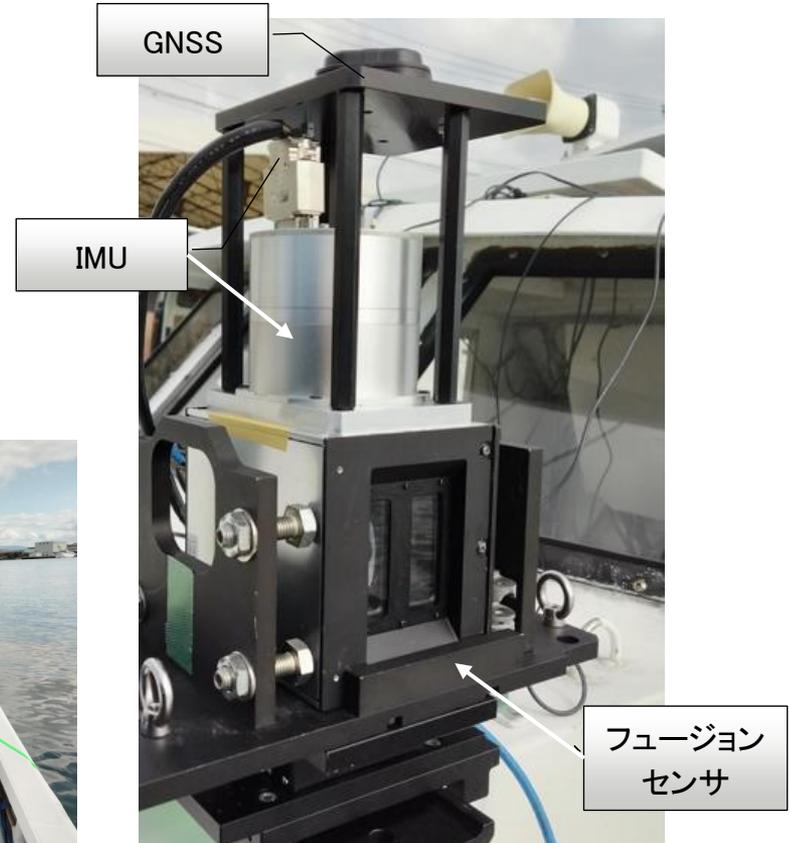
- ✓ 今回の手法(セルフキャリブレーション用多方向撮影)は、**焦点距離やレンズ歪みを写真から推定**
- ✓ 常に被写体を捉えつつも、カメラの向きに多様性を持たせることで、**従来手法の課題に対処**
- ✓ そのため、**標定点がなくとも**、写真だけで、**形状に歪みのない3Dモデルを生成可能**
- ✓ 生成された3Dモデルは、「**全体的な歪みはない**」

■ 3Dモデルの高精細化

- ✓ ふ頭の構造物が**多少変形しているのは、高精細さの問題で、カメラ解像度、被写体との距離が影響**
- ✓ より高精細に3D化するため、「**より近くから and/or より良いカメラで撮る**」こと
- ✓ **最新小型ドローンで、高度100m程度からの撮影による精細度として、今後の計画の参考となる知見**

■ 計測結果

- 計測日：2023年12月16日(土)～18日(月)
- 計測場所：清水港 折戸湾 富士見埠頭
- 計測機器（作業船左舷に設置）
 - ✓ カメラ-LIDARフュージョンセンサ ショートタイプ
 - ✓ IMU
 - ✓ GNSS



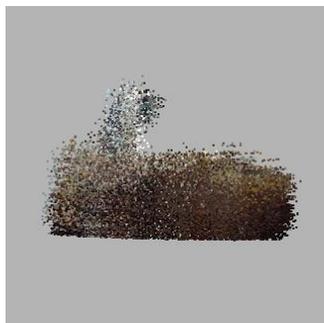
■ 計測結果（沖合ブイ）

- ✓ 生成した3Dモデルより、ブイの360度計測を確認

平面図



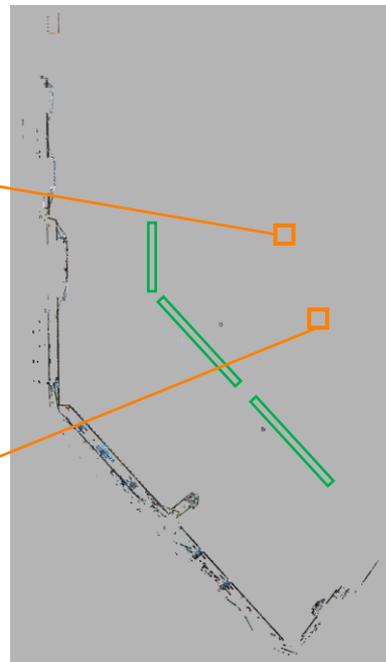
側面図



カメラ画像

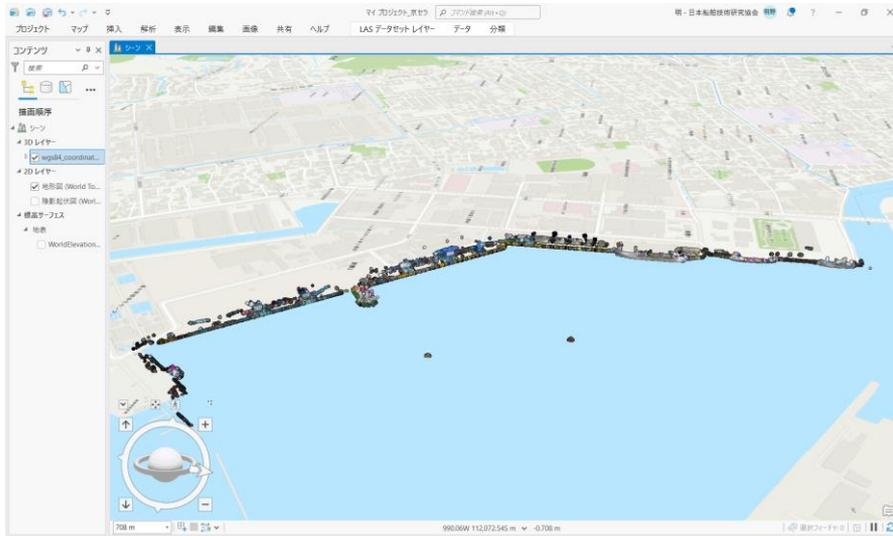


平面図

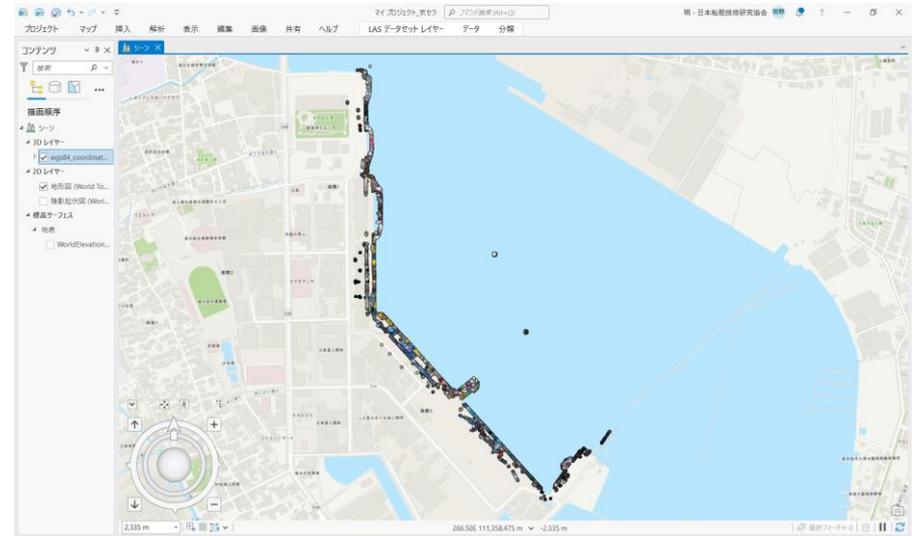


■ ArcGIS による表示（富士見ふ頭）

- ✓ フュージョンセンサのLIDARデータから生成した3DモデルをArcGISにて表示



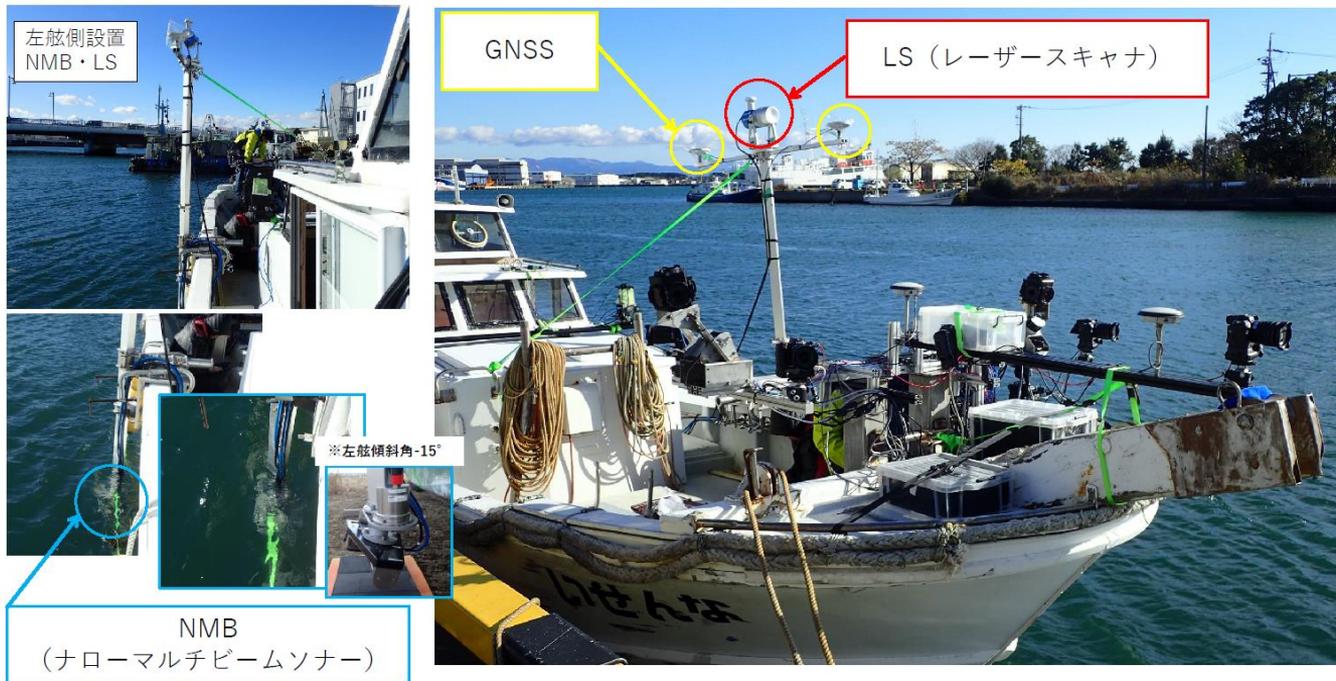
(a) 全景図



(b) 平面図

■ 水陸一体型3Dスキャナによる計測

- ✓ 作業船に水中、水上を同時に計測可能な3Dスキャナを搭載し、ふ頭を計測（水中：ソナー、水上：レーザ）

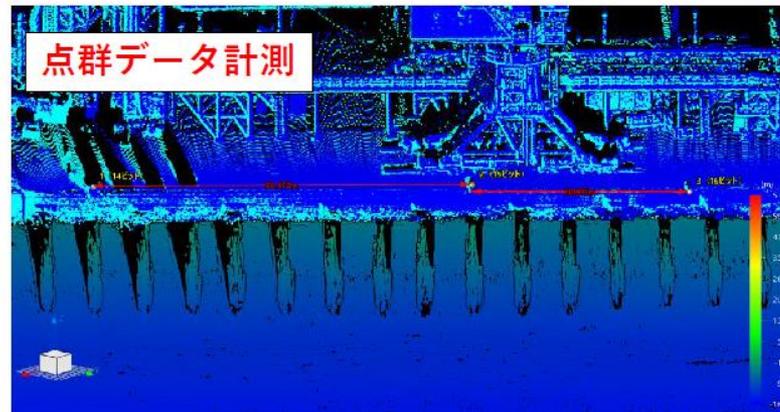
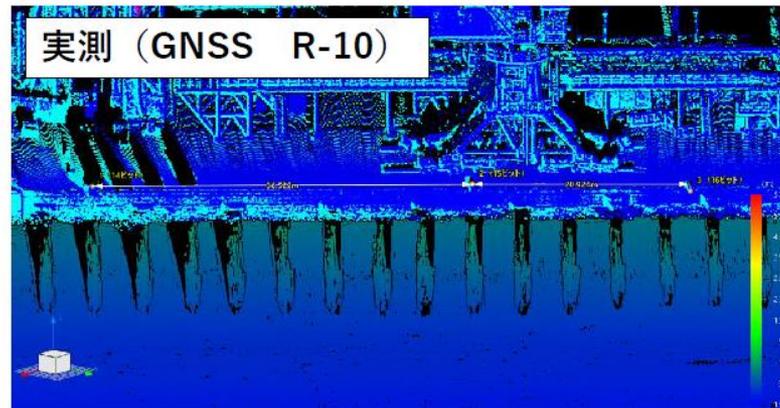


■ 富士見ふ頭 14,15,16ビット 計測結果

- ✓ 点群データから計測したビット間隔は、実測データと比較して、**5~7 cm程度**

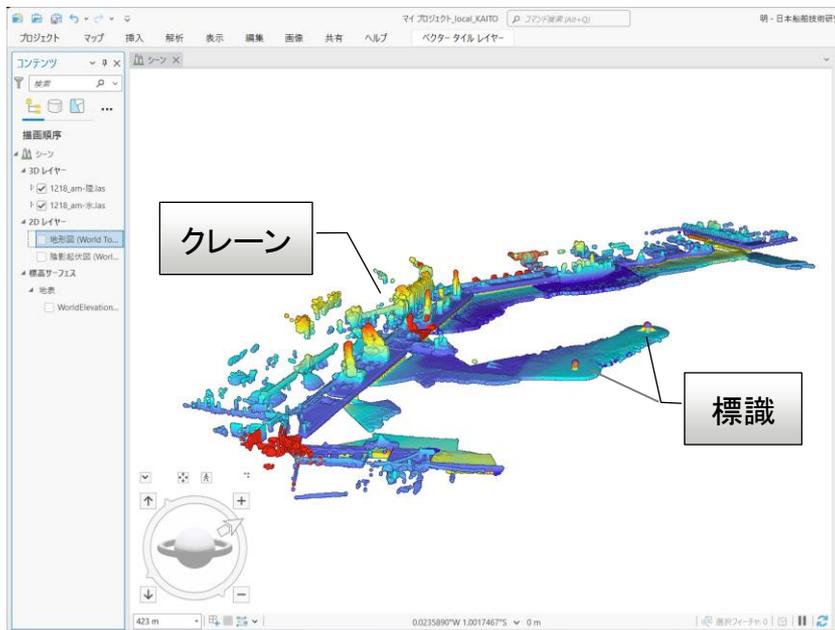
(単位 : m)

表1-1. 計測結果 14、15、16ビット間		
	14-15ビット間	15-16ビット間
実測 (GNSS R-10)	36.522	20.924
点群データ計測	36.470	20.991
差 (±)	0.052	0.067

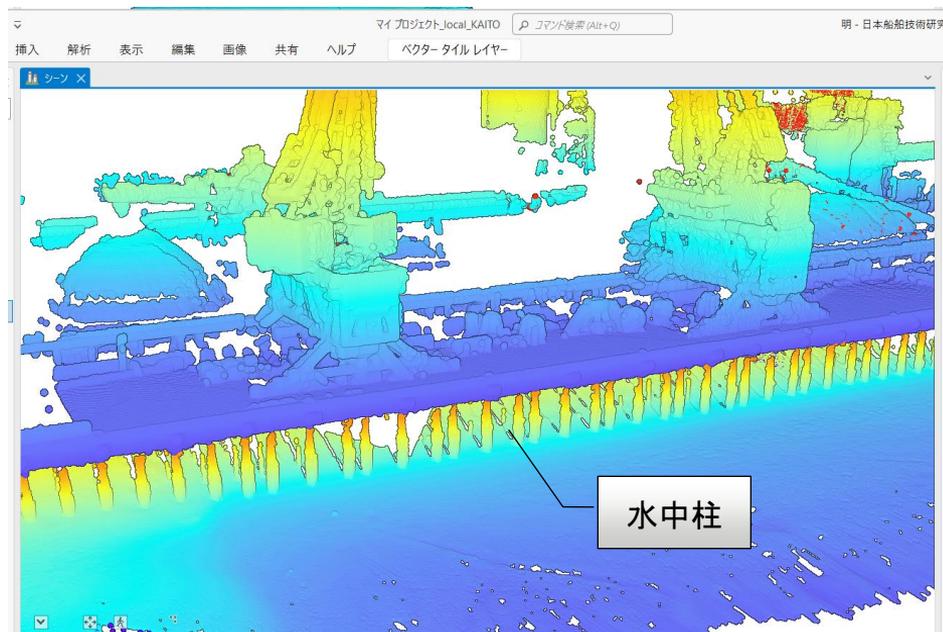


■ ArcGISによる表示 (水中を含む富士見ふ頭全景)

- ✓ 富士見ふ頭と港湾設備(クレーン等)、沖合の標識2点を表示



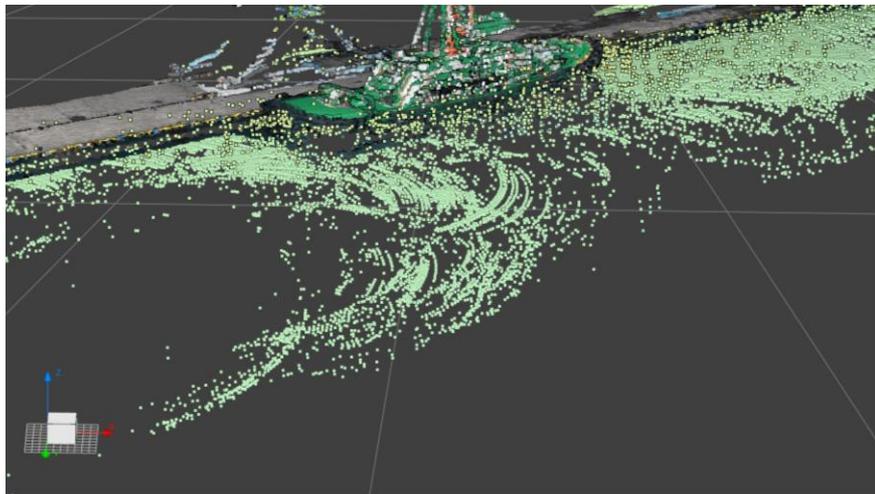
(a) 富士見ふ頭全景



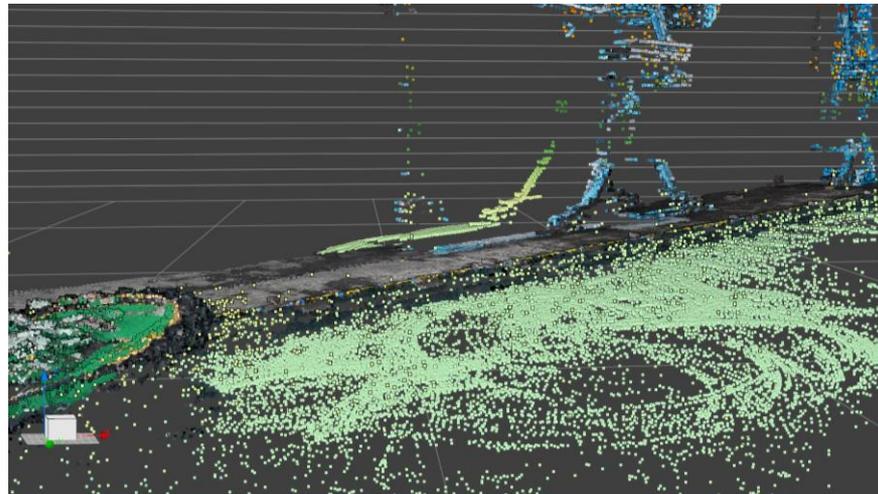
(b) ふ頭下の水中構造物

■ 計測結果

- ✓ ドローン飛行の制約により、**高度70m**程度から計測（通常の計測時もこの程度の高度から計測）
- ✓ **水質**によりデータ取得に影響があり、**水面を計測**していると思われる（目視では、透明度は高い）



(a) 富士見ふ頭全景



(b) 拡大表示

図3-12. グリーンレーザ計測結果

- 潮流計設置 (2023/12/13)
 - ✓ 事前に海保、県清水港管理局に潜水作業申請
 - ✓ ラダーを組み立て、潮流計を取り付け
 - ✓ 水深 5m に潮流計設置
- 潮流計測 (2023/12/14-20 : 7日間)
 - ✓ 10分毎に水深 5m の潮流(速度、方向)を計測
 - ✓ ふ頭設置の潮流計から、沖合方向に5mごとに12箇所的位置を計測
 - ✓ 計測データはWEB経由でリアルタイムに表示可
- 潮流計撤去 (2023/12/21)

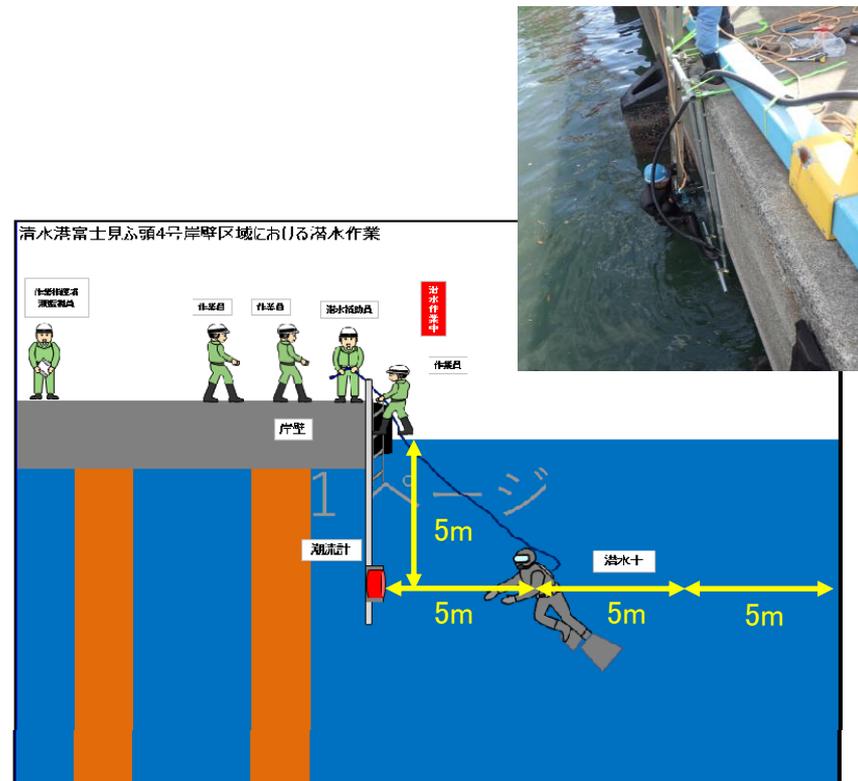
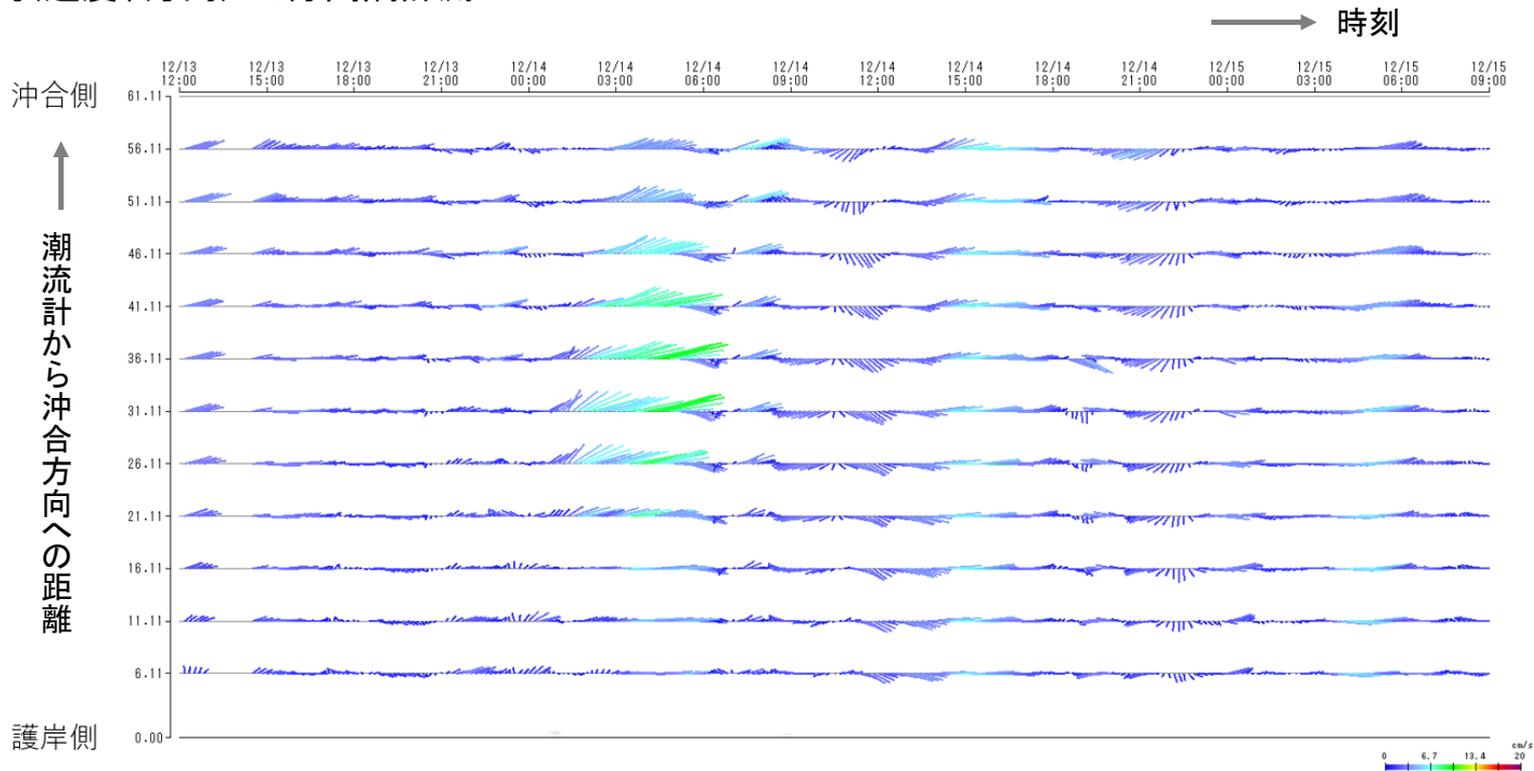


図3-13. 潮流計設置作業 (右上：潜水作業の様子)

■ 潮流(速度、方向) 10分間隔計測



■ 港湾設備の計測対象および成果物

計測対象	計測方法			計測結果	プラットフォーム
	センサ	設置個所	成果物		
ふ頭、港湾設備	カメラ	船舶	3D マップ	良好	独自ツール (ArcGIS連携可)
		ドローン	SfM	良好	ArcGIS表示済
	フュージョンセンサ (カメラ・LiDAR 一体型)	船舶	点群データ (3D モデル)	良好	ArcGIS表示済
水中構造物	水陸一体型3Dスキャナ	船舶	点群データ (3D モデル)	良好	ArcGIS表示済
	グリーンレーザ	ドローン	点群データ (3D モデル)	水質影響あり	ArcGIS連携可 (LASデータインポート)
潮流	ソナー	ふ頭岸壁	潮流 (速度、方向)	良好	独自ツール

Thank you

