

河川砂防技術研究開発【成果概要】

		氏 名 (ふりがな)		所 属		役 職	
①研究代表者		おかべ たくみ		豊橋技術科学大学		客員准教授	
		岡辺 拓巳		三重大学		准教授	
②技術研究 開発テーマ	名称	多様な計測情報をベイズ推定で融合する広域海底地形モニタリング技術の開発					
③研究経費 (単位: 万円)		平成 3 0 年度	平成 3 1 年度	令和 2 年度	総 合 計		
※端数切り捨て。		499万円	1,499 万円	1,472 万円	3,470 万円		
④研究者氏名		(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
		氏 名		所属機関・役職 (※令和 年3月31日現在)			
		武若 聡		筑波大学・教授			
		下園武範		東京大学・准教授			
		鈴木高行		不二総合コンサルタント株式会社・測量調査担当取締役			
		松野英昭		不二総合コンサルタント株式会社・測量調査部測量課マネージャー			
⑤研究の目的・目標 (様式海岸-1、海岸-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)							
【目的】 多様な水深データを融合する広域海底地形生成手法を構築し、年間を通じた機動的な海岸管理行政に貢献する。 【目標】 様々な方法、精度 (高～中)、コスト (中～低) で取得される水深データをベイズ推定で融合し、精度保証した広域・高頻度の海底地形情報として海岸管理者に提供する手法の開発。 本研究開発では、測量精度や計測面積が異なる5つの計測手法を用いて海底地形データを取得する。(1)漁船ビッグデータ：操業中の水深や漁船位置を収集・分析し、数km～数十kmの沖合の海底地形を高頻度にモニタリングする。(2)Xバンドレーダー：取得される位相画像から分散関係式を用いて水深2m以深を沿岸方向数kmにわたって推定する。汀線も精度良く把握できる。(3)UAV：撮影した海面の映像を分析し、と分散関係式を用いて百mオーダー四方の浅海域の水深を推定する。(4)衛星画像：衛星画像の可視バンド情報(放射輝度)と実測した水深の関係を使用し、数十kmの浅海域の海底地形を推定する。(5)自律航行RCボート：RTK-GNSSと音響測深機器(シングルビーム)により、高精度な測深データを取得する。 (1)～(4)で取得した水深を(5)の測量結果と過年度の深浅測量データと比較し、誤差の頻度分布など水深方向の計測誤差に係る特徴・情報を明らかにする。このFSでは、(1)～(5)はそれぞれの手法の機動性を活かして、短期間に同期的に実施し、地形変化が少ないことを確認した上で、海底地形情報を生成した。 様々な精度とカバレッジの地形情報をベイズ推定により融合する点が、本手法の鍵である。(1)のデータに対して、取得した水深の時系列に粒子フィルタを適用することで、時間的に補間された水深情報を生成するプログラムを構築する。地形情報の融合においては、(1)～(4)地形情報を、それぞれの計測手法が持つ誤差を考慮するベイズ推定(共役事前分布)によって融合し、水深方向の精度が向上した広域の海底地形を得る(図a)。							
図a ベイズ推定による水深情報の融合							

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

駿河海岸のうち、大井川河口を中心とする沿岸方向に約 10 km の範囲を対象とし、主に台風シーズンに生じる地形変化とターゲットに同期した計測を実施した。また、X バンドレーダは固定設置による連続観測で、多様な波浪場でのデータを取得し、手法の適用限界を検討した。1～6 に本研究で用いた地形計測の結果を、7 にはそれらをベイズ推定によって融合する手法と結果(海底地形)を、8 には本手法の実装に向けた課題を示す。

1. 自律航行型リモコンボートによる深浅測量

手法の概要：RTK-GNSS と音響測深機を搭載した自律航行型の無人リモコンボートを使用し、深浅測量レベルの海底地形データを取得した。

観測：2021 年 9 月～2021 年 12 月にかけて計 4 回の観測を実施した。観測は波浪の少ない条件で行い、NO.49～NO.57 の 9 測線を測量した。海岸線から約 400～500 m 沖合まで観測し、測深位置及び標高(T.P.標高)をネットワーク型 RTK-GNSS 測量機(VRS)を使ってリアルタイムにデータ解析を行い、1 秒間隔のデータを取得した。取得したデータから横断面図を作成した。

測量結果：図 1-1 は河口全面で得た海底の水深分布(2020 年 10 月)である。同年 7 月に生じた洪水後であり、昨年度の測量結果と比較して河口テラスへの土砂体積を確認した。この測量成果を他の計測データの精度評価用の基準値として用いた。

2. 自漁船ビッグデータを用いた沖合海底地形の生成手法

手法の概要：沿岸域を操業する漁船に搭載されている魚群探知機と GNSS から、航行中の水深と位置を収集・解析することで、広域の浅海域地形データを生成する。

データ収集と補正：吉田漁港を母港とするシラス漁船 7 隻に過年度から搭載されているデータロガーへ、2020 年 3～2021 年 1 月の漁期中の水深と位置情報を記録した。本年度は、御前崎港(吉田より 20 km 南)の 11 隻からもデータを収集した。水深データは、清水港、焼津漁港と御前崎港の観測潮位を、船の位置・時刻を勘案した潮位で補正し、魚探の振動子と海面までのオフセット距離も補正した。この 3 次元点群データから平面格子 10 m の海底地形を算出した。台風による波浪などを考慮し、5 期(各約 1 ヶ月間)の時間平均的な地形図を作成した。

海底地形データと精度：図 2-1 は 2020 年 7～8 月にかけて記録された漁船の航跡である。赤色は吉田漁港からの出漁、青色は御前崎港からのものを示している。浅海域を沿岸に沿って約 40 km にわたり航行しており、この手法で広範囲の海底地形モニタリングが可能であることを示している。

図 2-2 はこの情報による海底地形図(2020 年 9 月)である。浅い水深は 4 m 程度であり、大井川河口のテラス形状・先端が把握できる。水深 10 m あるいは 30 m より深場では、魚探の多重反射や気泡に起因するエラー値が多く見られた。これら地形データを RC ボートによる測深値と比較したところ、平均誤差 μ が約 -0.1～-0.4 m と深めに計測され、標準偏差 σ が約 0.2～0.4 m であることがわかった。

3. X バンドレーダ観測による水深分布と汀線位置の推定

手法の概要：X バンドレーダはマイクロ波を送信し、その反射(エコー)を取得する能動的リモートセンシング手法である。大井川河口右岸の護岸上より観測を行い、エコー画像を収集する。これより、

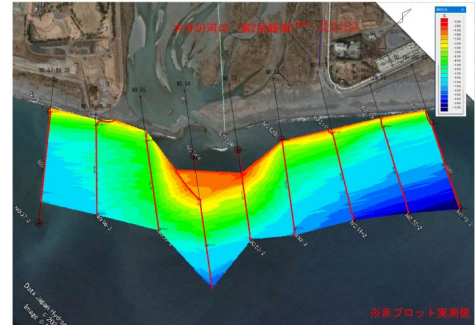


図 1-1 RC ボート深浅測量による海底地形

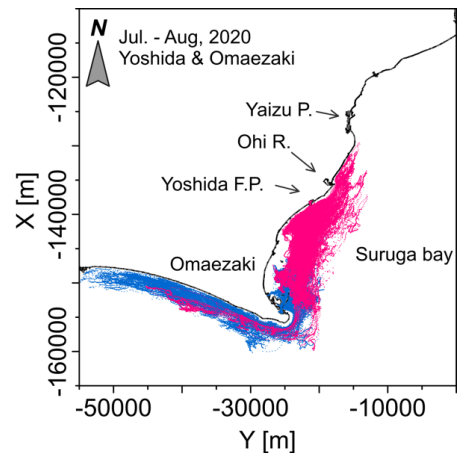


図 2-1 漁船の航跡(2020 年 7～8 月)

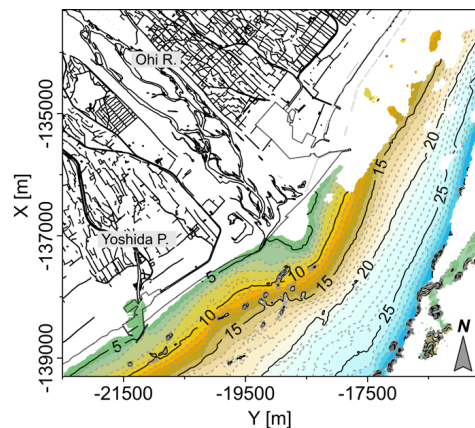


図 2-2 漁船データから算出した海底地形図

表面波の波長・周期の抽出と分散関係式を介した水深推定を行う。本年度はレーダ設備を海岸に固定設置し、多様な波浪環境下で連続観測することで、手法の限界や連続した地形・汀線モニタリングの可能性を検討した。

調査とその結果：2020年10月から2021年1月の間、Xバンドレーダを大井川河口右岸に常設設置して観測を行った。観測期間中、大井川の水位は上昇せず、顕著な出水はなかった。写真3-1にレーダの設置状況を示す。図3-1に2020年10月7日に観測された高波浪時のエコー画像を示す。大井川河口、川尻海岸に波がほぼ直角入射している状況が捉えられている。また、吉田漁港の防波堤より、反射波が発生している様子もうかがえる。



写真3-1 Xバンドレーダと観測建屋

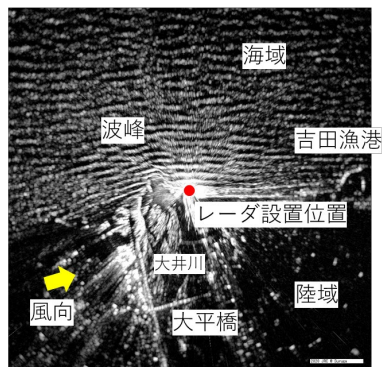


図3-1 レーダ画像 (2020年10月7日 18時, 御前崎 H: 約3m, T: 約11s)

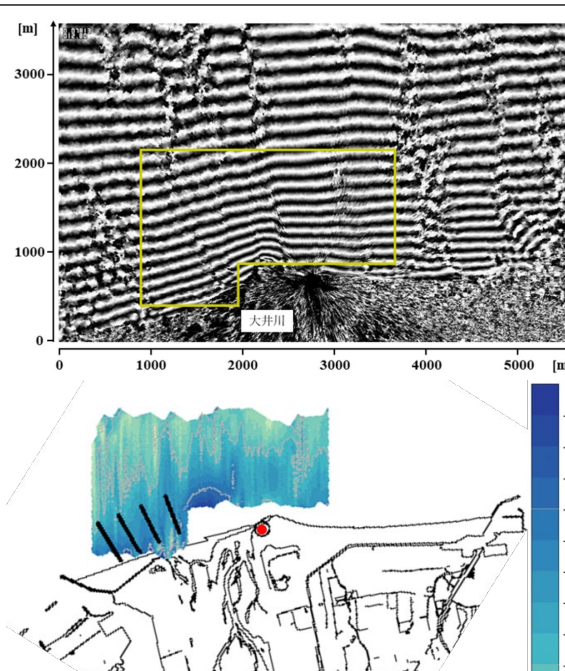


図3-2 位相画像と水深推定結果
2020年10月7日18時

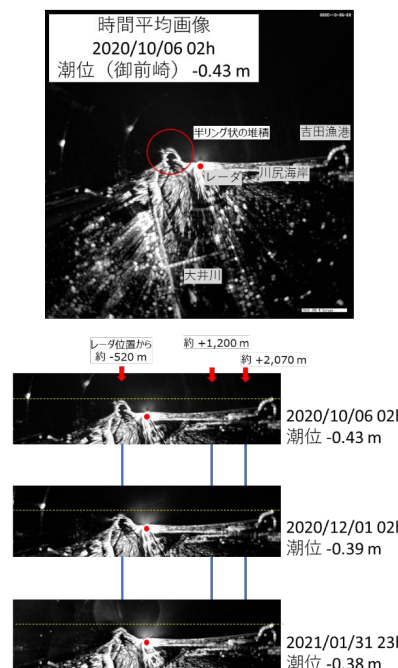


図3-3 時間平均画像

10月初旬に御前崎 NOWPHAS で有義波高3m超、有義周期10s超の高波浪を記録した後、観測期間中にこれに匹敵する波浪状況にはならなかった。12月末、1月末には御前崎 NOWPHAS で有義波高2m程度、有義周期10s程度の波浪が観測された。本研究では、これらの3時期を対象に水深分布推定を行った。なお、他の時間帯の観測記録についても、解析可能な波浪パターンが映っているかを目視で確認したが、波峰の連なりが明瞭に認められる観測結果はなかった。図3-2に10月7日の位相画像(上)、水深分布推定結果(下)を示す。位相画像内の黄色の枠が水深推定を行った範囲である。水深推定結果には、河口付近の半円状の浅い領域の形成が捉えられている。

エコー画像を時間平均した時間平均画像を作成すると、水際と陸域の境目を知ることができる。2020年10月から2021年1月までに取得された大井川河口周辺の時間平均画像を作成し、水際位置(汀線位置)の変化を読み取った。図3-3の上に時間平均画像の説明を、下に2020年10月6日、12月1日、2021年1月31日の潮位(御前崎)がほぼ等しい時間帯に作成された時間平均画像を示す。高輝度部分に陸域がある。レーダ位置から吉田漁港にかけての水際位置、吉田漁港の防波堤、河口、河道内の砂州等を判読で

きる。10月の画像には、河口を囲むように半リング状の堆積が見られる。これは、この年の7月の出水により運ばれた土砂が堆積したものと考えられる。この半リング状の堆積位置は1月末には河口側に後退している。10月中旬以降は河川出水の影響はなかったと考えられるので、

この後退は波の作用によるものと考えられる。

4. UAV による海岸水深推定

手法の概要 : UAV (unmanned aerial vehicle) により撮影した海面動画から波浪情報 (波速および周期) を抽出し、分散関係式によって水深を推定する手法を開発する。平成 30 年度に開発した平行等深線海岸を前提とした推定手法を、二次元性の強い河口周辺の波浪場に適用できるように拡張している。X バンドレーダの固定設置設備に 4K 定点カメラを設置し、海面の映像を連続的に取得して UAV 手法の適用限界に関する情報整理も実施した。

調査とその結果 : UAV を用いた海底地形推定手法の適用可能条件を明らかにするため、大井川河口域を対象領域として様々な条件で海面動画を取得した。撮影は 2021 年 10 月～2020 年 12 月にかけて計 4 回実施し、毎回の観測では、UAV (DJI, Phantom 4-RTK) により河口両岸から対象領域の撮影を行うとともに、動画の補正・変換のために地上標定点を設けて RTK-GPS 測量を実施した。対象領域は沿岸方向 1,500 m、岸沖方向 700 m の河口前面に設けた矩形領域である。河口前面には河口砂州が発達しており、領域内の海底地形は沿岸方向に一樣でない。過年度に実施した観測と同様に、UAV は上空 100 ～150m で静止させて、5-10 分程度の間、対象領域の海面を撮影した。図 4-1 には水平面に投影した撮影映像のフレームと、これまでに開発した手法によりうねり伝播速度から推定した水深分布を示している。開発した水深推定手法では、うねりの伝播が明瞭に映像上で捉えられる場合に、広範囲かつ高精度の水深推定を行うことができる。この例では、うねり波高が小さく推定水深が得られるのは比較的水深の小さい領域に限られている。過年度に水深推定を行ったケースと合わせて海象条件との関係を分析した結果、有義周期が重要な指標となることが示唆された。

限られた回数の UAV による観測では、気象・海象条件と手法適用性の関係を明らかにすることは難しいため、固定カメラによる連続観測を並行して実施した。カメラは、大井川河口右岸側に X バンドレーダ設置のための設けられたプレハブ上に設置した。カメラは標高 10.1 m の高さに設置し、広角 (水平画角 105°) で河口周辺の海面を撮影した。撮影に用いたカメラはアルコム社製の屋外用バレット型 IP カメラ (4K, 3840×2160 画素) であり、LAN ケーブル接続によってプレハブ内の PC に撮影した動画を自動的に保存するようにシステムを構築した。撮影期間は 10 月 6 日から 12 月 30 日に設定し、毎日 7 時から 19 時の毎正時から 10 分間の動画撮影を行った。これによって期間中に計 1,115 本の動画を取得した。カメラに近い No. 55 測線を対象として、毎正時に得られた 10 分間の各動画に対

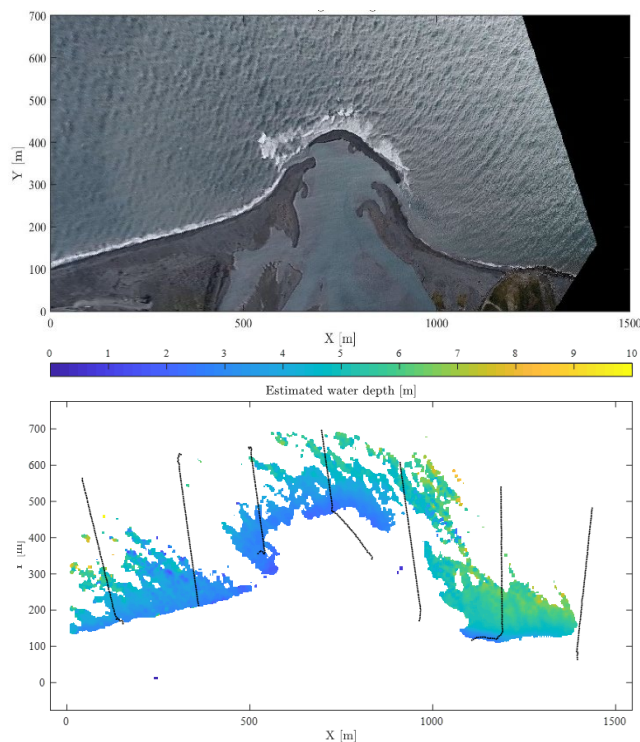


図 4-1 大井川河口の撮影映像 (射影変換後、上) と水深推定 (下) の例 (2021 年 10 月 16 日撮影)

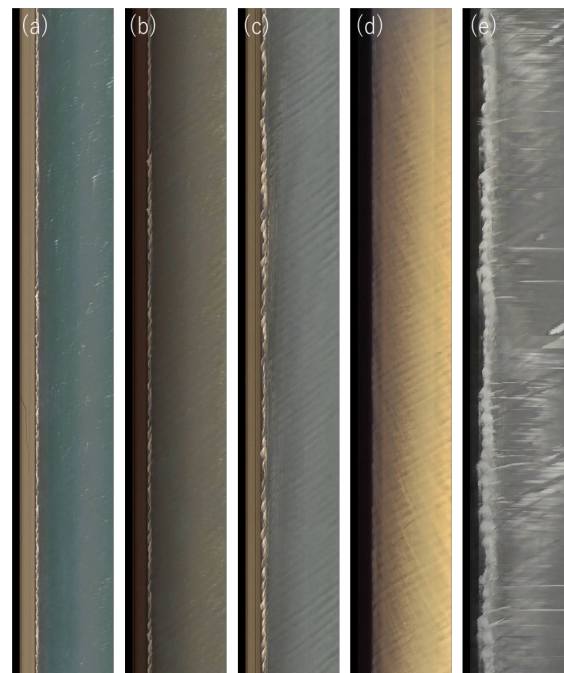


図 4-2 固定カメラによる No.55 測線上のタイムスタック画像の例

して射影変換を行った上で測線上の輝度変動を時間方向に並べたタイムスタック画像を作成した(図 4-2). 各タイムスタック画像からうねり周波数帯の海面輝度の空間相関値を評価し、御前崎観測所の波浪観測データや各種気象データとの関係解析を行った。固定カメラによる検討を通して、うねりによる水深推定は、有義周期が 6s より大きく、風速が 5 m/s 以下の晴天時が好ましいこと明らかになった。この適用条件をもとに、気象・海象データから対象海岸での手法適用性を事前検討することができる。

5. 衛星画像を用いた浅海域の水深推定

手法の概要：衛星画像(可視)の放射輝度と一部の測量水深の同地点での関係式を用いて、画像全体の水深を推定する satellite derived bathymetry (SDB) 手法を用いる。

SDB 手法による水深推定：2020 年 10 月 29 日に Landsat 8 で撮影された画像(30m 格子)を用いる。これに sun glint 補正を行い、緑と青のバンドの放射輝度の対数比と、RC ボートで計測(10 月)した水深を同じ地点で比較して回帰分析をする。領域内で適宜データを棄却し、相関の良い領域をターゲットとする。得られた関係を用いて、画像内の浅海域の水深の空間分布を、放射輝度から算出した。

推定結果と精度：大井川河口全面では、河川水の影響が、また砕波帯近傍では浮遊砂等の濁りで推定結果の精度は高くなかった。中でも焼津(北)側の沿岸から沖合にかけて現実にはない 10 m より浅い水深が広がっており、地形としての精度は劣っていた。算出した海底地形図(図 5-1)を RC ボートの測量成果と比較したところ、誤差は、 $\mu=0.06\text{ m}$, $\sigma=2.52\text{ m}$ であった。

6. 粒子フィルタを用いた海底地形情報の生成

手法の概要：収集された漁船データ群から、ある平面の 1 点の水深の時系列を誤差情報とともに抽出し、これに粒子フィルタを適用することで、時間的な内挿や水深値の変動のフィルタリングを行う。システムノイズと観測ノイズが正規分布に従うローカルレベルモデルとして解析した。

結果：地形データの時間ウィンドウは 2 週間とし、ある 1 つの地点において、半径 20 m の範囲に 2 週間蓄積されたデータから 1 つの水深(観測値)を算出した。その際、蓄積されていたデータの個数(密度)より誤差情報も求め、観測値および観測誤差を得た。2020 年 7~12 月にかけて、12 セットの地形データを構築した。過年度に取得した漁船ビッグデータも加え、時間フィルタリングを実施し、時空間内挿された地形の時系列を算出した。図 6-1 に 2020 年 11 月上旬~下旬の水深変化の空間分布図を示す。漁船の航行がなかった領域もデータの差分を取得できているが、水深 10~15 m において漁船ビッグデータのエラーが残っていることがわかる。状態空間モデルの選択に課題を残したが、モデルの複雑さとフィルタの結果のバランスを検討していきたい。

7. ベイズ推定を用いた海底地形情報の融合

手法の概要：上述した手法で取得した海底地形情報を、その誤差情報を用いて共役事前分布によって水深を更新する。これにより、異なった手法で得た水深が空間的に重なる場所では、それら個々の精度よりも向上した水深を得ることができる。

水深情報の更新：いずれの手法も、誤差は正規分布とみなすことができたため、これらを更新して算出される水深が有する誤差も正規分布とする。各々の手法で得られた水深 h と誤差の分散 σ^2 より、更新された水深 h' と分散 σ'^2 の事後分布が求まる。なお、各手法の平均誤差 μ は、計算の際に h に加えて除去した。

計算結果と精度：図 7-1 に算出した海底地形図を、図 7-2 にある側線の岸沖断面を示す。図 7-1 より、SDB によって広域なエリアをカバーしているが、水深 30 m より沖側に浅い領域が広がるなど、単独

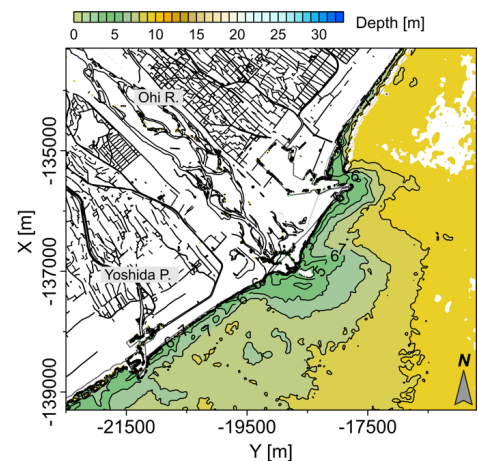


図 5-1 SDB 手法による水深分布

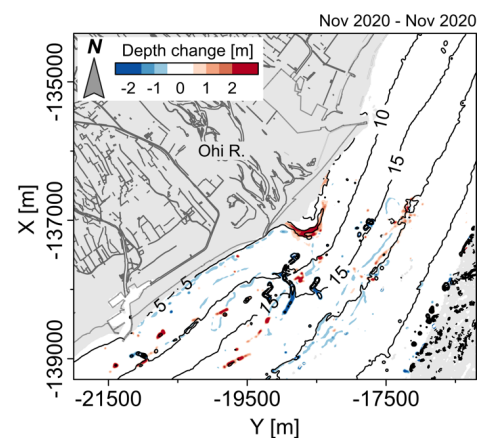


図 6-1 粒子フィルタによる水深分布から得た地形変化(2020 年 11 月上旬~下旬)

の水深データしかないエリアでは個々の計測データの質が重要になる。河口前面では複数のデータが融合されており、ここでは精度の改善が見られた。図 7-2 は各計測手法のデータが融合することで（赤色実線）RC ボート（灰色実線）に近づいていることを示している。灰色のハッチは融合結果の精度であり、この範囲に RC ボートの成果が入っていれば良い成果と言える。ただし、各種法において精度の悪化する汀線近傍の水深は実データと大きく異なっており、個々の計測手法の精度向上も図っていく必要がある。

8. 本提案の社会実装と今後の課題

マニュアルの作成：本手法を実務で活用してもらうために、ベイズ推定を用いた水深データの融合や、UAV、X バンドレーダ、漁船ビッグデータによる海底地形モニタリング手法の導入を解説したマニュアルを作成した。5 章、全 57 ページで構成されており、学術的な報告では記載され辛い詳細な点も含まれている。このマニュアルは適宜改訂していく予定であり、新しい手法や改善点なども追記していく。

社会実装へ向けた動き：漁船ビッグデータによるモニタリング手法は、静岡県での本格的な導入に向けた議論を行っている。海岸管理者である県自身の予算措置でデータロガーを漁船に設置する動きを拡大すべく、漁業者との連携体制も構築中である。またこのデータに融合すべく、X バンドレーダ（静岡県天竜川河口に既設）によるデータ取得や海岸監視カメラとの併用・データ融合の可能性も模索中である。特に天竜川河口では浜松河川国道事務所と議論を開始する予定であり、国・県・漁業者・大学の連携で河口域の地形モニタリングを実現できる可能性が高まっている。

課題：ベイズ推定によるデータ融合手法では、融合後の海底地形から求める、地形変化量の取り扱いについて検討する必要がある。本手法では、時空間的に誤差分布が均一でないため、単なる差分ではなく、伝播した誤差情報を活用した地形変化量の取り扱いを考えなければならない。総合的土砂管理では土砂のフラックスを推定することが求められるため、汀線から海側へ連続した海底地形をモニタリング、あるいはデータ生成できるような手法の融合・構築が必要であり、精度の劣るデータの活用方法を実務者と議論を継続する必要がある。誤差情報が明確であれば、データ同化といった数値シミュレーションでの活用が期待でき、こういった技術を管理者が用意に実行できるようなソフトウェアの開発にも取り組む必要がある。

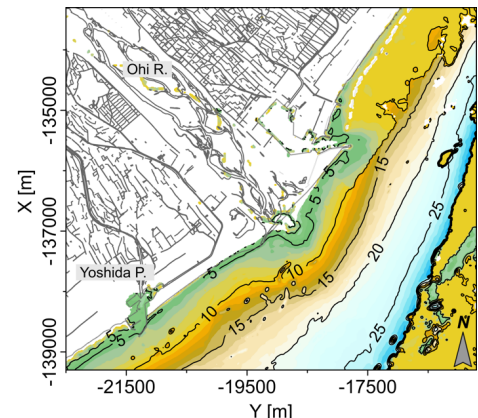


図 7-1 ベイズ推定による水深データの融合結果（2020 年 10 月）

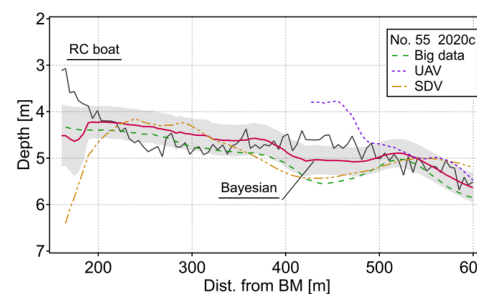


図 7-2 ベイズ推定による水深データの融合結果（岸沖断面）

【「一般研究」の場合記載】

【「FS研究（新規課題）」の場合記載】 【非公表】

⑧研究成果の発表状況・予定

（本研究の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。）（以下記入例）

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書（教科書、学会抄録、講演要旨は除く）
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文（掲載が決定しているものに限る）
- ・研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等

以下の論文にて成果を公表した。

・岡辺拓巳・下園武範・武若 聡・増田隆宏・松野英昭・鈴木高行・松尾幸二郎：ベイズ推定を用いた海底地形データの融合手法に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学）76巻2号 pp.I_1345-I_1350, 2020.

・Hashimoto K, Shimozono T, Matsuba Y, Okabe T.: Unmanned Aerial Vehicle Depth Inversion to Monitor River-Mouth Bar Dynamics, *remote sensing* 13, No.3: 412, doi:10.3390/rs13030412, 2021.

その他，以下の学会誌・学会にて成果を発表予定である。

・橋口喬太・岡辺拓巳・武若 聡：オープン衛星画像と漁船ビッグデータによる浅羽海岸の海岸地形モニタリング，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 77, No. 2（投稿予定）

・橋本佳奈・下園武範・松葉義直・岡辺拓巳：UAVを用いた河口地形変化把握のための水深推定手法の構築，海岸工学講演会，2021（学会発表予定）

【「一般研究」の場合記載】

⑨研究成果の社会への情報発信

（ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。）

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑩表彰、受賞歴

（単なる成果発表は⑧⑨に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。）

なし

【「一般研究」の場合記載】

⑪研究の今後の課題・展望等

（研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。）

漁船ビッグデータによるモニタリング手法では、漁業者へのデータフィードバックによるモニタリングへのモチベーションに繋げる取り組みが必要である。シラス漁には水温が重要な要素であることから、地形（水深）以外にも水温を同時に取得し、適切なマッピングデータを提供できるような仕組みづくりに取り組みたい。このような土木と異なる分野との連携は各政策の立案や実行の際に重要であり、日常的な協働の枠組みを構築していくことが必要である。データサイエンスの観点では、時空間的に異なる精度の水深データを内挿する技術（本研究での粒子フィルタ）の向上が課題であり、これを達成できると沿岸域の地形データの時空間密度が飛躍的に向上すると考えられる。

UAVによる水深手法については、映像から水深推定までの一連の処理を自動化（ソフトウェア化）することが現場への適用に向けた課題である。また、UAVのRTK-GPS機能を活用し

た自動飛行・撮影など、現場作業を省力化するための技術開発も同時に求められる。

【「一般研究」の場合記載】

⑫研究成果の海岸行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、海岸政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

漁船ビッグデータ、Xバンドレーダ、オープン衛星画像、UAV・監視カメラデータを組み合わせて、以下のモニタリングを具体的に検討中である。管理者となる浜松河川国道事務所、静岡県浜松土木事務所と議論を重ねた上で、本研究成果を海岸管理や河川整備計画などへの反映したい。

- ・対象：天竜川河口、福田漁港等
- ・内容：汀線-海底地形変化の推移モニタリング、漂砂ベクトルの推定、公共測量との位置付（代替、併用）

漁船ビッグデータについては、静岡県と共同して海岸モニタリングへの適用に取り組んでおり、県が管理する遠州灘～駿河湾の広域な海岸をカバーする漁船データ記録システムを構築していく。その中で、UAVや海岸監視カメラの映像データ分析も用いたデータ融合を模索する。また、得られた情報（水温の空間分布）を漁業者へフィードバックすべく、静岡県水産技術研究所とも協力してデータ処理・マッピング技術の開発や漁業者とのデータ利用に係るルール設定に取り組んでいく。

UAVによる水深手法については、安価かつ機動的に海岸の水深概況を把握することができる。精度は良好な条件で0.5 m程度であり、台風等のイベントや、海岸保全事業の実施前後の地形モニタリング等への適用が期待される。

融合後の地形データについては、誤差を有するデータをどのように実務で活用するかを模索しなければならない。精度を気にしない従来型の深浅測量成果では、時間差分を算出することで地形変化を把握できたが、時空間的に異なる誤差を有する地形を差分しただけでは、水深の変化を見出すことが困難である。例えば、データ同化といった誤差情報も有効に活用できるような分析手法によって海岸管理に有用な情報（土砂のフラックス）を得るなど、実務面で新たな分析技術の導入などを議論していくことが肝要である。