

(一財) 日本建設情報総合センター研究助成事業
海岸の順応的管理に向けたハイブリッド地形データの活用に関する研究
研究報告書

令和5年10月

研究者紹介

おかべ たくみ

岡辺 拓巳

現職：三重大学大学院生物資源学研究科 准教授（博士（工学））

共同研究者紹介

たけわか さとし

武若 聡

現職：筑波大学システム情報系 教授（工学博士）

目次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
2. 漁船ビッグデータによる海底地形の生成	4
2.1 漁船ビッグデータによる海底地形データの生成手法	4
2.2 リアルタイム型データロガーの試作	10
3. 衛星オープンデータによる汀線抽出	15
3.1 衛星データの入手	15
3.2 汀線の抽出	17
3.3 抽出した汀線データの検証	19
4. ハイブリッド地形データの生成手法の開発	24
4.1 地形データの合成手法の検討	24
4.2 ハイブリッド地形データの生成	25
4.3 ハイブリッド地形データの確からしさ	31
5. 海岸管理事業へのハイブリッド地形データの適用	36
5.1 土砂収支の算出	36
5.2 ハイブリッド地形データの活用に向けた検討	38
6. おわりに	41

謝辞

参考文献

1. はじめに

1.1 研究の背景

世界各地で進行する海岸侵食は、エネルギー・治水のためのダム建設など人為的な漂砂系へのインパクトで生じており、根本的な解決が極めて困難な環境問題である。今後の温暖化による海面上昇も加わることで、沿岸・河口域を中心とした国土消失が加速的に拡大することが予想されており、各国が侵食対策に奔走している。また、砂浜海岸は多くの動植物が生息し、海岸砂丘から沿岸域に至るまで豊かな生態系が構成されていることから、砂浜環境の消失はそれら動植物の生息場所の消失と等しく、沿岸域環境を保全する上で侵食への対策は不可欠である。

これら海岸侵食のほとんどは人為的な影響による漂砂バランスの崩壊で生じる。世界的にもダム建設などによる河川から海岸への土砂供給遮断が海岸侵食の要因として指摘されている。また、外洋に面した海岸へ流入する河口では、砂州の発達を原因とした河口閉塞による水害防止や、漁船などの航路の安全確保のための導流堤の建設のほか、航路埋没の防止や港湾内の静穏化のため港湾における防波堤の建設によって沿岸漂砂が阻止されることで漂砂の下手側で海岸侵食が進行する。

海岸侵食への対応は、主に海岸構造物による対策や砂の供給（養浜）、セットバックの3つの手法が用いられる。いずれの手法も海岸侵食の要因を根本から改善するものではないため、長期的な対応が継続して求められる。海岸侵食の原因に立ち返れば、山から川へ、川から海へと一連の土砂移動を取り戻すことが根本的な問題解決方法である。構造物を用いた海岸侵食対策は、土砂を「局所的」に「ストック」して防護を図る手法である。他方、総合的な土砂管理とは、漂砂系におけるそれぞれの管理者の連携を図り、「広域」に土砂の「フロー」を管理する手法である。これは単なる海岸侵食対策ではなく、山・河川・海岸の全体における土砂の問題に対して最適化を目指す取り組みである。

海岸管理は転換期を迎えているが、総合的な土砂管理の実現に向けてクリアすべき課題は多い。山や川といった漂砂の上手側で確保した土砂の流れが、海岸を回復させるためには数十年という時間が必要であるが、局所的には緊急度の高い侵食対策が求められる場合もある。また、地方自治体が行政区域を越えた事業を起こすことは難しく、管理すべき広域の漂砂系の中で個々の管理区域内での対策に終始してしまう。これら土砂管理の際の時間・空間スケールのギャップを埋める方法は、総合的な土砂管理を運用するうえで重要な課題である。加えて、水産業など、関係者との合意形成も不可欠である。更に、ダムからの排砂による下流への生態環境を含めた影響評価や漂砂量そのものの計測手法の確立、広域地形の継続的なモニタリング、順応的な土砂管理技術など、発展させなければならない技術は多い。特に土砂管理を長期にわた

り継続するため、海岸の土砂管理・計測の PDCA をより効果的かつ効率的に実施するための技術革新は必須である。

海と陸が接続する浅海域は海洋政策においても重要な役割を持つ。陸海のシームレスな地理・地形情報は、防災力強化や新たな産業創出に不可欠である。国はデータが不足している海域の地理基盤情報整備に注力する方針である。国土管理において地形データは基盤情報として必須であるが、近年では、様々な分野で活用するための、オープンデータとしての期待が高まっている。例えば、津波シミュレーションや環境保全分野での利用など、地理空間情報を高度に活用した G 空間社会に向けた取り組みが始まっている。陸域では、レーザー測量技術が衛星や航空機に搭載され高密度な地形情報を生成している。ドローンによる 3D 計測も社会実装段階であり、技術発展が地理情報の大量生成を後押ししている。一方で、水中、特に浅い海域では地形データが不足しており、砂浜が消失する海岸侵食問題への対策において海底地形データの充実が課題となっている。海域では海底資源や地震調査など、深海での情報収集が盛んである。これらは音響技術の発達に依っている。しかし、海と陸が接続する浅海域では、波によって地形が頻繁に大きく変わるため、高頻度かつ継続的な地形データの更新が必要であり、新技術である航空グリーンレーザー測量も含め、水中の測量には高いコストが伴うことから、従来型の測量技術にとらわれない、水深 20 m 以浅の地形を効率よく低コストでモニタリングするための新たな発想の技術を構築する必要がある。

1.2 研究の目的

様々な海底地形の調査技術の研究が展開されているが、本研究では漁船の操業中に取得するビッグデータから浅海域の地形図を生成する技術に加え、衛星画像のオープンデータから汀線（海の水際線）を抽出する技術の 2 つの手法を用いる。これらは、それぞれ精度は劣るものの、低コストに広域（数十 km オーダー）の海岸の地形情報を高頻度（2 ヶ月に 1 回以上）に取得できる技術である。この技術を静岡県太平洋側に位置する浅羽海岸（磐田市から袋井市の沿岸方向に 8 km 以上）を対象として展開し、各技術のアウトプットを融合することで、両者のデメリット（漁船が通らない浅い水深データが取得できない、水中の水深が取得できない）を補い、海岸の管理事業に適用できるレベルのハイブリッド地形データを生成する（図 1-1）。これにより、海岸の土砂移動量を把握することができ、海岸管理事業を順応的に進めることが可能となる。管理における活用（土砂量の計算やその妥当性）や、高精度ではない地形データのユースシナリオを検討し、維持管理の高度化への貢献を目指す。

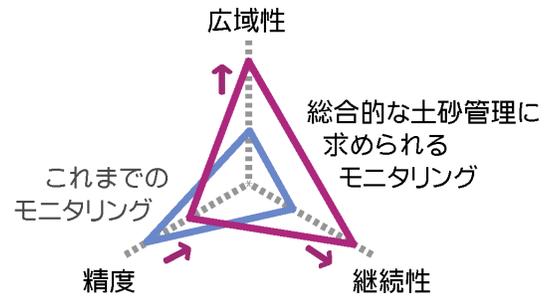


図 1-1 総合的な土砂管理に求められるモニタリング手法の特徴

2. 漁船ビッグデータによる海底地形の生成

本章では、静岡県遠州灘の浅羽海岸に位置する福田漁港および舞阪漁港を母港とするシラス漁船（10 トン未満）より、操業中の位置・水深・時刻を記録し、収集する。これを分析することで、水深およそ 4 m より深い海底の地形データを生成することが可能となる。既にロガーなどのシステムは 22 隻に設置しており、IT 活用型の漁船ビッグデータを生成している。現在はロガー内のメモリに魚群探知機などの機器から外部出力されたデータが記録されているが、新たに、無線通信（LTE）による ICT ロガーの試作機を作成し、データが 1 回/日オンライン収集できるかを確認する。新システムが構築できれば、ICT によるリアルタイムの漁船データ収集が可能となり、海岸管理事業の即応性が格段に高まる。

2.1 漁船ビッグデータによる海底地形の生成手法

漁船に搭載されている海洋電子機器に多くは、NMEA0183 の標準規格に基づいて様々なデータを外部へ出力できるものが多数ある。したがって、このデータセンテンスを記録することができるロガーを機器に接続すれば、漁船が航行・操業中の水深や位置情報などのデータを収集することができる。中でも土砂移動の活発な浅海域を高頻度で操業するシラス漁船は、土砂管理にとって重要な水深帯の地形データを収集するのに最も適している。本研究では、シラス漁船に既設の魚群探知機やプロッタから水深・位置および時刻データをデータロガーに記録し、回収後にデータ処理することにより海底地形データを作成するものである¹⁾。

(1) データ取得

データ収集は、2007 年より浜名漁業協同組合に所属するシラス漁船（舞阪漁港および新居より出漁）の協力を得て、データ収集を実施している。また、2012 年より遠州漁業協同組合（以下、遠州漁協）に所属するシラス漁船および遊漁船（図 2-1、福田漁港より出漁）の協力を得て、同型のデータロガー（図 2-2）を設置して継続的にデータを取得している。

データは 1~3 秒間隔で取得しており、魚群探知機による水深、GNSS プロッタあるいは GNSS アンテナから取得する位置およびタイムスタンプをデータロガー内で同期し、同機器内の CF カードに記録する。これを定期的に回収することで、タイムスタンプ付きの 3-D 地形データを取得する。この時点の水深データはいくつかの補正・修正が必要であるため、回収したデータをそのまま海底地形データとして取り扱うことはできない。



図 2-1 福田漁港に停泊しているシラス漁船

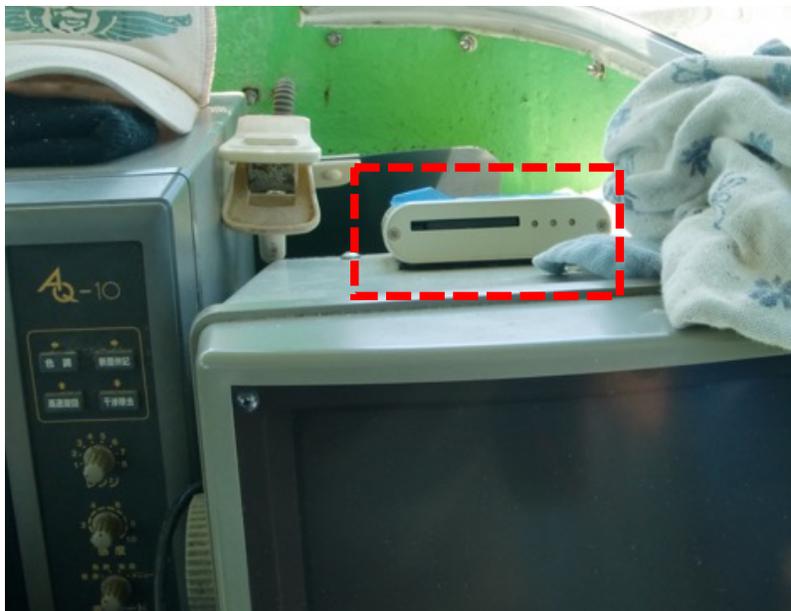


図 2-2 魚群探知機に接続されたデータロガー（赤点線で囲まれたもの）

(2) データの補正

シラス漁船および遊漁船の作業中に得られる位置（緯度および経度）・水深（魚群探知機による測深値）に対して様々な処理を行うことで、より正確な地形データを生成する。

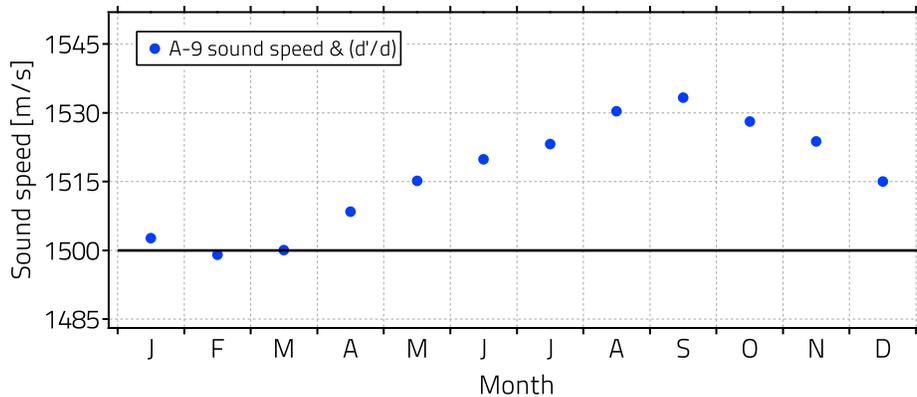


図 2-3 遠州灘沖で観測された水質から算出した月平均の音速度

得られた位置情報（緯度及び経度）は，平面直角座標系（VIII 系，JGD2000）へ変換した．メートル法で扱うことで，様々なデータ処理や分析に対して平面データの扱いが容易になるメリットがある．

取得した水深については，音速度，潮位および魚群探知機の振動子から水面までのオフセット補正する必要がある．魚群探知機で表示・出力される水深は，一般的には音速度 1500 m/s を基に算出されたものであるが，海水の密度や水温，圧力によって音速度は変化する．そこで，これらの観測値を用いて水深（超音波）の音速度も補正した．図 2-3 に，愛知県水産試験場が 2003 年 4 月から 2008 年 10 月まで愛知県遠州灘沖（水深約 22m）で毎月実施した調査結果を基に，Mackenzie の式により算出した毎月の音速度を示す．この値を用いて，その月の水深値を修正した．潮位については，舞阪，御前崎の各検潮所（気象庁）の験潮記録（公開値，1 時間毎の潮位）を基に，位相や減衰を考慮して潮位を 1 分毎に推定したものをを用いて，水深が記録されたタイムスタンプと同時刻の値を使用した．オフセットは漁船毎に事前に計測してある値を用いて補正し，これによって取得した水深を T.P. からの値（深度方向に正）とした．

(3) 海底地形データの作成

シラス漁の漁期は 3 月下旬から翌年 1 月中旬に設定されており，1 年のうち冬期 2 ヶ月間を除いて操業することができる．この漁期を通じて記録されたデータは，データ数（操業頻度や時間）や海象条件（有義波高）を考慮して水深の変化が小さいと考えられる期間（時間幅）で 1 つのデータセットとしてまとめ，海底地形図を算出した（図 2-4）．これには，できるだけ空間的に欠損のない地形図を作成する意図のほか，記録データの空間的な密度を向上させることによって，エラーデータの除去や算出地形の精度向上を狙う意図がある．一方で，時間幅が長くなると，実際の海底地形の短期的な形状変化を反映させることができない．すなわち，精度や

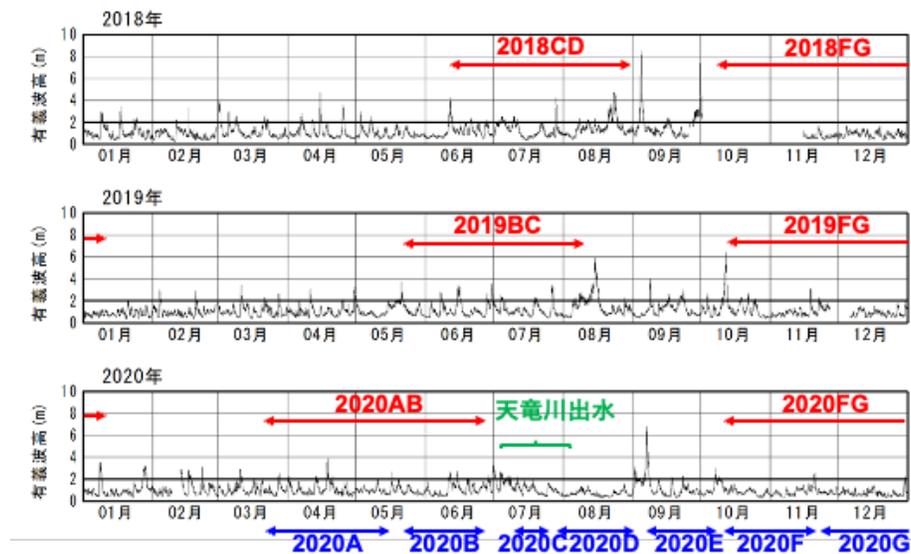


図 2-4 海底地形作成のための時間幅設定の一例（有義波高の経時変化）

カバレッジ，データの空間密度・充実度と，地形時間平均的な水深となってしまうことのトレードオフとなる．しかしながら，地形変化の外力として比較的大きな台風や河川出水といったイベントにおける水深変化を分析対象と捉えれば，ごく短期間での地形変化よりも，イベント前後での水深変化を抽出できる方が土砂管理上のメリットは大きく，時間平均的な水深を扱うことでも問題はないと考えられる．

データセットの作成では，2016年から2020年の間に取得した漁船ビッグデータを対象に，いくつかの時間幅を設定した．時間幅は水深変化ができるだけ小さく設定する必要があるが，ここでは3つのタイプの海底地形を算出するため，次のような時間幅を設定した．

- ・ 長期：1年間（漁期を通じた1シーズン，およそ10ヶ月）の平均的な水深分布の海底地形を算出するために設定した（表 2-1）．2016年（2016All）から2020年（2020All）までの5セットを設定した．その年の通年の平均的な地形として定義され，短期的な地形変化は時間的に平均化されてしまう．
- ・ 中期：1年間をおよそ2分割した，約半年程度の時間幅を設定することで，主に夏から秋にかけての台風などによる高波浪による水深変化を分析するために設定した（表 2-2）．これより，2016AE（春から秋）および2017AF（同じく春から秋）を除いて約3ヶ月の時間幅を用いた．なお，2017年は秋以降の取得データ数が少なく，シーズンを通じて1つの中期データセットのみ作成した．

- ・ 短期：来襲する高波浪を考慮して時間幅を設定した（表 2-3）。年間の高波浪ごとの水深変化を分析する目的である。2020 年を対象として、約 2 週間から 2 ヶ月の時間幅でデータセットを作成した。

これらデータセットに対して σ チェックによる外れ値（気泡反射などを起因とする明らかに誤りと思われる水深データ）を除き、Kriging を用いた内挿と、移動平均法によるローパスフィルターを空間的に適用して 10 m 格子平面に水深が配置された海底地形データを作成した。

作成した海底地形図の一例を図 2-5～図 2-9（長期）、図 2-10（中期）および図 2-11（短期）に示す。短期の時間幅を用いて算出した海底地形図（図 2-11）においては、漁期の後半（冬期）に向かうに従って空間的に水深情報が少なくなり、水深データのない領域が拡大している。これは、水温の低下とともに漁獲が減少し、操業頻度や一日の操業時間が減少していることに起因する。

本手法で作成した海底地形データは、既往研究¹⁾における深浅測量（マルチビーム深浅測量）成果との比較により、およそ 0.2 m の誤差を有することがわかっている。大きく見積もっても、0.5 m 程度の水深変化であれば、本手法により分析・発見が可能である。一方で小さな水深変化を捉えることは難しく、例えば広域にわたる微小な変化による土砂フラックスを算出することはできない点に注意が必要である。

表 2-1 データセットの作成期間（長期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	日数
2016All	2016/3/13	2017/1/13	306
2017All	2017/3/21	2018/1/16	301
2018All	2018/3/24	2019/1/10	292
2019All	2019/3/1	2020/1/22	327
2020All	2020/3/1	2021/1/26	331

表 2-2 データセットの作成期間（中期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	日数
2016AE	2016/3/13	2016/9/19	191
2016FH	2016/9/24	2017/1/13	112
2017AF	2017/3/21	2017/10/18	212
2018CD	2018/6/14	2018/8/31	79
2018FG	2018/10/8	2019/1/10	95
2019BC	2019/5/23	2019/8/7	77
2019FG	2019/10/13	2020/1/11	91
2020AB	2020/3/21	2020/6/29	101
2020FG	2020/10/11	2021/1/16	98

表 2-3 データセットの作成期間（短期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	日数
2020A	2020/3/21	2020/5/19	60
2020B	2020/5/21	2020/6/29	40
2020C	2020/7/13	2020/7/24	12
2020D	2020/7/27	2020/9/1	37
2020E	2020/9/10	2020/10/7	28
2020F	2020/10/11	2020/11/19	40
2020G	2020/11/22	2021/1/16	56

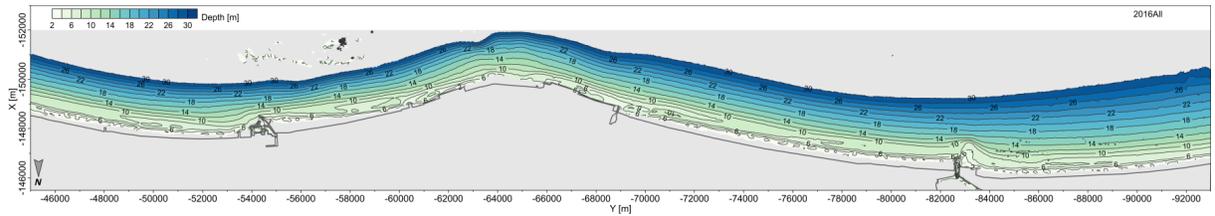


図 2-5 漁船ビッグデータより作成した海底地形（長期，2016AII）

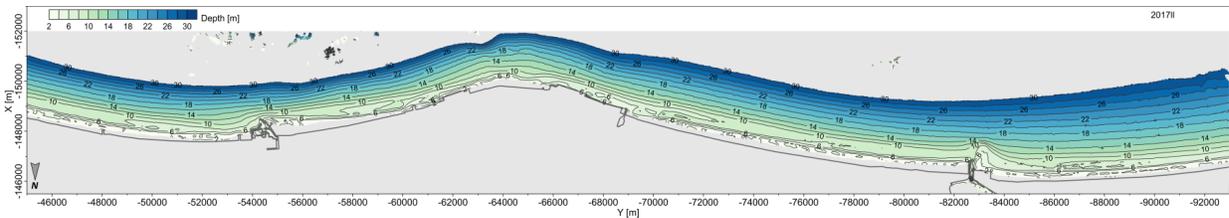


図 2-6 漁船ビッグデータより作成した海底地形（長期，2017AII）

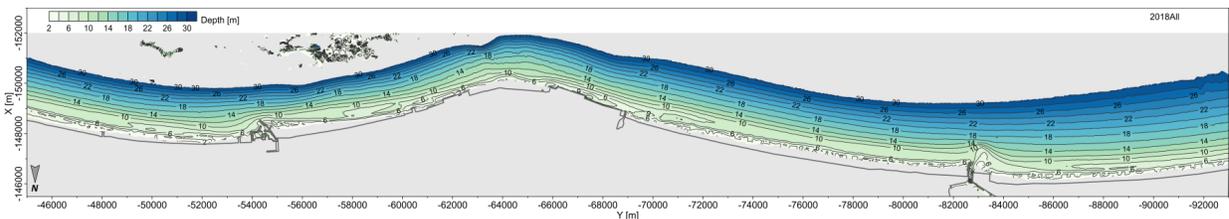


図 2-7 漁船ビッグデータより作成した海底地形（長期，2018AII）

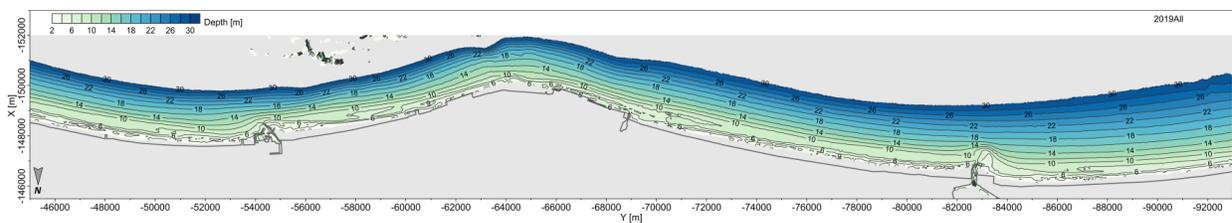


図 2-8 漁船ビッグデータより作成した海底地形（長期，2019AII）

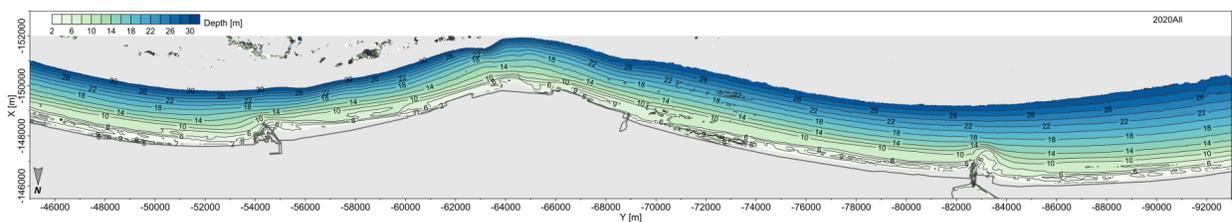


図 2-9 漁船ビッグデータより作成した海底地形（長期，2020AII）

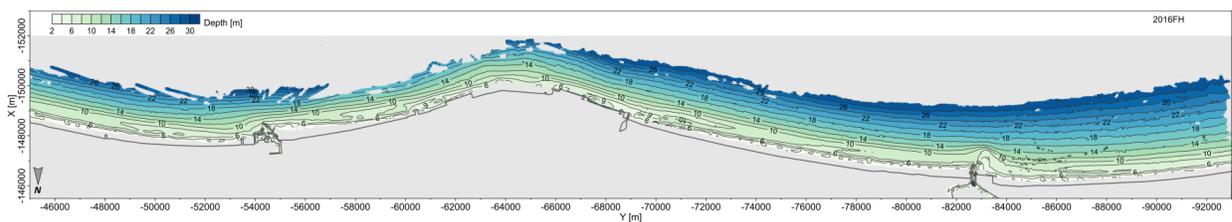


図 2-10 漁船ビッグデータより作成した海底地形（中期，2016FH）

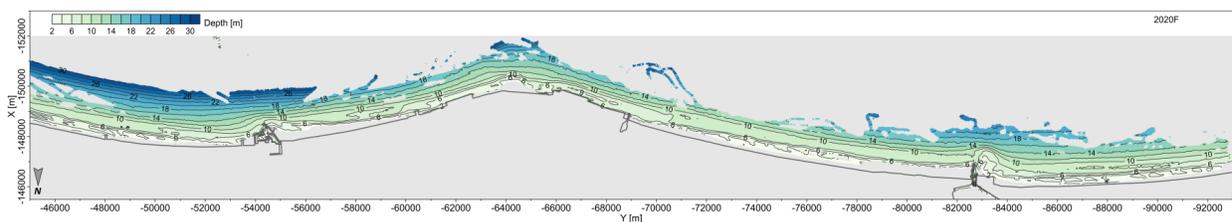


図 2-11 漁船ビッグデータより作成した海底地形（短期，2020F）

2.2 リアルタイム型データロガーの試作

本システムで使用しているデータロガーでは、漁船から収集される位置・水深・水温データがロガー内のメモ리카ードに蓄積されており、現在はこれを現地に赴いて回収している。シラス漁の操業期間中、出漁している時間帯ではデータ回収作業が実施できないだけでなく、漁船

の帰港後の回収作業に向けて漁業者との事前調整が必要となるなど、効率的なデータ回収には課題が多い。また、漁船のバッテリートラブルや機材変更により魚群探知機やプロッタなどのデータ外部出力のための設定がリセットや変更され、これら機器から情報がロガー側へ出力されない状況が発生していることがある。頻度の高い回収作業が実施できないと、このような事象が発生していることを把握するまでの時間、すなわちデータの欠測期間が長くなってしまう。大量のデータが必要となる本手法にておいて、このような欠測は避けたい。また、台風など高波浪前後の地形把握が迅速に必要な場合、データ回収作業がボトルネックとなり速報性の高いデータ解析が実現できない可能性もある。

これらの解消のために、データ通信機能を搭載したデータロガーを製作し、データ取得のリアルタイム性とビッグデータ収集の費用対効果を向上させる。ここでは、そのロガーの試作と動作のフィールド試験を実施し、漁船ビッグデータの収集システムの基盤を強化するハードウェアを開発する。

(1) データロガーの要件

データ収集には、漁船に既設の機器（魚群探知機など）の外部出力を使用するため、RS232Cポートを2つ有し、NMEA形式のシリアルデータを取得できることが必須となる。取得データはLTEモジュールを介して外部サーバに送信するが、バックアップとしてSDカードにデータを保存することとした。電源は漁船のバッテリーから供給（24Vあるいは12V DC）することを基本とする。一方で、単発的な調査などテンポラリーにデータを取得する場合や、試験的なデータ取得をさせる場合を考慮し、船内の電源工事を必要としない乾電池での稼働も視野に入れた。

これらの条件を可能にするため、CPUボードはSONY製SpresenseとLTE拡張ボードを使用した。オンボードのGNSSアンテナを使用できることに加え、省電力で稼働や待機を実現できることや、既に海洋環境計測のシステムとして組み込まれている実績などを考慮して選定して製作した（図2-12）。

データのアップロードは、一定時間有効な電源供給と有効なLTE電波環境の維持が必要であり、この可能性が高い漁船の操業開始時（電源投入時）にサーバーへのアップロード処理を一度だけ行う。その後取得する最新データはメモリカードに残されたままとなり、次回起動時までデータがアップロードされないが、通信経路の安定性を優先した。また、地形データに関し言えば、例えば毎秒リアルタイムにデータのアップロードが必要な程リアルタイム性は必要とは考え辛く、通信や消費電源とのトレードオフを考慮した結果の仕様となった。なお、3MBのデータをFTP送信した場合、処理に要した時間の実測値はおよそ2分であった。

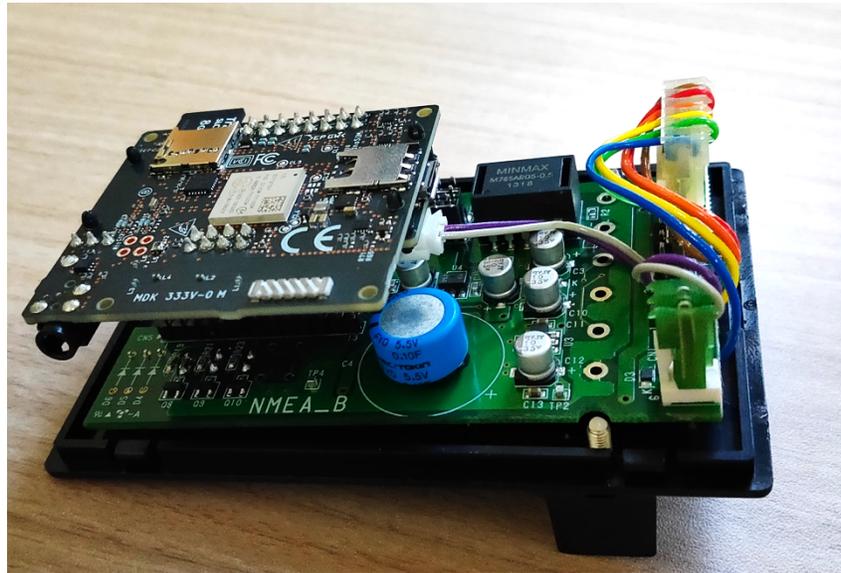


図 2-12 試作したデータロガーの内部

表 2-4 フィールドでの稼働試験内容

テスト名	内容	目的・確認内容	時間
T1	起動	船のバッテリーで起動・稼働確認	-
T2	魚探からのNMEA センテンス出力をMTW(水温)のみとし、シリアルポート 1 つのみにケーブルを接続	ロガーの記録挙動確認	10 分
T3	電源切断	-	-
T4	NMEA センテンスを MTW (水温) と DBT (水深) とし、シリアルポート 2 つにケーブルを接続	-	-
T5	電源投入・起動	T2 までの記録データの送信確認	-
T6	通常ロギング (出港～航行)	T4 のデータ記録および長時間の実海域での稼働確認	1 時間以上
T7	帰港・電源切断・再起動	T4 の記録データの送信確認	-

(2) 実海域での稼働試験

製作したデータロガーは、魚群探知機との接続性、通信、航行時の振動の影響や GNSS の受信などに関して実海域での稼働試験を実施した。2022 年 2 月に三重県英虞湾から太平洋にかけての海域で 10 時間程度の運用を行い、表 2-4 に示す内容、目的の試験を実施した。試験時の様子を図 2-13 に示す。なお、使用した魚群探知機は GARMIN 社製 GPSmap 585 PLUS であった。

稼働試験の結果、主にデータ通信に関して次のことを確認した。

- ・ 2 つの記録テスト (T2 および T6) において、それぞれ 10 分 35 秒間 (635 秒間) で 632 行、8 時間 38 分 9 秒間 (31089 秒間) で 31090 行をデータ内に収め、これらが T5 および T7 にてサーバーへ送信された。長い稼働時間のテストケース T6 でも約 1 秒間に 1 レコードを記録できたことになる。ただし、記録行数は魚群探知機側からのデータ出力頻度に依存するため、接続する機種によっては数秒から数十秒に 1 行しか記録されない可能性もある。
- ・ LTE 回線を通じて FTP サーバーに送信された 2 つのデータ (CSV ファイル) が、T5 の電源投入後に FTP サーバーに保存されており、機器動作フローに従ってインターネットを通じたデータ送信が実行されたことを確認した。ロガーの SD カード内に保存されたデータ内容とサーバーにアップロードされたデータの両者に相違ないことを、ファイル内の比較 (diff コマンド) にて確認した。なお、データ内には設定で指定した NMEA センテンスの内容 (水温 MTW および水深 DBT の値) が問題なく記録されていた。

データロガーによる記録テスト T6 時に、ハンディ GPS (GARMIN 社製 GPSmap62SCJ) を用いて測位情報 (緯度および経度) を 2 秒毎に記録した。ロガー内部の GNSS アンテナによる記録と、ハンディ GPS による記録より、T6 実施中の船の航跡を比較したものが図 2-14 である。全体の航跡は両データで一致しておりロガー内部のアンテナで問題なく測位・記録できていることがわかる。また、詳細を確認したところ、両者の測位情報に違いがある場所もあったが、その差は大きくても 10 m であり、おおよそ単独測位の誤差の範囲であることから、測位精度にも問題がないことを確認した。

これらの結果より、起動から位置情報の取得、データの送受信までが問題なく動作できており、以前より使用しているデータロガーと比較して、リアルタイム性の高い省電力な漁船ビッグデータ用 LTE 通信型データロガーを製作することができた。



図 2-13 データロガーのフィールド稼働試験の様子

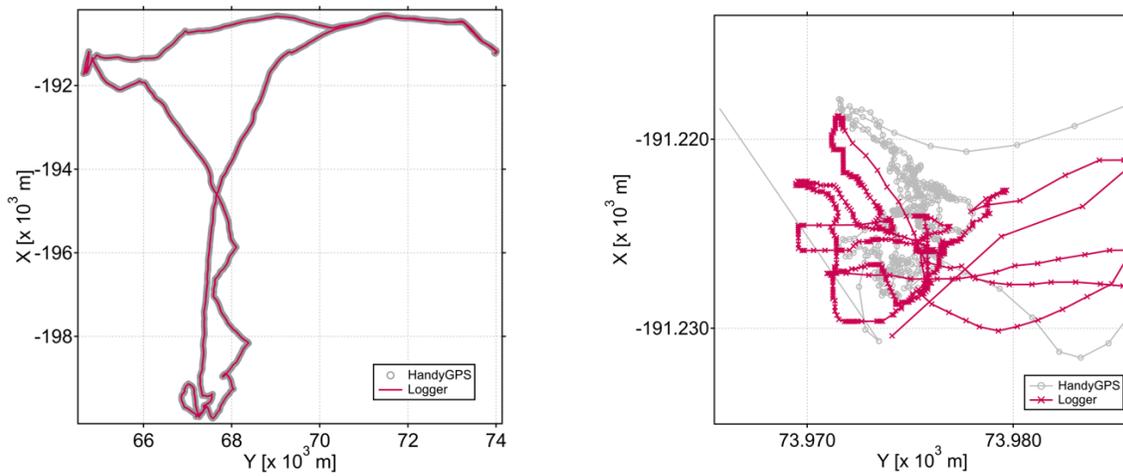


図 2-14 測位情報の比較 (左：試験全域 右：停泊棧橋付近の拡大)

3. 衛星オープンデータによる汀線抽出

漁船ビッグデータは水深およそ 4 m より深い海底の地形データを生成することができるものの、それ以浅では漁船が操業できないため地形データが得られない。そのため、何らかの方法で浅い海域のデータを取得する必要がある。本章では、無料でインターネット上に公開されている衛星画像データより汀線データを作成することで、漁船ビッグデータでは取得できない領域の地形データを取得する。これにより、2 つのデータを組み合わせるハイブリッド地形データの作成が可能となる。

3.1 衛星データの入手

欧州宇宙機関 (European Space Agency, <http://www.esa.int>) が運用する地球観測衛星 Sentinel-2 を対象としてダウンロードし、画像を取得した。Sentinel-2 のスペックを表 3-1 に示す。可視光 (B2, B3, B4) と近赤外 (B8) の解像度は 10 m である。これは、航空写真と同等の判読が可能な高分解能衛星の解像度 (~数 m) に比べると劣るが、汀線変動を一定の確からしさで追跡できる分解能である。Sentinel-2 は 2 機体制 (Sentinel-2A : 2015 年運用開始・設計寿命 7 年, Sentinel-2B : 2017 年運用開始・設計寿命 : 7 年) で運用されており、回帰日数は 5 日であるため高頻度な解析対象データの入手が期待できる。また、後継衛星の打ち上げが 2024 年と 2028 年に計画されており、継続的に同等のデータを入手することが期待できる。

画像データの検索は、対象域、対象期間、データの種類等を指定すると候補のシーンが示され、クイックルックにより撮像状況を確認できる。この段階で、雲が沿岸に無いことを確認したデータをダウンロードした。取得データはシーン内の雲分布状況、水際付近の砕波状況を目視で確認した。雲が沿岸域に無いこと、沿岸域の波浪が小さく砕波の発生が少ないことを確認し、汀線データの抽出 (水際位置の読み取りと潮位補正を経た汀線位置の決定) の対象とすかを判断した。図 3-1 に取得シーンの例を示す。沖合、浜名湖に雲が見られるが、沿岸部はクリアであり汀線データの作成が可能なシーンである。なお、入射波の波高が大きく、水際から砕波帯までが白波で覆われていると水際位置の決定が難しくなることを予備解析で確認したが、シーンを目視でチェックする際、砕波帯の発達状況の程度の判定は解析者の主観によるため、経験が必要となる。

上述した手順で衛星データを収集し、2016 年から 2021 年までの 36 シーンを解析対象とした。このシーンが撮影された日付を図 3-2 に示す。なお、全てのシーンの撮影時間は午前 10 時 30 分頃である。6 月、7 月、8 月は曇天や高波浪等により解析可能なシーンが他の時期に比べて少なかった。

表 3-1 Sentinel-2 の観測波長と解像度

バンド	波長名	観測波長（中心） [nm]	解像度[m]
B1	Indigo	443	60
B2	Blue	493	10
B3	Green	560	10
B4	Red	665	10
B5	VNIR	704	20
B6	VNIR	740	20
B7	VNIR	783	20
B8	NIR	833	10
B8a	NIR	865	20
B9	NIR	945	60
B10	SWIR	1374	60
B11	SWIR	1610	20
B12	SWIR	2190	20

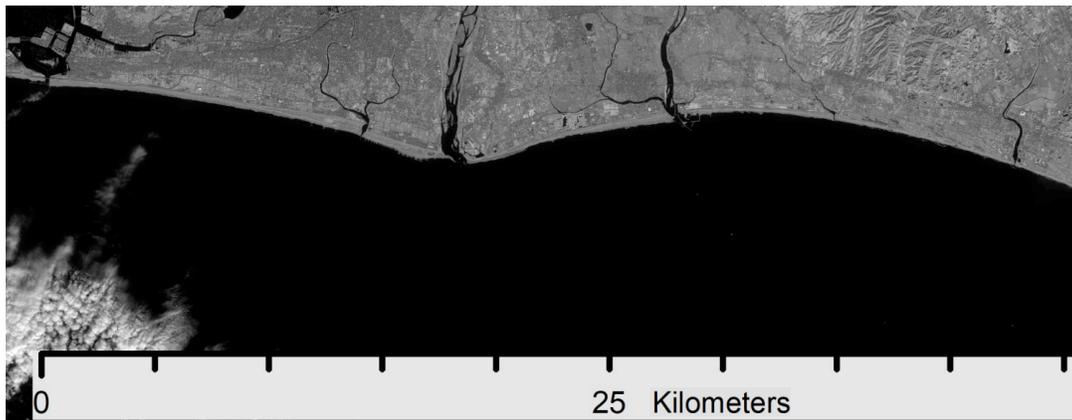


図 3-1 取得した Sentinel-2 のシーンの一例（2021 年 12 月 28 日，B8：近赤外）

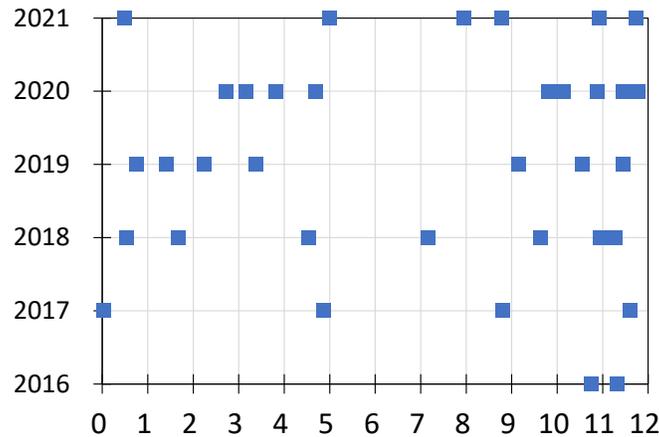


図 3-2 取得したデータの撮影日（横軸：月，縦軸：西暦）

3.2 汀線の抽出

汀線データを作成した手順を図 3-3 に示す。汀線データの作成は ArcGIS (ArcMap) による水際位置データの作成と、潮位補正による汀線位置の決定から成る。

水際位置を抽出する手順においては、選定した衛星データのうち、近赤外波長帯のデータ (B8 : NIR, 空間分解能 10 m) を用いて汀線データを作成した。近赤外は日射光に含まれており、陸域では反射し、水域ではほぼ完全に吸収される (図 3-1)。この特性を利用し、最尤分類法により陸域と水域を区別した。

潮位補正においては、汀線位置を高さ T.P. 0.0 m における水際位置で定義した。衛星データ取得時の観測潮位 (御前崎験潮場, 気象庁) をインターネットから取得し、これを用いて表 3-2 に示す前浜勾配を用いて潮位補正を行なった。具体的には、衛星データ取得時の潮位が T.P. 0.0 m より高かった場合、水際位置を海側に変移させる (低かった場合は陸側に変移)。変移の概略を図 3-4 に示した。変移させる量は $[\text{潮位} \div \text{前浜勾配}]$ である。

潮位補正を行なった汀線データは沿岸方向に不等間隔で取得される (平均的な間隔 10 m)。これを沿岸方向 10 m 毎の汀線データに補間・外挿した。沿岸位置は平面直角座標系 (8 系) の東西方向座標、汀線位置は南北方向座標で定めた。図 3-5 に近赤外波長帯のシーンとこれより作成した汀線位置 (黄色実線) の一例 (2021 年 1 月 15 日のシーンより抽出) を示す。河口域、港湾域は汀線データを定められないので空白域 (図中は陸側に表記) とした。浜松五島、浜松篠原海岸の離岸堤群背後のトンボロ状の汀線分布、天竜川河口砂州上の突堤の両側の汀線位置のギャップ等が捉えられていることがわかる。

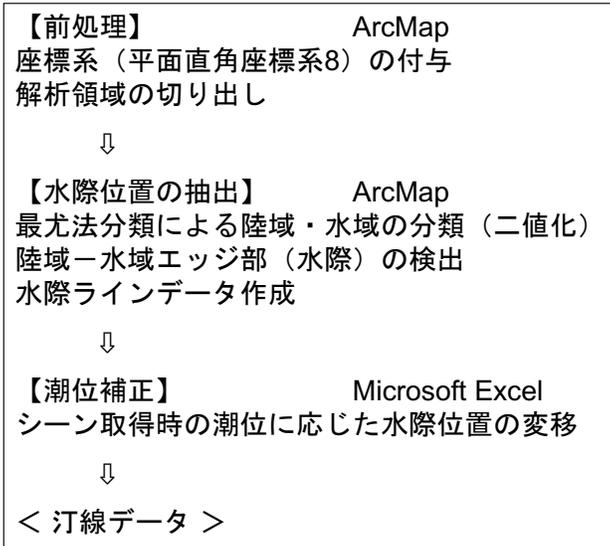


図 3-3 汀線データの作成手順

表 3-2 潮位補正に用いた前浜勾配

海岸名	前浜勾配
大須賀	1/15
浅羽	1/15
福田漁港	1/15
福田	1/15
磐田	1/15
竜洋	1/15
天竜川河川区間	1/30
浜松五島	1/30
馬込川河川区間	1/30
浜松篠原	1/15
舞阪	1/15
浜名港	1/15

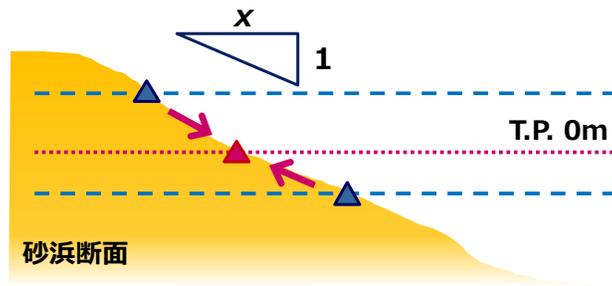
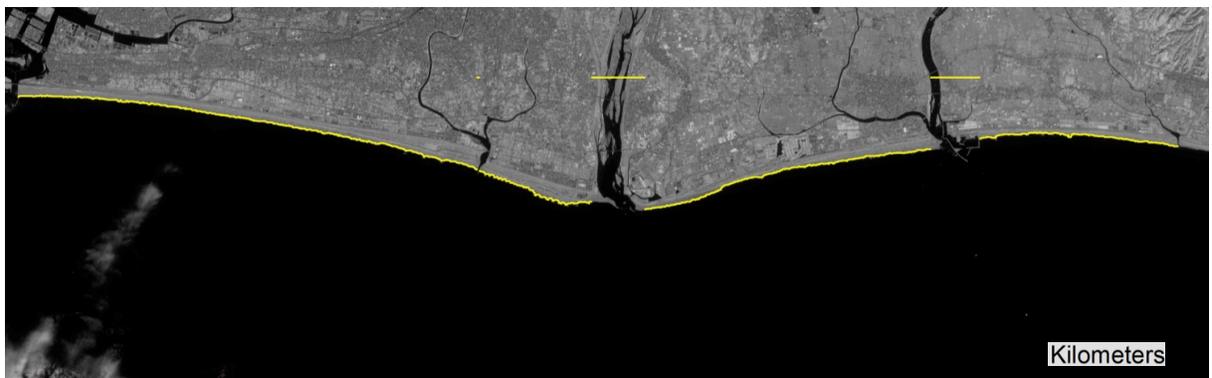
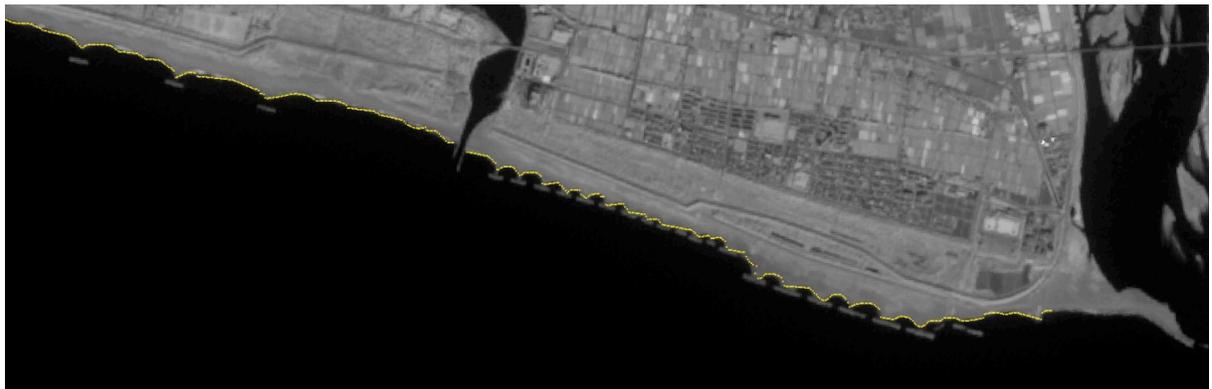


図 3-4 抽出した汀線位置の潮位補正の概略（青色△印が抽出位置）



(a) 全域（今切口から弁財天川にかけて）の汀線分布



(b) 浜松五島，浜松篠原の汀線分布

図 3-5 近赤外シーンより抽出した汀線位置（黄色実線，2021 年 1 月 15 日）

3.3 抽出した汀線データの検証

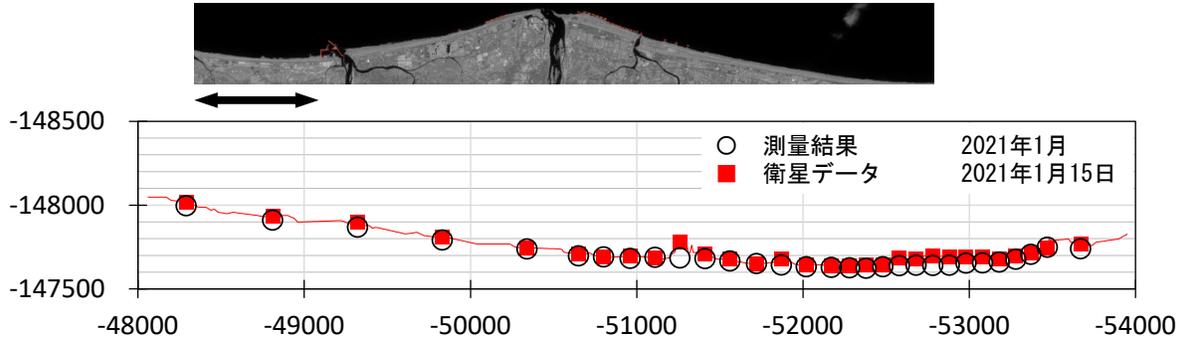
汀線位置の空間分布に関する精度の検証は、深浅（横断面）測量結果より汀線位置（T.P. 0.0 m）を定め、衛星データより読み取った汀線位置と比較した。比較の際には、測量位置（測線）

との衛星データによる汀線位置が異なるため、深浅測量位置を基準とした最寄りの衛星データを比較した。図 3-6 に汀線位置の分布、表 3-3 に比較のまとめを示す。衛星データより定めた汀線位置は海岸線の概形を捉えているものの、平均誤差は全て正值（衛星データが測量結果に比べて海側にシフト）となっている。これの一つの要因は、砕波による影響である。衛星シーンを詳細に調べたところ、砕波が顕著にあった場合には水際位置を砕波帯の海側エッジ領域にあると判定していた。波浪が穏やかな時には、衛星観測の空間分解能（10 m）に見合った平均誤差・変動強度（10 m のオーダー）で汀線位置を定められることがわかった。

時間的な変化の精度検証では、各年の深浅（横断面）測量結果より汀線位置（T.P. 0.0 m）を定め、衛星データより読み取った汀線位置の時間変化を比較した（2016 年-2021 年）。図 3-7 および図 3-8 に各沿岸位置における汀線位置の時間変化を示す。比較の際、上述したように測量位置の最寄りの衛星データ汀線位置を採用した。衛星データから求めた汀線データにはばらつきがある。これは衛星データ解析の際の不確実性と汀線位置が日々変動していることによる。測量結果から求めた汀線位置は概ねこのばらつきの範囲内に収まっている。以上より、衛星データから汀線変化の動向を追跡できると考えられる。

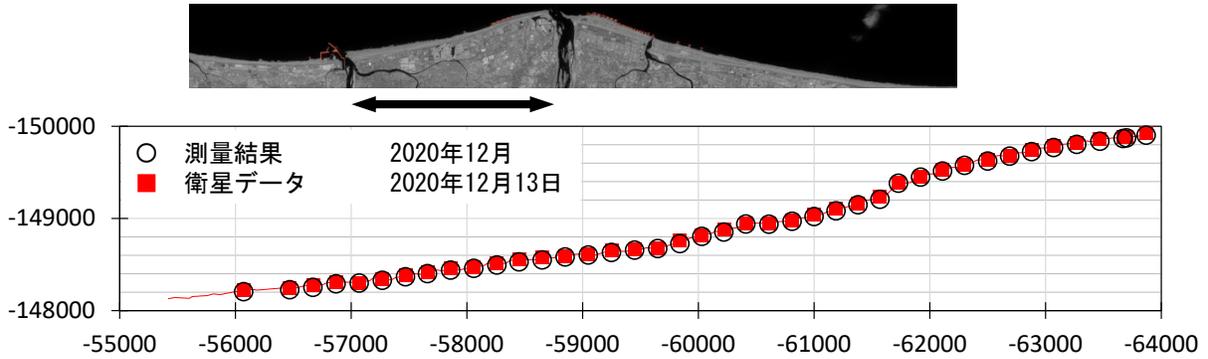
加えて、航空写真から読み取った汀線変動との比較をおこなった。2020 年 1 月、2020 年 11 月に撮影された航空写真から汀線位置を読み取った差分を求めた結果（静岡県遠州灘沿岸侵食対策検討委員会²⁾）と 2019 年 12 月 14 日、2020 年 11 月 26 日の衛星データから定めた汀線位置の差分の比較を図 3-9 に示す。前進、後退のあった領域はほぼ一致する。両結果における後退の評価はおおよそ等しい大きさであるが、前進の評価は衛星データで大きくなっている。

これらの検証結果より、オープン衛星画像から抽出できる汀線は、深浅測量と比較しても概ねそれを表現しているものの、ある程度の誤差が生じることは避けられず、この点については漁船ビッグデータによる海底地形データの精度と同じような扱いや活用方法が求められる。一方で、同様の特性（ある程度の誤差を含む地形データ）を持つ両者（漁船ビッグデータと衛星データ）であるからこそ、これらデータを融合することで活用の幅が広がるものと考えられる。

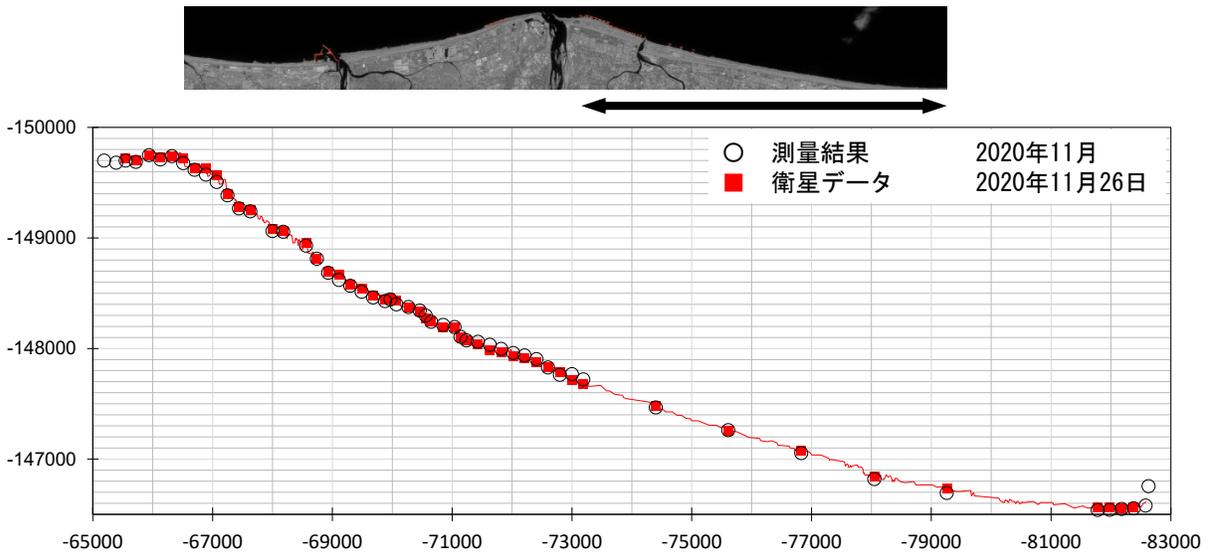


(a) 福田海岸 (平均誤差* : 21.9 m, 変動強度 : 19.3 m)

* 正值の場合 : 衛星データが測量結果に比べて海側にシフト



(b) 竜洋海岸 (平均誤差 : 15.5 m, 変動強度 : 7.9 m)



(c) 西部 : 天竜川河口～今切口 (平均誤差 : 6.6 m, 変動強度 : 24.7 m)

図 3-6 汀線位置 : 測量結果と衛星データの沿岸分布

表 3-3 衛星汀線データと測量結果の差

領域	測量時期	衛星データ取得日	波高[m]	周期[s]	平均誤差[m]	変動強度[m]
福田	2021年1月	2021年1月15日	0.7	6.5	21.9	19.3
竜洋	2020年12月	2020年12月13日	N/A	N/A	15.5	7.9
西部	2020年11月	2020年11月26日	0.7	6.2	6.6	24.7

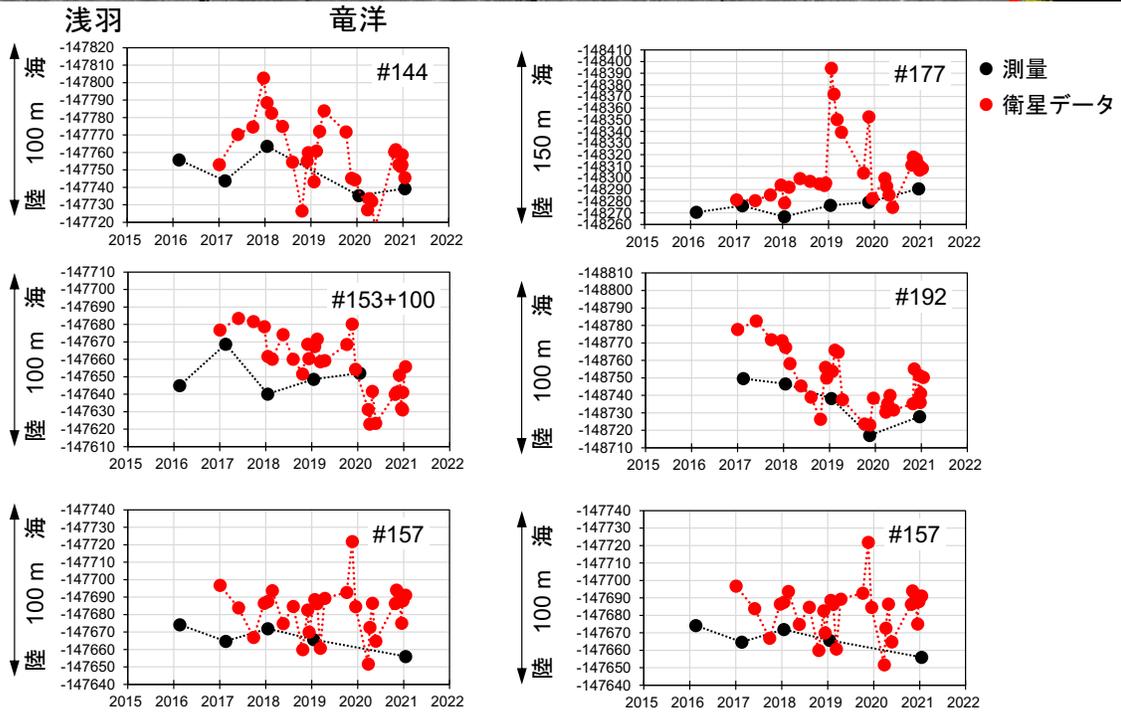
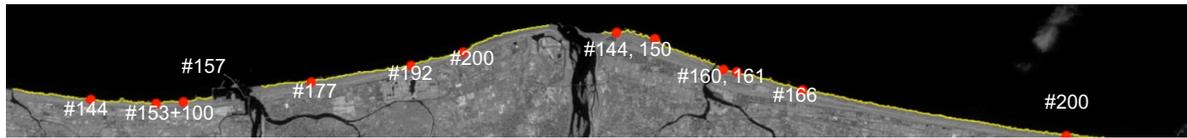


図 3-7 汀線位置の時間変化の比較（東側海岸：浅羽，竜洋）

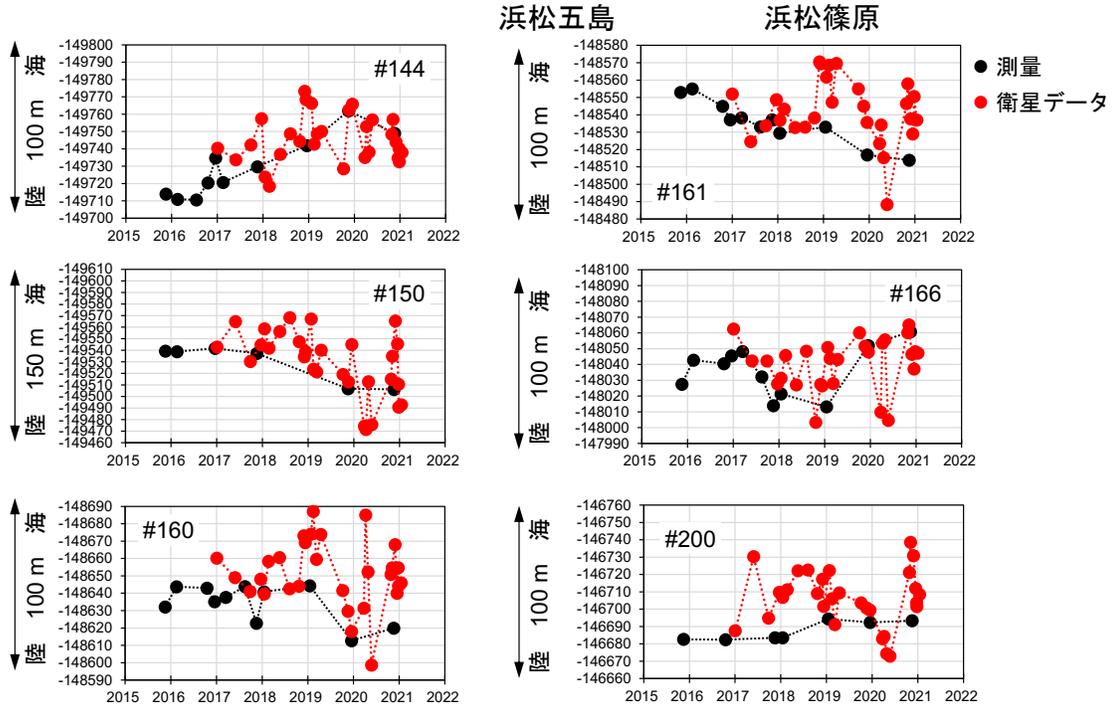
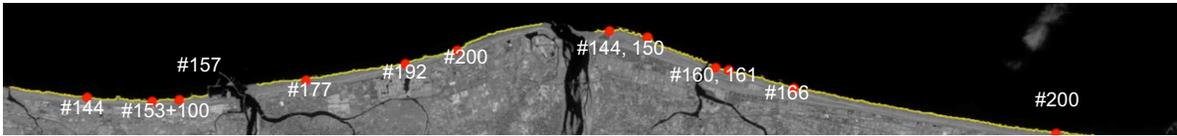


図 3-8 汀線位置の時間変化の比較 (西側海岸：浜松五島，浜松篠原)

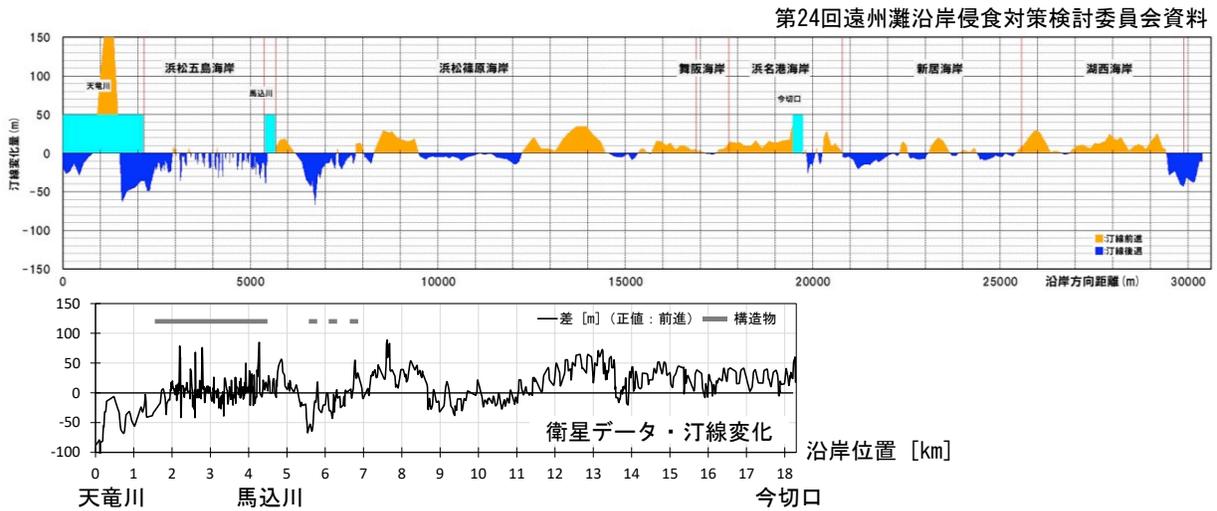


図 3-9 1年間の汀線変動 (天竜川河口～今切口) (上段：航空写真 (2020年1月, 11月) から読み取った汀線位置の差分²⁾, 下断：衛星データ (2019年12月14日, 2020年11月26日) から読み取った汀線位置の差分, 正值：汀線の前進)

4. ハイブリッド地形データの生成手法の開発

およそ 4 m より深い海底の地形データを生成することができない漁船ビッグデータと、水中の地形情報を生成できない衛星画像による汀線データを組み合わせることで、空間的に十分に満たされた海底地形情報を作り出す。本章では、実務での活用を主眼に置き、よりコストを要しない簡便な手法で両者のデータを融合する方法を検討するとともに、ハイブリッド地形データ（または合成データ）の精度についても検証した。

4.1 地形データの合成手法の検討

衛星画像から抽出した汀線（水深 0 m 等深線）と漁船データによる海底地形の最も岸寄り（およそ水深 4 m）の間、すなわち水深 0~3 m の区間に情報のない空白があるため、この空白を埋めることがデータ融合を意味する。図 4-1 に漁船ビッグデータおよび衛星データの空間的な配置の一例（2019BC）を示す。緑色は漁船データで得られた水深を、赤線は衛星画像から抽出した汀線の存在を示しており、両者のギャップに相当する青色の範囲がデータの空白地帯である。この空白領域の海底地形形状を推定する情報が得られないことから、両者のデータのみを用いて空白領域の内挿を検討した。

内挿では岸沖方向の断面形状をある関数で 2 地点（汀線と漁船データの最も岸寄りの地点）を結ぶ。岸沖方向の 2 地点結ぶ関数としては、放物線形状やべき乗式などで得られる曲線により実際の地形を模して補間する方法が考えられるが、計算に際して様々な設定が必要になる。例えば、それら式のパラメータ（曲がり具合などを決める変数）設定や、内挿の形状を当てはめる際にどちら（汀線、漁船ビッグデータの最も岸側、あるいは両方とも）の水深を拘束（固定）条件とするかなど、計算・検討のコストが大幅に嵩むことが懸念される。そこで、本検討では 2 地点間を直線（1 次関数）で結ぶ簡便な内挿方法を用いることとした。ただし、これは曲線的な自然の水深変化を表現するものではなく、特に漁船データの地点から急に汀線（水深 0 m）に向けて浅くなる直線が生じるように、地形形状が不自然になるデメリットが想定される。一方で、パラメータ決定など計算コストが最も小さいため、精度面でのデメリットが許容されるのであれば、有用な合成方法である。ここでは、沿岸方向 10 m 毎の岸沖断面において、両者のデータを線形内挿し、これを沿岸方向に順次計算した。これは、内挿しなければならない区間（2 種類のデータの距離）が最も短くなる条件となるためである。図 4-2 に 1 次関数を用いて内挿した海底地形の岸沖断面を示す。水深 5 m 付近に形成されたバーを漁船データは捉えているものの、それより陸側は空白域となっていた。断面形状はやや不自然であるが、漁船データと汀線が直線で結ばれることで空間的に地形データを充足することができる。

合成データを作成するにあたり、次のような空間的な制約による内挿の可否条件を設けた。

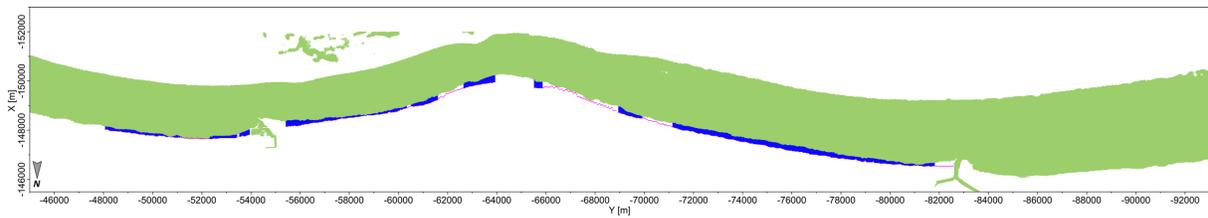


図 4-1 地形データの空間分布（2019BC，緑：漁船ビッグデータ，赤線：衛星画像による汀線データ，青：データの存在しない空白領域，白色：陸地などのデータ未生成領域）

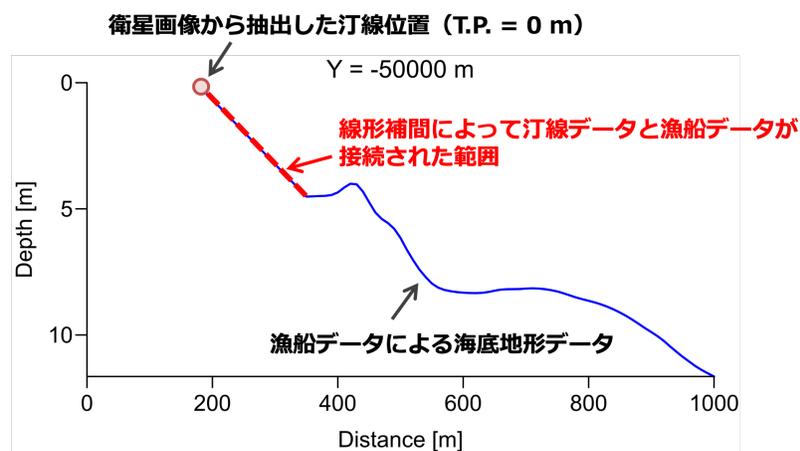


図 4-2 内挿により合成した際の地形データの岸沖断面

- ・ 河口および漁港を含む領域は，汀線が抽出できないため岸沖方向の合成をしない。
- ・ 離岸堤および離岸堤群は，衛星画像から汀線は抽出できるものの，沖側から構造物を無視して線形補間することを避けるため，岸沖方向に合成しない。
- ・ 漁船データの取得状況や地形算出のための処理次第では，汀線を陸側に超えた位置まで海底地形データが存在してしまう場合がある．例えば，漁船ビッグデータによる地形生成の際に強く内挿処理がかかりすぎてしまう場合，汀線の近傍まで漁船が操業した場合などに生じてしまう可能性がある．この場合は，海底地形データを削らずに合成しない（漁船データを残したままにしておく）。

4.2 ハイブリッド地形データの生成

衛星画像による汀線は，漁船データによる海底地形を作成する際に設定した時間幅（表 2-1～表 2-3）におおよそ含まれるものを算術平均して期間平均的な汀線位置と定義し，両データの合成に用いた．すなわち，汀線位置も海底地形（水深）も，同期間（時間）幅での平均的なもの

として扱うことになる。表 4-1～表 4-3 に、漁船ビッグデータから海底地形データセットを作成する時間幅と、合成に用いる汀線を抽出した衛星画像の撮影日を示した。長期（表 4-1）および中期（表 4-2）のデータセットは、2016 年から 2020 年までの 4 年間のデータを用いた合成作業をおこなった。海象および気象条件に左右されるため、主に夏場において漁船ビッグデータに対応する衛星データが少なくなっているものの、特に 2020 年に入ってから衛星データの時間的な密度が増大していることがわかる。なお、短期的な時間幅を用いた漁船ビッグデータと衛星データの合成については、2020 年のみを対象とした。夏場のデータセット（2020C および 2020D）は合成できる衛星データがなかったものの、それ以外の時期では平均 2.6 枚の衛星画像を用いた汀線データで、漁船ビッグデータとの合成が可能であった。

表 4-1 合成したデータセットと衛星画像の撮影日（長期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	衛星画像の撮影日 (汀線)
2016All	2016/3/13	2017/1/13	2016/11/22
			2016/12/09
			2017/01/01
2017All	2017/3/21	2018/1/16	2017/05/28
			2017/09/25
			2017/12/19
			2018/01/16
2018All	2018/3/24	2019/1/10	2018/05/18
			2018/08/06
			2018/10/20
			2018/11/29
			2018/12/09
2019All	2019/3/1	2020/1/22	2019/01/23
			2019/03/09
			2019/04/13
			2019/10/05
			2019/11/17
			2019/12/14
2020All	2020/3/1	2021/1/26	2020/03/23
			2020/04/05
			2020/04/25
			2020/05/22
			2020/10/24
			2020/11/03
			2020/11/26
			2020/12/13
2020/12/21			
			2020/12/23
			2021/01/15

表 4-2 合成したデータセットと衛星画像の撮影日（中期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	衛星画像の撮影日
2016AE	2016/3/13	2016/9/19	2016/11/22
2016FH	2016/9/24	2017/1/13	2016/11/22 2016/12/09 2017/01/01
2017AF	2017/3/21	2017/10/18	2017/05/28, 2017/09/25
2018CD	2018/6/14	2018/8/31	2018/05/18, 2018/08/06
2018FG	2018/10/8	2019/1/10	2018/10/20 2018/11/29 2018/12/09 2019/01/23
2019BC	2019/5/23	2019/8/7	2019/04/13
2019FG	2019/10/13	2020/1/11	2019/10/05 2019/11/17 2019/12/14
2020AB	2020/3/21	2020/6/29	2020/03/23 2020/04/05 2020/04/25 2020/05/22
2020FG	2020/10/11	2021/1/16	2020/10/24 2020/11/03 2020/11/26 2020/12/13 2020/12/21 2020/12/23 2021/01/15

表 4-3 合成したデータセットと衛星画像の撮影日（短期）

データセット名	期間のはじめ	期間の終わり	衛星画像の撮影日
2020A	2020/3/21	2020/5/19	2020/03/23 2020/04/05 2020/04/25
2020B	2020/5/21	2020/6/29	2020/05/22
2020C	2020/7/13	2020/7/24	合成なし
2020D	2020/7/27	2020/9/1	合成なし
2020E	2020/9/10	2020/10/7	2020/10/24
2020F	2020/10/11	2020/11/19	2020/10/24, 2020/11/03
2020G	2020/11/22	2021/1/16	2020/11/26 2020/11/03 2020/12/13 2020/12/21 2020/12/23 2021/01/15

合成した海底地形図の一例を図 4-3（長期）、図 4-4（中期）および図 4-5（短期）に示す。図中の赤線は衛星画像から抽出した汀線である。なお、紙面の都合上、約 50 km におよぶ沿岸方向の浅海域地形データを十分なサイズで掲載できないため、図 4-6 と図 4-7 に長期（2016AII と 2020AII）の浅羽海岸および馬込川～浜松篠原海岸の範囲を拡大した合成海底地形図をそれぞれ示した。これより、岸側のデータの空白領域が解消され、面的に充足された地形データが生成されていることがわかる。また、トンボロ地形では（図 4-7(a)）汀線と浅海域の空間的な特徴がそれぞれのデータで捉えられており、両者間での乖離が大きくなければ合成手法がデータの空間的な充足に有用であることが示唆される。

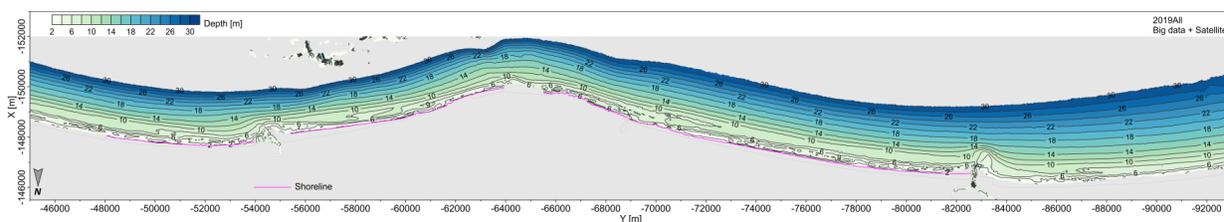


図 4-3 合成した海底地形図（長期 2019AII, 赤線は汀線データ）

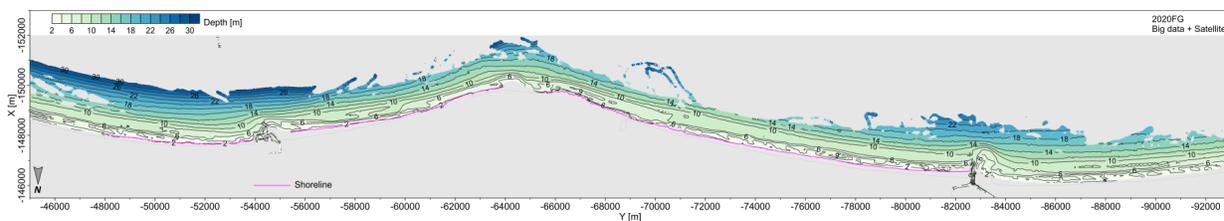


図 4-4 合成した海底地形図（中期 2020FG, 赤線は汀線データ）

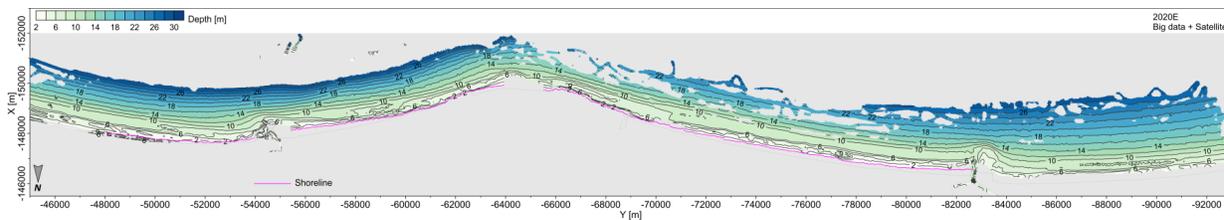


図 4-5 合成した海底地形図（短期 2020E, 赤線は汀線データ）

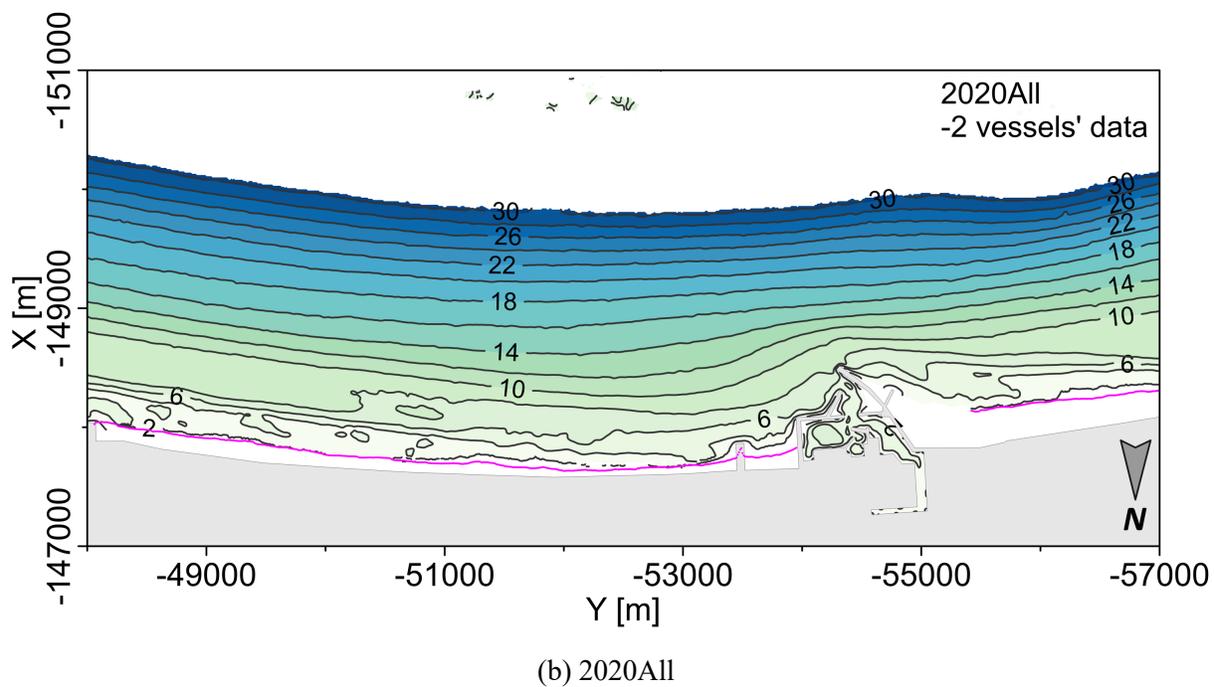
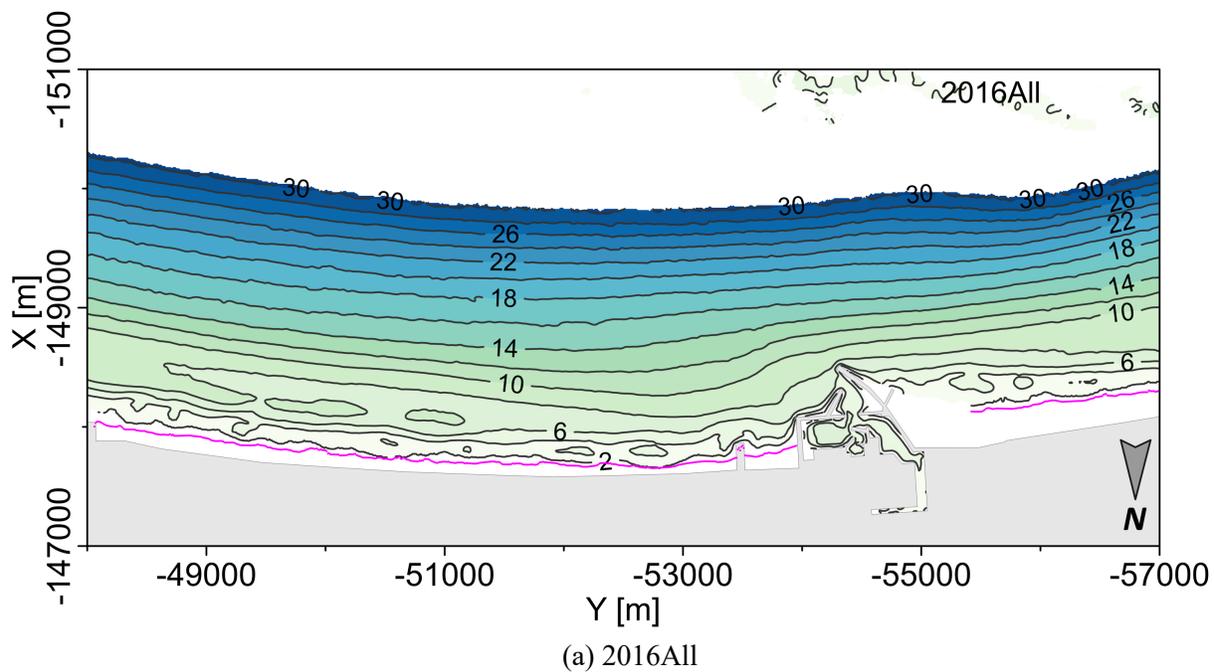
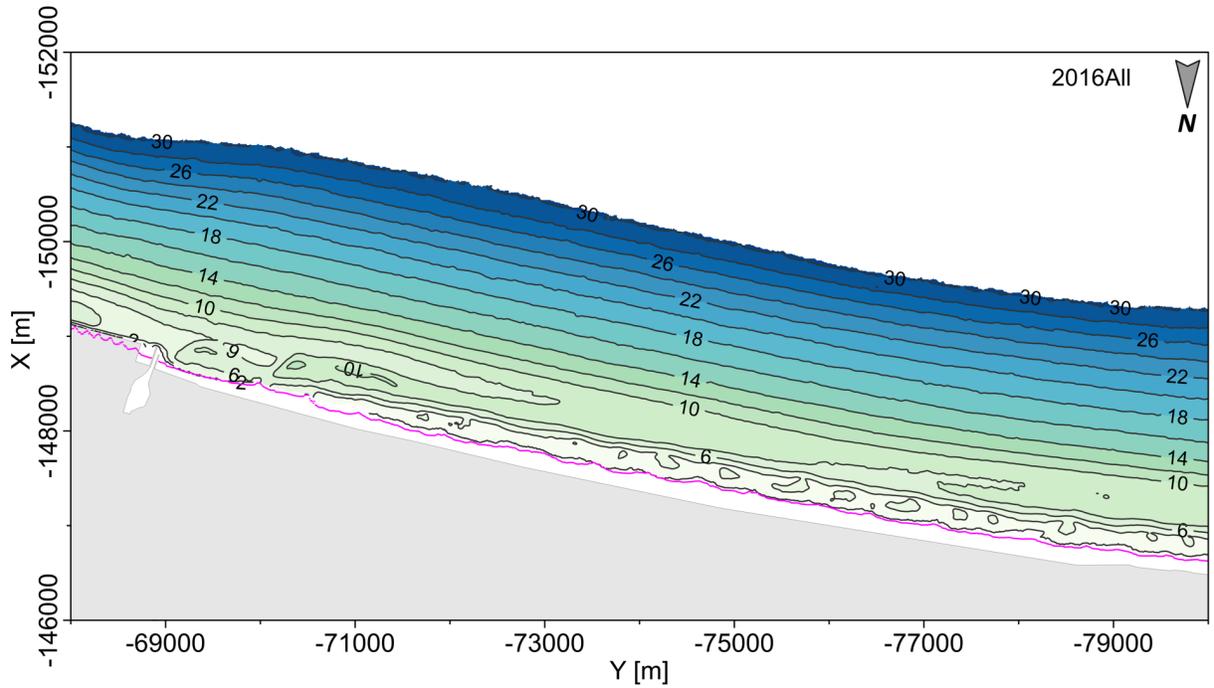
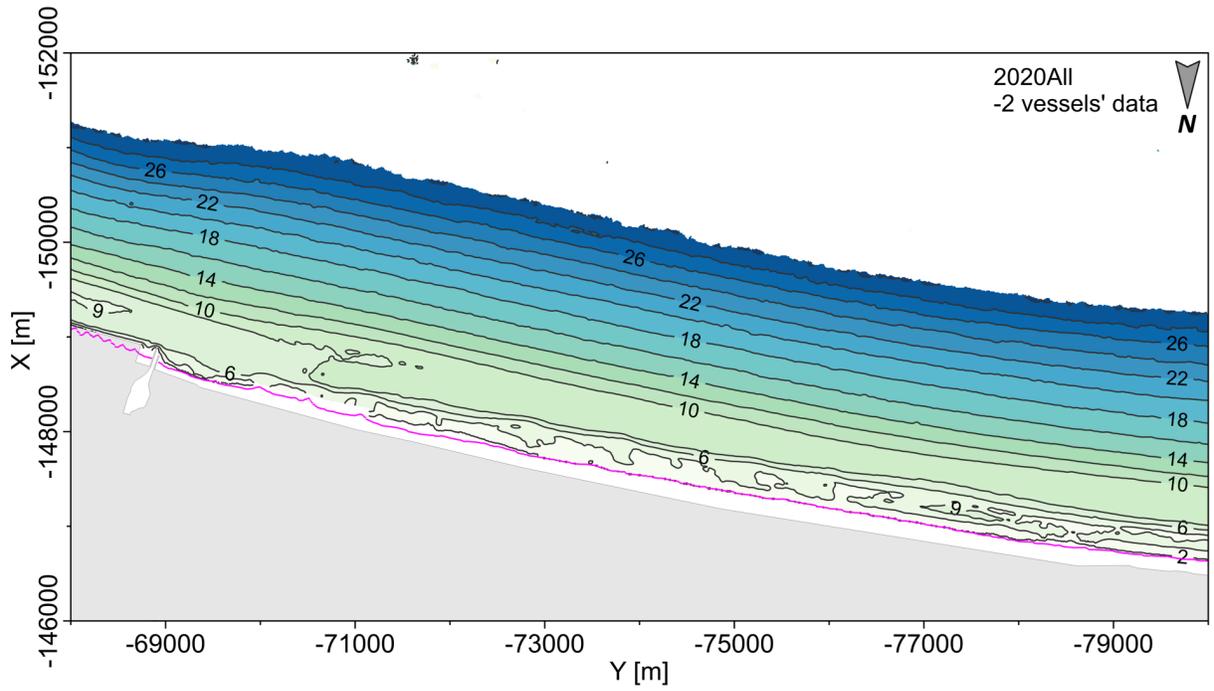


図 4-6 合成した浅羽海岸の海底地形（長期データセット）



(a) 2016All



(b) 2020All

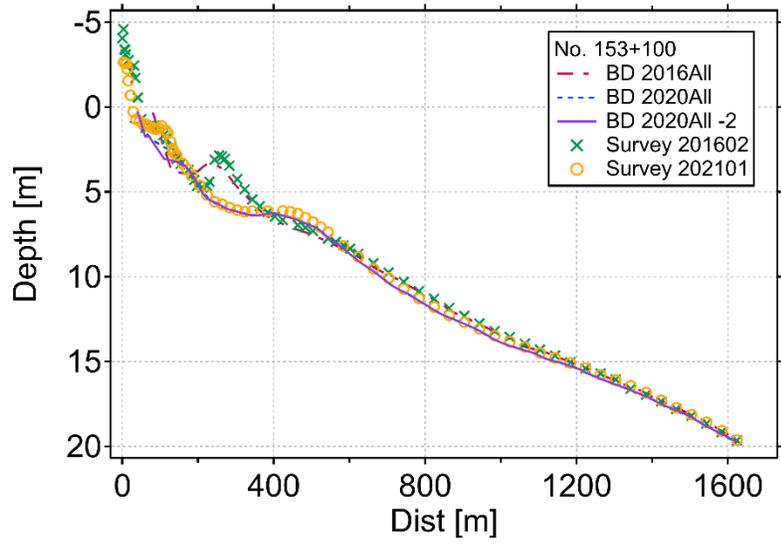
図 4-7 合成した馬込川～浜松篠原海岸の海底地形（長期データセット）

4.3 ハイブリッド地形データの確からしさ

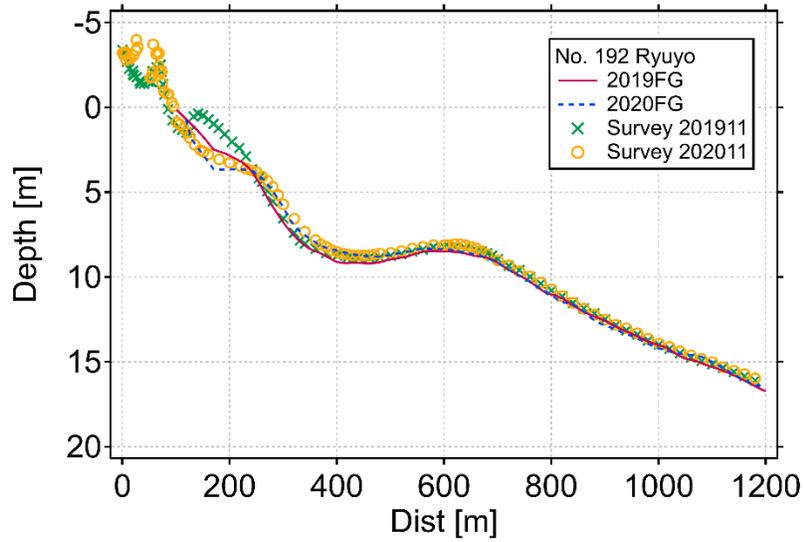
ここでは測量結果を用い、合成海岸地形データセットの確からしさを断面形状の観点より検討した。静岡県によって実施されている定期深浅測量結果（岸沖方向の縦断測量）と合成データを比較した。

まず、断面形状の定性的な比較を検討する。図 4-8 に天竜川河口より西側に位置する浅羽海岸 (No. 153+100)、竜洋海岸 (No. 192) を、図 4-9 に東側に位置する浜松五島海岸 (No. 144) および浜松篠原海岸 (No. 161) の計 4 つの海岸における深浅測量用測線に沿った合成データと測量成果の海底地形岸沖断面を示した。浜松五島海岸 (図 4-9(a)) No. 144 は構造物（岸沖距離 200 m 付近）を含む断面であるが、2017 年から 2019 年にかけて生じた構造物沖の大規模な侵食と 10 m 付近の侵食を漁船データが同様に再現している。浜松篠原海岸 (図 4-9(b)) も同様に、バーの岸沖方向の移動をほぼ正確に捉えている。内挿された範囲については、例えば浜松篠原海岸に見られるように、測量成果とやや異なった形状と水深を示していることがわかる。全体を俯瞰すると、漁船データによる海底地形形状はデータ量としては大部分を占めることから、大きな違いは見られないものの、内挿した領域では、測量結果とはやや異なる地形データが作成されていた海岸もあった。一方で、大まかに見ると、浅羽海岸や浜松篠原海岸では、浅い領域 (< 3 m) の地形形状は、合成データでも比較的再現できていることがわかる。これは、漁船データが浅い領域まで取得できている場合に見られ、内挿される領域が狭いことが再現度を高めていることが確認できた。図 4-10 には海岸地形データセットの岸沖断面を定期深浅測量の成果と比較し、水深の差分を合わせて示したものである。図 4-10(a)は竜洋海岸、図 4-10(b)は浜松篠原海岸における例である。図中の点線はデータセットのうち線形補間による範囲を意味している。両海岸とも、沖合のバーやトラフといった地形の特徴は漁船ビッグデータにより捉えられており、その誤差も小さい。また、衛星画像による汀線位置も測量成果とほぼ同じである。竜洋海岸では、補間された水深は測量成果との差が大きく、最大で 3 m 程度の乖離が生じた。一方、篠原海岸では汀線近傍においても誤差は小さく、線形補間によって汀線から沖合までの地形データを形成できていた。

次に、深浅測量地点における合成データの水深を抽出し、測量成果との差を誤差と定義して値を整理した。表 4-4 にデータセットおよび比較した測量成果情報（測量日と海岸名）、誤差（平均誤差と誤差の標準偏差）を示した。なお、平均誤差は負の値が深いことを意味し、漁船データによる海底地形図のみの誤差と、内挿領域のみの誤差の 2 つのエリアの誤差情報を示している。対象としたデータセットは中期（表 4-2）のものであり、その時期に対応した測量成果のない 2018CD, 2019BC, 2020AB は評価しなかった。この結果より、内挿した領域の誤差の標準偏差はおおよそ 1 m 程度あり、平均的に数十 cm 深いことがわかる。漁船データについては、2019 年と 2020 年の値が著しく悪いことを除けば数十 cm 程度の誤差であることがわかる。

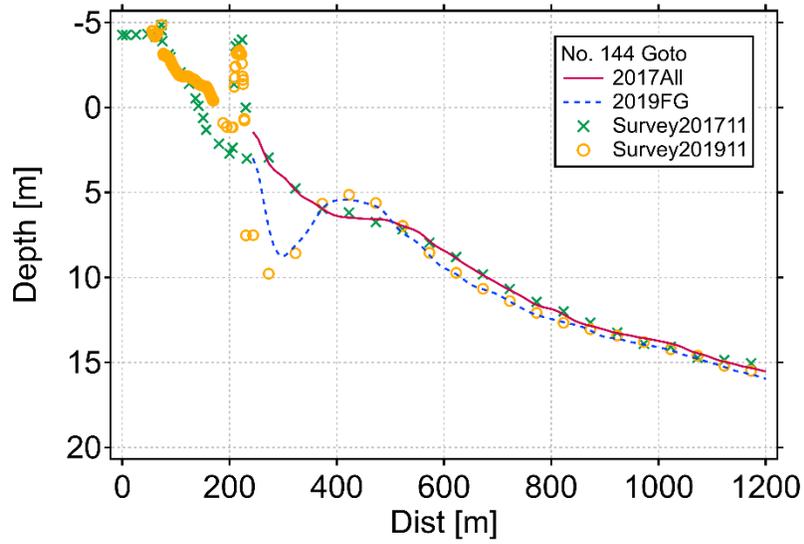


(a) 浅羽海岸

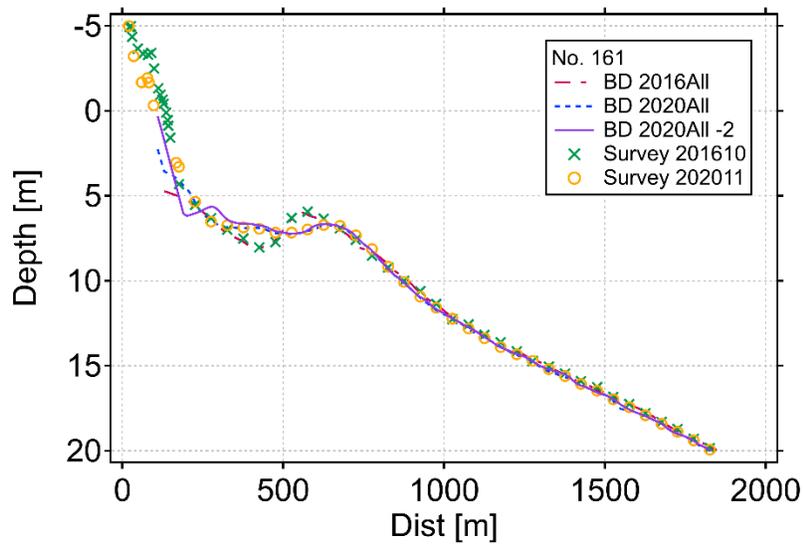


(b) 竜洋海岸

図 4-8 合成データと深浅測量成果の岸沖断面（天竜川東側）

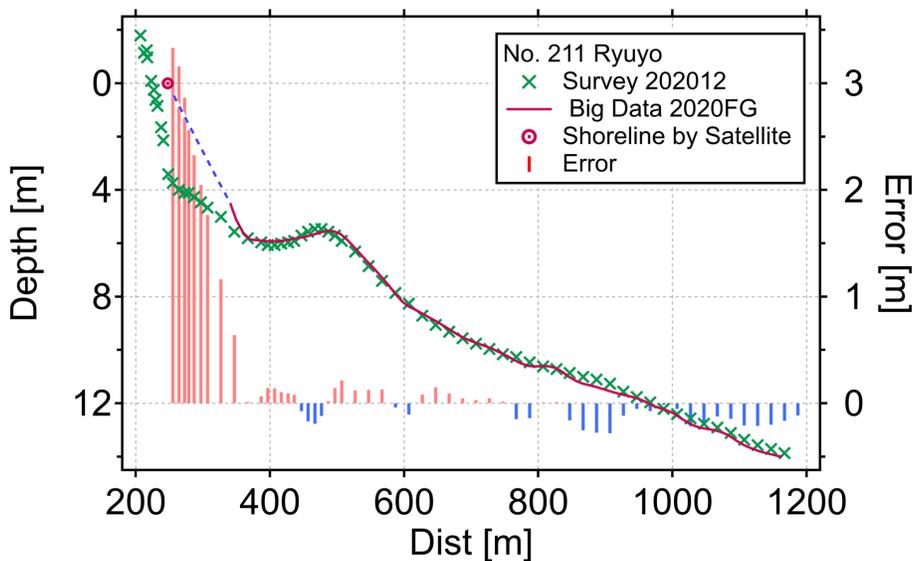


(a) 浜松五島海岸

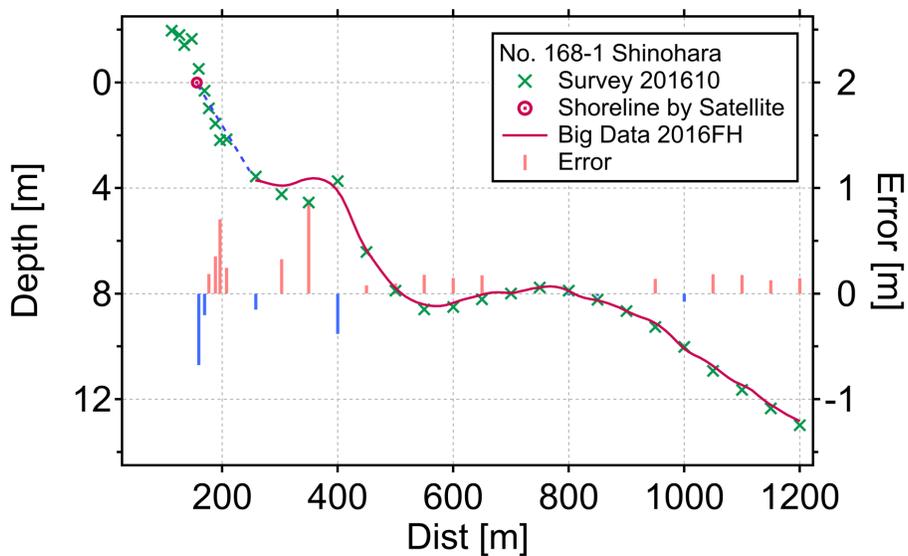


(b) 浜松篠原海岸

図 4-9 合成データと深浅測量成果の岸沖断面（天竜川西側）



(a) 竜洋海岸 (2020年冬季)



(b) 浜松篠原海岸 (2016年秋季)

図 4-10 海岸地形データセットと深浅測量による岸沖断面の比較 (縦棒両者を比較した水深差を示す)

表 4-4 合成データと深浅測量成果との比較

データ セット	比較した深浅測量成果	漁船データの 誤差[m]	内挿データの 誤差[m]
2016AE	201607 (浜松五島, 竜洋)	Mean = -0.05 SDev. = 0.33	Mean = -0.80 SDev. = 1.24
2016FH	201610 (浜松五島, 浜松篠原, 舞阪)	Mean = 0.00 SDev. = 0.81	Mean = -0.40 SDev. = 0.74
	201611 (浜名港, 竜洋)		
	201612 (浜松五島, 浜松篠原)		
	201701 (大須賀, 浜松五島, 浜松篠原)		
2017AF	201708 (浜松篠原)	Mean = 0.08 SDev. = 0.47	Mean = -0.61 SDev. = 0.61
2018FG	201811 (福田浅羽)	Mean = 0.11 SDev. = 0.59	Mean = -0.69 SDev. = 1.17
	201812 (浜松五島)		
	201901 (大須賀, 浜松篠原, 福田浅羽, 竜洋, 舞阪)		
	201911 (浜松五島, 竜洋)		
2019FG	201912 (浜名港, 浜松篠原, 舞阪)	Mean = -0.87 SDev. = 1.40	Mean = 0.38 SDev. = 1.05
	202001 (大須賀, 福田浅羽)		
	202011 (浜名港, 浜松五島, 浜松篠原, 舞阪)		
2020FG	202012 (竜洋)	Mean = 0.48 SDev. = 1.18	Mean = -0.43 SDev. = 0.77
	202101 (大須賀, 福田浅羽)		

深浅測量との比較の前提として、地形および汀線は日々、短い時間スケールでも大きく変動しており、短期的に 30~40 m の前進後退を繰り返すこともある。したがって、ここで内挿を試みたごく浅い領域、とりわけ砕波帯から汀線にかけての土砂移動が活発な範囲において合成データと測量成果を比較する際、スナップショット的な測量と時間平均的な合成データは性質が異なるという点を考慮して評価する必要がある。それらを踏まえても、やや大きめ（数十 cm～メートル）の誤差を含むデータであることは、深浅測量をそのまま本手法のデータに置き換えることは困難である。しかしながら、合成データの持つ広域性と高時間分解能（高頻度）であるメリットを活用し、短期的な海岸の地形変化や長期的なトレンドを見出すといった、管理上のスクリーニングや初期検討段階のデータとして活用することは十分可能であると考えられる。

5. 海岸管理事業へのハイブリッド地形データの適用

前章では、漁船ビッグデータと衛星画像による汀線データを合成した地形データは、主に内挿して空間的な水深データの充足を図ったエリアでは数十 cm からメートル程度の誤差が生じることを示した。一方で、誤差を有することを理解した上で、その広域性や高時間分解能である点にメリットを見出すことができれば、実務においてもこれらオープンデータ・ビッグデータによる地形情報の活用が可能となる。本章では、実務面での活用を検討するため、合成データと深淺測量成果を用いて土砂量変化の算出における比較を行った。

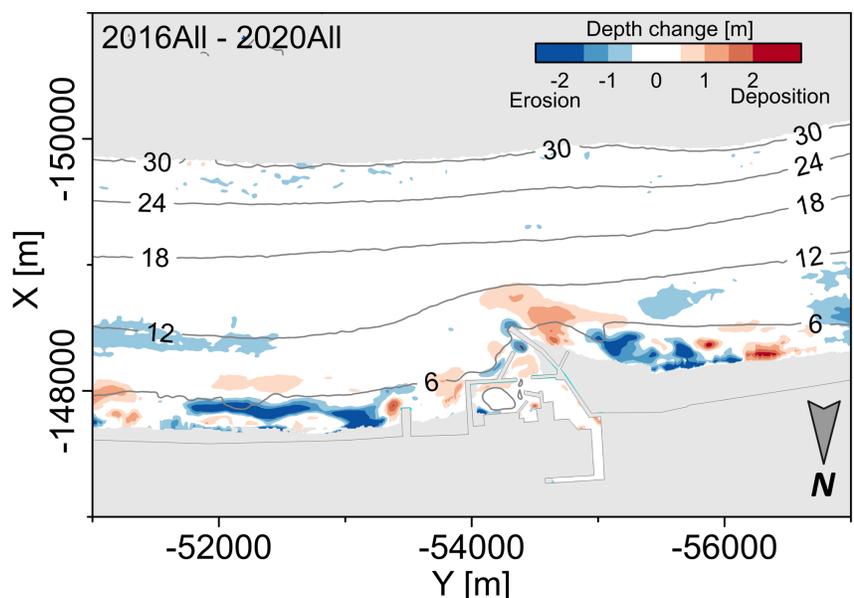
5.1 土砂収支の算出

合成データと深淺測量成果を用いて土砂量変化に関する比較を行った。福田漁港周辺から浅羽海岸にかけて、周辺東西の海岸の 2017 年（2016 年度）から 2021 年（2020 年度）にかけての土砂変化量の経時変化を計算する。

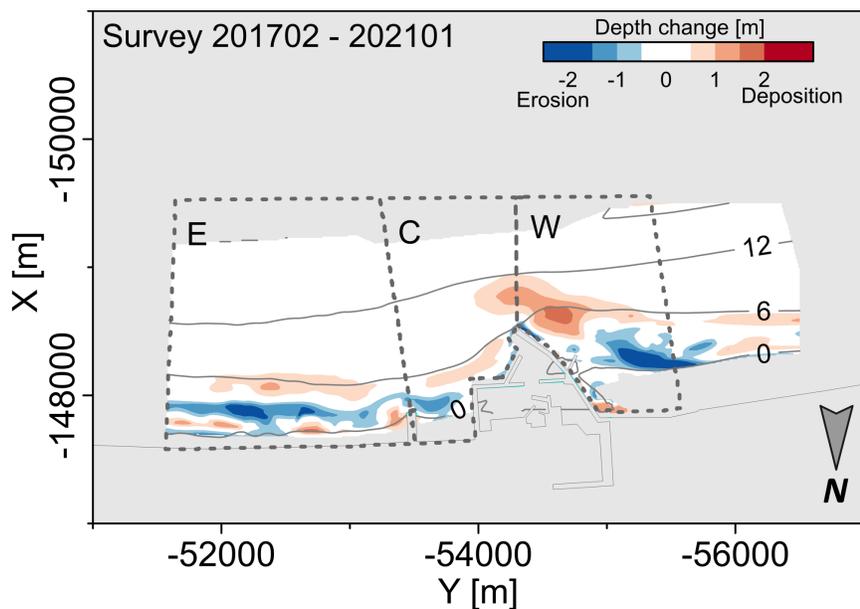
図 5-1 は 2016 年度から 2020 年度の水深変化をハイブリッド地形データおよび深淺測量成果より求めたものである。両図とも、灰色はデータの無い領域を表しており、± 0.5 m を超える水深変化に着色した。両データによる侵食・堆積の空間的なパターンはおよそ一致しており、提案手法で侵食域と堆積域を把握することが可能であることがわかる。

土砂変化量の計算において、合成データは主に海域をカバーする漁船データの水深方向の精度を考慮し、±0.5 m 未満の変化を水深差算出の計算から除外した。また、データセットには、年間を代表する値として長期（2016All, 2017All, 2018All, 2019All, 2020All）を用いて水深変化を計算し、台形則にて土砂量変化へと換算した。図 5-1(b)には土砂量変化を計算する領域設定（E, C, W の 3 領域）、を示している。これらのデータを用いて、水深の時間差分から E（面積：342.2 万 m²）、C（157.7 万 m²）、W（169.5 万 m²）の 3 領域について土量変化を算出した（表 5-1）。領域 E においては侵食を過大に、領域 C, W においては堆積を検知できておらず、特に E 領域での乖離が大きい。両データの特徴を水深差の頻度分布の観点から検討したところ、海岸地形データセットは侵食が生じた地点が多いことを確認した。ただし、これが系統的な誤差に起因するのか、あるいは、地形データ作成期間（1 年間平均データ）によるのか等の検討は今後の課題である。領域 E および W の土砂量変化の経時変化を確認したところ、特に東側領域において合成データが侵食傾向を過大に評価していることがわかった。2019 年には 300 万 m³ の差が生じていた。一方で図 5-1 に示したように地形変化パターンは両データともにおおよそ一致していることから、深淺測量で見られる浅羽海岸沖側の堆積部分が、合成データでは見られず、これが両者の土砂量に影響したのではないかと考えられる。また、深淺測量はある時間で地形状態を切り取るスナップショット的な情報であるのに対し、合成データは年間の時間平均的な

情報である。それぞれの地形情報の時間的な取り扱いの違いも、こういった計算結果に影響を及ぼしている可能性もあることがわかった。一方で、合成データには深浅測量と比較して短い期間で地形データを算出できるメリットがある。高波浪や出水といったインパクトの大きな気象・海象イベントによる地形変化を捉えることが可能である。大雨などによる出水が引き起こす海域への大規模な土砂供給といったイベントを捉えることには本データは向いており、梅雨



(a) ハイブリッド地形データ (2016AII - 2020AII)



(b) 深浅測量 (2017/02 - 2021/01)

図 5-1 海岸地形データセットと深浅測量に作成した水深変化マップの比較

表 5-1 2017 年から 2021 年にかけての土量変化

領域	ハイブリッド地形データによる 土砂変化量 [m ³]	深浅測量データによる 土砂変化量 [m ³]
E	-32.1 × 10 ⁴	-5.9 × 10 ⁴
C	-2.8 × 10 ⁴	+18.1 × 10 ⁴
W	+1.9 × 10 ⁴	+17.6 × 10 ⁴

などで天竜川には規模の大きな出水が生じており、これに伴う海域への土砂供給があったことが示唆される。このように、深浅測量レベルの精度はないものの、頻度や広域性といったメリットを活用することで、費用対効果に優れた地形データの利用方法が広がるものとする。

5.2 ハイブリッド地形データの活用に向けた検討

第 4 で示した結果より、本手法による地形データは詳細設計や詳細な精度を必要とする深浅測量の代わりに用いる程度の精度は有していない。また、構造物背後の地形は再現できないことや、構造物周辺は漁業活動の対象エリアから必然的に外れる（網の損傷や座礁・衝突等の安全のため）ことから、構造物周辺の地形モニタリングには活用できない。一方で、地形変化の傾向については定性的に示せるため、海浜断面の経年変化モニタリングには活用できると考えられる。断面形状では、スナップショット的に時間で切り取った地形形状を確認したが、水深の時間変化を捉えられるかも重要である。図 5-2 は浅羽海岸の側線 No. 144 沿いに設定した固定地点（水深帯の異なる 3 地点、水深 $z=2\text{ m}$, 5 m , 8 m 付近に設定、それぞれ Point A, Point B, Point C とした）の水深の経時変化を示したものである。図中の横線は合成データ（中期）から抽出したものであり、そのデータセットの時間幅を意味している。図より、主に Point B および Point C は深浅測量成果の経時変化を合成データで追従できていることがわかる。また、最も浅い地点である Point A も深浅測量による水深変化の長期的な傾向を捉えている。これらのことより、合成データを用いることで、水深の定性的な長期トレンドは十分に把握できるものと考えられ、侵食や堆積が長い時間スケールで進行しているような現象を、ハイブリッド地形データでモニタリングすることが可能である。

次に精度の面から実務での活用を検討する。表 5-2 は海岸の各種事業で用いられる測量手法を、設計用基本図作成および海岸侵食実態調査について測量成果に求められる精度の考え方を整理したものである³⁾。設計用基本図作成は海岸保全施設の出来形管理に係る。出来形管理では、施設の種類や構造物種類に応じて精度が求められる。ただし、工事前測量時から施工開始までの期間及び施工中にも地形変化が生じることを考えると、実態として求められる水深計測精度は短期的な地形変化よりも小さいことであると考えられ、ここで提案するハイブリッド地形データは、特に内挿範囲において精度が不足する。海岸侵食実態調査に求められる精度は、

河川供給土砂量等の境界条件や、実施・計画している対策の規模、沿岸漂砂量に代表される地形変化のスケールにより異なる。広域を扱う場合、微小な誤差が空間的に積分されて大きな度量算出の誤差につながる。少なくとも測深の平均誤差が地盤高変化量の半分以内に収まっていることが必要であると考えられ、この目的にはハイブリッド地形データは適用が困難であると考えられる。一方で、海岸侵食実態調査では定性的な評価から得られる情報も重要である。堆積または侵食の傾向把握や、沖合のバー地形の消失などの海岸侵食のサイン（沖合侵食）などの特徴的な地形変化が確認できると、侵食対策の必要性の判断に繋げることができる。

また、本手法による海底地形データは、深淺測量成果のように精度保証されておらず、誤差を含んだ値である。このことを踏まえたデータ解析を実施することが望ましい。具体的には、以下のようなことが考えられる。

- ・ 取得データからの地形データ作成の際に、ベイズ推定等真値が分布や誤差を持つことを前提とした解析手法を用いる。
- ・ 水深変化等の成果を示す際に、想定される誤差の幅を持たせた表現とする。
- ・ 地形変化の将来予測の際に、過去のデータが分布や誤差を持っていることを前提として補正を行うモデルを構築する。

これらの手法はいずれも、今後の研究テーマになりうる課題である。

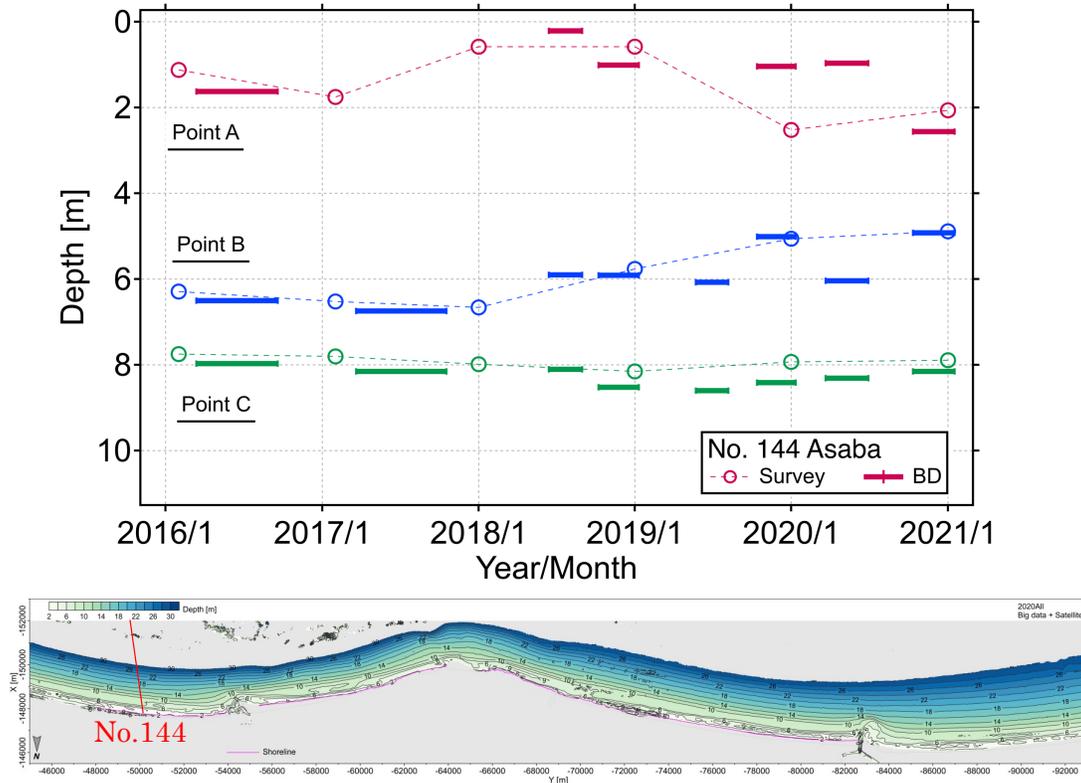


図 5-2 合成データと深淺測量成果の定点水深時系列比較（浅羽海岸）

表 5-2 海岸に関する測定の種類とその利用目的

目的	測定作業	測定の種別
計画策定	海岸地形図作成 計画用基本図作成	水準測定（海浜および 汀線測定）
海岸保全施設計画	設計用基本図作成	
モニタリング （海岸地形変化）	海岸侵食実態調査 被災実態調査	深浅測定

6. おわりに

本研究では、漁船の操業中に取得するビッグデータから浅海域の地形図を生成する技術に加え、衛星画像のオープンデータから汀線（海の水際線）を抽出する技術の2つの手法から生成される海域の地形データを組み合わせることで、費用対効果の高い海底地形データを生み出す方法を検討した。これらビッグデータやオープンデータで作られる地形データは、精度は一般的に深淺測量に用いられる手法と比べて劣るものの、低コストに広域（数十 km オーダー）の海岸の地形情報を高頻度（2ヶ月に1回以上）に取得できる技術である。この技術を静岡県遠州灘に展開し、各技術のアウトプットを融合するとともに、海岸管理における活用（土砂量の計算やその妥当性）や、高精度ではない地形データのユースシナリオを検討した。

第2章では、静岡県遠州灘の浅海域で活動するシラス漁船より、操業中の位置・水深・時刻を記録・収集したログを分析することで、水深およそ4 mより深い海底の地形データを生成することが可能であることを示した。操業中のログの量と地形情報の空間的な密度の関係から、ある程度の時間幅でデータセットを作成して海底地形データを生成することで、およそ0.2 mの誤差を有する地形情報を生成できる。これは、大きく見積もっても0.5 m程度の水深変化を分析・発見が可能である。さらに、無線通信（LTE）により記録データをオンラインで収集できるICTロガーの試作機を作成し、実海域において実証試験を実施してその性能を確かめた。

第3章では、無料でインターネット上に公開されている衛星画像データ（Sentinel-2）を用いて汀線データを抽出した。衛星画像データは、領域切り出しなど事前処理を実施した後、近赤外波長帯のデータ（B8：NIR，空間分解能10 m）を用いて汀線データを作成した。近赤外は日射光に含まれており、陸域では反射し、水域ではほぼ完全に吸収される特性を利用し、最尤分類法により陸域と水域を区別した。抽出した水際線に対して海浜勾配を考慮した潮位補正をおこない、汀線データを生成した。抽出した汀線位置が測量成果と比較して海側に位置しているケースがあるものの、同時期の汀線位置は概ね再現できた。なお、汀線位置は波浪条件によってはごく短期的に30 m程度変化する可能性があることに留意する必要がある。

第4章では、およそ4 mより深い海底の地形データを生成することができない漁船ビッグデータと、水中の地形情報を生成できない衛星画像による汀線データを組み合わせ、空間的に充足した海底地形情報を生成する手法について検討した。実務での活用を主眼に置き、よりコストを必要としない1次関数（直線近似）で汀線（水深0 m）と漁船データで取得した最も陸側の水深を岸沖方向に結ぶ簡便な内挿方法を用いた。このハイブリッド地形データと深淺測量データを比較したところ、内挿した領域では測量結果とはやや異なる地形データが作成されていた海岸もあったが、概ね浅い領域（< 3 m）の地形形状を合成データで比較的再現できていること

がわかった。定量的には、数十 cm からメートル程度の誤差が生じており、これらを踏まえた上でのデータの利活用が求められる。

第 5 章では、誤差を有するハイブリッド地形データを実務で活用するためのユースケースを検討した。ハイブリッド地形データと深浅測量成果より算出される浅海域での土砂量変化の比較を行った。水深の時間差分から土量変化を算出したところ、測量データと比較して大きく乖離する領域も見られた。この原因には、ハイブリッド地形データが侵食傾向を示す領域が多いためであったが、この原因については今後の検討が必要である。これが系統的な誤差に起因するのか、あるいは、地形データ作成期間（1 年間平均データ）によるのか等の検討は今後の課題である。その反面、侵食・堆積の空間的なパターンは両データセットでおよそ一致することから、提案手法による地形データから侵食域と堆積域を定性的に把握することが可能である。また、定点での水深の経時変化についても、深浅測量データと同様に把握が可能であることから、海岸侵食実態調査等における海岸の定性的な評価（堆積や侵食傾向の把握）や、沖合のバー地形の消失などの海岸侵食のサイン（沖合侵食など）、特徴的な地形変化のモニタリングといった活用方法が考えられる。

本手法で提案したハイブリッド地形データは、精度的な側面から今すぐに深浅測量を代替できるものではないが、データ同化やベイズ推定など誤差情報を活用する計算・解析手法の中で活用することが可能である。本手法で得られるデータの広域性と高い時間分解能は、数値シミュレーションの分野において誤差付きではあるけれども有用なデータと言えよう。一方で、漁船ビッグデータや衛星画像による汀線抽出手法で得られる地形データの精度向上も課題であり、今後も継続的に研究に取り組みたい。

謝辞

本研究に助成いただいた一般財団法人日本建設情報総合センターに感謝の意を表します。研究の遂行にあたり、漁船の操業中データの収集には浜名漁業協同組合および遠州漁業協同組合に協力いただいた。また、海岸・海底地形の深淺測量データおよび竜洋波浪観測所での波浪データは静岡県より提供いただき、LTE 通信型のデータロガーの運用試験についてもご協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡辺拓巳, 青木伸一, 河村雅彦: シラス漁船を利用した広域・高頻度海底地形図の作成とその応用に関する研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 661-665, 2008.
- 2) 第 24 回 遠州灘沿岸侵食対策検討委員会, p.16, https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/029/378/210325_kaigil.pdf, (最終アクセス日: 2022年3月1日).
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川砂防技術基準 調査編, 第 22 章 第 2 節 -2, 2016