

海洋情報部におけるリモートセンシングを用いた測深技術への取り組み[†]

小川 遥^{*1}, 松本良浩^{*2}, 山野寛之^{*3}

JHOD's efforts toward the practical application of remote sensing technologies for depth measurement[†]

Haruka OGAWA^{*1}, Yoshihiro MATSUMOTO^{*2}, and Hiroyuki YAMANO^{*3}

Abstract

Since the introduction of the first airborne LIDAR system in 2003, the Japan Hydrographic and Oceanographic Department (JHOD) has been operating airborne LIDAR bathymetry (ALB) in shallow waters where multibeam echosounding by survey boats would be difficult or inefficient. In 2020, the JHOD is to deploy its third airborne LIDAR system together with an aircraft exclusively engaged in hydrographic surveys, which is expected to improve the efficiency of ALB. Since 2014, the JHOD has been conducting research on Satellite Derived Bathymetry (SDB), another remote sensing technology for depth measurement, focusing on its application to hydrographic services. SDB is a technology designed to extract water depth information from visible satellite images, and its cost effectiveness and rapidity has been attracting hydrographic offices and IHO in recent days. This review outlines the JHOD's efforts at designing a practical application of remote sensing technologies for depth measurement, namely ALB and SDB.

1 はじめに

リモートセンシングとは、上空から陸上・海上の対象物を観測する技術を呼ぶことが多く、上空のプラットフォームに搭載したセンサを使用してある帯域の電磁波を観測するものが一般的である。プラットフォームとセンサの組み合わせと解析手法次第で様々な情報を得ることができるため、都市開発、防災・減災、植生調査、経済活動や水質のモニタリング等の幅広い分野で活用されている。プラットフォームとは、センサを搭載す

る機器のことであり、人工衛星や航空機が代表的である。また、使用されるセンサは目的に応じて多様であり、可視光から赤外域で地表面の視覚的情報が得られる光学センサ、地表の変化が昼夜問わず観測可能な合成開口レーダ (SAR)、降水・降雪の様子が分かるマイクロ波放射計/降雨レーダ、地表温度や海水温が分かる熱赤外センサなどが挙げられる。海域においては、リモートセンシングは水深や海面水温、海上風、海面高度、海水の状況把握などに使用されている。特に、水深取

[†] Received September 18, 2020; Accepted November 11, 2020

* 1 技術・国際課 海洋研究室 Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

* 2 第九管区海上保安本部 9th Regional Coast Guard Headquarters.

* 3 沿岸調査課 Coastal Surveys Division

得に関しては衛星高度計を利用し衛星重力異常値から水深を求める技術や SfM (Structure from Motion) 多視点ステレオ測量の原理を応用した技術, 衛星画像推定水深 (SDB: Satellite Derived Bathymetry) や航空レーザ測量等が知られている。

海洋情報部においては, 海洋速報や海水速報の作成, 火山の監視など様々な用途でリモートセンシングが活用されている。本稿では, その中でも水深データを取得する技術である航空レーザ測量と SDB に関する近年の取り組みについて概説したい。

2 航空レーザ測量

2.1 序論

航空レーザ測量は航空機に搭載したレーザ測距装置を使用して, 発射したレーザ光が対象物で反射して返ってくるまでの時間から距離を計測する測量方法であり, 電線の保守管理や災害発生時の迅速な地形変化の把握をはじめとした防災や砂防, 都市計画, 河川, 水路分野など幅広いフィールドで使用されている計測技術である。航空レーザ測量は近赤外線による陸域の測量だけでなく, グリーンレーザ光による水域の測量にも利用されている。以下この章でいう「航空レーザ測量」とは, グリーンレーザ光を使用し, 水路測量において沿岸域の地形を海図基準面を高さの基準として陸上から海底までシームレスに測量する技術を指す。

一般に, 水路測量の多くはマルチビーム測深機を用いて行われるが, 浅海域ではスワ幅が狭くなるため測量効率が低下し, 測量船に座礁の危険も伴う。一方で航空レーザ測量は, 航空機を用いて上空から測量することにより, スワ幅の減少が少なく, 広範囲の浅海域の測量を, 短時間かつ迅速に行うことが可能である。そのため, 海底地形図作成や海岸保全の基礎データ収集をはじめとした海底地形データ整備等に幅広く活用されている。航空レーザ測量の歴史は 1960 年代に潜水艦や機雷探知の軍事目的で開発されたことが始まり

であるが, 今や軍事目的だけでなく商業や水路業務目的でも使用されており, 日々開発が進められている (矢島, 2004)。特に水路業務関係では, 1991 年に航空レーザ測量の成果を使用した海図がカナダで作成されたことをはじめとして, 現在はカナダやアメリカ, オーストラリア等で航空レーザ測量が実施されている。

そのような背景を受けて, 海洋情報部では, 浅海域における安全で効率的な測量のために 2003 年から航空レーザ測量のシステムを導入し, 運用を行ってきた。この章では, 各システムと運用, 活用事例を概説する。

2.2 海洋情報部における取り組み

2.2.1 航空レーザ測量システムと運用

海洋情報部はこれまでに 3 つの航空レーザ測量システムを導入している。それぞれのシステムの測定最大深度は透明度に依存し, 測量精度は国際水路測量基準 IHO S-44 第 5 版 (IHO, 2008) の 1b 級を満たす。

電子海図の普及や GIS の活用により極浅海域 (本稿においては測量船の航行が困難と考えられる水深 5 m 程度以浅の海域を呼ぶ) の水深データの充実が求められてきたため, 海洋情報部は 2003 年に Optech Inc. (現 Teledyne Optech Inc.) 製の SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Laser Survey) 1000 (以下 SHOALS と呼ぶ。) を導入した。SHOALS の主な仕様を Fig. 1 に示す。その後, 航空レーザ測深機の性能向上と東日本大震災による詳細な極浅海域の水深データ需要の増加により, 2003 年から Optech Inc. 製の CZMIL (Coastal Zone Mapping and Image Lidar) を導入し, 翌年から CZMIL の運用がはじまった (Fig. 2)。CZMIL は SHOALS と比較して, 測量密度やデジタルカメラの性能向上, レーザスキャンパターンの変更により, 測深能力が強化されている。また, 使用する機体を大型にしたことで, 1 フライトあたりの測量時間が飛躍的に増加し, 測量効率が向上した。さらに, 基地から遠くのエリアの測量を行うことも可能と



Fig. 1. System overview and major specifications of SHOALS.

図 1. SHOALS の概要と運用の様子。



Fig. 3. System overview of Nova.

図 3. Nova の概要。

Table 1. Comparison of the specifications between SHOALS, CZMIL, and Nova (based on Kawai (2015)).

表 1. SHOALS と CZMIL, Nova の性能比較表 (河合 (2015) による).

	SHOALS	CZMIL	Nova
Total weight	200 kg	500 kg	300 kg
Aircraft	Beechcraft King Air 350	Bombardier DHC-8-Q300	Beechcraft King Air 350
Laser rate	1,000 shot/s	10,000 shot/s	10,000 shot/s
Receiver	Refracting telescope (10 cm diameter)	Refracting telescope (20 cm diameter)	Refracting telescope (20 cm diameter)
Scan pattern	Circular arc	Circle	Circle
Sounding density	5 x 5 m	2 x 2 m	2 x 2 m
Topographical density	5 x 5 m	0.7 x 0.7 m	0.7 x 0.7 m
Depth range	2 x Secchi depth	2 x Secchi depth	2 x Secchi depth
Swath width	230 m	298 m	298 m
Data volume	1.5 GB/h	350 GB/h	350 GB/h



Fig. 2. System overview and major specifications of CZMIL.

図 2. CZMIL の概要と運用の様子。

なった。現在は性能改良及び小型・軽量化が計られた CZMIL Nova (以下 Nova と呼ぶ) を 2020 年に導入し、運用へ向け調整中である。Fig. 3 に Nova の搭載機体、システムの仕様を示す。これまで SHOALS と CZMIL は主に警備救難業務に従事する機体に搭載して運用してきたため、年間測量日数が限られており、測量毎に航空レーザ測量システムの搭載・撤去作業が必要であった。一方、Nova を搭載する予定の機体は航空レーザ測量を行うための測量専用機であるため、恒久的にシステムを搭載することができる。これにより搭載・撤去作業に伴う機器の損傷やケーブルの接続

不良を回避することができ、より効率的かつ安全に航空レーザ測量が行えることが期待される。なお、Nova の運用開始後は Nova をメインに沿岸域の測量を行う予定であるが、遠方の離島での緊急測量等に対応するため、当面は現行の CZMIL を保管し搭載機の装備も維持したままとしている。それぞれのシステムの性能比較表を Table 1 に示す。

2.2.2 事例紹介

(a) 東北地方太平洋沖地震発生後の対応

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の発生をうけて、震災後の広範囲にわたる極浅海域の海底地形や被災状況を把握するために航空レーザ測量を用いた事例をとりあげる。

海洋情報部は、被災地の海図の最新維持のため

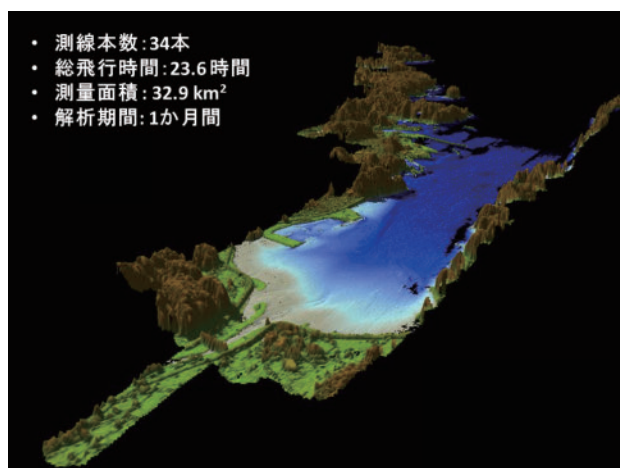


Fig. 4. Survey data at Miyako Bay obtained by SHOALS.

図 4. SHOALS によって取得された岩手県宮古湾の測量成果。

に国土交通省水管理・国土保全局（以下、水国局と呼ぶ）と共同で、2011年6月岩手県の宮古湾と宮城県仙台湾において、航空レーザ測量を実施した。Fig. 4は、SHOALSによって取得された岩手県宮古湾の鳥瞰図である。

通常航空レーザ測量は高度400mで運用するが、宮古湾は600m級の山に囲われていたため、電線及び煙筒、山への衝突を回避すべく様々な運用条件を変更して測量を行った。また、事前調査による透明度は4m程度であったことから、この海域での測定最大深度は8mまでと予想していたが、測量前までに雨がほとんど降らなかったことから、当日の透明度は高く、水深約15mまでデータが取得できた。

この測量によって、当初の目的である海底地形や震災における被災状況を把握ができたほか、測量結果は水国局の津波シミュレーションや水産庁の海岸災害復旧における基礎データとしても有効活用された。

(b) 波照間島周辺の事例

沖縄県波照間島周辺の海域は、透明度は約30mと高く、さらに底質がサンゴ礁であり反射率が高いことから、航空レーザ測量には有利な環境である。海洋情報部は2015年2月に領海の基線

の再測量と海図の最新維持を目的として、沖縄県波照間島周辺において航空レーザ測量を行った。

波照間島周辺は、サンゴ礁が密集しており、暗岩や洗岩が点在している海域である。そのため、測量船による測量は座礁の可能性があり危険である。さらに、測量範囲が広く全体的に水深が浅い海域であったことから、効率的に測量が実施できる航空レーザ測量を行った。Fig. 5 (a)に、この測量によって得られた波照間島周辺の海底地形図を示す。Fig. 5 (a)より、波照間島周辺には広範囲にわたってサンゴ礁の複雑な海底地形があることが分かる。

この測量ではCZMILの性能限界である水深50m付近までのデータを取得することに成功し、白波によってレーザ光の透過が妨げられ図では島の周囲を囲むように黒くみえる砕波帯を除いて、陸から海までシームレスな地形を捉えることができた。なお、砕波帯については潮高改正により干出域に含まれるので、海図水深として利用する上で問題はない。Fig. 5 (b)に波照間島北西沖のラグーン状の地形を、Fig. 5 (c)に詳細なサンゴ礁の分布している様子を示す。なお、これらはFig. 5 (a)を拡大した図である。

(c) G7伊勢志摩サミット2016における対応

この事例は、マルチビーム測量と航空レーザ測量という異なる測量手法を組み合わせることで、各測量手法の欠点を補完しあい、より良い成果を得ることができた事例である。

2016年5月、三重県でG7伊勢志摩サミット2016が開催され、海上保安庁はサミットの安全対策の一部として、会場周辺の海上警備にあたった。海洋情報部は、海上警備の際に必要な参考図の作成を行うため、第四管区海洋情報部と協力して、航空レーザ測量とマルチビーム測量を行った。Fig. 6は、CZMILによって取得された測量成果の一部である三重県志摩市英虞湾の海底地形図である。カラーにより水深及び標高を表現しており、詳細なリアス式海岸の地形が取得できたことが分かる。

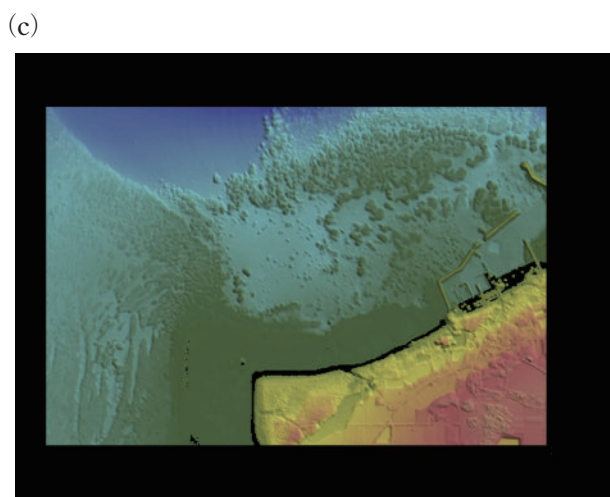
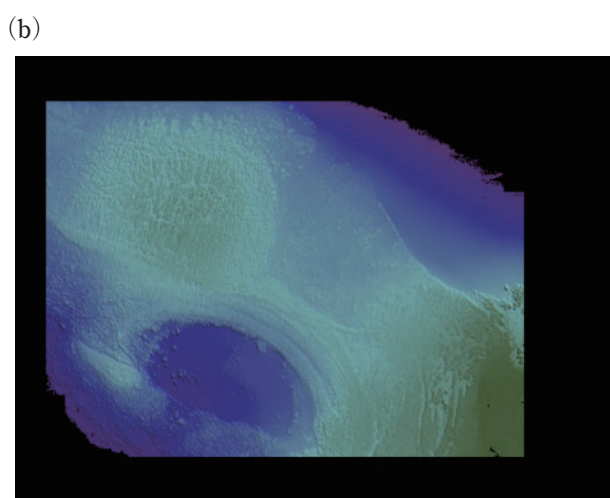
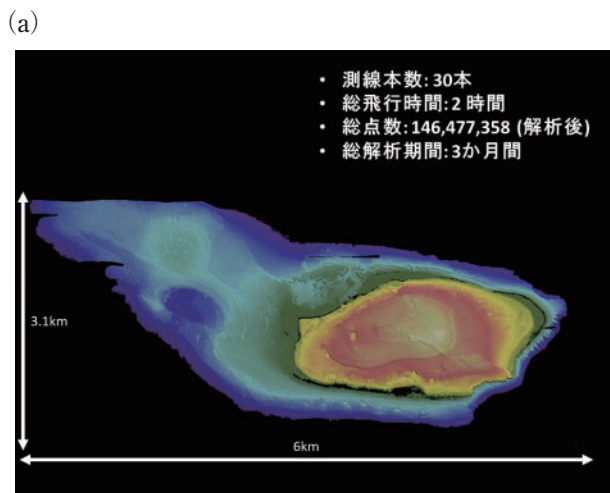


Fig. 5. (a) Survey data around Hateruma Island obtained by CZMIL. (b) Magnified view of (a), showing the northwest offing of Hateruma Island. (c) Magnified view of (a), showing the area off the Hateruma fishing port.

図 5. (a) CZMIL によって取得された沖縄県波照間島周辺の海底地形. (b) (a) の拡大図 (波照間島の北西沖). (c) (a) の拡大図 (波照間漁港沖).

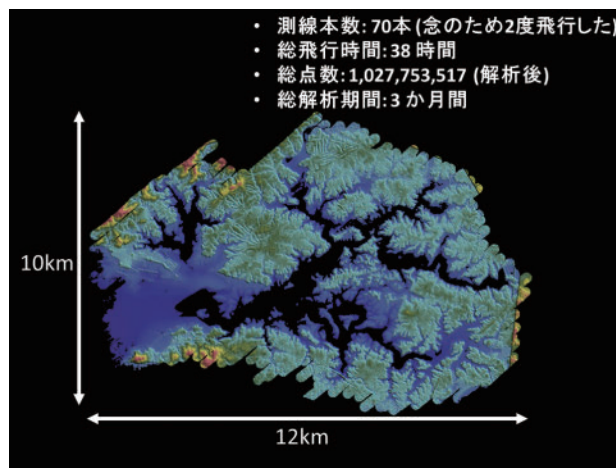


Fig. 6. Bathymetry at Ago Bay in Ise-Shima obtained by CZMIL.

図 6. CZMIL によって取得された伊勢志摩の英虞湾の海底地形.

航空レーザ測量は英虞湾のように測量船による測量ができない島間、岩礁地帯、入り江などの浅海域のデータを広範囲に取得することに効果的であった。また、英虞湾は透明度が高いだけでなく、白波が立ちにくく、航空レーザ測量の特性を生かしやすい海域であったことも、良質なデータの取得につながった。得られた測量成果は、海上保安庁の海上警備の他、地方自治体の沿岸警備等の運営にも貢献した。

(d) 西之島周辺の事例

西之島は東京の南方約 1000 km に位置している火山島である。2013 年から 2015 年にかけて、激しい火山活動が起き、島全体に溶岩流が広がった。この事例は、陸地が拡大し海岸線と海底地形が大きく変化したことから、海図の最新維持のための測量を行ったものである。

海洋情報部は、2016 年 10 月と 11 月に航空レーザ測量とマルチビーム測量を行った。機体の基地は西之島から 1000 km ほど離れ、近くに着陸・給油可能な飛行場がないため、現地における測量時間が 1 日あたり実質 1 時間強で 2 日間のみと非常に短時間で測量を行う必要があった。この調査によって得られた、浅水域の火山周辺における海底地形図を Fig. 7 に示す。

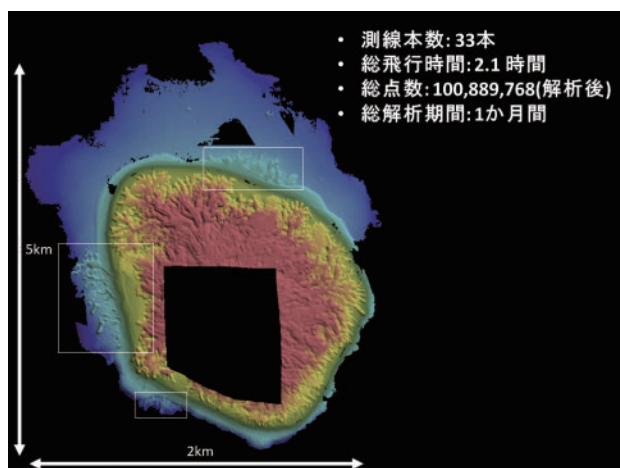


Fig. 7. Bathymetry around Nishinoshima Island obtained by CZMIL.

図7. CZMILによって取得された西之島周辺の海底地形.

Fig. 7の白線で囲んだ海域では、以前航空写真によって判明した1973年から1974年の噴火の際の溶岩流の痕跡を確認することができた(小野・他, 2018)。また、この測量を行った時、西之島の海岸線周辺では火山活動に伴う変色水が存在していた。航空レーザ測量の測定最大深度は透明度に依存し、一般的に変色水が分布する海域は透明度が悪いため、データ取得は困難になると予想されていたが、良質なデータが取得できた。CZMILによって取得されたデータは、測量船と無人測量艇によって得られたマルチビーム測量の成果と組み合わせて、海図の作成に使用された。なお、この航空レーザ測量の成果により2017年に海図の改補を行ったが(航海情報課, 2018)、西之島はその後噴火と休止を繰り返しており、2020年6月現在も火山活動が活発で島がいくつもの方向に拡大し続けている。

2.3 まとめと今後の動向

海洋情報部はこれまで17年間にわたり2台の航空レーザ測深システムを運用して航空レーザ測量を実施してきた。航空機と航空レーザ測深システムを保有し、運用・解析までを直営で行っている水路機関は世界でも珍しいが、導入以来自ら試行錯誤を繰り返してきた。前節で述べた事例はい

ずれも極浅海域、あるいは自然災害といった測量船の使用が困難な要素を持っており、航空機を利用した安全で効率的な業務プロセスとして、水路測量における航空レーザ測量は確立されたといえよう。これまでに蓄積してきた貴重な知識・経験を活かし、今後はNovaの本格的な運用を通じて、領海やEEZの外縁の根拠となる基礎データの収集等、海洋権益確保のための調査に努めていくこととなろう。

昨今、航空レーザ測深システムの技術開発が盛んに行われ、小型・軽量化したシステムが多数商品化されており、民間の航空測量企業にも導入が進んできた。こうした企業が河川管理のための横断測量に代わる調査として地方整備局から航空レーザ測量を受注する例が増えている。また、回転翼や固定翼の航空機のみならず、ドローン搭載型の航空レーザ測深システムも既に商品化されている。今後の技術開発の進展と利活用シーンの拡大を注視したい。

3 SDB

3.1 序論

可視光領域の航空写真や衛星画像から水深情報を抽出する技術の研究は、サンゴ、海草、藻場などの底質のマッピングやモニタリングの分野において1970年代から行われてきた(佐川・他, 2019)。近年各国の水路機関や国際水路機関(IHO: International Hydrographic Organization)から、特に人工衛星搭載の光学センサで取得される衛星画像から水深情報を抽出する技術およびそれにより得られる海底地形データへの注目が高まっており、SDBと呼ばれて利用が広がりつつある。IHOと政府間海洋学委員会(IOC: Intergovernmental Oceanographic Commission)との共同プロジェクトである大洋水深総図(GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans)が公開している海底地形データ作成マニュアルIHO-IOC GEBCO Cook Book(IHO and IOC, 2018)にも沿岸域の概査の手法として2013年より解析方法が収録されるようになった。SDB

は日本語では衛星画像推定水深と訳されている(松本, 2015; 日本水路協会, 2017)。

SDBは、人工衛星に搭載されている光学センサーによって計測された可視光領域のマルチスペクトル画像を使用して、光は水中において指数関数的に減衰するという基本理論に基づき、水深を算出したものである。衛星画像の一部の画素に対応する水深の実測値を学習用水深データとして与え、衛星画像全体の各画素に対応する水深を回帰分析によって求める経験的手法が多く使用されているが(例えば Lyzenga, 1978; Benny and Dawson, 1983; Stumpf et al., 2003)、他方で実測値を用いずに光の放射伝達の物理モデルに基づきインバージョン法で水深を導出する(Lee et al., 1998, 1999, 2001)手法も用いられている。経験的手法では必要な可視光領域のバンド数は比較的少なく、例えば Benny and Dawson (1983)は1バンド、Stumpf et al. (2003)は2バンドを使用して解析するものである、各手法が仮定する適用環境が成り立たない場合にはよい精度が得られない場合がある。他方インバージョン法は、経験的手法よりも汎用性が高い一方、原理的に多数のバンドを必要とし、例えば Lee et al. (1998, 1999)は5バンド以上を必要とする。いずれのアプローチでも、光の波長帯によって水中での減衰率が異なる性質を水深推定に利用している。また、経験的手法であっても、近年ではバンド数のより多い画像を解析することによって、推定精度の向上を図るものもある(例えば Lyzenga et al., 2006)。

フランス海軍水路部(SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine)は1990年代から海外県・海外領土の島嶼部の海図作成にSDBを活用してきており、得られた水深の精度を評価している。SHOM(2012)によると、水平位置の精度は衛星画像の解像度と陸上基準点の密度に依存し、鉛直方向の不確かさは水深0-5mにおいて最大30%程度、水深5-20mの水深帯で平均10%程度である。また、推定可能な深度はSHOMの管轄海域において20m程度、良い場合で30m程度であった。このよう

にSDBは、推定精度や推定可能な深度の点で、マルチビーム測量や航空レーザ測量とは特性が異なる水深取得技術であることを理解しなければならない。

浅海域において測量の多くはマルチビーム音響測深機を用いて行われているが、測深機や測量船にコストがかかり、特に水深5m程度以浅といった極浅海域では測深幅が狭いため測量効率が悪く、時には座礁の危険も伴う。一方で航空レーザ測量は、極浅海域においても効率が高く安全に実施できる調査技術であることは前章で述べたとおりであるが、航空機や測深システムを導入し維持するためのコストはやはり大きく、航空機の運用そのものが大がかりであるという難点もある。また、測定最大深度の点でマルチビーム測深よりも制約があり、当部の航空レーザ測深システムではいずれも透明度の2倍までである(Table 1)。そのような中で、SDBはマルチビーム測量のような正規の測量に比べ精度は劣り、推定可能な深度の制約もあるが、浅海域において面的に短時間、低コストで特別なインフラを必要とせず海底地形が把握できる長所がある。SHOM(2012)の試算によれば、各調査技術測量手法の面積あたりのコストは、マルチビーム測量と航空レーザ測量がそれぞれ€1,000-2,400/km²、€1,500-2,000/km²とおおよそ同水準であるのに対し、SDBは€25-45/km²であり、2桁程度低コストであるという。このため、SDBは使用目的によっては費用対効果の高い調査技術となり得る。例えば、全く海底地形の把握がなされていない発展途上国における海底地形図の整備や頻繁に水路測量が困難な海域での水深変化の把握などである。上記のようにSHOMは既に100図以上の島嶼における海図にSDBを参考情報として段彩表示してきたほか、英国水路部(UKHO: United Kingdom Hydrographic Office)においては2015年にSDBの成果を採用した海図(UKHO, 2015)を刊行するなど、SDBの海図作成への活用が広がりつつある。

IHOは、近年各国政府が保有する測量船の数は約30%減少している一方で、世界には未測量

海域や何十年も再測量が行われていない海域が多数存在している状況であると指摘し、そうした測量データの空白を埋める有効な手法の一つとしてSDBの利用が適当な場合には、利用を推進するという勧告を行った (International Hydrographic Bureau (IHB), 2013). これを受けて、IHOのいくつかの作業部会において、SDBに関する測量基準や海図作成に関する基準策定についても議論がなされている (UKHO, 2015). また海図作成のほか、浅海域の高密度な海底地形データを必要とする浸水シミュレーションにもSDBは有望であり、高波・高潮に対して脆弱な島嶼国のハザードマップの作製等でSDBが活用されている (例えば福田, 2018).

日本では、全・他 (1994) や神野・他 (2008) 等により人工衛星で取得される衛星画像を使用して水深を推定する技術の研究が行われてきた。以下の節では、海洋情報業務への利用を主眼としたSDBに関する研究や活用事例を中心として概説する。

3.2 海洋情報部におけるSDBに関する取り組み

3.2.1 海洋情報業務への利用に向けた研究

海洋情報部は、平成26 (2014) 年度から平成28 (2016) 年度の3年間にわたって (一財) 日本水路協会および (一財) リモート・センシング技術センター (RESTEC) と共同研究「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」を行った。国内外におけるSDBの研究状況や活用事例を調査し、我が国の特性を踏まえたSDBの解析手法を開発・検証し、さらにその解析手法を実装した解析ツール「BathymetryMapper 2.0」及びマニュアルの作成を行った (日本水路協会, 2017). Fig. 8にこの手法によるSDB作成処理フローを示す。このソフトウェアは、衛星画像の一部に対応する海図または実測した水深値を学習用水深データとして使用し、衛星画像のピクセル毎の輝度と学習水深データの相関関係式を回帰分析によって導く Lyzenga (1978) の方法をベースに開発されたものである。

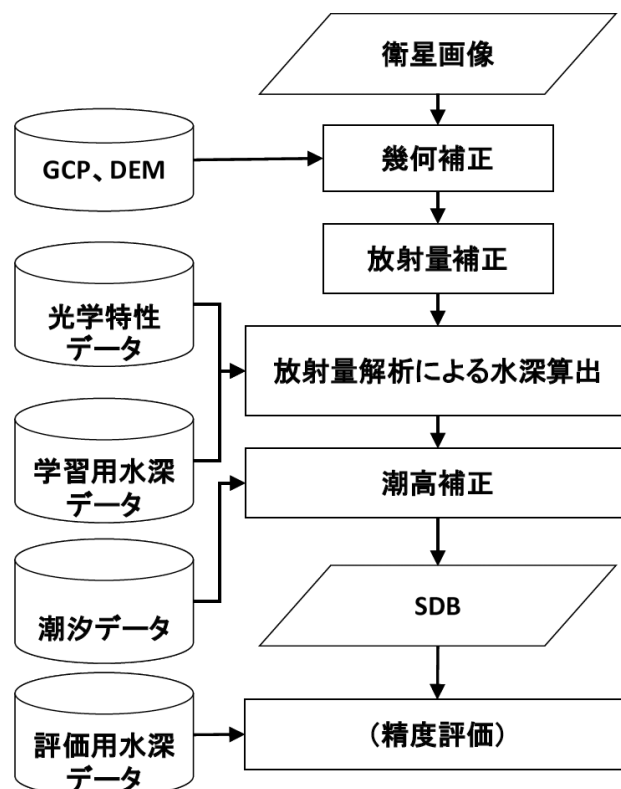


Fig. 8. Flow chart for producing SDB (JHA, 2017).

図 8. 日本水路協会 (2017) による SDB の作成フロー。

松本 (2018) は、Landsat 8 の衛星画像を使用し、学習水深データがどれくらい離れた場所でも有効か検証を行った。本来、SDB 解析のためには対象領域内に様々な水深、底質、水質などの条件を代表できる学習用水深データがあることが望ましいが、実際の運用にあたってこうした理想的なデータを用意することは困難であることから、対象領域から離れた学習用水深データの有効範囲や条件を把握しようとしたものである。

また、熱海・他 (2019) は、日本海域におけるSDBの活用方法の一つとして、SDBをChart Adequacy (CA) の一要素として使用できないか検討するため、河口域や湾口のような海底地形変化のモニタリングが重要な海域で海底地形の経年変化を追うことを試行的に行った。CAとは、海図に記載されている水深や海底地形、海岸線など航行船舶の安全のために必要な情報の有効性を表す。CAを適切に評価することは、マンパワーや測量機器、コストなど限られたリソースの中で、海図改訂のために必要な再測量の優先順位や緊急

性を判断するための重要な要素である。その結果、学習用水深データとして実測データではなく海図水深を使用しても SDB で海底の把握をすることができることを示し、測量船の航行が困難な極浅海でも水深を算出できる SDB は CA の評価の要素として使用できる可能性が高いことを示唆した。

3.2.2 波照間島周辺の解析事例

沖縄県の波照間島周辺は海水の透明度が特に高く、SDB の解析にとって有利であることが事前に予想され、技術開発のために実験的に調査を行うにも好適である。

Sagawa et al. (2016) は 3.2.1 節に述べた共同研究の一環で沖縄県波照間島周辺の SDB を作成している。2013 年 5 月 18 日に撮影された WorldView-2 の衛星画像を使用し、学習用水深データとして 2015 年 2 月に航空レーザ測量(2.2.2 節 (b)) で取得した水深データの一部を使用している。解析に使用した衛星画像を Fig. 9 (a) に、得られた SDB の解析結果を Fig. 9 (b) に示す。日本水路協会 (2017) で開発した解析手法を用いており、同手法で推定可能な最大水深を調査するという実験としては、水深 24 m まで解析可能であったという結果を得ている。この海域では海洋情報部が実施した航空レーザ測量によって得られた水深データが広範囲にわたって面的に利用できたため、水深推定可能な最大水深の調査のほか、学習データの抽出方法の検討や底質の影響の調査、解析結果の精度評価を行う上で好適であった。

3.2.3 鎌倉沖の解析事例

次に、透明度が特別に高いわけではない一般的な日本の海域での解析事例として、神奈川県鎌倉沖の事例を紹介する。解析に使用した衛星画像を Fig. 10 (a) に、BathymetryMapper 2.0 を使用し得られた SDB の解析結果を Fig. 10 (b) に示す (日本水路協会, 2017)。解析限界は 9 m 程度であり、水深 1-2 m 前後の不確かさがある結果で

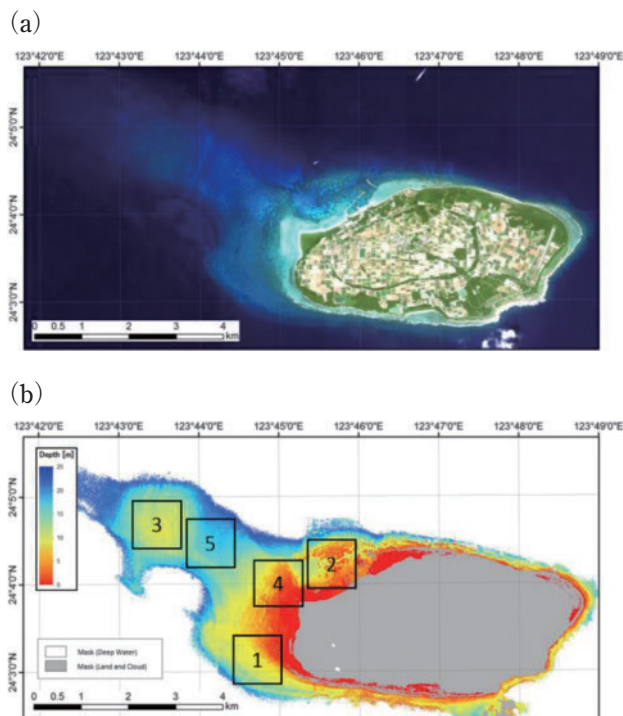


Fig. 9. (a) WorldView-2 satellite image used for SDB analysis around Hateruma Island, obtained on 18 May 2013. (b) SDB around Hateruma Island (Sagawa et al., 2016).

図 9. (a) SDB に使用した波照間島周辺の WorldView-2 衛星画像 (2013 年 5 月 18 日撮影)。(b) 波照間島周辺の SDB (Sagawa et al., 2016)。

あった。この結果は、ごく一般的な日本国内の海域で極浅海域の海底地形の概略を把握できる可能性を示唆するものである。

3.2.4 海洋情報業務への活用に向けた事例

小川・他 (2020) は、SDB の活用事例の一つとして、IHO-IOC GEBCO Cook Book (前述) に記載されている CA の評価手法 Nautical Chart Adequacy Evaluation (NCAE) 方式 (Klemm et al., 2016) の具体的方法を紹介の上、日本の沿岸海域でもその方法を試行し、水路測量の優先順位を可視化する一つのツールとして有用であることを示した。Klemm et al. (2016) は CA の指標を数値化するために、GIS ソフトウェアを使用し、参照水深、船舶交通量、水深の品質情報、水深変化 (海図記載水深と SDB の差分) の 4 要素でレイヤー演算を行う NCAE 方式を提唱した。小川

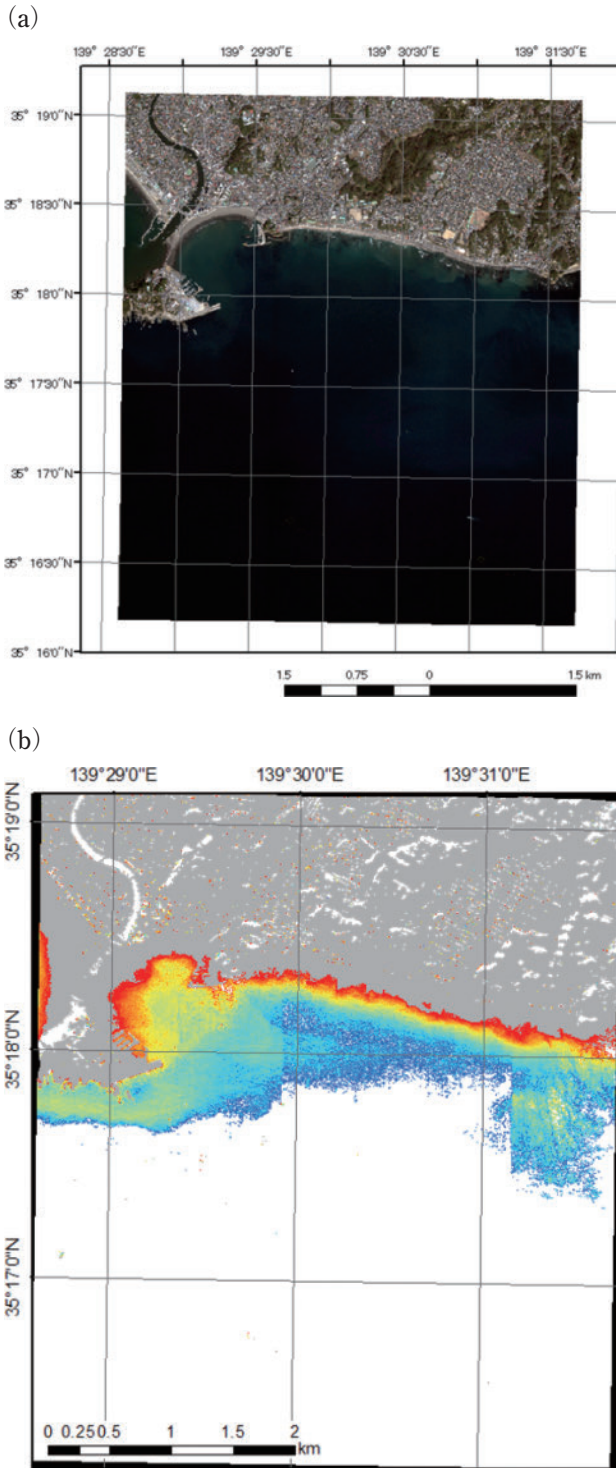


Fig. 10. (a) WorldView-2 satellite image used for SDB off Kamakura, obtained on 28 December 2013. (b) SDB off Kamakura (JHA, 2017).
 図 10. (a) SDB に使用した鎌倉沖周辺の衛星画像 (2013 年 12 月 28 日撮影). (b) 鎌倉沖の SDB (日本水路協会, 2017).

らは、日本の沿岸海域で NCAE 方式を試行するために、いくつかの変更と改良を行い、新潟県柏崎港で試行した。

SDB 解析に使用した衛星画像を Fig. 11 (a) に、BathymetryMapper 2.0 を用いて算出した SDB 分布図を Fig. 11 (b) に示す。Fig. 11 (b) について、カラーバーは SDB の水深を表し、SDB の解析が有効であると考えられる 2–12 m を表示した。

レイヤー演算に使用した各種レイヤーを Fig. 11 (c) に、日本沿岸海域で CA を演算するために必要な最低限の変更を加えた演算結果を Fig. 11 (d) に、日本の沿岸海域の特性を考慮し改良した結果を Fig. 11 (e) に示す。Fig. 11 (d) は、CA 値が 0.5 以上で再測定の必要性が高い海域を赤色で表現し、それ以外の海域を緑色で表現している。Fig. 11 (e) は、CA 値が 0.5 以上の海域をさらに細分化し、CA が 0.5 から 0.7 の場合は再測定の必要性が高い海域を黄色で示し、0.7 以上の場合は再測定の必要性を強く警告する海域を表す。

これらの結果から、海図記載の海域の中でどこを優先的に測量し改版を検討すべきかが視覚化され、さらに元の NCAE 方式に日本の特性を踏まえた改良を加えることで、より実用的な運用ができる可能性があることが示された。

3.2.5 キャパシティビルディングへの取り組み

SDB は測量機材や船舶・航空機等の先行投資の必要が少なく、実施面でも低コストで即効性のある技術であることから、未測量海域を広く抱える発展途上国や島嶼国などでも導入がしやすい特徴がある。2018 年 1 月に 3 日間にわたり、東京にある RESTEC において「衛星画像推定水深 (SDB) 及びレーザ測量 (LIDAR) ワークショップ」が開催された。これは、IHO の人材育成事業の一環として、東アジア水路委員会 (EAHC) の加盟国等の技術者を対象としたワークショップで、海洋情報部、RESTEC 及び日本水路協会の協力により運営されたものである。

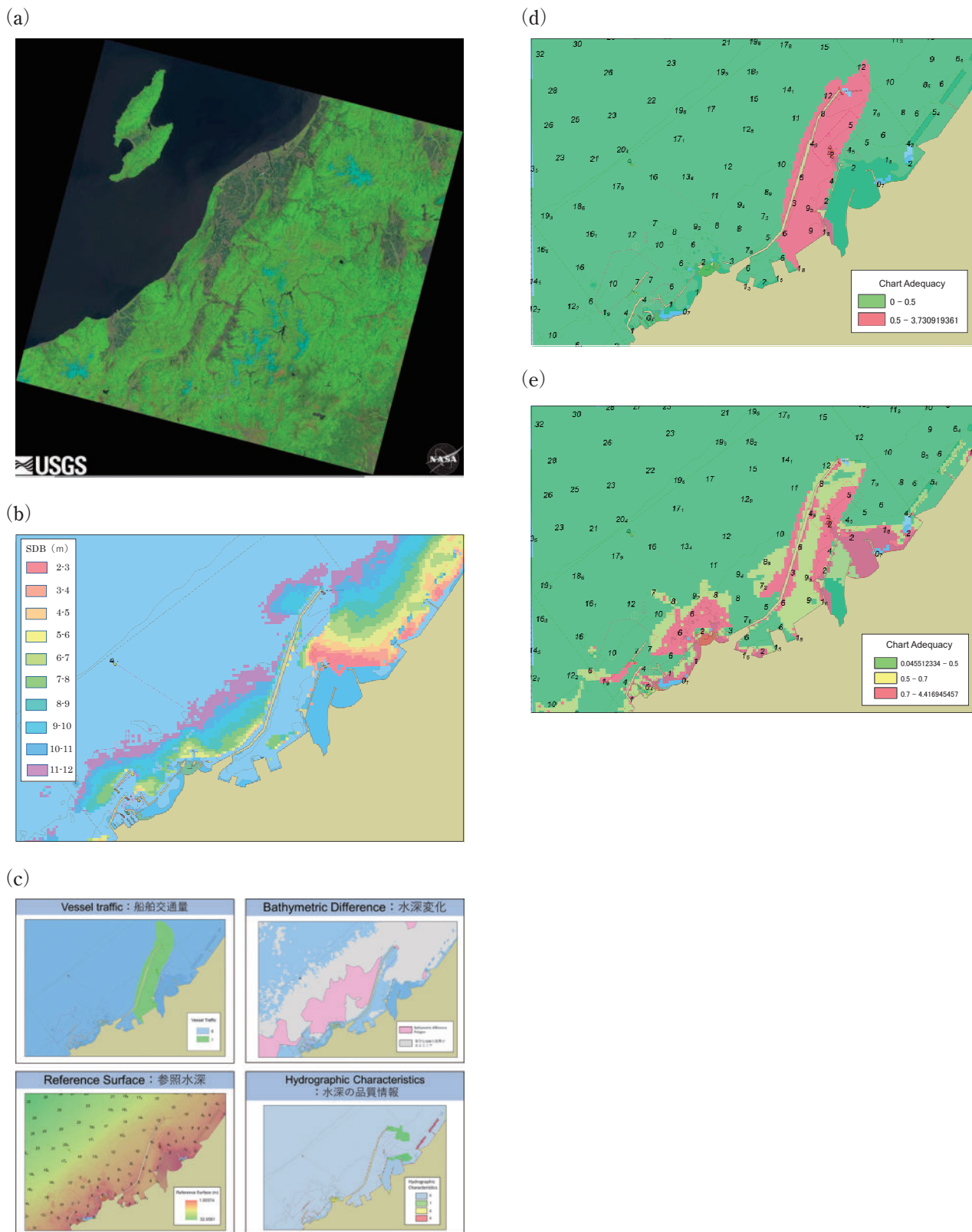


Fig. 11. (a) Landsat 8 satellite image used for SDB at Kashiwazaki port, obtained on 4 June 2013, Path: 108, Row: 34. (b) SDB at Kashiwazaki Port. (c) Various layers used for operation. (d) Operation result of Chart Adequacy. (e) Chart Adequacy obtained using improved VT and HC layers.

図 11. (a) SDB に使用した柏崎港周辺の Landsat 8 衛星画像 (2013 年 6 月 4 日撮影, Path: 108, Row: 34). (b) 柏崎港の SDB. (c) 演算に使用した各種レイヤー. (d) Chart Adequacy の演算結果. (e) 改良後の VT と HC レイヤーを使用し求めた Chart Adequacy の図.



Photo 1. Lidar and Satellite Derived Bathymetry Workshop.

写真1. 衛星画像推定水深 (SDB) 及びレーザ測量 (LIDAR) ワークショップの様子。

ワークショップへはブルネイ、ベトナム、中国 (香港)、インドネシア、日本、マレーシア、フィリピン、韓国、シンガポール、タイの計10か国、12名の参加があり、リモートセンシング技術の基礎や BathymetryMapper 2.0 を用いた SDB の実習、航空レーザ測量に関する講義が実施された (Photo 1)。

3.3 まとめと今後の動向

海洋情報部では、海洋情報業務への利用を見据えた SDB の研究を 2014 年から行ってきた。マルチビーム測深や航空レーザ測深と比較して SDB で推定される水深の鉛直位置の不確かさは大きく、国際水路測量基準 IHO S-44 第 5 版 (IHO, 2008) を満たさないことから、海図への採用には適さない一方で、SDB の迅速性と簡便性という特徴から、概略情報としての利用や CA の評価、港湾域・沿岸域の災害時の対応等に活用が期待できる。また、世界の潮流としては、水深の解析プロダクトとして SDB を商用で提供するドイツの EOMAP のような企業も既に出現している。UKHO ではこうして商用で作成される SDB の水深を注記を付した上で海図に採用している (EOMAP, 2019)。

3.2 節で述べた SDB 解析手法は学習用水深デー

タとして実測水深を用い、回帰分析によって経験的に画素毎の水深値を推定するものであるが、回帰方程式によらずに、ランダムフォレストのような機械学習アルゴリズムを用いて水深推定モデルを構築する方法でより相関の高い推定結果が得られるという報告がある (例えば Manessa et al., 2016)。また、Sagawa et al. (2019) は、既存の水深データが利用可能な代表的海域について時期の異なる多数の衛星画像を機械学習により解析し、一般化した水深推定モデルを構築する手法を提案し、透明度の高い海域における有効性を示した。これまでの経験的な推定手法では、既存の水深データが利用可能でない場合には、対象海域に赴いて部分的、簡易的にでも水深の実測値を用意する必要があり、迅速性や簡便性、低コストといったリモートセンシングの特長を減じているが、一般化した水深推定モデルが構築できれば、こうした短所が補われ、SDB の利用可能性が一層広がるであろう。

衛星画像を取得するセンサの面では、「だいち」(ALOS) の後継機として 2020 年度打ち上げ予定の「だいち 3 号」(ALOS-3) は、沿岸域の状況把握が可能となるよう、水中の減衰が少ない 0.4–0.45 μm の帯域の Coastal band を新たに搭載しており、沿岸域における水深推定をはじめとした様々な分野での利用が期待されている (JAXA, 2020)。さらに、バンド数や量子化ビット数の増加等の光学センサの開発研究も進んでおり、SDB 水深の推定精度や推定可能な深度の向上が今後期待される。

上記で紹介したように SDB の解析技術や光学センサの進歩は目覚ましく、SDB の商用化も進んでいくと考えられる。これからも海洋情報部は SDB に関する動向を追い、最適な SDB の利活用を目指していく必要があるだろう。

4 おわりに

近年リモートセンシング技術は機械学習や人工知能、情報通信技術の発展により、技術革新が目覚ましく、多様化・高度化が進んでいる。海洋調

査技術の多様な選択肢を持つことによって、海洋情報業務に柔軟に対応できるようになり、それぞれの調査手法の長所を組み合わせることによって、効率のよい最適な調査を行うことも可能になる。海洋情報部は自らも調査技術を充実させるとともに、アウトソーシングも視野に入れて学界・業界の動向を注視し、最適な技術を見極めて導入・利用していく必要があるだろう。

謝 辞

本総説を作成するにあたり、匿名の査読者に有益なご指摘とご助言をいただくことで、本稿は大幅に改善されました。ここに記して感謝いたします。

文 献

熱海吉次・森 弘和・松本良浩・住吉昌直 (2019) 衛星画像推定水深 (SDB) を利用した Chart Adequacy の評価に向けて、海洋情報部研究報告, 57, 75-86.

Benny, A. H. and G. J. Dawson (1983) Satellite imagery as an aid to bathymetric charting of the Red Sea, *The Cartographic Journal*, 20, 5-16, doi:10.1179/caj.1983.20.1.5.

EOMAP (2019) Satellite-Derived Bathymetry in Hydrographic Surveys, paper presented at 16th Meeting of the South-West Pacific Hydrographic Commission, SWPHC, Alofi, Niue, 13-15 Feb, 2019.

福田 徹 (2019) 島嶼国における気候変動下での高潮・高波ハザードの推定, G空間 EXPO2019 日本写真測量学会・日本リモートセンシング学会シンポジウム「気候変動適応と衛星地球観測」, 東京, 2019年11月28日.

IHB (2013) Satellite derived bathymetry, paper presented at 5th Meeting of the IHO-Inter Regional Coordination Committee, IHO IRCC, Wollongong, Australia, 3-4 June 2013.

IHO (2008) IHO Standards for Hydrographic Surveys 5th Edition, Special Publication No.

44, 28pp., International Hydrographic Bureau, Monaco, Feb. 2008.

IHO and IOC (2018) The IHO-IOC GEBCO Cook Book, IHO Publication B-11, Monaco, Sep. 2018, 416pp. - IOC Manuals and Guides 63, France, Sep. 2018, 429pp.

JAXA, 先進光学衛星「だいち3号」(ALOS-3), https://www.jaxa.jp/projects/sat/alos3/index_j.html, 参照2020年8月1日.

全 炳徳・後藤恵之輔・宇野史郎 (1994) ランドサットデータによる浅海域のサンゴ礁抽出と水深推測, 写真測量とリモートセンシング, 33, [4], 23-31, doi:10.4287/jsprs.33.4_23.

神野有生・鯉淵幸生・寺田一美・竹内 渉・磯部雅彦 (2008) 底質の不均一性を考慮した衛星画像による汎用水深分布予測法, 水工学論文集, 52, 895-900.

河合晃司 (2015) 新たに導入した航空レーザ測深機「CZMIL」の紹介, 海洋情報部研究報告, 52, 27-32.

Klemm, A., S. Pe'eri, C. Sartor, J. Nyberg, and J. Barber (2016) Chart adequacy procedure using publicly-available information, paper presented at Canadian Hydrographic Conference, Halifax, Canada, 16-19, May 2016.

航海情報課 (2018) 西之島噴火に伴う航行安全情報と海図の発行, 海洋情報部研究報告, 55, 110-115.

Lee, Z., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward, and J. F. Patch (1998) Hyperspectral remote sensing for shallow waters: I. A semianalytical model, *Appl. Optics*, 37, 6329-6338, doi:10.1364/AO.37.006329.

Lee, Z., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward, and J. F. Patch (1999) Hyperspectral remote sensing for shallow waters: II. Deriving bottom depths and water properties by optimization, *Appl. Optics*, 38, 3831-3843, doi:10.1364/AO.38.003831.

- Lee, Z., L. C. Kendall, R. F. Chen, and T. G. Peacock (2001) Properties of the water column and bottom derived from Airborne Visible Imaging Spectrometer (AVIRIS) data, *J. Geophys. Res.*, 106, 11639–11651, doi:10.1029/2000JC000554.
- Lyzenga, D. R. (1978) Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Appl. Opt.*, 17, 379–383.
- Lyzenga, D. R., N. P. Malinas, and Fred J. Tanis (2006) Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2251–2259.
- Manessa, M. D. M., A. Kanno, M. Sekine, M. Haidar, K. Yamamoto, T. Imai, and T. Higuchi (2016) Satellite-derived bathymetry using random forest algorithm and worldview-2 imagery, *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 3, [2], 117–126, doi:10.14710/geoplanning.3.2.117–126.
- 松本良浩 (2015) 衛星画像による水深の推定, *海洋情報部研究報告*, 53, 16–28.
- 松本良浩 (2018) 学習データがない海域における衛星画像推定水深 (SDB) の精度評価, *海洋情報部研究報告*, 56, 24–45.
- (一財) 日本水路協会 (2017) 衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究実施報告 (平成 26 ~ 28 年度), <http://fields.canpan.info/report/detail/19931>, 参照 2020 年 8 月 1 日.
- 小川 遥・橋本崇史・住吉昌直・森 弘和 (2020) The IHO-IOC GEBCO Cook Book における Chart Adequacy の評価手法: 日本沿岸海域における適用例と改善策の検討, *海洋情報部研究報告*, 58, 80–91.
- 小野智三・佐藤 泉・森下泰成・福山一郎・吉岡眞一・中村圭佑・山野寛之・白根宏道・小川遥・山川 峻・野上健治 (2018) 2013–2015 年噴火活動による西之島火山の地形変化, *海洋情報部研究報告*, 55, 77–84.
- Sagawa, T., E. Sakata, Y. Matsumoto, and T. Hiraiwa (2016) Satellite based bathymetry measurements in shallow water, *Techno-Ocean 2016*, 97–100, doi:10.1109/Techno-Ocean.2016.7890627.
- 佐川龍之・神野有生・出原真理子・山之口 勤 (2019) WorldView 衛星画像を用いた浅海域における汎用水深推定式に関する研究, *日本リモートセンシング学会誌*, 39, [2], 112–122, doi:10.11440/rssj.39.112.
- Sagawa, T., Y. Yamashita, T. Okumura, and T. Yamanokuchi (2019) Satellite derived bathymetry using machine learning and multi-temporal satellite images, *Remote Sensing*, 11, [10], 1155, doi:10.3390/rs11101155.
- SHOM (2012) The satellite derived chart, paper presented at 4th Meeting of the IHO-Hydrographic Services and Standards Committee, IHO HSSC, Taunton, UK, 25–28, Sept. 2012.
- Stumpf, R. P., K. Holderied, and M. Sinclair (2003) Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnol. and Oceanogr.: Methods*, 48, 547–556, doi:10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.
- UKHO (2015) Satellite derived bathymetry, paper presented at 11th Meeting of the IHO-Chart Standardization and Paper Chart Working Group, IHO CSPCWG, Rostock, Germany, 27–30, Apr. 2015.
- 矢島広樹 (2004) 航空レーザー測深, *海洋調査技術学会編集委員会 (編), 海洋調査フロンティア 海を計測する 増補版*, 42–61, 海洋調査技術学会, 東京.

要 旨

2003年に初の航空レーザー測深システムを導入して以来、海洋情報部は測量船によるマルチビーム測深では実施が困難あるいは非効率な浅海域に

において航空レーザ測量の実績を積み重ねてきた。2020年には測量専用の航空機とともに3台目となる測深システムが整備され、一層効率的に測量が実施できると期待される。また、人工衛星の可視画像から水深情報を抽出する技術であるSDBは、短時間、低コストで水深データが取得できる技術として諸外国の水路機関やIHOの関心が近年高まっており、海洋情報部では2014年度から海洋情報業務への利用を見据えた研究を行ってきた。本稿では、共に水深データを取得するリモートセンシング技術である航空レーザ測量とSDBに関する海洋情報部のこれまでの取り組みを概説する。