

衛星画像推定水深を活用した海洋情報業務の展望[†]

松本良浩^{*1}, 栗田洋和^{*2}, 佐川龍之^{*3}, 平岩恒廣^{*4}

Expected applications of Satellite Derived Bathymetry to hydrographic services[†]

Yoshihiro MATSUMOTO^{*1}, Hirokazu KURITA^{*2},
Tatsuyuki SAGAWA^{*3}, and Tsunehiro HIRAIWA^{*4}

Abstract

The authors have been developing the technique of Satellite Derived Bathymetry (SDB) and have created trial SDBs at various waters around Japan. The trial SDB around Hateruma Island, Okinawa Pref., penetrates down to 24 m, which infers the maximum applicable depth of the current SDB technique. The trials off Kochi Pref. and at Choshi Port, Chiba Pref., indicate that water depths can be estimated properly, if training bathymetry data well represents the variety of depth, the nature of seabed, and water clarity in the given area. Although the current SDB analysis performs depth estimation of far larger uncertainty than acoustic hydrographic surveys, it has the great advantage of rapidity and mobility to derive approximate information of seafloor in harbours and coastal areas for use of charting, chart adequacy assessment, and disaster response.

1 はじめに

開始から 3 年目を迎えた海洋情報部と（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）の共同研究「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」では、衛星画像推定水深（SDB）の作成技術を開発するとともに、わが国海域における SDB の解析例を積み重ね、現時点での SDB の実力が明らかになってきた。本稿では、SDB の活用によって期待できる海洋情報業務の各論について述べ、その限界や留意点について検討する。

2 SDB 作成技術の概略

著者らの調査研究における SDB 作成の手法については日本水路協会（2016）に全体像が述べられているが、本稿で必要な概要をここでまとめておく。

SDB では、人工衛星搭載の光学センサによって取得されたマルチスペクトル衛星画像を用いて、光は水中において指数関数的に減衰していくという基本理論に基づき水深を推定する。青や緑などの光の波長帯（バンド）によって水中での減衰率が異なる性質を利用して、複数のバンドの画

[†] Received September 16, 2016; Accepted November 4, 2016

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

* 2 第四管区海上保安本部 海洋情報部 Hydrographic and Oceanographic Department, 4th R.C.G. Hqs.

* 3 （一財）リモート・センシング技術センター Remote Sensing Technology Center of Japan

* 4 （一財）日本水路協会 Japan Hydrographic Association

像を併せて解析に用いる。ただし、光の水中における減衰率は水質によって一定ではなく、海底面の反射率も底質によって異なるなど、様々な要因がセンサで受信される光の量に影響を与えるため、その過程は複雑である (Fig. 1)。このため、衛星画像のうちの一部の画素に対応する実測または海図記載の水深値を既知として与え (これを学習用水深データという)、母集団である画像全体の各画素に対応する水深を回帰分析によって経験的に推定する Lyzenga (1978) の手法を基本に用いている。一般に、利用できるバンド数が多いほど水深推定精度は向上する (Lyzenga et al., 2006) とされているが、これは、解析領域内での水質や底質等の不均質が推定水深に与える影響が光の波長によって異なるため、多数のバンドを情報として用いることでこうした影響を抑制できるからである。

これまで主に解析の対象としてきたのは光学衛

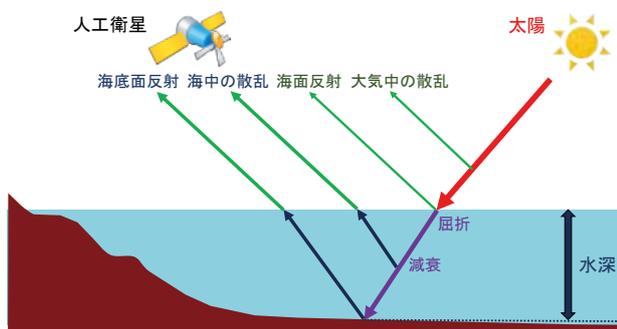


Fig. 1. Propagation path of sun light to the satellite in and above the shallow water.

図 1. 浅海域において人工衛星に到達する太陽光の伝播経路。

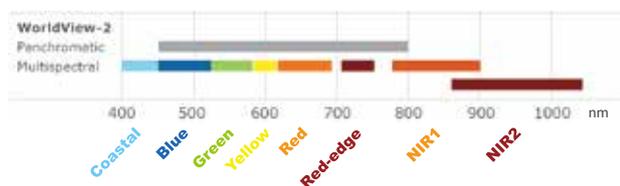


Fig. 2. Spectral bands of WorldView-2 satellite (after DigitalGlobe (2010), with band names annotated).

図 2. WorldView-2 衛星のマルチスペクトルセンサがもつバンドの分布 (DigitalGlobe, 2010 にバンド名を加筆)。

星 WorldView-2 による衛星画像である。WorldView-2 の光学センサは可視光が 6 バンドと多く (Fig. 2)、水深推定において有利と考えられる。また、1.84 m の水平解像度が得られることは、詳細な海底地形の把握に有効である。

3 解析例と水深の品質

著者らはこれまで国内の 12 海域で試験的に SDB を作成し、別途水路測量によって取得されている水深データとの比較による精度検証を行ってきた。これらの結果は日本水路協会 (2016) に詳細が掲載されているが、本稿ではこの中から特に海洋情報業務での利用に際して示唆を与える事例を 3 つ取り出し、検討を加えたい。

3.1 波照間島周辺

沖縄県の波照間島周辺は海水の透明度が特に優れており、衛星画像の解析にとって有利であることが予想される。また、この海域では 2015 年 2 月に実施された航空レーザー測量で高密度の水深データが取得されていることから、衛星画像による水深推定手法の適用限界の調査を行うのに適当と判断した。実際、今回用いた衛星画像 (WorldView-2 2013 年 5 月 18 日撮影: Fig. 3 (a)) は海域全体で透明度が高く、砂地とサンゴが分布していることが水深 20 m 前後まで目視判読によって確認できる。衛星画像の面積は 75 km² である。

作成された SDB を Fig. 3(b) に、評価用水深データを Fig. 3 (c) に、SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図を Fig. 3 (d) に、誤差グラフを Fig. 3 (e) に示す。

学習用水深データは、SDB を実運用する際にはシングルビーム音響測深機で簡易な測量を行って取得することを想定して、評価用水深データから測線に見立てた線状に水深を抽出したものを作成する (これは以下の解析事例にも共通である)。本解析例において抽出した学習用水深データの分布は Fig. 3 (c) に紫線で示す。学習用水深データは、解析対象となる水深を偏りなく代表できる

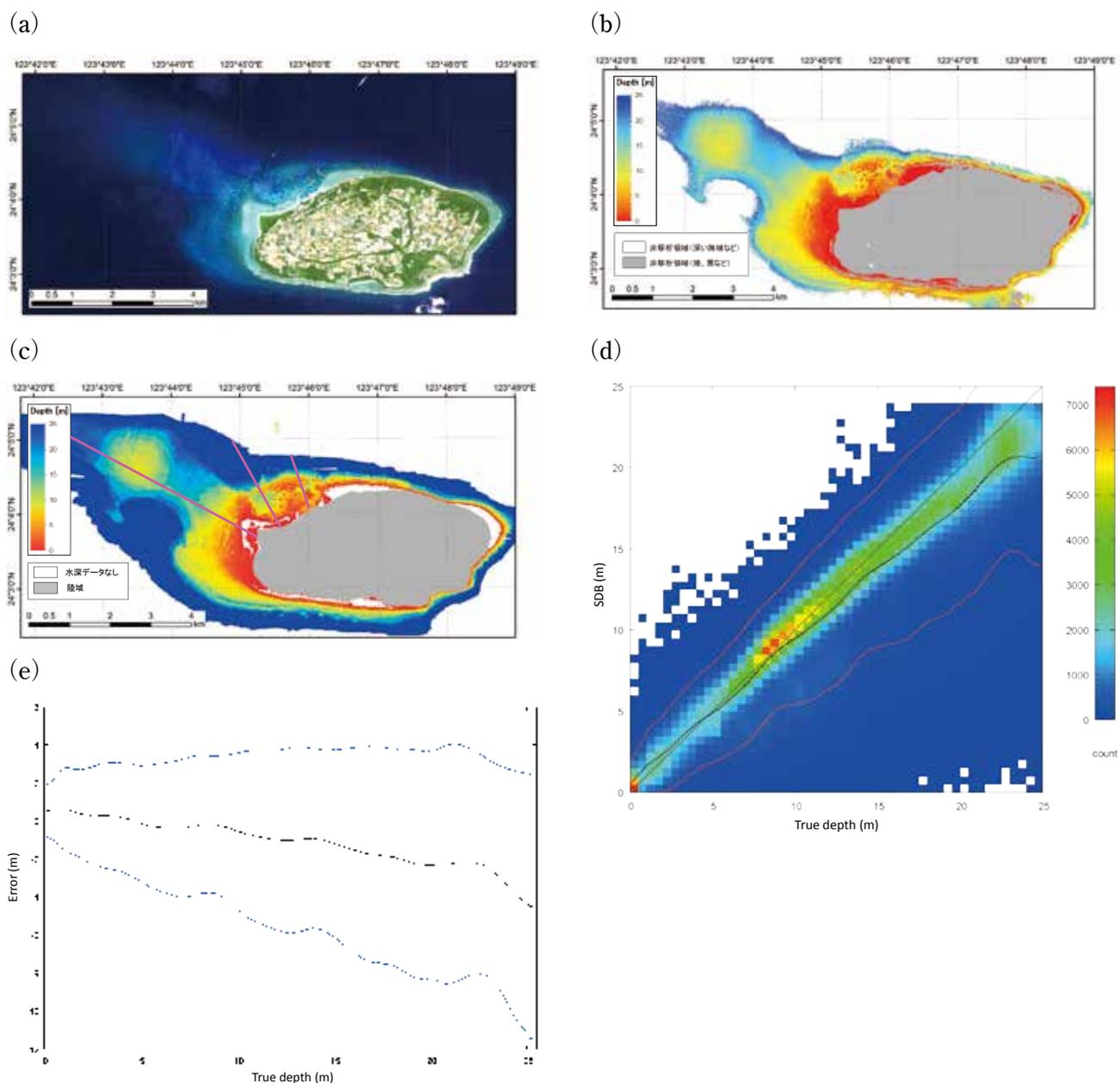


Fig. 3. (a) The WorldView-2 satellite image around Hateruma Island, Okinawa Pref. obtained on 18 May 2013. (b) The SDB created from the satellite image. (c) Ground truth bathymetry. Depth data along the purple lines are extracted for use of training data. (d) The histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth. (e) The error graph of SDB.

図 3. (a) 波照間島周辺の WorldView-2 衛星画像. 2013 年 5 月 18 日撮影. (b) 作成された SDB. (c) 評価用水深データ. 学習用水深データとしては紫線上の水深を抽出した. (d) SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図. (e) SDB の誤差グラフ.

ように取得することが望ましい。

「SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図」とは、衛星の各画素で推定された SDB の水深値とそれに対応する評価用データ的水深値（この例では航空レーザー測深のデータによる）を縦

軸と横軸としてプロットし、さらにプロット数を 0.5 m 間隔のメッシュ内の頻度としてヒストグラム表示したものである。黒線は評価用データ的水深値 Z に対し、 $Z \pm 0.5$ m 区間の SDB の水深値の平均値、赤線は評価用データの水深値 Z に対し、

$Z \pm 0.5$ m 区間の SDB の水深値の 95 % 信頼区間を表す。また、「誤差グラフ」とは、

誤差 = SDB の水深値 - 評価用データ的水深値として算出した誤差を縦軸に、横軸に評価用データ的水深値の値をプロットしたものである。黒線は評価用データ的水深値 Z に対し、 $Z \pm 0.5$ m 区間の誤差の平均値、青線は評価用データ的水深値 Z に対し、 $Z \pm 0.5$ m 区間における誤差の 95 % 信頼区間を表す。

解析可能な水深の範囲は、SDB の各水深値と対応する学習用水深データとの差（残差）の平均の絶対値が残差全体の標準偏差以下となる水深までとしている。

この海域では、水深 24 m まで解析できた。Fig. 3 (d) から SDB と評価用データ的水深値との相関は高いことがわかる。Fig. 3 (e) から、誤差の 95 % 信頼区間は水深 5 m 付近では平均値 ± 3 m 程度であるが、水深 20 m 付近では平均値 ± 6 m 程度であり、水深の増大とともに SDB の水深値は実際より小さく推定され、誤差が広がる傾向にある。

Fig. 4 で特徴ある海底地形 5 箇所について、衛星画像、SDB、評価用データの水深分布を拡大して対照する。範囲 1 はなだらかな砂地の斜面、範囲 2 はサンゴ礁等の複雑な地形、範囲 3 と範囲 4 はサンゴ礁を含むとみられるが前例ほど複雑ではない地形で、いずれの範囲も SDB と評価用水深データとの間で形状に良い一致が見られる。範囲 5 は、前 4 例よりなだらかで深い地形であるが、水深 15 m より深い場所で SDB が浅めに推定する傾向にあることが見てとれる。

この画像についてはさらに、佐川・他 (2016) が学習用水深データの分布と水深推定精度への影響について検討している。ここで結論のみを引用すると、学習用水深データの数は、母集団を推定するのに十分なデータがあればそれ以上は精度に影響しない。また、学習用水深データが砂地など特定の底質に偏ると誤差が大きくなるが、底質に関して無作為に学習用水深データを取得することで、誤差が小さくなる。

母集団を妥当に推定するのに最低限必要なデータ数についてはまだ具体的な目安がなく、引き続き調査する必要がある。

3.2 高知沖

わが国の多くの海域はプランクトンが豊富に分布する温帯にあり、所により海洋汚染の影響もあることから、3.1 節の波照間島周辺ほどの優れた透明度が期待できないが、高知沖海域 (WorldView-2 2012 年 12 月 31 日撮影: Fig. 5 (a)) の本事例はこうした沖縄以外の一般的な海域においても水深情報が広く取得できる可能性を示す良い事例である。

作成された SDB を Fig. 5(b) に、評価用水深データを Fig. 5 (c) に、誤差グラフを Fig. 5 (d) に示す。評価用水深データは 2002 年 8 月のマルチビーム音響測深で得られたものである。

水深 18 m 程度までは誤差が比較的安定しており、95 % 信頼区間で ± 3 -5 m 程度で推移し、水深 20 m 程度で推定水深が評価用データ的水深値から大きく離れる。SDB と評価用水深データを比較すると、大きな傾向は視覚的には一致しているが、中央付近の 10 m 以深の濁りの影響があると考えられる海域は解析できておらず、その周辺も大きな誤差を含んでいるように見える。

この衛星画像の面積は 3.1 節の波照間島周辺の例と同じ 75 km² である。一枚の画像内で海水の消散係数などの環境条件は一様と仮定しているが、実際に広域の画像を解析すると、こうした前提条件は必ずしも成り立たず、水深推定のモデルと条件が異なる領域では誤差が大きくなり得る。他方で、同じ領域を複数に分割して解析してモザイク処理を行うとした場合には、接合部の SDB の水深は必ずしも一致しない。広域の水深を一度に把握できるのが SDB の長所である一方で、環境条件の変化が大きいと予想される海域でどのように運用するかは、今後の検討課題である。

3.3 銚子港

銚子港は 3.2 節の高知沖と同様、わが国で一般

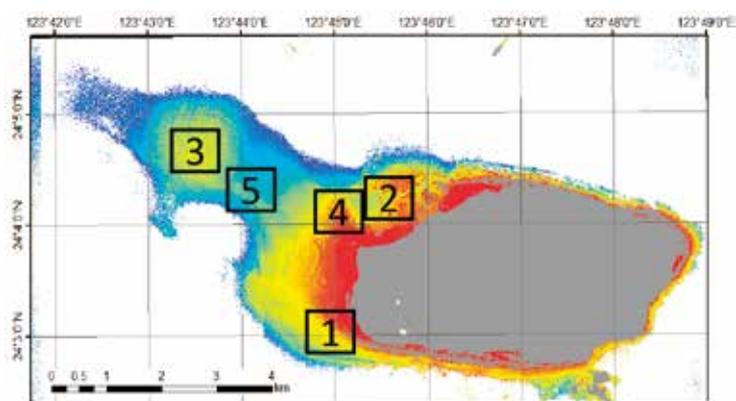
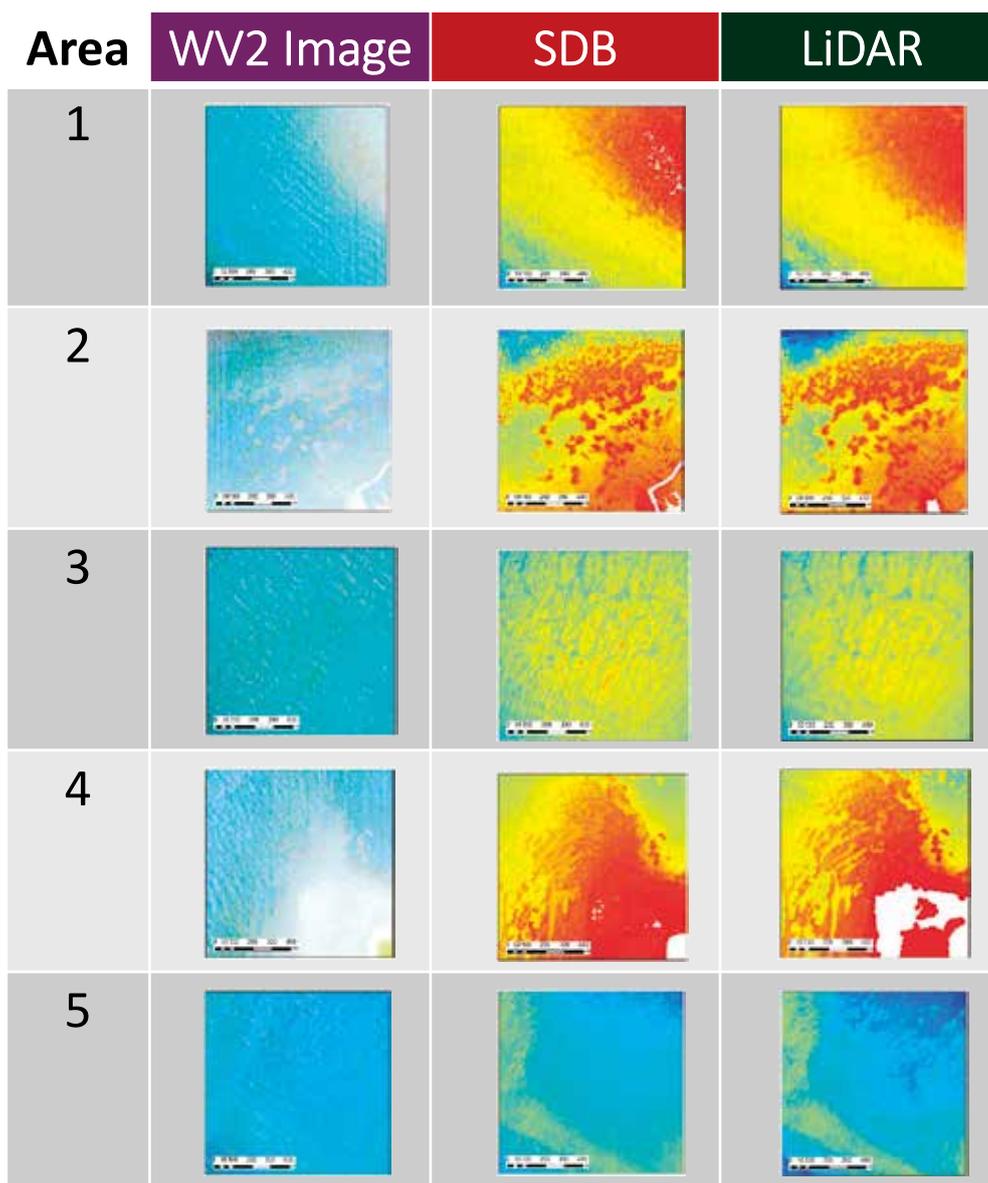


Fig. 4. Comparison of representation between satellite image, ground truth bathymetry, and SDB at five topographic features. Each area is shown on the whole image of the SDB (bottom).

図4. 特徴ある海底地形5箇所について、衛星画像、SDBおよび評価用データの水深分布の比較。下の全領域のSDB上に1-5の各領域を示す。

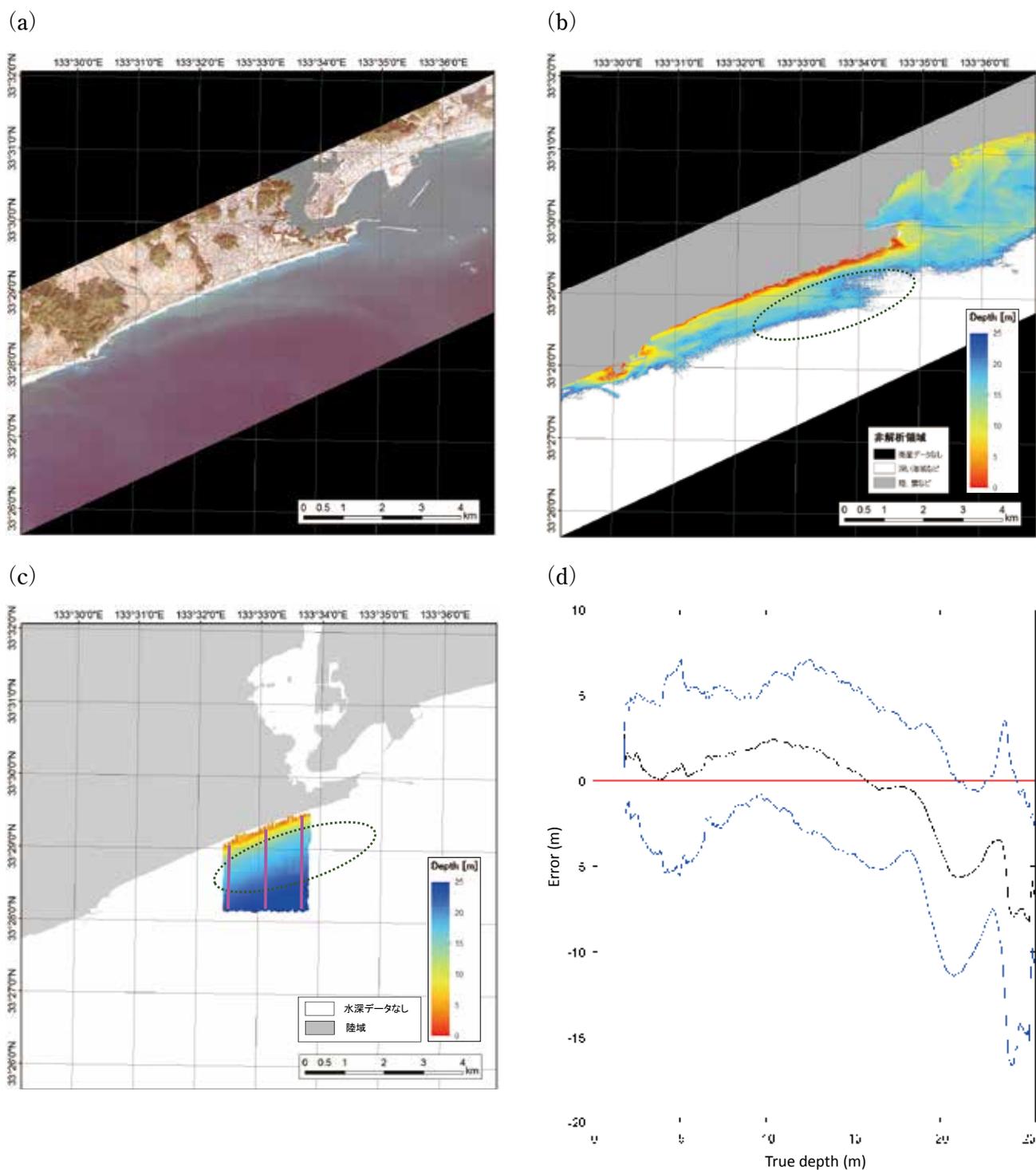


Fig. 5. (a) The WorldView-2 satellite image off Kochi Pref. obtained on 31 December 2012. (b) The SDB created from the satellite image. (c) Ground truth bathymetry. Depth data along the purple lines are extracted for use of training data. (d) The error graph of SDB. The area enclosed by the dark green dotted ellipse in (b) and (c) is apparently affected by turbidity.

図5. (a) 高知沖のWorldView-2衛星画像。2012年12月31日撮影。(b)作成されたSDB。(c)評価用水深データ。学習用水深データとしては紫線上の水深を抽出した。(d)SDBの誤差グラフ。濁りの影響が顕著な領域を(b)および(c)に深緑色点線の楕円で示す。

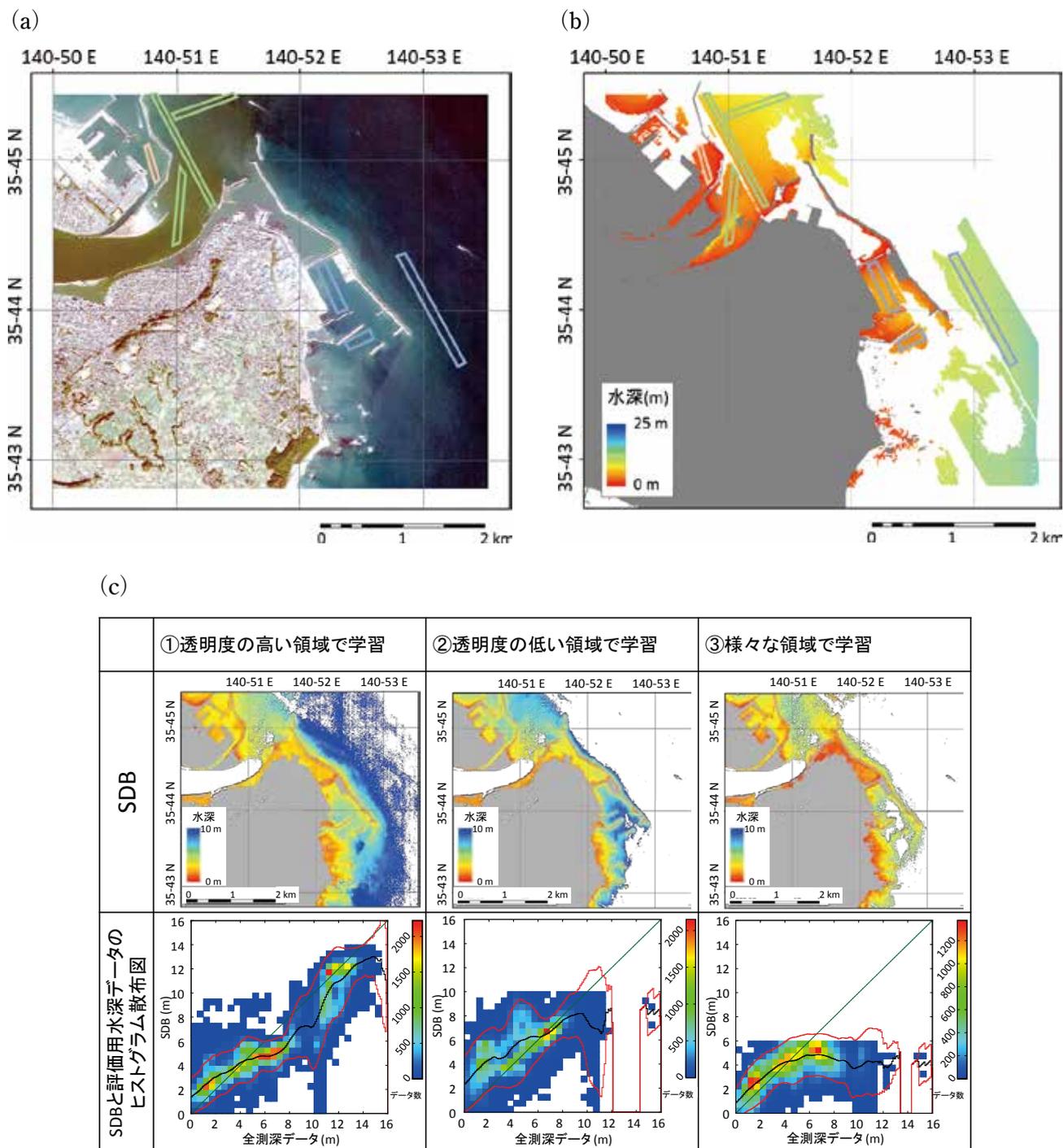


Fig. 6. (a) The WorldView-2 satellite image at Choshi Port, Chiba pref. obtained on 27 January 2010. (b) Ground truth bathymetry. (c) Three pairs of the SDB created from the satellite image and the corresponding histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth. These are the results of analyses using training bathymetry data of (1) high water-quality areas, (2) low water-quality areas, and (3) combination of various water-quality areas. On (a) and (b) are superposed the source areas of training bathymetry data: high water-quality (light blue), low water-quality (green), and medium water-quality (pink).

図 6. (a) 銚子港沖の WorldView-2 衛星画像。2010 年 1 月 27 日撮影。(b) 評価用水深データ。(c) 作成された SDB と「SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図」の対で、①透明度の高い領域で学習した場合、②透明度の低い領域で学習した場合、③様々な領域で学習した場合の 3 通りがある。(a) と (b) には学習用水深データの海域を重畳している。水色枠：透明度の高い海域、緑枠：透明度の低い海域、ピンク枠：透明度が中間の海域。

的な温帯に位置する港湾である。銚子港の衛星画像 (WorldView-2 2010 年 1 月 27 日撮影: Fig. 6 (a)) の面積は、WorldView-2 の衛星画像を調達する際の最小単位である 25 km² である。解析領域が狭いと一般的には領域内での水質、底質等の環境条件の違いも小さく、推定される水深の品質にとって有利であるが、この領域には利根川河口が含まれていて、場所による透明度の違いが目視でも明らかに判読できるほどである。そこで、この画像は透明度の影響調査として、3 通りの学習用水深データを作成して、それぞれについて SDB を作成し、比較した (栗田・他, 2016)。

評価用水深データを Fig. 6 (b) に示す。評価用水深データは、2013 年に航空レーザー測深、マルチビーム音響測深およびシングルビーム音響測深で得られたものである。

学習用水深データは評価用水深データから一部を抽出して透明度の高い領域、中間の領域、低い領域の 3 通りを作成した。それぞれの分布領域は Fig. 6 (a) および 6 (b) に図示している。作成した SDB は①透明度の高い領域で学習した場合、②透明度の低い領域で学習した場合、③様々な領域で学習した場合の 3 通りである。このうち③においては、3 通りの学習用データを各 1 領域ずつ組み合わせて使用している。これらの SDB と「SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図」の対を Fig. 6 (c) に示す。

これらの結果から、(A) 解析できた最大の水深、(B) 誤差の平均値が ± 1 m 以内となる (相関の

Table 1. Penetration depth (A) and precisely resolved depth zone (B) of each SDB derived from the corresponding histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth (bottom row of Fig. 6 (c)).

表 1. 銚子港沖の SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (Fig. 6 (c) の下段) から得られた解析最大水深 (A) と誤差の平均値が ± 1 m 以内となる (相関の高い) 水深の範囲 (B)。

	学習用水深の領域		
	①透明度の高い	②透明度の低い	③様々
(A)解析最大水深	14 m	10 m	6 m
(B)相関の高い水深の範囲	2 - 6 m	5 - 9 m	0 - 6 m

高い) 水深の範囲を Table 1 にまとめて比較する。解析できた最大水深はそれぞれ① 14 m, ② 10 m, ③ 6 m となり、解析できた範囲もそれぞれ異なっている。推定された海底地形は互いに類似しているが、②が水深を比較的深めに推定している。一方、③では、誤差の平均値が ± 1 m 以内となる (相関の高い) 水深の範囲は 0-6 m 程度と最も広がった。

この結果から、水路測量が特に非効率となる水深 5 m 程度以浅の極浅海域に目標を絞り海底地形を比較的良い精度で把握することをめざすならば、透明度で領域を限定することなく、「様々な領域で学習」することが望ましいと考えられる。このためには、学習用水深データは透明度の違う領域から偏りなく収集しておくことが望ましい。

ところで、本画像の場合にも、全面を一括で解析するのではなく、解析領域を透明度別に目視判読で分割して SDB を別々に作成し、モザイク処理をするという運用が考えられる。そうすれば、透明度の不均質に起因する精度劣化が軽減される、解析可能領域が最大化される等の効果が予想できる。この場合にも前節で述べたとおり、接合部の不整合をどう処理するかという問題は残される。

3.4 期待できる水深の品質

これまでの調査結果や解析例から、現状で SDB に期待できる水深の品質は以下のようにまとめられる。

3.4.1 水平位置の精度

2014 年 7 月に石西礁湖周辺においてディファレンシャル GPS による特徴点の位置情報 (GCP: Ground Control Point) を取得する現地調査を行い、GCP を用いた幾何補正の有無による WorldView-2 衛星画像の水平位置精度の比較を行っている (日本水路協会, 2015)。これによれば、国土地理院の 10 m メッシュの数値地形モデル (DEM: Digital Elevation Model) を用いたオルソ補正後の誤差の絶対値の平均は 2.27 m、標準

偏差 1.27 m, 95 %信頼区間の最大値は 2.93 m であり, オルソ補正後に GCP を用いた幾何補正を行った場合の誤差の絶対値の平均は 2.18 m, 標準偏差 1.73 m, 95 %信頼区間の最大値は 3.09 m となった. この結果からは, GCP を用いた幾何補正を加えたことによる水平位置精度の改善はほぼ見られない.

ところで, 国際水路測量基準 IHO S-44 第 5 版 (IHO, 2008) における 1a / 1b 級の要件は, 水平位置の不確定性が 5 m + 水深の 5 % 以下であることを要求しているが, これは誤差の絶対値の平均ではなく真の水平位置を原点とする 95% 信頼区間を評価する必要がある. そこで, 上記の調査結果が誤差 0 を原点とした片側正規分布に従うと仮定して誤差の 95 % 信頼区間を算出すると, オルソ補正後で 5.05 m 未満, オルソ補正後に GCP を用いた幾何補正を行った場合には 5.38 m 未満となった. この結果は, GCP を用いた幾何補正なしで IHO S-44 の 1a / 1b 級の要件にほぼ達している.

なお, この評価は陸上の特徴点の位置の比較によって行ったが, 水深推定のように海部の情報のみを目的とした実運用に衛星画像を使用するのであれば, 陸域の位置精度の確保は不要であるので, オルソ補正自体が必要ないと考えることもできる. この場合には, システム的な幾何補正のみが施された比較的安価な衛星画像プロダクトの購入で問題なく, 解析の手順も減るということになる.

3.4.2 解析可能な最大水深と深さの精度

これまでわが国海域で実施した解析例のうちでは 3.1 節で述べた波照間島周辺のケースが最も深くまで解析できており, 解析可能な最大水深は 24 m であった. また, シミュレーションの結果からは, 同じ手法で推定できる限界は水深 20 m 程度と考えられている (日本水路協会, 2016). ただしこれまでの解析例から見ても, わが国の一般的な海域における実際の限界は透明度等の環境条件により通常これを下回る.

推定水深の誤差の 95 % 信頼区間をみると, 銚

子港 (3.3 節) の例の他, 日本水路協会 (2016) が面積 25 ~ 35 km² の衛星画像から作成した SDB の多くにおいて, 水深約 10 m までは平均誤差 ± 2 m 程度であった. 平均誤差そのものは 0 m から 2 m の間で水深により変化しているケースが多い. ただし, 前述した波照間島周辺 (3.1 節) と高知沖 (3.2 節) のように 75 km² の広域を解析した事例では, いずれも誤差の 95 % 信頼区間が平均誤差 ± 5 m 程度以上となっており, 解析領域が広がるほど領域内の水質や底質が一様でないことによる影響が大きく現れると推測される.

国際水路測量基準 IHO S-44 第 5 版 (IHO, 2008) における 1a / 1b 級で許容される深さの不確定性は, 水深 d m に対して 95% 信頼区間で

$$\pm\sqrt{0.5^2 + (0.013 \times d)^2} \text{ (m)}$$

とされており, 例えば水深 10 m の場合には ± 0.517 m である. SDB の水深は多くの範囲で IHO S-44 の 1a/1b 級を満たさない.

3.4.3 海底の地物の検出

海底の地物の検出能力は主に光学センサの水平解像度に依存すると考えられる. これまで具体的に海底の地物の検出を試みていないが, 解析してきた衛星画像は大半が WorldView-2 衛星によるもので, 水平解像度は 1.8 m である. したがって IHO S-44 の 1a 級が求める一辺 2 m 以上の立方体の検出は現時点では困難と予想される.

より高解像度の光学センサが将来衛星に搭載されるようになると, 検出能力は当然高まると考えられる. 例えば, WorldView-2 の後継機である WorldView-3 は 2014 年 8 月に打ち上げられたが, 同じ 8 バンドマルチスペクトルで直下の水平解像度は 1.24 m に向上しており, 一辺 2 m の立方体の検出に一步近づいている.

推定される水深値のばらつきも地物の検出能力に影響する. 水深 10 m 程度以浅の多くの海域において水深値の誤差が 95 % 信頼区間で 2 m 程度であることから, 比高 2 m の立方体の検出はぎりぎりの水準である. ただし, この誤差は解析対象の画像全体での評価であり, 水質や底質が一様

な一部領域内を見た場合には、水深のばらつきはこれより小さいことが予想され、比高2mの立方体が検出できる可能性は実際には高いと考えられる。

4 SDB を活用した海洋情報業務の展望

4.1 海図への利用

SDB の成果を初めて海図に採用したのは、海外県・海外領土として島嶼を多数領有するフランスである。フランス海軍水路部 (SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) は、1988 年より主に仏領ポリネシアと

ニューカレドニアの環礁を海図に記載するため SDB の利用を開始した (Laporte et al., 2015)。これは個々の水深値を海図に採用するわけではなく、SDB を段彩で参考表示する方式であり、これまでに 100 図以上の海図を刊行してきた実績がある (IHB, 2013)。

英国は SDB の成果を採用した海図 “BA2066 Southern Antigua” (UKHO, 2015; Photo 1) を 2015 年に初めて刊行した。この際、SDB の水深値の 97 % が CATZOC の C 級¹ を満たすことを検証しており、SDB の水深値は他の水深と同じ書式で表記して、SDB を使用した区域をソースダ

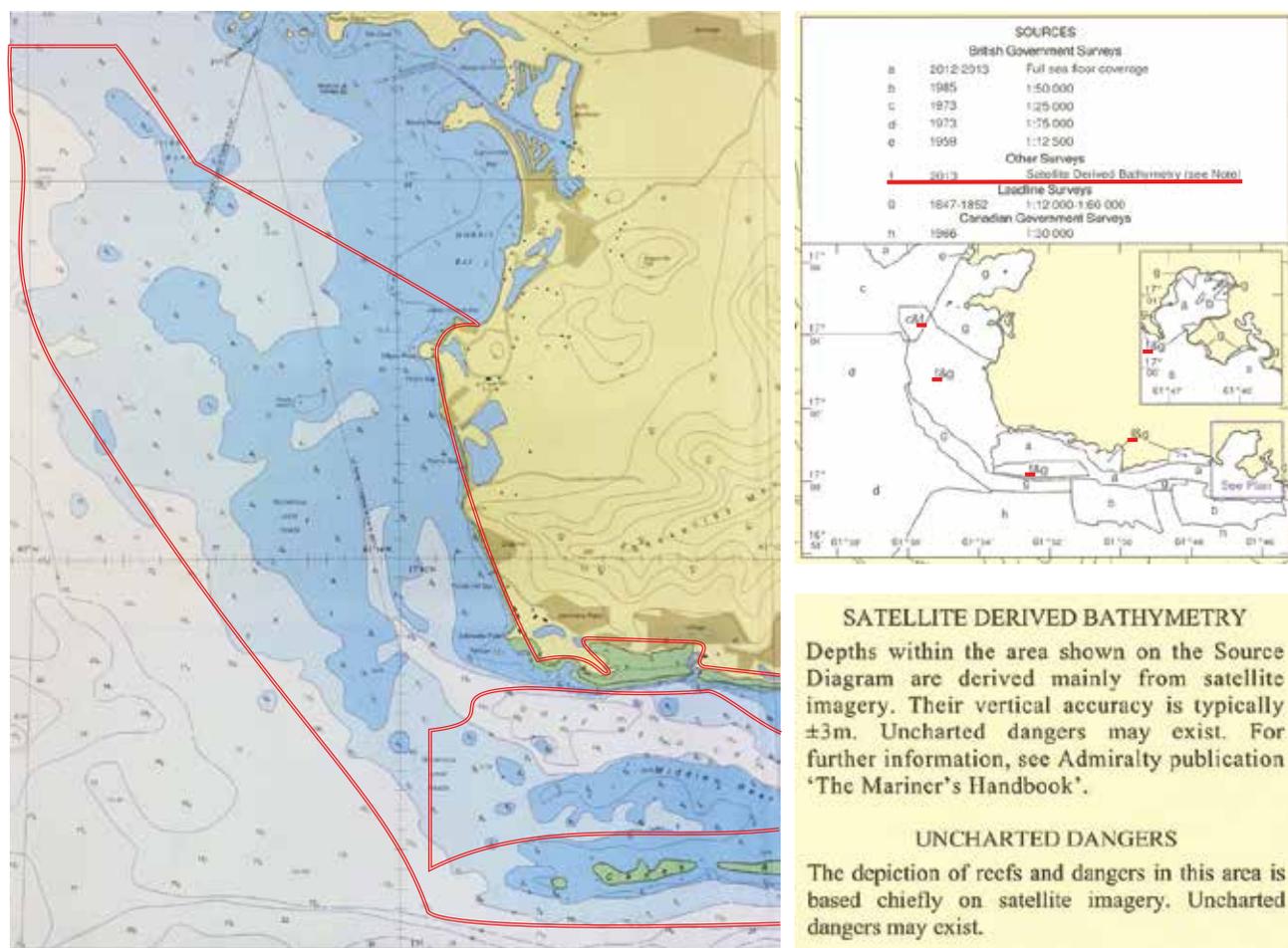


Photo 1. The first UKHO chart which includes SDB data: BA2066 Southern Antigua (UKHO, 2015), annotated by the author. The area delineated by double red lines includes depths derived from satellite imagery (left). The depths in the area “f” (underlined in red) in the source diagram (top right) are sourced from SDB. Notes on the accuracy of SDB and potential uncharted dangers (bottom right) are found.

写真 1. SDB を使用した UKHO (2015) による海図 ‘BA2066 Southern Antigua’ (著者により注記)。(左) SDB による水深を使用した区域を赤二重線で囲んでいる。(右上) ソースダイアグラム。赤下線を付した f の区域で SDB が使用されている。(右下) SDB の深さの精度が $\pm 3\text{m}$ 程度であること、危険箇所が未記載である可能性があること等の注意書き。

イアグラムで示している（この例では f）。SDB の水深を採用した海図編集に際しては、従前の錘測の成果には無かった浅所が新たに見つかったほか、錘測の成果による既存の浅所の水平位置が SDB の情報によって精度の高い位置へと更新された。また、等深線が改善されるという効果があった。他方、従前の錘測の成果に基づいて記載されているながら SDB で確認できなかった浅所については、削除しないという対応となった（Capsey and Talbot, 2015）。

米国は 2015 年 12 月に SDB の利用を盛り込んだ“US Nautical Manual”の改訂も行った（USA, 2016）。この主要な内容は以下の通りである。

- ・音響測深や航空レーザー測深によるデータが利用可能である場合には SDB を用いない。
- ・ SOLAS 船のための under-keel clearance が要求される海域では SDB を用いない。
- ・ SDB データは既に海図に記載済みの浅所の水深を取り消すために用いてはならない。ただし、古い測量による浅所あるいは報告された浅所の水平位置を改善するためには用いてもよい。
- ・ SDB から採用した水深の範囲により浅い既存の海図水深があっても、特段の指示がなければ削除しない。より深い既存の海図水深は削除する。
- ・ SDB から生成した等深線および海岸線は概略（approximate depth curves, approximate shoreline）として扱う。
- ・ SDB を用いて改訂した区域はマゼンタの破線によって境界を表す。

SDB の水深と一致しない既存の海図水深や浅所の扱いは英国海図“BA2066 South Antigua”の場合とほぼ同様の考え方であることがわかる。ただし、SDB の水深値そのものの海図への記載には否定的で、「SDB は予備調査であり、水路測量とは見なされない。よって SDB から測量原図水深

を採用することはなく、等深線の生成にのみ用いる」（Barber et al., 2006）という方針である。

SDB の海図への利用方法については IHO の海図標準化及び紙海図作業部会（CSPCWG：Chart Standardization and Paper Chart Working Group）で議論されているが、上記の英国と米国の運用例が基礎となるように予見される。

また、電子海図（ENC：Electronic Navigational Chart）について、米国は、2015 年 11 月にアラスカ州のユーコン川流域のプロトタイプを作成した（Kampia et al., 2016）。この地域は測量が不十分で基準面も不明だが、地元のタグやバージの通航が多くあり、航行安全上の問題があることから、取り急ぎ衛星画像のみにより ENC の作成を試みたというものである。作業期間とコストの観点から基準面の決定を見送り、概略海岸線・河岸線（approximate shoreline）を近赤外バンドの画像から抽出し、浅所の概形を基準面に準拠しない SDB（これを‘relative bathymetry SDB’と呼んでいる）から抽出して Obstruction Area として記載するという、かなり思い切った利用法である。

4.2 Chart Adequacy の評価

海図に表現された海底地形、海岸線その他の航行船舶の安全のために必要な情報の有効性は Chart Adequacy と呼ばれており、適時に評価を行って、海図改訂のための再測量の必要性や緊急性の判断に用いられる。特に、海図に描かれた地形は自然条件でも常に変化していくため、とりわけ沿岸部では地形の変化をモニタリングし、変化に応じて海図を改訂していく必要がある。だが地形の変化の把握を目的にマルチビーム音響測深などの水路測量を沿岸部、特に極浅海域で頻繁に実施するのは調査期間やコストの面で大きな負担となるので、より簡便な調査手法が望まれる。その一つとして SDB が有望と考えられている。

Klemm et al. (2016) は、以下のように Chart

1 CATZOC (CATegory of ZOne of Confidence in data) とは、IHO デジタル水路測量データ転送基準 S-57 (IHO, 2002) が定義する水深品質の階級で、CATZOC の C 級とは、水平位置の精度が 500 m、水深の精度が 2.00 m + 水深の 5% (例えば水深 10 m において 2.5 m) 以内であり、海底の全面が測量されていないものをいう。

Adequacy を指標化する数式を提案し、GIS 上でこの演算を行った結果 0.5 以上となる領域について再測定の必要性を警告するとしている。

$$\frac{VT \times BD + HC}{RS}$$

ここで、以下のパラメータを用いる。

BD (水深変化の有無)：海図との変化ありと判断した領域に 10、それ以外に 0 の値を設定したポリゴン。

VT (船舶通航量)：0.0044 隻 / m² / 年以上の海域に 1、それ以外に 0 の値を設定したポリゴン。

HC (水深の品質)：測深領域の海底のカバレッジ、測量年、測量手法の 3 要素で判定して最良を 1、最悪を 9 とする整数値を設定したポリゴン。

RS (参照水深)：現行の水深データを逆距離加重法でグリッド化した水深値。ただし水深 4.1 m 以下は一律 4.1 m としている。

Klemm et al. (2016) は、米国海洋大気庁 (NOAA) の海図の他、イスラエル (アシュドド)、スリランカ (コロンボ)、ケニア (モンバサ)、フィリピン (セブ)、日本 (気仙沼港) についてこの評価手法を実施するワークショップを開催し、各種の海域で汎用性がありロバストな評価手法であることを確認したとしている。

これは方法論の一例であるが、こうした海図に描かれた情報の有効性の繰り返し評価を実施するには、海図の範囲全体の水深変化を低コストで面的に判断できる SDB の利用が最適である。

海底地形が特に短期間に変化しやすい場所としては河口や潮流口がある。こうした場所であっても変化は一様ではなく、例えば浅所が時間とともに移動していくなど、周期的に変化していく領域と、安定していて変化が小さい領域がある。そこで、SDB のように簡便にモニタリングができる手法を用いて繰り返し調査することにより、①変化の激しい領域と安定した領域を峻別する、②報告された浅所の位置を確認する、③浅所の移動トレンドを推定する、等を行い、再測定の優先度を

判断することができる (Freire et al., 2016)。

4.3 港湾域・沿岸域の災害時の対応

地震・津波や台風、高潮のような災害により、港湾域や沿岸域への土砂や瓦礫の流入、構造物の破壊、地殻変動 (特に海底が隆起する場合) 等の形で船舶の通航に支障するおそれがある場合、航路啓開に向けて水深や海底の異物の把握が緊急に必要となる。こうした調査に SDB を適用する場合、被災海域では土砂の流入等による海水の透明度の悪さが障害となる可能性はあるものの、迅速性に加えて現地調査のためのインフラがほぼ不要であるという簡便性は大きなメリットである。

初動対応では海水の透明度の回復をある程度待つ必要があるが、マルチビーム測深などの詳細な調査が必要となる海域の選定が測量船の派遣前に効率的に進むほか、航路障害物の検出も期待できる。

なお、発災後には被害状況把握を目的として、被害地域の航空写真の撮影が速やかに実施されることが通常なので、航空機によるマルチバンド空撮画像を使用して SDB と同手法により水深を推定するという方策も今後の利用法として検討できよう。

4.4 学習用水深データの取得方法

現状の SDB の作成には、学習用水深データがある程度必要であるため、対象画像の一部に既存の水深データがある場合を除いては、水深データの取得方法の検討が必要である。SDB の迅速性と簡便性を活かすためには、学習用水深データも簡便に取得できることが望まれる。

学習用水深データは、3.1-3.3 節で議論したとおり、解析領域内における水深や底質、透明度の違いをなるべく偏りなく代表していれば、広く面的である必要はない。佐川・他 (2016) が SDB 作成を試行する際に想定したように、シングルビーム音響測深機を用いて 3 測線程度のデータがあれば十分と考えられる。

このような簡素な測深であれば、例えば最近商

品化が進んでいる小型の無人測量ボートで短時間測深を行うことも考えられる。一つの事例として、Head et al. (2016) は Z-boat (Teledyne, 2016) という無人測量ボートを用いて学習用水深データを取得し、SDB を作成した例を紹介している。このようなボートは喫水が 0.5 m 程度と非常に浅いため、通常の測量船では得られない極浅海の水深が計測可能な点も SDB の学習用に都合がよい。特に 4.3 節で述べたような災害対応での SDB 作成を想定する場合、小型の無人測量ボートであれば自動車など他の輸送手段で対象海域に持ち込むことも可能と考えられ、測量船の回航を待つことなく迅速性が発揮されよう。

5 まとめ

諸外国の SDB 作成例としてサンゴ礁の熱帯域を扱うものが多い中、わが国のような温帯域で SDB を作成・検証した事例は多くは知られておらず、本稿で取り上げた 3 例のほかにも、日本水路協会 (2016) に報告されている多数の SDB は貴重な適用事例であると思われる。

正規の水路測量との比較では SDB の水深の品質は大きく劣るものの、4 章で検討したような迅速性と簡便性を活かした利用は有望であると思われる。今後の運用に向けては、学習用水深データとして必要かつ十分なデータ量の目安や、評価用水深データのない海域における運用時の推定水深の不確定性の評価方法等について検討が必要である。

また、発展途上国において未測量海域の調査を進展させるために供与できる技術の一つとしても、運用方法をマニュアル化していくことが望まれる。

今後は、実運用に向けた方法論を確立してくとともに、IHO を中心とする国際水路コミュニティにおいて活発化している測量基準や海図作成の基準作りの議論に参加していくことが求められよう。

謝 辞

本研究は (公財) 日本財団の助成により (一財) 日本水路協会が実施する「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」の一環として、海洋情報部と (一財) 日本水路協会の共同研究協定に基づき実施しています。 (一財) 日本水路協会の明石龍太前調査研究部長、第五管区海上保安本部の古田明海洋情報部長、技術・国際課の中川正則主任技術・国際官、松田治技術・国際官付、鹿島海上保安署巡視艇よどの佐久間春輔機関長 (元技術・国際官付) には、研究の運営全般でご支援をいただきました。匿名の査読者からのご指摘により、本稿は改善されました。記して感謝いたします。

文 献

- Barber, J., A. Klemm, J. Powell, J. Nyberg, and S. Pe'eri (2016) Bathymetric sensor policy and localized chart updates at NOAA's Marine Chart Division, paper presented at Canadian Hydrographic Conference, Halifax, Canada, 16 -19 May 2016.
- Capsey, A. and A. Talbot (2015) Satellite derived bathymetry as source data for navigation charts, paper presented at the 7th International Conference on High-Resolution Surveys in Shallow Water, Plymouth, UK, 14-18 Sept. 2015.
- DigitalGlobe (2010) The benefits of the eight spectral bands of WorldView-2, http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8SPECTRAL-WP_0.pdf, Accessed 2 Sept. 2015.
- Freire, R., S. Pe'eri, L. Alexander, Y. Rzhanov, C. Parrish, and T. Lippmann (2016) Use of satellite imagery for monitoring the mouths of dynamic rivers, paper presented at Canadian Hydrographic Conference, Halifax, Canada, 16 -19 May 2016.
- Head, M., S. Smith, and D. Manda (2016) Into the

- Blue (Tint): Unmanned survey boats complement multibeam, Lidar, and satellite derived bathymetry on the NOAA ship *Thomas Jefferson*, paper presented at Canadian Hydrographic Conference, Halifax, Canada, 16-19 May 2016.
- 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 (2002) IHO Transfer Standard for digital hydrographic data, Special Publication No. 57, S-57 Maintenance Document (Cumulative) Number 8, March 2002, Editions 3.0 and 3.1, pp.56, International Hydrographic Bureau, Monaco, Mar. 2002.
- IHO (2008) IHO Standards for Hydrographic Surveys 5th Edition, Special Publication No44, pp.28, International Hydrographic Bureau, Monaco, Feb. 2008.
- Kampia, A., A. Klemm, S. Pe'eri, J. Barber, D. Merke, and E. Athens (2016) Yukon River prototype electronic charts using satellite derived bathymetry, paper presented at Canadian Hydrographic Conference, Halifax, Canada, 16-19 May 2016.
- 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.
- 栗田洋和・松本良浩・佐川龍之・平岩恒廣 (2016) 衛星画像推定水深で見る海底地形, 平成 27 年度海洋情報部研究成果発表会講演要旨, P1.
- Laporte, J., J. Hedley, and P. Mouscardes (2015) Satellite derived bathymetry migration, *Hydro International*, 19 (7), 16-19.
- 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. Malianas, and Fred J. Tanis (2006) Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2251-2259.
- (一財) 日本水路協会 (2015) 2014 年度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, <http://fields.canpan.info/report/download?id=8900>, Accessed 5 Aug. 2016.
- (一財) 日本水路協会 (2016) 衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究 (平成 27 年度), <http://fields.canpan.info/report/download?id=11186>, Accessed 5 Aug. 2016.
- 佐川龍之・松本良浩・栗田洋和・平岩恒廣 (2016) 高解像度光学衛星画像を用いた水深推定技術の実用化に向けた検討, 日本写真測量学会平成 28 年度年次学術講演会発表論文集, 33-36.
- Teledyne Oceanscience (2016) Z-Boat 1800-RP Datasheet, http://oceanscience.com/pdf/Z-Boat%201800RP%20Data%20Sheet_021316.pdf, Accessed 8 Aug. 2016.
- UKHO (2015) Chart BA2066 South Antigua, UKHO, Taunton, UK.
- USA (2016) NOAA Nautical Chart Manual updated for satellite derived bathymetry, paper presented at United States-Canada Hydrographic Commission, Halifax, Canada, 16 May 2016.

要 旨

海洋情報部と(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)の共同研究「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」では, 衛星画像推定水深(SDB)の作成技術を開発するとともに, わが国海域におけるSDBの解析例を積み重ねてきた。波照間島周辺の解析例から, 解析可能な最大水深は約24mであった。これに加えて高知沖と銚子港の解

析例から、水深や底質、透明度の違いをなるべく偏りなく代表できるような学習用水深データを用意することで、実用的な水深の推定が可能であることがわかった。SDBは正規の水路測量と比較して水深の品質が大きく劣るものの、調査の迅速性と簡便性に大きなメリットがあり、概略情報の海図への利用、Chart Adequacy の評価、港湾域・沿岸域の災害時の対応等において有効な調査手法となろう。