

衛星画像による水深の推定 —海洋情報業務への利用に向けて—[†]

松本良浩*

Satellite derived bathymetry: toward utilisation for hydrographic services[†]

Yoshihiro MATSUMOTO*

Abstract

Hydrographic organisations and their affiliated institutes are stepping up development of the technology of Satellite Derived Bathymetry (SDB). In Japan, Hydrographic and Oceanographic Department of the Japan Coast Guard (JHOD) has launched a research project for SDB in collaboration with Japan Hydrographic Association (JHA) and Remote Sensing Technology Center of Japan (RESTEC) since 2014. Although the uncertainty of the depth values generated in current SDB does not satisfy the IHO S-44 standards, SDB can be produced at lower cost in a shorter survey term compared with conventional survey techniques. Adequate use of SDB will help greatly improve the coverage of unsurveyed or very poorly surveyed sea area that will encourage further maritime development, including charting for safe navigation. IHO and its subsidiary committees have recently started discussion on standardisation of SDB data quality and charting of SDB soundings.

1. はじめに

近年、浅海域はマルチビーム音響測深機で測量が行われているほか、海上保安庁海洋情報部では 2003 年に航空レーザー測深機も導入し、面的な水深情報が効率よく取得されるようになってきた。とはいえ、重要港湾以外の海域ではこうした面的測量でカバーされておらず、旧来の疎な水深データのみであることが依然として多い。とりわけ水深数 m 以浅の極浅海域では、測量船が容易に航行できない上、マルチビーム音響測深機を用いても測深幅が著しく狭いことから、測量の効率は低いものとなる。航空レーザー測深機を用いれ

ばこうした欠点を回避できるものの、運用できる機材が希少であり、利用は限定的である。

また、世界的に見ても、未測量の海域は主に発展途上国において多く存在し、ほとんど進展が見られないということが国際水路機関 (IHO: International Hydrographic Organization) によって指摘されている (第 3 節)。

こうした背景にあって、人工衛星から得られる画像を利用して水深情報を抽出する技術の開発が近年各国水路機関の注目を集めている。このような水深情報は Satellite Derived Bathymetry (SDB: 衛星画像推定水深と訳す) と呼ばれてい

[†] Received September 4, 2015; Accepted October 19, 2015

* 技術・国際課 海洋研究室

Ocean Research Laboratory, Technology Planning and International Affairs Division

る。

本稿では、SDBの諸外国の開発・利用状況を概観するとともに、わが国における現在の開発状況と海洋情報業務へのSDBの利用の展望について述べる。

2. 衛星画像による水深推定の概要

人工衛星搭載の光学センサを用いた受動的なりもーとセンシングは、海底の調査においてはサンゴ、海草、藻場などの底質のマッピングやモニタリングに利用されている例が多い。これは、海域を撮影した衛星画像の各画素の輝度から、太陽光が海水を経て海底で反射する際の反射率を情報として抽出して、底質の判別を行うものである。これに対し、海水中の経路における光の減衰量を情報として抽出すれば、経路の長さから水深が推定できることになる。

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。水中での光の減衰率は波長によって異なり、長波長の光ほど減衰が激しいため、近赤外より長い波長の情報は使えず、可視域の光を利用することになる(山野, 2011)。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、複数のバンドの画像を併せて解析に用いることが多い。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)、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手法が主流である。こうした手法によるSDBの作成フローをFig.2に示す。

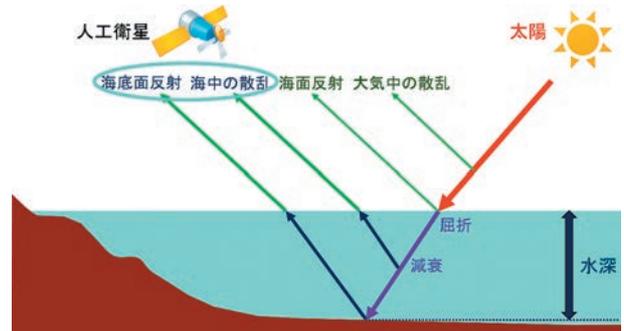


Fig. 1. Propagation path of sun light to the satellite in and above the shallow water.

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。

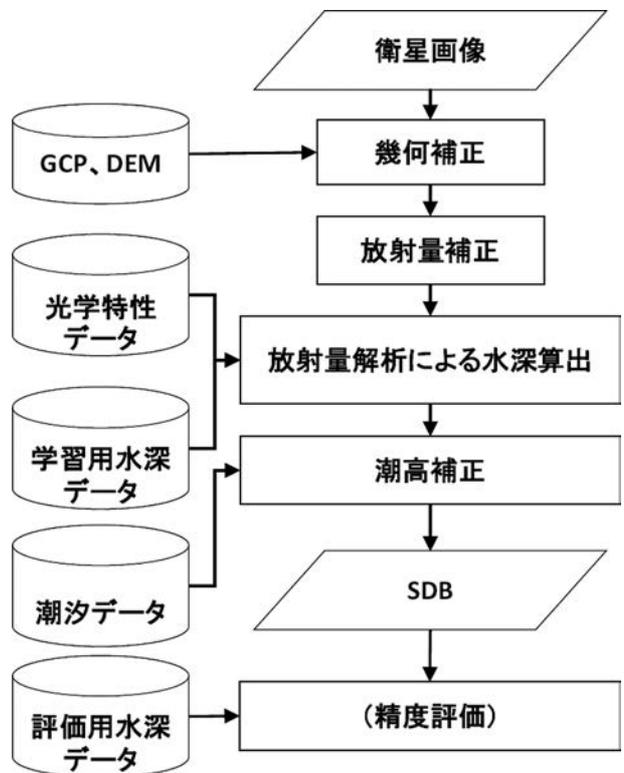


Fig. 2. Flow chart of producing SDB (JHA, 2015).

図2. SDB作成のフロー(日本水路協会, 2015)。

3. 水路機関においてSDBが注目される背景

2013年6月にオーストラリア連邦ウロンゴンで開催されたIHOの第5回地域間調整委員会(IRCC: Inter-Regional Coordination Committee)において、SDBが議題に挙げられた。この時の会議文書(IHB, 2013)は、現在水路コミュニティが抱える問題、SDBの技術の現状および今後のSDBの技術開発の推進への要望を述べるも

のである。この文書に沿って、SDB が注目される背景を概括する。

3.1 国際水路コミュニティが抱える問題

最近 30 年間に各国政府が保有する測量船の数は、外洋向けで 34%、沿岸向けで 35% 減少してきた。航空レーザー測深やマルチビーム測深等の効率的な新技術の導入や、政府から測量業者へのアウトソーシングが進められているが、測量船の減少分を埋め合わせるには至っていない。このため、ほとんどの国において、測量が実施済みの海域面積の進展は、依然遅いか、ゼロという状況にある。これまでに測量成果がほとんどなく、将来も測量の実施の見込みがないような海域について、SDB を利用すれば海図が大きく改善される可能性がある。

3.2 SDB 技術の現状

SDB では航海上重要な海底の地物を漏れなく検出できるとはいえない。使用する光学センサ次第では国際水路測量基準 IHO S-44 第 5 版 (IHO, 2008) の 1b 級を達成できる可能性がある。フランスは既に 20 年以上 SDB を利用して、100 図以上の海図を刊行している。

3.3 勧告

測量データの不足に対処するために適用可能な手法の一つとして、各地域の適切な海域で SDB を推進することを各地域水路委員会の議長に求めること等を勧告している。

4. フランスにおける SDB を利用した海図作成

4.1 SDB を利用した海図作成の手順

IHB (2013) に例示されたとおり、海外県・海外領土として島嶼を多数領有するフランスにおいて、フランス海軍水路部 (SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) は、20 年以上前から島嶼部の海図作成に SDB を利用し、これまでに 100 図以上の海図を刊行してきた実績がある。SDB を利用した海図作成の進め方

として大変よい参考例であるので概説する。本節の以下の記述は、特段の注記がなければ、SHOM (2012) に基づく。

(1) 画像の選択

水深の推定には青、緑、赤の可視光の画像を用いる。岸線や陸上の地物を把握するためにパンクロマチックやマイクロ波レーダー画像を併用している。

(2) 現地調査

測量船による測深を行い、学習用水深データとして用いる水深を取得する。また、衛星画像の幾何補正のための標定点となる陸上基準点の測量を行う。

(3) 幾何補正

(4) デストライピングと画像強調

衛星画像に縞状のノイズが発生することがあり、これを除去することをデストライピングという。画像強調とは、観測対象の情報が強調されるよう各画素の輝度値を一定の規則に従って変換することである。

(5) ベクターマスクの作成

陸地、干出のほか観測時の雲のように、画像の中で水深を推定できない領域を決定する。

(6) 地物の抽出

(7) 水深のモデル化

学習用水深データを用いて、Lyzenga (1978) の経験的方法により青、緑、赤の各バンドの各画素の輝度の対数と水深値のモデル式を重回帰分析により導く。このモデル式を適用して画像全域の各画素の水深を推定する。

なお、SHOM が SDB 解析に使用する衛星画像は SPOT 衛星および Pleiades 衛星のものである (日本水路協会, 2015)。

4.2 水深の品質

水平位置の精度は 2 m 程度で、衛星画像の解像度と陸上基準点の密度に依存する。深さの不確定性は、刊行された海図 99 枚について評価した結果は Fig.3 の通りで、水深 0 から 5 m の場合で最大 30% 程度、水深 5 から 20 m の場合で平

均 10% 程度と評価されている (SHOM, 2012). Fig. 3 によれば, SDB の水深は水深約 2 m 未満の場合を除き, IHO S-44 の 1b 級には達しない.

海底の異物の検出について, IHO S-44 の 1a 級では一辺が 2 m の立方体 (水深 40 m 以浅の場合) を, 特級では一辺が 1 m の立方体を検出可能であることが要求されるが, 現在利用可能な衛星の光学センサの解像度は SPOT 衛星で 8 m, Pleiades 衛星で 2.8 m であることから, 検出不可能である.

取得できる水深は通常は 20 m 程度であることが多く, 場合により 30 m 程度に達する. ただし, 適用例の多くは, フランスの海外県・海外領

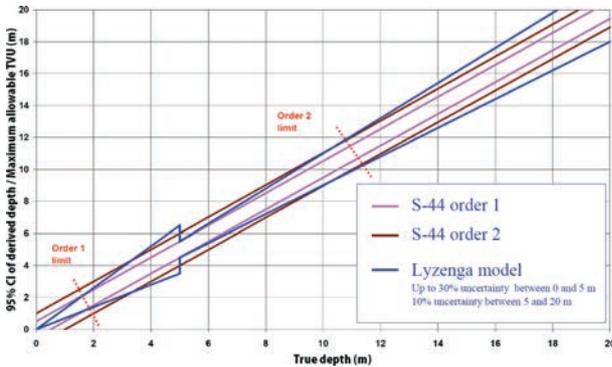


Fig. 3. Lyzenga model (1978) performance of depth uncertainty against IHO S-44 Standards (after SHOM, 2012). The horizontal axis is the true depth value (metric). The vertical axis is the 95 % confidence interval of the derived depth value (metric). The pair of blue lines represents the model of uncertainty of SDB depths observed on 99 nautical charts published by SHOM. Maximum allowable total vertical uncertainties (TVU) specified in IHO S-44 are shown for order 1a/1b (purple lines) and order 2 (brown lines).

図 3. Lyzenga (1978) の手法により推定される SDB 水深の不確定性の評価 (SHOM, 2012 を改変). 横軸は水深の真の値 (単位はメートル), 縦軸は推定水深の 95% 信頼区間 (単位はメートル) を示す. 青色はフランス海図 99 図に用いられている SDB 水深の誤差評価により得られた不確定性のモデル. IHO S-44 第 5 版が許容する深さの不確定性を紫色 (1a/1b 級) との茶色 (2 級) で表示.

土である島嶼周辺で, 熱帯に属する透明度の高い海域である.

4.3 従来の水路測量とのコスト比較

SHOM (2012) は, 測量手段別に面積あたりのコストを試算して比較を行っている.

(1) 航空レーザー測深

€1500-2000/km²

(条件により大きく変動する.)

(2) マルチビーム測深

€1000-2400/km²

(悪条件時には, この 10 倍程度まで変動することもある.)

(3) SDB

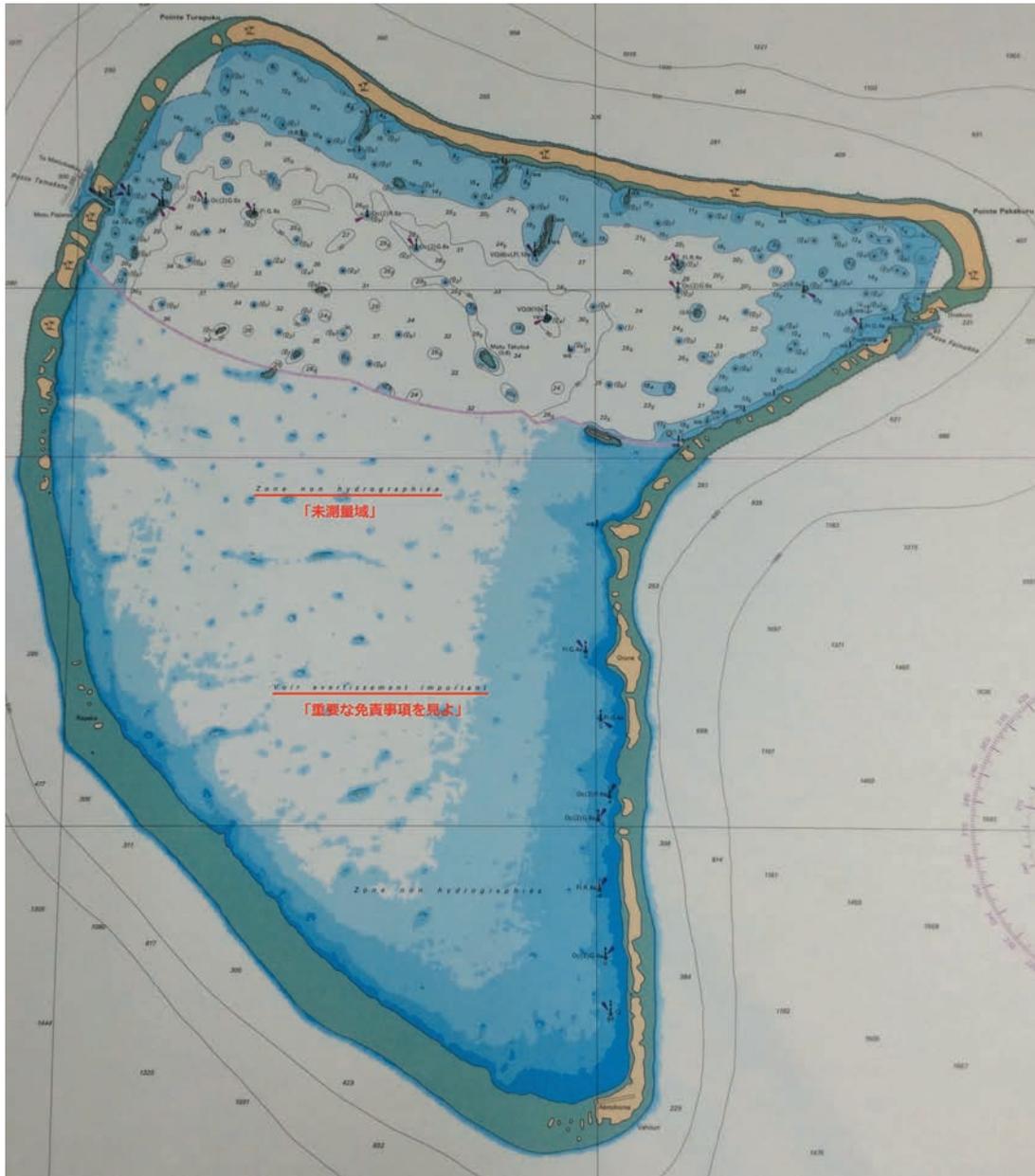
€25-45/km²

(成果物の品質による.)

SDB を利用する場合にも, 陸上基準点測量と学習水深データ取得が必要であるため, 現地調査にある程度時間と費用が必要となるが, そうしたコストを考慮しても, 測量船が容易に入れない極浅海域の水深を短い調査期間で効率よく取得でき, 面積あたりではマルチビーム測深や航空レーザー測量と比較して 2 桁程度低コストで海図が作成できるということになる.

4.4 海図への採用

SHOM 刊行の海図では未測量の海域に SDB を段彩表示 (青白の濃淡で 5 m 刻み) して “Zone non hydrographiée” (未測量域) および “Voir avertissement important” (重要な免責事項を見よ) の注記をしている. SDB で推定された水深値そのものは記載されていない. 欄外に「重要な免責事項」として, 未測量域には衛星データを解析した海底・陸上地形の情報を青色とセピア色で表示しているが, 実際的水深は表示よりも有意に小さかったり, リモートセンシングでは検出不可能な浅瀬があったりする可能性がある旨注意を喚起している (Photo 1).



Dans les zones où les données bathymétriques proviennent de l'interprétation des données du satellite SPOT, les nuances de profondeurs correspondent approximativement aux profondeurs suivantes :

	0 à 5 mètres
	5 à 10 mètres
	10 à 15 mètres
	15 à 20 mètres

Avertissement important : Pour pallier l'absence de données issues de levés classiques à l'extérieur des limites magenta, des informations bathymétriques et topographiques issues de l'interprétation par le SHOM des données du satellite SPOT [© CNES 1995] ont été figurées sur cette carte. Ces informations figurent en bleu et en bistre. L'attention du navigateur est attirée sur leur caractère indicatif et la précaution avec laquelle elles doivent être utilisées. Ainsi les profondeurs réelles peuvent être sensiblement inférieures à celles suggérées, et il peut exister des hauts-fonds non décelables en télédétection.

Photo 1. Example of a satellite derived chart published by SHOM (2011): 7458 ARATIKA, annotated by the author. Below the magenta line inside the atoll is the unsurveyed area filled with SDB (top). Legend of blue shades and “important disclaimer” (bottom).

写真 1. SDB を使用した SHOM (2011) による海図 (フランス海図第 7458 号 ARATIKA) の例 (著書により注記)。(上) 環礁内のマゼンタの線より下の範囲が未測領域で、SDB を表示している。(下) 段彩の凡例と「重要な免責事項」。

5. 米国における研究と適用例

5.1 ニューハンプシャー大学における研究例

米国では、ニューハンプシャー大学に米国海洋大気庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) と共同で設置されている Center for Coastal and Ocean Mapping (CCOM) の研究グループが SDB の手法を研究している。Pe'eri et al. (2014a) は、青・緑又は緑・赤のバンドの画像の対を用いて、Stumpf et al. (2003) による経験的方法により、学習用水深データから水深と輝度の関係式を導く手法で米国北東岸 (マサチューセッツ州)、ナイジェリア、ベリーズにおいて解析を実施している。使用している衛星画像は LANDSAT 8 衛星および WorldView-2 衛星のものである。米国北東岸の例では、到達する水深は約 6 m で、深さの不確定性は水深 2.2 m 付近において最小の 0.6 m 程度となり、これより深いと光路の長さに応じて不確定性が累積され、これより浅いと碎波、気泡や再浮遊する堆積物の影響により、不確定性が増大することが示されている。ナイジェリアおよびベリーズでは到達した水深は 15-24 m 程度であったという。このほか Pe'eri et al. (2014b) は、アラスカの北極海沿岸での適用を行っているが、到達する水深は 4-6 m 程度にとどまっている。アラスカでは画像の範囲で海水の濁度が様でないほか、海水で解析できない領域が多く含まれるため、複数枚の画像を併せて解析するという手法が取り入れられている。

5.2 NOAA における利用

Pe'eri et al. (2014a) は、SDB は予備調査の手段であり、音響測深や航空レーザー測深などの水路測量手法に取って代わるものではないとの見方を示している。NOAA においても、SDB の用途は測量計画のための予備調査、時間変化の大きい海底のモニタリング、災害時の緊急対応等であり、海図作成には直接使用していない (Pe'eri, 2015)。

5.3 GEBCO Cook Book

IHO とユネスコ政府間海洋学委員会 (UNESCO-IOC) の共同事業である大洋水深総図 (GEBCO: GEneral Bathymetric Chart of the Oceans) のプロジェクトの一環として、水深データマッピングへの技術者の参画を促進することを目的に、水深グリッドデータ作成のための技術解説書「GEBCO Cook Book」(IHO and IOC, 2014) が刊行されている。Pe'eri et al. (2014c) は、この第 11 章として、インターネット上で無料公開されている LANDSAT 8 の衛星画像を対象に、広く知られた GIS ソフトウェアである ArcMap と Microsoft Excel を使用して低コストで実施できる SDB の作成手順を解説している。ここでは、学習用データとしては既存の海図水深を利用するものとしている。インターネットからの衛星画像入手方法からソフトウェアの操作方法まで、操作画面の図版入りで順を追って平易に解説されており、発展途上国においても導入しやすく、概査的なデータ整備に有効であると考えられる。なお、LANDSAT 8 画像を使用した場合、解像度は 30 m 程度で、水平位置精度は 14 m 程度となる。

6. オーストラリアにおける研究事例

オーストラリアでは、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) の Dekker ほかの研究グループが SDB の手法を研究している。前述した SHOM と CCOM における事例では衛星画像から得られる各画素の輝度と水深の相関を経験的方法で解析するのに対し、Dekker et al. (2011) は、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) の手法をベースに技術開発を行っている。

こうしたインバージョン法は、経験的方法よりも汎用性が高く、学習用水深データを用いなくてよいという長所がある。可視域のバンドを多数必要とするため、航空機搭載のハイパースペクトルセンサには既に適用されているが、衛星画像に適

用する場合には、何らかの経験式や仮定を新たに設定して未知数を減らす必要がある。Dekker et al. (2012) は、こうしたカスタマイズを行い、ALOS/AVNIR や QuickBird の衛星画像に適用している。より高解像度の QuickBird を利用した場合、深さの精度は水深の 10% 程度、解像度は 2.6 m で、水平位置精度は 5.5 m 程度となる。

こうした手法は研究としては最先端にあるが、実用化にはまだ課題がある。オーストラリア水路部は現在のところ SDB を海洋情報業務に採用していない。

7. わが国の取り組み

わが国で水深の推定を目的に衛星の光学センサを用いたリモートセンシングを研究した例は多くはないが、神野・他 (2009) が底質の不均一な水域に適用できるようこれまでの水深推定手法を改良し、QuickBird, ALOS/AVNIR-2, Terra/ASTER 等の衛星画像を用いて石垣島周辺海域に適用した例が挙げられる。

(一財) 日本水路協会は、日本財団の助成を受け、(一財) リモート・センシング技術センターへの委託による「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」を平成 26 (2014) 年度より 3 年間の予定で実施しており、海上保安庁海洋情報部がこれと共同して研究を進める体制となっている。国内外での SDB に関する研究状況や海外での SDB の海図への採用状況を調査し、これを踏まえてわが国の海域の特性を考慮しながら SDB の解析手法を開発し、実用に向けた検証と海図への採用等に向けた検討を行う計画である。

2009 年 10 月に利用可能となった光学衛星 WorldView-2 は、水中の透過率が高い Coastal Blue バンド (波長 400–452 nm) などのこれまでに無かったバンドが加わった 8 バンドのマルチスペクトルセンサ (うち可視光は 6 バンド) を搭載し (Fig. 4), 1.8 m の解像度を持っていることから、浅海水深情報の取得に効果的であると期待できる。よって本研究課題では WorldView-2 により取得される衛星画像を主な解析対象として開

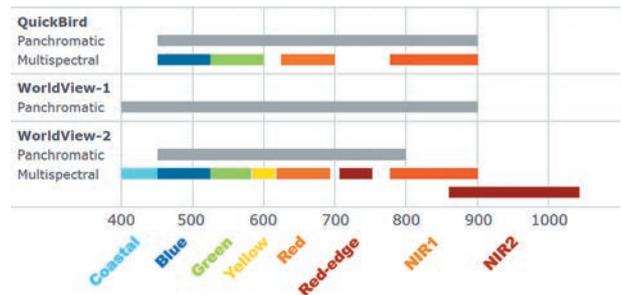


Fig. 4. Spectral bands of WorldView-2 satellite, compared with QuickBird and WorldView-1 (after DigitalGlobe (2010), with band names annotated).

図 4. 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と QuickBird 衛星および WorldView-1 衛星との比較 (DigitalGlobe, 2010 にバンド名を加筆)。

発を行っている。

平成 26 (2014) 年度には、石垣島で陸上基準点の現地調査と WorldView-2 の衛星画像の試験解析を実施した。Lyzena (1978) の手法、Benny and Dawson (1983) の手法および Stumpf et al. (2003) の手法を試行して比較検討を行っている (日本水路協会, 2015)。同海域のマルチビーム測深による水深データを学習用水深データとして利用し、併せて SDB 解析結果の検証にも用いている。比較の結果は Fig. 5 の通りで、水深 5–10 m ではどの手法を用いてもマルチビーム測深の水深とほぼ同様の水深分布が見られるが、Stumpf et al. (2003) の手法は比較的水深を浅く算出し、Benny and Dawson (1983) の手法は海底がサンゴなどの場所を砂地などと比較して水深を深く算出する傾向が見られた。こうした所見も考慮し、水深推定誤差が最良の Lyzena (1978) の手法をベースに今後の開発を進める予定である。

Lyzena (1978) の手法は、その後、Lyzena et al. (2006) や Kanno et al. (2013) による開発・改良が進められている。さらに、Kanno et al. (2014) は、WorldView-2 衛星の画像を用いた水深推定に関して、可視光 6 バンドのうちどの組み合わせを用いるのが有効かという検討を行っている。特にこの結果において、水中の透過が最も良

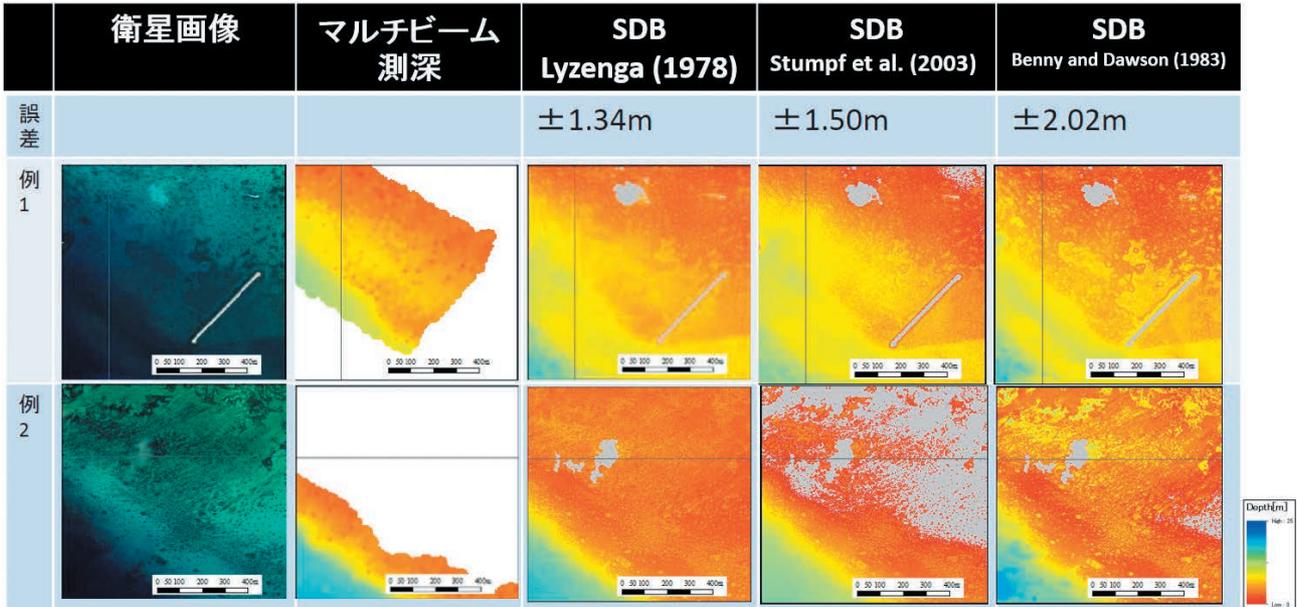


Fig. 5. Comparison of SDBs produced by three different methods from the same WorldView-2 image off Ishigaki Island, Okinawa (JHA, 2015). The seabed is sand as a whole, and partially covered with coral. The errors in this figure mean 95% confidence limits of the difference between SDB depths and reference multibeam soundings.

図 5. 石垣島沖の WorldView-2 衛星画像から 3 つの異なる手法によって作成された SDB の比較 (日本水路協会, 2015). 底質は砂地で、所によりサンゴが分布する. ここで表示している誤差は、マルチビーム測深による水深を真値と見なしたときの SDB 水深値との差の 95% 信頼限界である.

い Coastal バンドが水深推定においては比較的有效性が低く、逆に透過率の低い Red Edge バンドの有効性が高かったことは興味深い。

今後これらの新しい知見を取り入れることによって効率化や精度向上が期待できる。

平成 27 (2015) 年度には、解析手法を進展させつつ、国内の様々な海域でテーマ別の精度検証を行っていく予定である。併せて、放射伝達モデルのシミュレーターを用いて、透明度などの環境条件が水深推定に与える影響について調査していく計画となっている。これは、海底面の反射率や海底地形、透明度などの条件を設定してシミュレーション画像を作成し、このシミュレーション画像を解析して得られる SDB が設定した海底地形を復元できるかを検証して、解析の能力を評価し、解析手法を改良していこうとするものである (Fig. 6)。

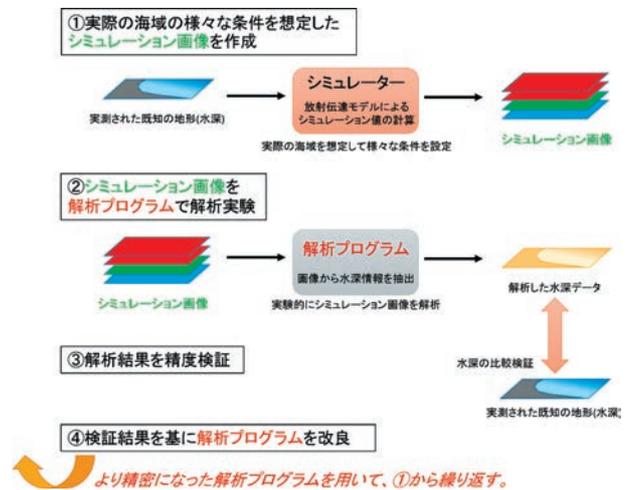


Fig. 6. Flow chart of verification and improvement of SDB analysis software via simulation of radiative transfer model.

図 6. 放射伝達モデルによるシミュレーターを用いた SDB 解析プログラムの検証と改良の流れ。

8. SDBの海洋情報業務への利用に向けて

8.1 水路測量基準の観点

これまでに述べたような各国の研究事例から、現状のSDBで実現可能な品質は、水路測量の観点からは概略次のようにまとめられる。

水平位置の精度

陸上基準点を使えば2 m程度。IHO S-44の1a/1b級を満たす。

深さの精度

水深5 m程度以浅であれば、IHO S-44の1a/1b級を満たす可能性があるが、多くの範囲では満たさない。

海底の地物の検出

光学センサの解像度に依存する。WorldView-2衛星による1.8 mの解像度がこれまでの適用例では最良であった。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である。

また、これまでの適用例は熱帯および亜熱帯域で透明度の比較的高い海域のものが多く、こうした海域以外でも同様の品質が得られるかどうかについては、まだ検証例が少なく、明らかではない。前述した共同研究において、今後わが国の様々な海域における適用を行い、検証していきたいと考える。

深さの精度については、手法の改善に向けた研究が今後も国内外で進められることが期待される。

海底の地物の検出については、より高解像度の光学センサが衛星に搭載されるようになると、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の立方体の検出に向けて一歩近づくものと思われる。

また、IHO S-44の測量基準は元々SDBを想定していないため、例えば深さの不確定性や未測幅、異物の検知能力などの評価基準が単純に適用しにくい項目がある。こうしたことから、Dekker

Table 1. Comparison of hydrographic survey standards specified in IHO S-44 ed. 5 and ‘Satellite order’ proposed by Dekker (2012). For reference, the allowable TVU and THU (Total Horizontal Uncertainties) at 5 m depth are also shown.

表1. IHO S-44 第5版における測量基準とDekker (2012)が提案する「衛星級」基準の比較。TVUとTHUについては、水深5 mにおける基準値を参考表示。

	IHO S-44 特級	IHO S-44 1a級	IHO S-44 1b級	「衛星級」 (Dekker, 2012)
深さの許容不確定性(TVU)*	a=0.25 m b=0.0075 0.253 m @水深5 m	a=0.5 m b=0.013 0.504 m @水深5 m	a=0.5 m b=0.013 0.504 m @水深5 m	水深の10% 0.5m @水深5 m
水平位置の許容不確定性(THU)	2 m	5 m + 水深の5% 5.25 m @水深5 m	5 m + 水深の5% 5.25 m @水深5 m	画素サイズ以内 (2-10 m)
地物の検出	一辺が1 m以上の立方体	一辺が2 m以上の立方体 (水深40 m以浅)	N/A	画素サイズの物体 (水深15 m以浅)
海底全面の探査	必要	必要	不要	必要 (画素サイズの物体の可視深度以浅)
未測深幅	N/A	N/A	25 mまたは水深の3倍のうち大きい方 航空レーザー測深では5 m x 5 m スポット	画素サイズ (2-10 m)

*TVUは次の式により算出する: $\pm\sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$ 。但し、dは水深(m)。

et al. (2012)は、SDB解析に用いる衛星画像の画素サイズをパラメータとしてIHO S-44に「衛星級」という基準を設定してはどうかという提案を行っている (Table 1)。SDBの技術開発・普及が進むとともに、こうした測量基準の議論がIHOを中心に進むことが予想される。

8.2 海図への採用の観点

現在のところ、SDBの成果を海図に直接採用しているのはIHO加盟国のうちフランスのみである (IHB, 2013)。SDBから採用した水深を海図に記載する書式等は特に標準化されたものがなく、SDBを段彩表示で記載したフランス海図はこの点では独自仕様ということになる。

2015年4月にドイツのロストックで開催されたIHOの第11回海図標準化及び紙海図作業部会 (CSPCWG: Chart Standardization and Paper Chart Working Group) において英国がSDBに関する議題を提出している (UKHO, 2015)。この会議文書において、英国は、WorldView-2衛星の画像から直営及び外注で作成した複数の解析手法によるSDBの品質を検証している。この結果、マル

マルチビーム測深による品質の高い学習用水深データを用いた場合には、得られたSDBにおける水深値のうち97%以上が「CATZOCのC級」を満たしており、より安全な海図を作成するのに有効であるという。

なお、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。音響測深機が導入される以前の錘測による水深がこの階級に該当する。

併せて、英国は SDB から採用した水深の海図への記載について海運業界から意見聴取をしており、新たな図式を作って記載することには否定的で、ソースダイアグラムと注記によって水深の品質の違いを表示することが好ましいとの反応を得た。

英国は、以上の検討から、SDB から採用した水深の海図への記載に関する標準化と指針作成を CSPCWG に要請した。実際の海図への記載方法について、航海用電子海図 (ENC: Electronic Navigational Chart) では SDB から採用した水深に最良で CATZOC の C 級を付与し、紙海図には通常黒斜体で記載すること、SDB を根拠に既存の浅所を取り消してはならないこと (但し、旧来の測量による浅所の位置を更新することは可)、SDB の水深の品質についての注記を記載し、ソースダイアグラムに SDB を使用した場所を明示し、データの元となった衛星画像の取得日を記載すること、等を提案した。

CSPCWG 会議における検討では、SDB から採用した水深は海図において他の水深と図式を区別しないこと、SDB を根拠に既存の浅所を取り消してはならないこと、および SDB から採用した水深に最良で CATZOC の C 級を付与することが合意された。

これを受けて、今後 IHO のデータ品質作業部

会 (DQWG: Data Quality Working Group) および S-44 作業部会 (近々に設置される可能性がある) に英国から資料が提出される予定であり、SDB 利用の標準化に向けてそれぞれの観点から議論が進んでいく見込みである。

8.3 海図作成以外の活用

8.3.1 災害時の対応

NOAA の適用例にも挙げられたとおり (5.2 節)、港湾域および沿岸域の水深や異物の把握が緊急に必要なような災害時に、SDB の迅速性は大いに発揮されよう。海洋情報部では、平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震による津波被害に際し、初動対応としての航路障害物調査および二次的対応としての海図の補正・改版のための測量を広範囲において迅速に実施する必要があったことは記憶に新しい。災害時の海底面の調査に 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点は大きなメリットであり、航路障害物の検出および測量船による詳細な調査が必要となる海域の選定が効率的に進むことが期待できる。

8.3.2 学術利用や津波シミュレーションへの使用

海底地形そのものの把握が目的の学術研究や津波シミュレーションに用いる水深データのように、浅海域において高密度の海底地形データを求める需要はある。通常行われる水路測量は航行安全が主目的であることから、船舶の通航の多い港湾域や航路ではマルチビーム音響測深機による面的な測量が進んでいる一方、それ以外の海域では十分に実施されてはおらず、沿岸域であっても海図に記載された旧来の疎な水深情報に限られる場合も多い。また、水深数 m 以浅の極浅海域では、測量船が容易に航行できない上、マルチビーム音響測深機を用いても測深幅が著しく狭いことから、測量の効率は低いものとなる。航空レー

ザー測深機を用いればこうした欠点を回避できるものの、コストが高く、機器も希少であり、普及しているとは言えない状況である。こうした目的の水深データは、DEM (Digital Elevation Model) のようにある一定の密度で水深情報が分布していることが望ましく、他方異物検出の要求は厳しくない場合が多いので、SDBはこうした需要に迅速・低コストで応えることができよう。

9. 結び

SDBは正規の水路測量よりデータの品質が劣ることを理解した上で適切に用いれば、浅海域のデータの空白を低コスト・短期間で埋めることができ、海上交通の安全をはじめとする海洋の開発に有効活用できるという“Better than nothing” (何もないのよりずっといい) の発想で各国とも積極的利用に向かっていくと考えられる。特に、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として、パッケージの開発が進むことも予見される。

海洋情報部においても、今後わが国海域で利用できる技術としてのSDBの研究を進めて行くとともに、IHOを中心とする国際水路コミュニティにおける測量基準や海図作成の基準作りの動向を注視し、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。本研究の遂行に当たり、(一財)リモート・センシング技術センターの佐川龍之博士には、SDBをはじめとする衛星リモートセンシングの技術についてご教示をいただきました。(一財)日本水路協会の明石龍太前調査研究部長および平岩恒廣調査研究部長、大陸棚調査室の古田明上席大陸棚調査官、技術・国際課の中川正則主任技術・国際官および佐久間春輔

技術・国際官付(現・鹿島海上保安署巡視船よど機関長)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

- 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.
- Dekker, A. G., S. R. Phinn, J. Anstee, P. Bissett, V. E. Brando, B. Casey, P. Fearn, J. Hedley, W. Klonowski, Z. P. Lee, M. Lynch, M. Lyons, C. Mobley, and C. Roelfsema (2011) Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments, *Limnol. and Oceanogr.: Methods* 9, 2011, 396-425.
- Dekker, A. G., S. Sager, V. E. Brando, and D. Hudson (2012) Bathymetry from satellites for hydrographic purposes, paper presented at Shallow Survey 2012, Wellington, New Zealand, 22 Feb. 2012.
- DigitalGlobe (2010) The benefits of the eight spectral bands of WorldView-2, http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/DG-8_SPECTRAL-WP_0.pdf, Accessed 2 Sept. 2015.
- 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, MD 8, March 2002, Editions 3.0 and 3.1, pp. 56, International Hydrographic Bureau, Monaco, Feb. 2008.
- IHO (2008) IHO Standards for Hydrographic Surveys 5th Edition, Special Publication No 44, pp. 28, International Hydrographic Bureau, Monaco, Feb. 2008.

- IHO and IOC, The IHO-IOC GEBCO Cook Book, IHO Publication B-11, Monaco, Sept. 2014, 331 pp -IOC Manuals and Guides 63, France, Sept. 2014, 331 pp.
- 神野有生・鯉渕幸生・竹内 渉・磯部雅彦 (2009) 光学理論モデルのセミパラメトリック表現に基づく浅水域の汎用水深分布予測法, 日本リモートセンシング学会誌, 29, 459-470.
- Kanno, A., Y. Tanaka, A. Kurosawa, and M. Sekine (2013) Generalized Lyzenga's predictor of shallow water depth for multispectral satellite imagery, *Marine Geodesy*, 36, 365-376.
- Kanno, A., Y. Tanaka, R. Shinohara, A. Kurosawa, and M. Sekine (2014) Which spectral bands of WorldView-2 are useful in remote sensing of water depth? A case study in coral reefs, *Marine Geodesy*, 37, 283-292.
- 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.
- 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, <http://fields.canpan.info/report/download?id=8900>, Accessed 1 Sept. 2015.
- Pe'eri, S., C. Parrish, C. Azuike, L. Alexander, and A. Armstrong (2014a) Satellite remote sensing as a reconnaissance tool for assessing nautical chart adequacy and completeness, *Marine Geodesy*, 37, 293-314.
- Pe'eri, S., S. Smith, L. Snyder, and B. Madore (2014b) Satellite-derived bathymetry using multiple images: the Alaska north slope case study, paper presented at Canadian Hydrographic Conference 2014, St. John's Newfoundland and Labrador, Canada, 14-17 Apr. 2014.
- Pe'eri, S., B. Madore, L. Alexander, C. Parrish, A. Armstrong, C. Azuike, and E. N. Tetteh (2014c) LANDSAT 8 satellite-derived bathymetry, in *The IHO-IOC GEBCO Cook Book*, pp. 243-304, IHO Publication B-11, Monaco, Sept. 2014 -IOC Manuals and Guides 63, France, Sept. 2014.
- Pe'eri, S. (2015) Satellite-derived bathymetry (SDB), paper presented at 42nd Joint Meeting of UJNR Sea-Bottom Surveys Panel, Tokyo, Japan, 14-15 Jan. 2015.
- SHOM (2011) 海図第 7458 号 ARATIKA, SHOM, Brest, France.
- 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.

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.

山野博哉 (2011) サンゴ礁・藻場・水生生物, 基礎からわかるリモートセンシング, 日本リモートセンシング学会編, pp 70–72, 理工図書, 東京.

要 旨

Satellite Derived Bathymetry (SDB: 衛星画像推定水深と訳す) には近年各国の水路機関が注目

しており, 技術開発が進められている. わが国でも海上保安庁海洋情報部と (一財) 日本水路協会・(一財) リモート・センシング技術センターが平成 26 (2014) 年度から共同研究を開始した. SDB における水深の品質は IHO S-44 の測量基準を満たすものではないが, 正規の水路測量よりデータの品質が劣ることを理解した上で適切に用いれば, 浅海域のデータの空白を低コスト・短時間で埋めることができ, 海上交通の安全をはじめとする海洋の開発に有効活用できる. SDB に関する測量基準や海図作成の基準作りに IHO を中心として国際水路コミュニティが動き出している.