

学習データが無い海域における衛星画像推定水深（SDB）の精度評価 —離れた海域の学習データを用いた推定は有効か？—[†]

松本良浩*

Error assessment of Satellite Derived Bathymetry at areas lacking in-situ training depth data

—Do distant training data derive valid bathymetry?—[†]

Yoshihiro MATSUMOTO*

Abstract

For the purpose of error assessment, the author created satellite derived bathymetry (SDB) from a Landsat 8 image, including a broad area along the east coast of the Kii Peninsula, central Japan, trained by in-situ depth data in Owase Port, Mie Prefecture. Error assessment of the SDB at the twelve areas distant from Owase Port, the training area, yielded the following results: (1) the validity of the depth estimation is deteriorated roughly depending on the distance from the training area, (2) bathymetry mapping is not feasible for areas at a distance of about 20 km or more away from the training area, and (3) at any distance from the training area, depth estimation can be invalid inside an inlet or a bay with a narrow mouth. These results infer the possibility that SDB for reconnaissance of an unsurveyed area is available by utilising in-situ survey results in adjacent areas.

1 はじめに

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）は、2014年から3年にわたり共同研究「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」を実施した。この共同研究においては、衛星画像推定水深（SDB：satellite derived bathymetry）を作成するための解析ソフトウェアが開発され、わが国海域においてSDBの解析例を積み重ねて、SDBの能力や可能性が明らかにされた（日本水路協会（2017）により全容が報告されている）。また、海洋情報業務としての諸

外国における適用例や今後のわが国での活用の展望について松本・他（2017）が検討した。

現状のSDBの作成には学習用水深データと呼ばれる実測された水深値がサンプルとしてある程度必要である。学習用水深データは、母集団の水深を推定するのに十分となるよう、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、面的に多量でなくとも推定精度に影響しないということはSagawa et al.（2016）による検討等で示されている。そこで本稿では、SDBを作成したい対象海域で学習用水深データが入手できない海域を想定し、対象海域

[†] Received August 4, 2017; Accepted November 21, 2017

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

の近隣または離れた海域の水深データが利用可能であれば、これを学習用データに用いた水深推定がどの程度有効であるか、試行結果を用いて検討する。これはそもそも SDB を作成したい対象海域とは異なる環境条件（底質、透明度、気象等）の下で解析を行おうとするものであるため、精度面で不利であることはほぼ自明であるが、既存の水路測量データを活用することで迅速・簡便に SDB を作成できる可能性の一つとして検討しようとするものである。

2 SDB 作成技術の概略

本稿で用いる SDB 作成の手法については日本水路協会（2017）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水深値を既知の情報として与え（これを学習用水深データ

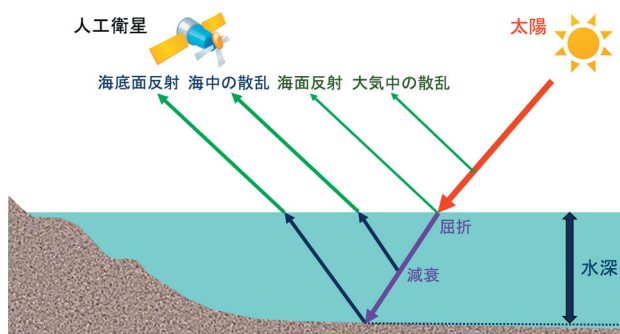


Fig. 1. Propagation path of sunlight to the satellite in and above shallow water.

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。

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。

わが国海域では、Sagawa et al. (2016) が透明度の特に優れた波照間島周辺海域で精度や有効性を詳細に検証しているほか、それほどの透明度が期待できない本州周辺の海域の解析例が上述の日本水路協会（2017）に多数示されており、わが国の極浅海域においてこの手法は実用性があると考えられる。

この解析手法を実装したソフトウェア Bathymetry Mapper 2.0（日本水路協会，2017）を使用して、以下の節で取り上げる SDB 解析を実施した。

3 解析と評価に用いた衛星画像と水深データ

解析した衛星画像は Landsat 8 の光学センサ OLI (Operational Land Imager: 陸域イメージャ) が観測したものである。Table 1 に示す可視光 4 バンドと近赤外線バンドが解析に使用できる。画素サイズは 30 m で、地表位置の決定精度は公称 12 m (CE90: Circular error with 90% confidence) である。解析には Collection 1 Level-1 と呼ばれる「放射量校正済み、オルソ化により地上基準点とデジタル標高モデル (DEM) を用いて高度による写真の歪みを補正済み」データプロダクトを使用した。このデータは米国地質調査所 (USGS) のウェブサイトから無償でダウンロードできる。

今回解析と評価を行う対象領域として、紀伊半島東岸を選定した。これは、わが国本土周辺で比

Table 1. Band designations for Landsat 8 OLI (extracted from USGS website).

表 1. Landsat 8 OLI がもつバンドの分布 (USGS のウェブサイトより抜粋)。

Landsat 8	Bands	Wavelength (micrometres)
Operational Land imager (OLI)	Band 1 - Ultra Blue (coastal / aerosol)	0.43 - 0.45
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88

較的透明度が高く、SDBの解析に適していることと、最近約10年以内の精度のよい水路測量の成果が沿岸に多数存在しており、作成したSDBの海域での評価に利用可能と考えたことによる。

具体的には、尾鷲港の水路測量データを学習用水深データとして利用してLandsat 8画像からSDBを作成し、尾鷲港以外の各海域において、推定水深と既存の水路測量データとの間で相関を評価した。SDBの解析を行った衛星画像は、2015年4月30日に取得されたPath: 109,

Row: 36のものである (Fig. 2)。学習および評価に用いた水路測量データの一覧をTable 2に、位置をFig. 3に示す。

4 三重県沿岸部のSDB作成と海域毎の評価

4.1 尾鷲港の水深を学習したSDBの作成と評価

SDBの解析にあたっては、学習用水深データとして入力する(正解とする)水深データは、解析対象の衛星画像の各画素に実水深値が対応するよう、ラスタデータで与える必要がある。

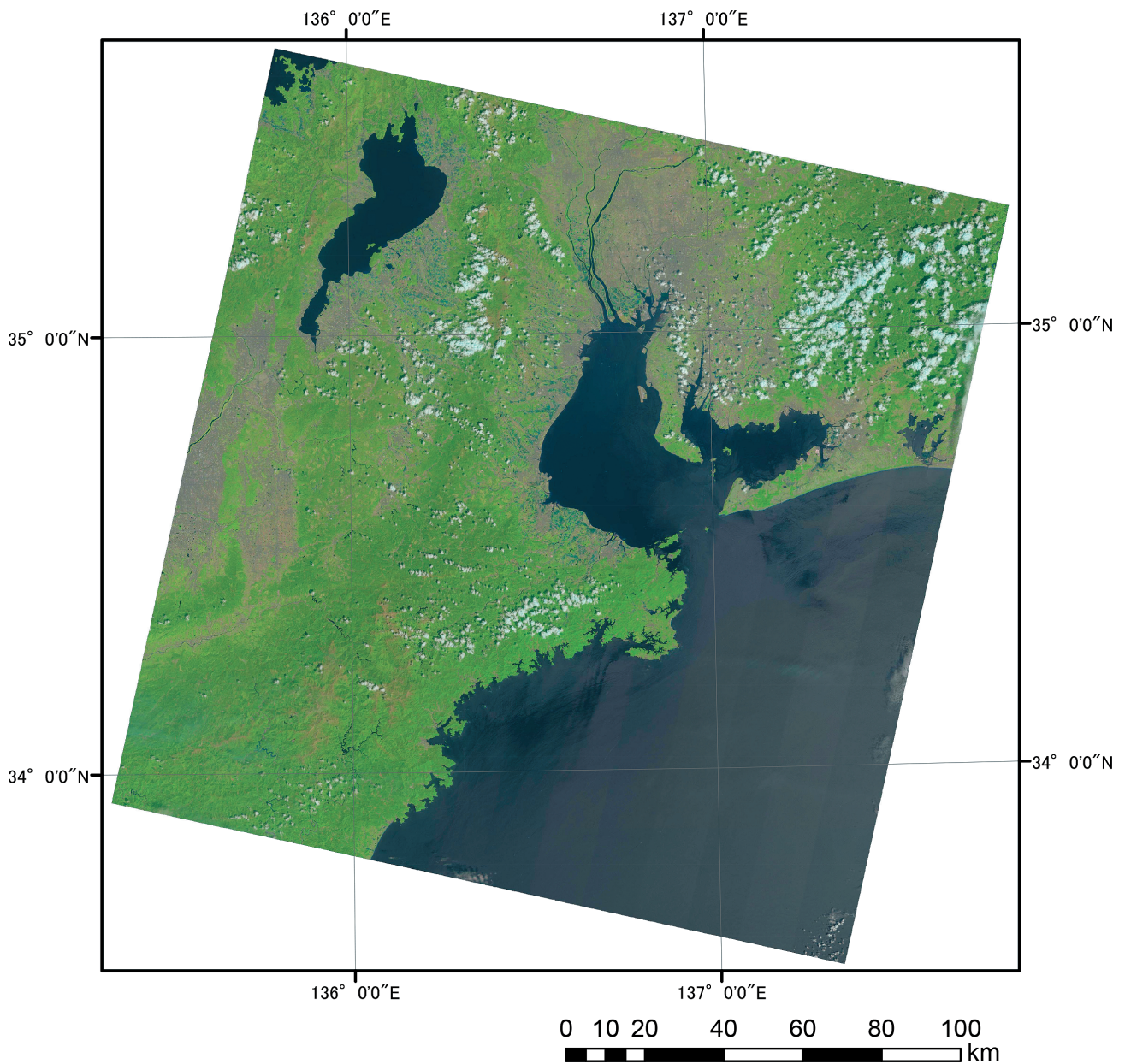


Fig. 2. Landsat 8 image used for SDB analysis. Acquisition date: 30 April 2015, Path: 109, Row: 36.

図2. SDB作成に用いたLandsat 8衛星画像。2015年4月30日撮影, Path: 109, Row: 36。

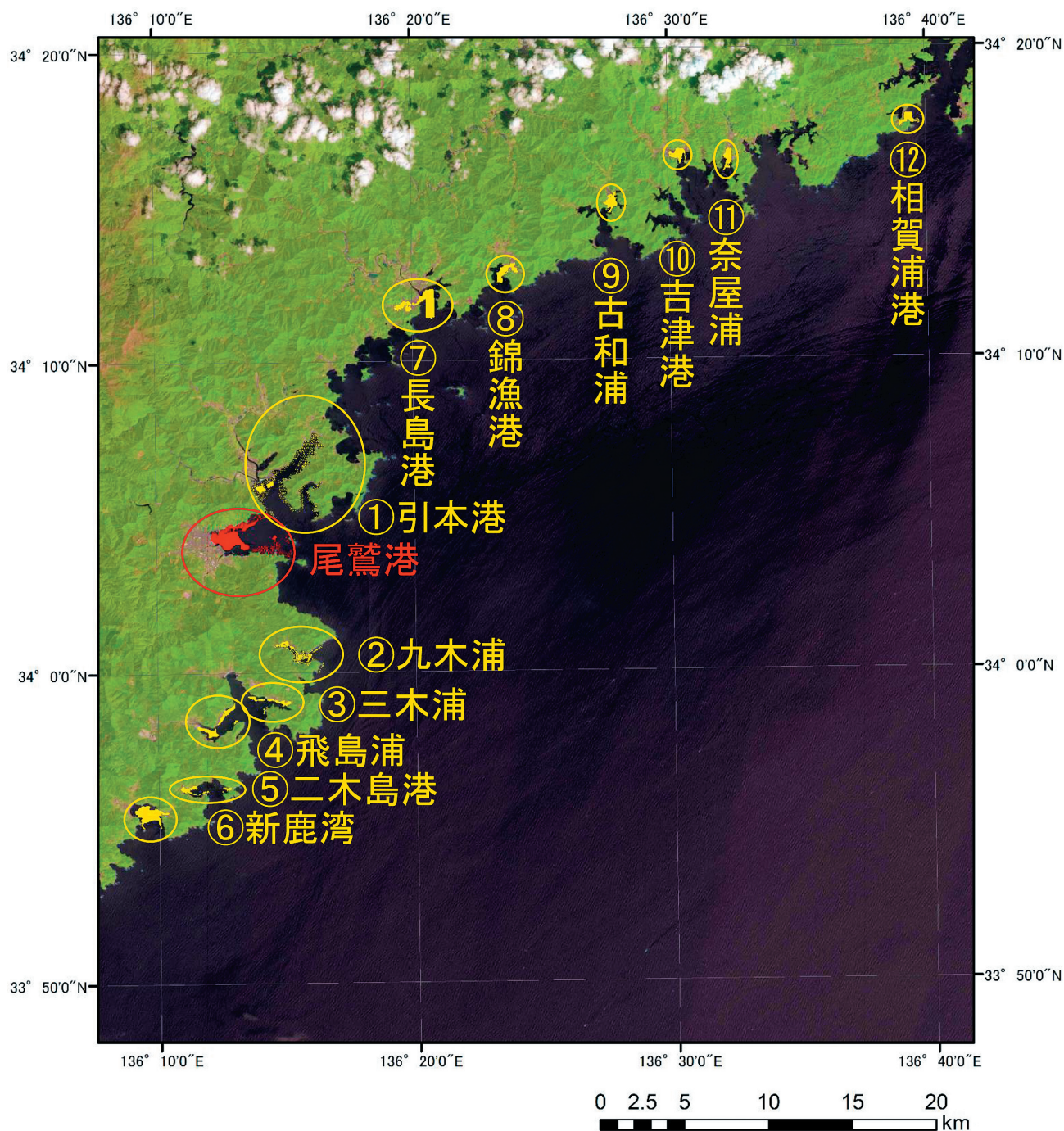


Fig. 3. Distribution of training and ground truth bathymetry data. The area of the training data in Owase Port is coloured in red. The areas of the ground truth are coloured in yellow.

図3. 学習用水深データおよび評価用水深データの分布. 赤色は学習用水深データを使用した尾鷲港. 黄色は評価用水深データを使用した各海域.

Table 2. The survey year(s) of the each in-situ (training or ground truth) bathymetry data and approximate distance between the each area and Owase Port, the training area.

表 2. 実水深（学習用水深および評価用水深）データの測量年および尾鷲港からのおおよその距離。

海域名	測量年	尾鷲港からのおおよその距離
⑫相賀浦港	2008	46 km
⑪奈屋浦	2009	36 km
⑩吉津港	2009	34 km
⑨古和浦	2009	29 km
⑧錦漁港	2010	22 km
⑦長島港	2010	17 km
①引本港	2004	3 km
	2016	
	2004 (2件)	
	2004~2005	
尾鷲港	2009	-
	2012	
	2016	
	2016	
②九木浦	2004	8 km
③三木浦	2012	10 km
④飛島浦	2011	11 km
⑤二木島港	2011	16 km
⑥新鹿湾	2012	18 km

尾鷲港では 2004 年から 2016 年にかけて 6 件の測量成果が実水深のデータとして利用可能であった (Table 2)。この 6 件の水深データを、解析対象の衛星画像と解像度および範囲が同じとなるよう最近傍法でリサンプリングして作成したラスタデータを実学習用水深データとした。このうち実際に学習に用いた水深の範囲は 0.1 m ~ 25 m であり、その画素数は 2660 であった。

作成した SDB の全景を Fig. 4 に示す。推定水深 0.1–25 m の範囲をカラースケールで表示している。OLI の走査幅は 185 km あり、元の画像およびそれから作成した SDB は三重県沿岸部のほぼ全域と伊勢湾および浜名湖までが含まれる。

学習用水深データの海域（以後「学習海域」と呼ぶ）から離れるほど推定水深が異常値であることは、SDB の沖合部を見れば明白である。学習海域からある程度離れた地点では水深推定が有効でなくなることが容易に予想できる。

尾鷲港を拡大した SDB を Fig. 5 (a) に、学習

用水深データ（実水深）を Fig. 5 (b) に、SDB と実水深との間の相関を見るヒストグラム散布図を Fig. 5 (c) に示す。

「SDB と実水深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実水深の値（この例ではマルチビーム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。黒線は実水深の水深値 Z に対し、 $Z \pm 0.5$ m 区間の SDB の水深値の平均値、赤線は実水深の水深値 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。

この SDB 解析の結果、決定係数は $R^2 = 0.675860$ 、二乗平均誤差は $RMSE = 3.816224$ m であった。誤差の 95% 信頼区間は水深に大きく依存せず全般的に平均値 ± 5 m 程度であり、水路測量の精度からは大きく見劣りするが、水深 20 m 程度まで実水深との相関があることが見てとれる。

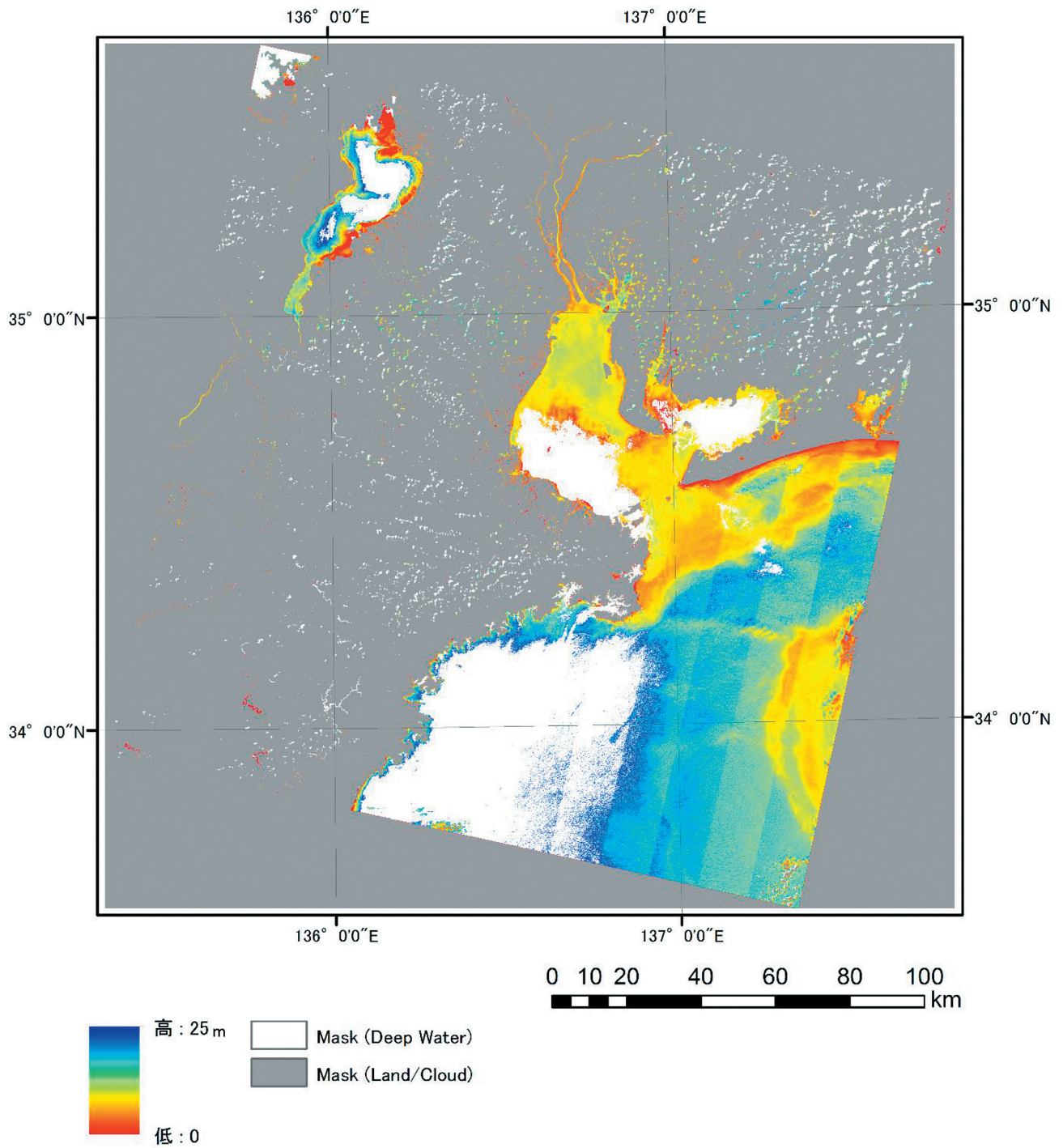


Fig. 4. Whole view of the created SDB.

図 4. 作成した SDB の全景.

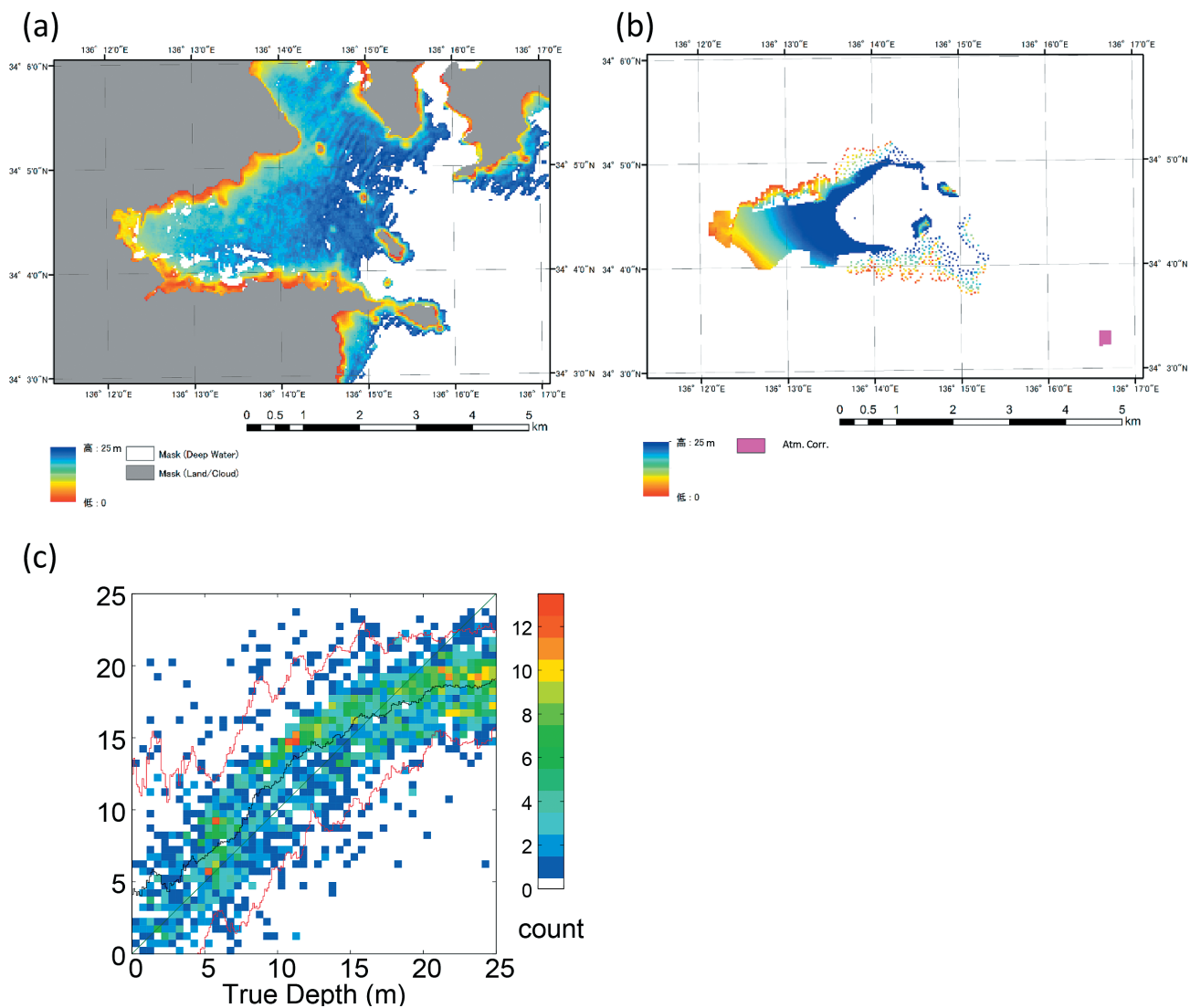


Fig. 5. (a) Enlarged map of the SDB at Owase Port. (b) Training data. The purple pixels were used for atmospheric correction. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus training data.

図5. (a) 尾鷲港を拡大したSDB. (b) 学習用水深データ. 紫色の領域は大気補正に使用した暗画素. (c) SDBと実水深のヒストグラム散布図.

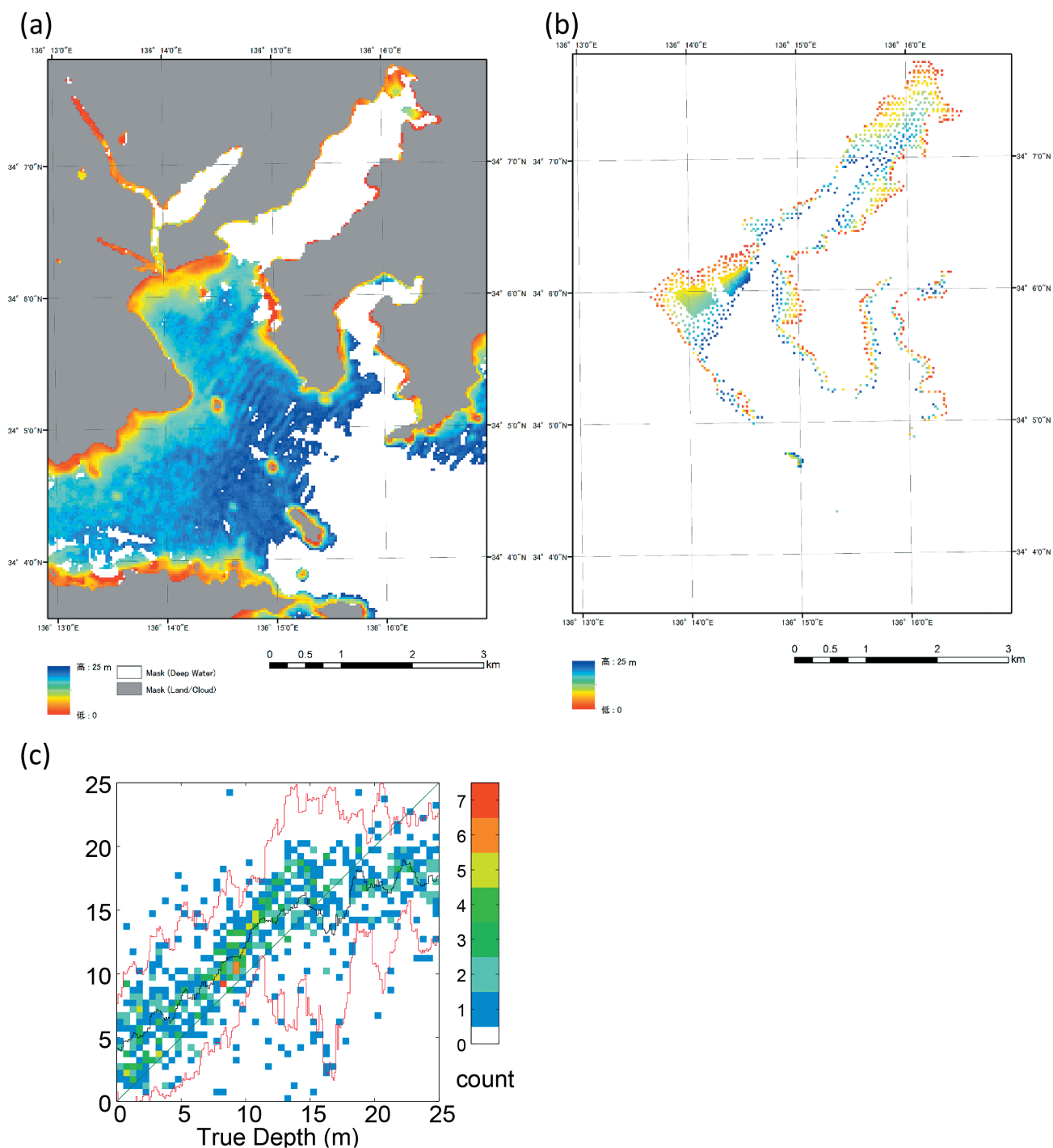


Fig. 6. (a) Enlarged map of the SDB at (1) Hikimoto Port. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図6. (a) ①引本港を拡大したSDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDBと実水深のヒストグラム散布図.

4.2 各海域における評価

①^{ひきもと}引本港

引本港は同じ尾鷲湾内にあり、尾鷲港の北東に隣接する港湾である。2004年および2016年に実施された水路測量のデータを評価用水深データと

して使用した。(なお評価にあたっては、学習用水深データと同様のリサンプリングを行ったラスタデータを作成して用いている。以降の各海域においても同様。)この海域を拡大したSDBをFig. 6 (a)に、評価用水深データ(実水深)を

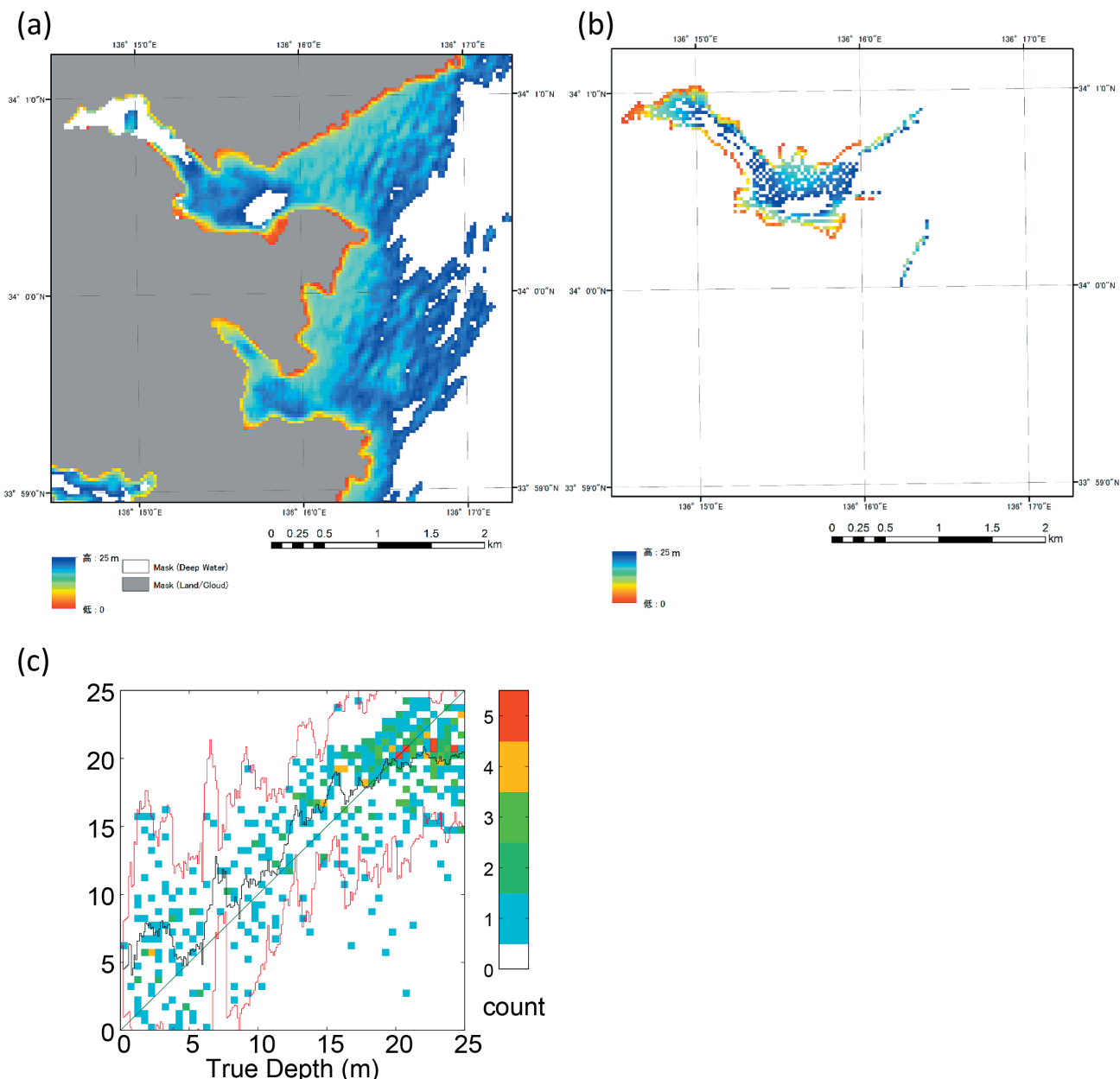


Fig. 7. (a) Enlarged map of the SDB at (2) Kuki-ura. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 7. (a) ②九木浦を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

Fig. 6 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 6 (c) に示す。

この海域では、推定精度の傾向は概ね尾鷲港における結果と同様で、水深 18 m 程度まで SDB と実水深の間の相関が見られるものの、誤差の 95% 信頼区間は水深 12 m 以深で幅が広がり、最大で平均値 ± 10 m 程度にまでばらついている。また、湾奥部や入江では水深が推定されずに抜けている領域が目立つ。

②^{くき}九木浦

九木浦は学習海域の中心部から約 8 km 南の海域である。2004 年に実施された水路測量のデータを評価用水深データとして使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 7 (a) に、評価用水深データ（実水深）を Fig. 7 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 7 (c) に示す。

この海域では、水深 20 m 程度まで SDB と実水深の間の相関が見られるものの、誤差の 95%

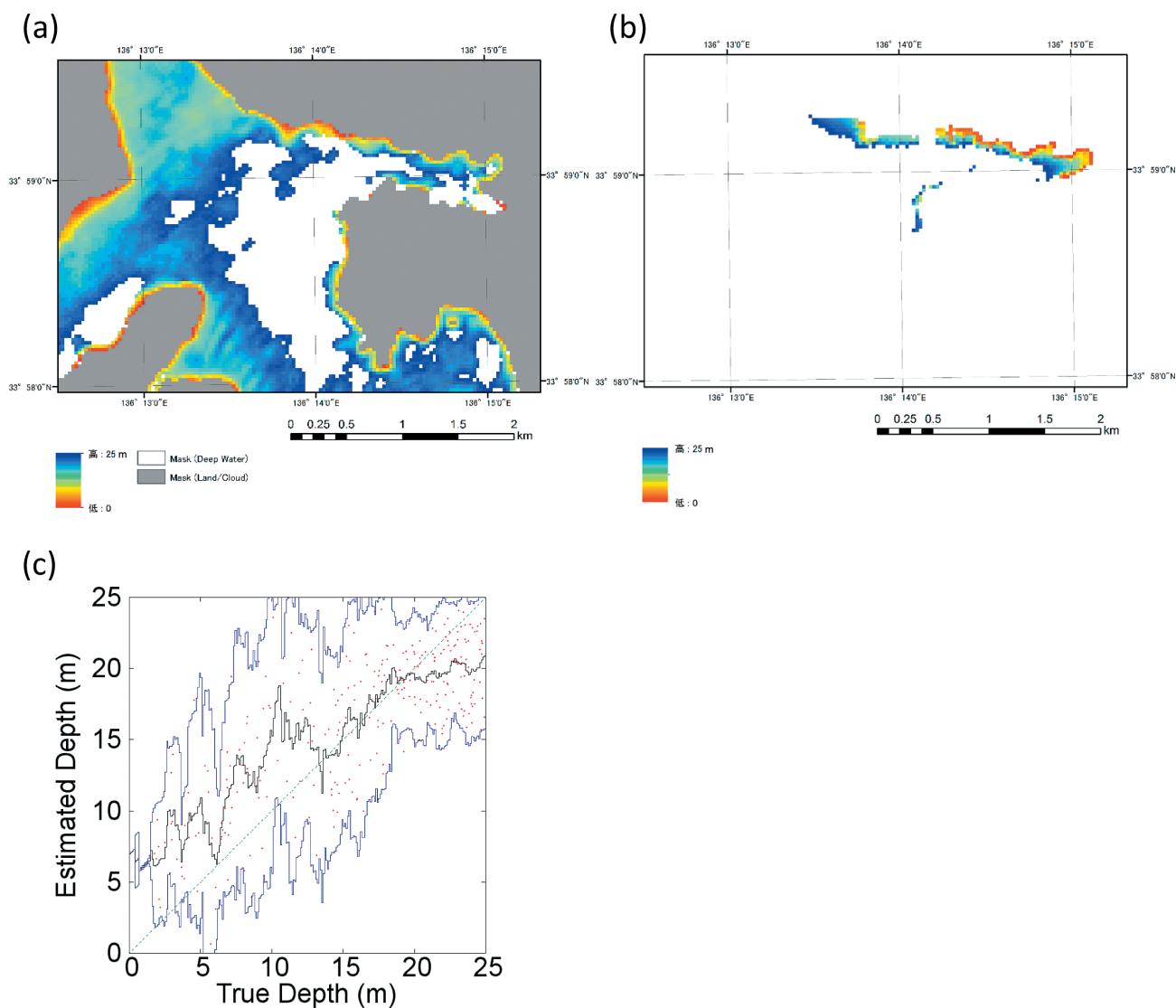


Fig. 8. (a) Enlarged map of the SDB at (3) Miki-ura. (b) Ground truth. (c) Scatter plot of SDB depths versus ground truth.

図 8. (a) ③三木浦を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深の散布図.

信頼区間は特に水深 10 m 以浅で $\pm 5-8$ m 程度の大きな幅を持っているなど、ばらつきが大きい。湾奥部で水深が推定されずに抜けている領域がある。

③^{みき}三木浦

三木浦は学習海域の中心部から約 10 km 南の海域である。2012 年に実施された水路測量のデータを評価用水深データとして使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 8 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 8 (b) に、SDB と実水深の散布図を Fig. 8 (c) に示す (検証点が少数

であるため、ヒストグラムとはしない)。

この海域では、水深 18 m 程度まで SDB と実水深の間の相関が見られるものの、全般的にばらつきが大きく、実水深より深い方向に推定値が外れていることが多い。

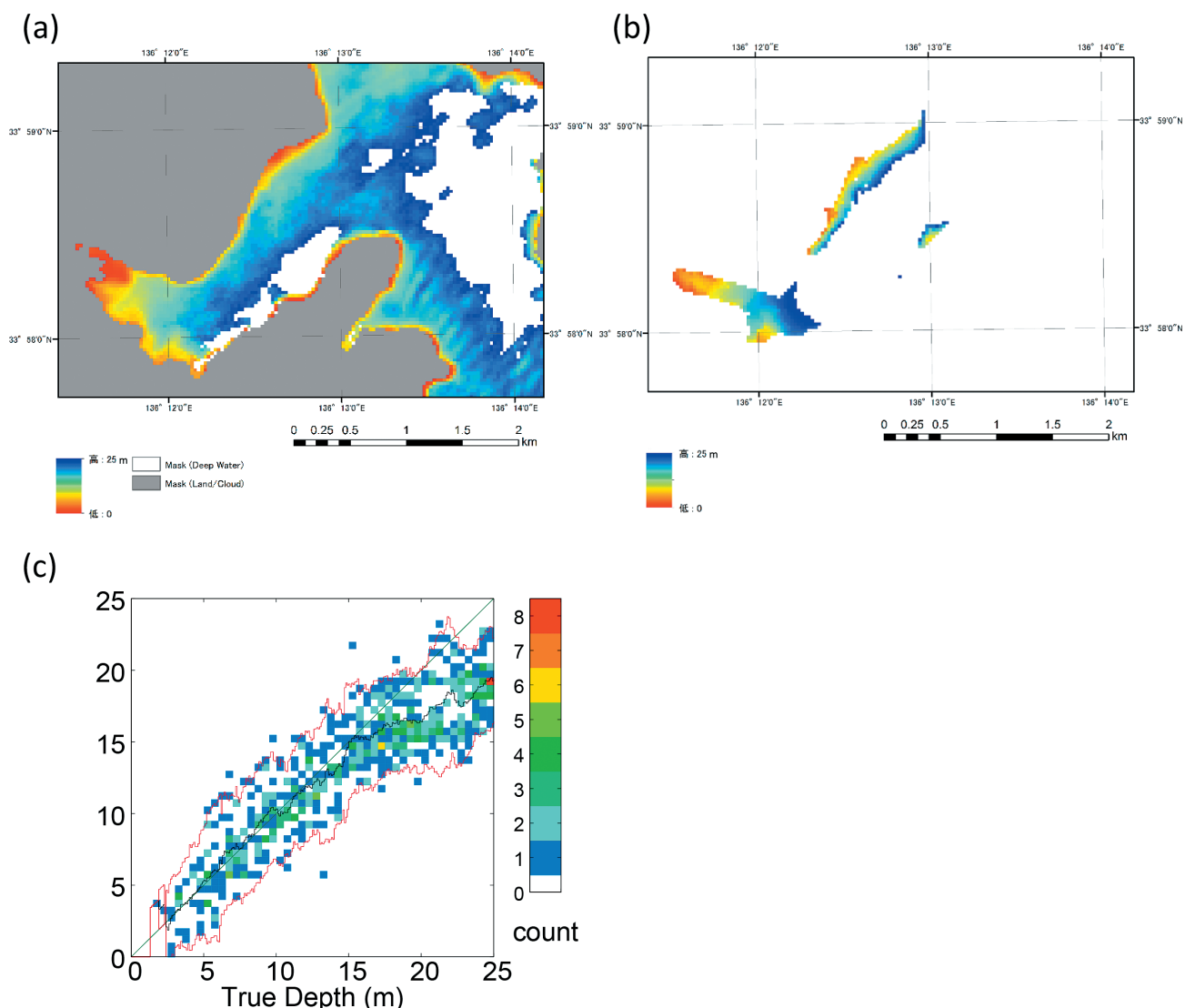


Fig. 9. (a) Enlarged map of the SDB at (4) Tobishima-ura. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 9. (a) ④飛島浦を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

とびしま ④飛島浦

飛島浦は学習海域の中心部から約 11 km 南で、③三木浦の西に隣接する海域である。2011 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 9 (a) に、評価用水深データ（実水深）を Fig. 9 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 9 (c) に示す。

この海域では、実水深がほとんどない水深 2 m 以浅を除き 17 m 程度まで SDB と実水深の間の相関が安定して見られ、誤差の 95% 信頼区間は平均値 ± 3 m 程度に収まっている。

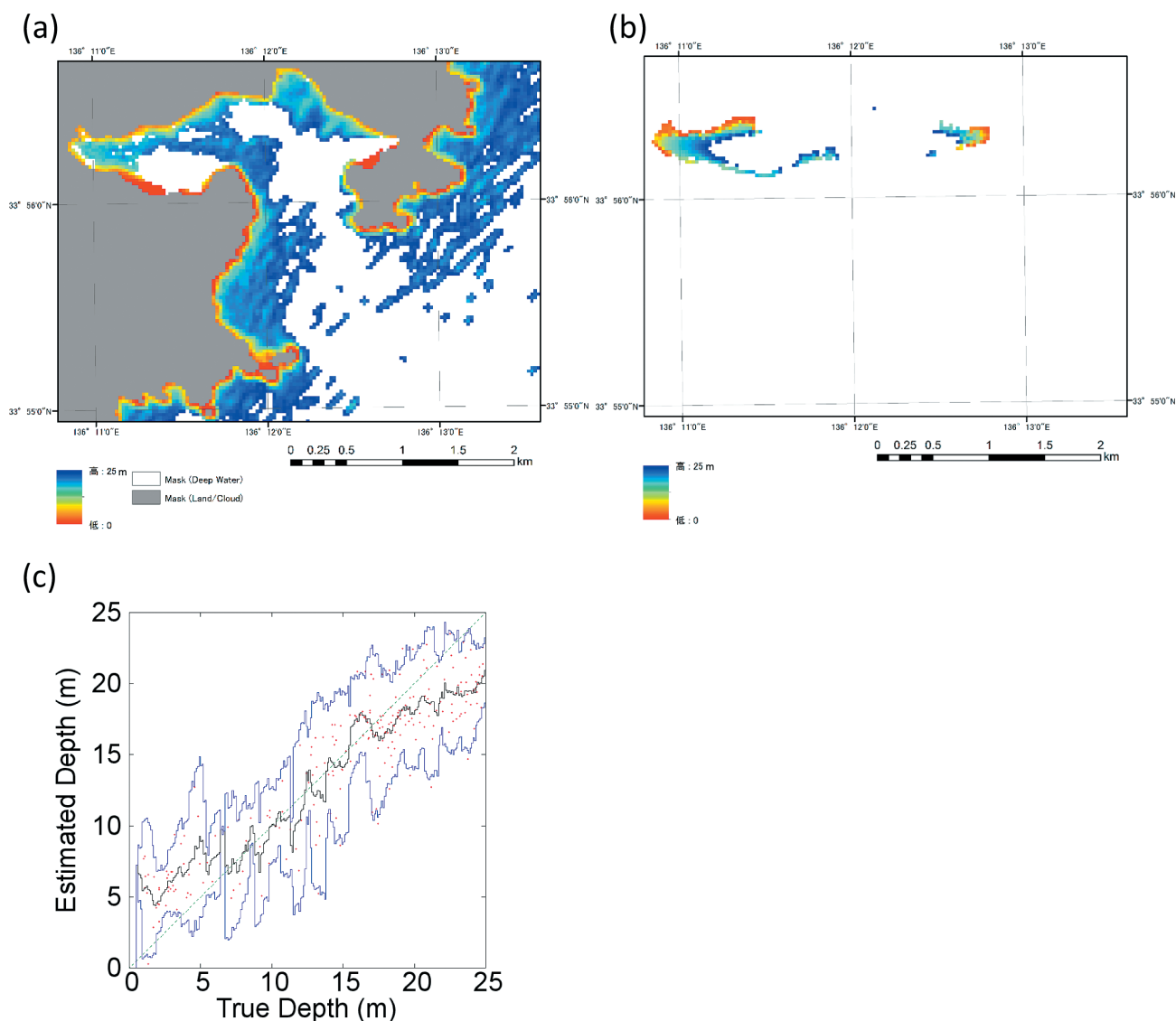


Fig. 10. (a) Enlarged map of the SDB at (5) Nigishima Port. (b) Ground truth. (c) Scatter plot of SDB depths versus ground truth.

図 10. (a) ⑤二木島港を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深の散布図.

⑤^{にぎしま}二木島港

二木島港は学習海域の中心部から約 16 km 南の海域である。2011 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 10 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 10 (b) に、SDB と実水深の散布図を Fig. 10 (c) に示す (検証点が少数であるため、ヒストグラムとはしない)。

この海域では、水深約 21 m まで SDB と実水深の間の相関は比較的良く、誤差の 95% 信頼区間は悪くとも平均値 ± 6 m 程度に収まっている。水深 6 m 程度以浅では実水深より深い方向に推

定値が外れている。

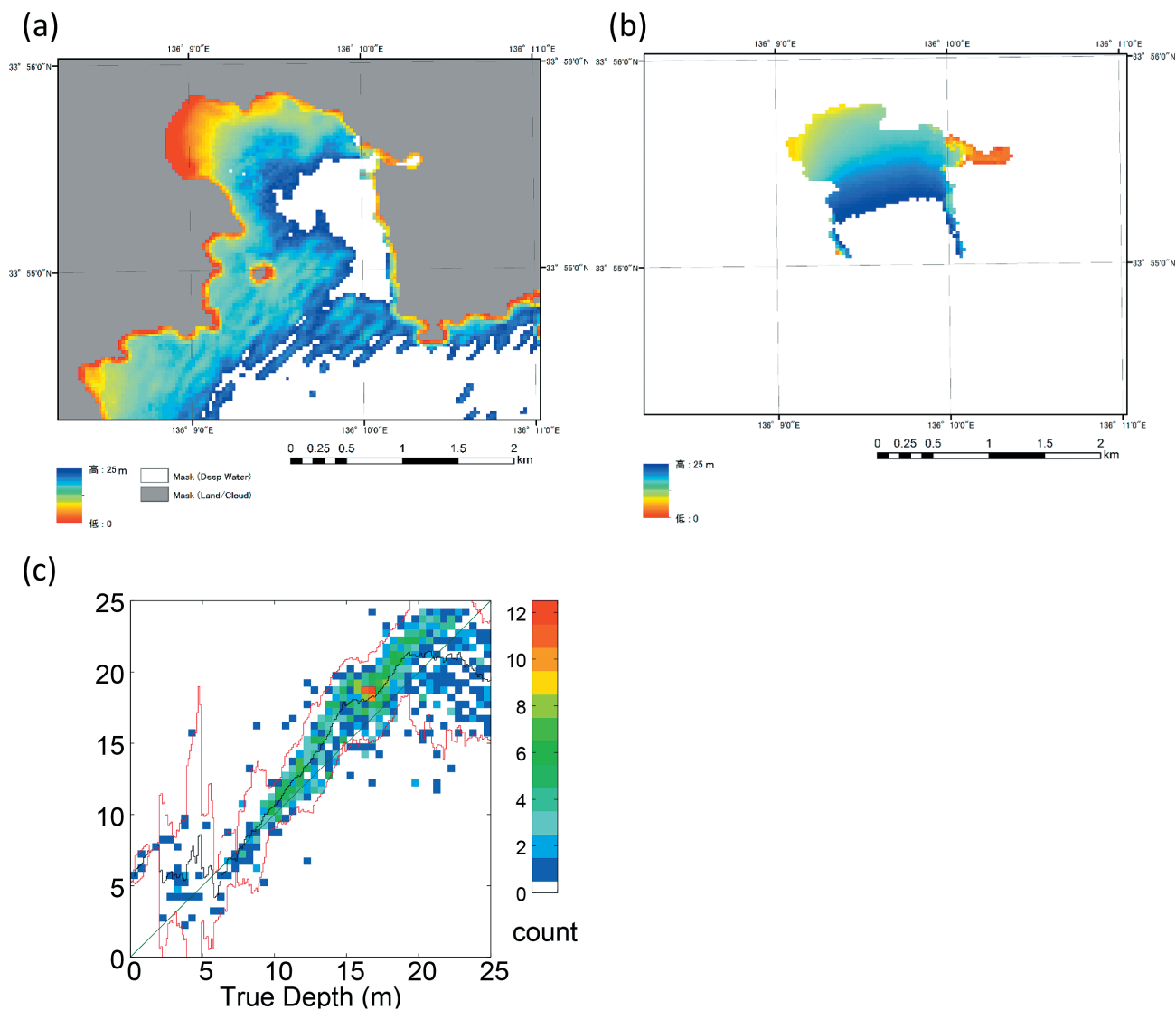


Fig. 11. (a) Enlarged map of the SDB at (6) Atashika Bay. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 11. (a) ⑥新鹿湾を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

⑥^{あたしか}新鹿湾

新鹿湾は学習海域の中心部から約 18 km 南南西の海域である。2012 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 11 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 11 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 11 (c) に示す。

この海域では、実水深が少ない水深 6 m 以浅を除き 19 m 程度まで SDB と実水深の間の相関が安定して見られ、誤差の 95% 信頼区間は平均値 ± 2 m 程度に収まっている。水深 6 m 以浅の評価は検証点が少なく困難であるが、実水深より

深い方向に推定値が外れる傾向がある。なお、湾の東岸沿いには SDB の水深が抜けている領域が多い。

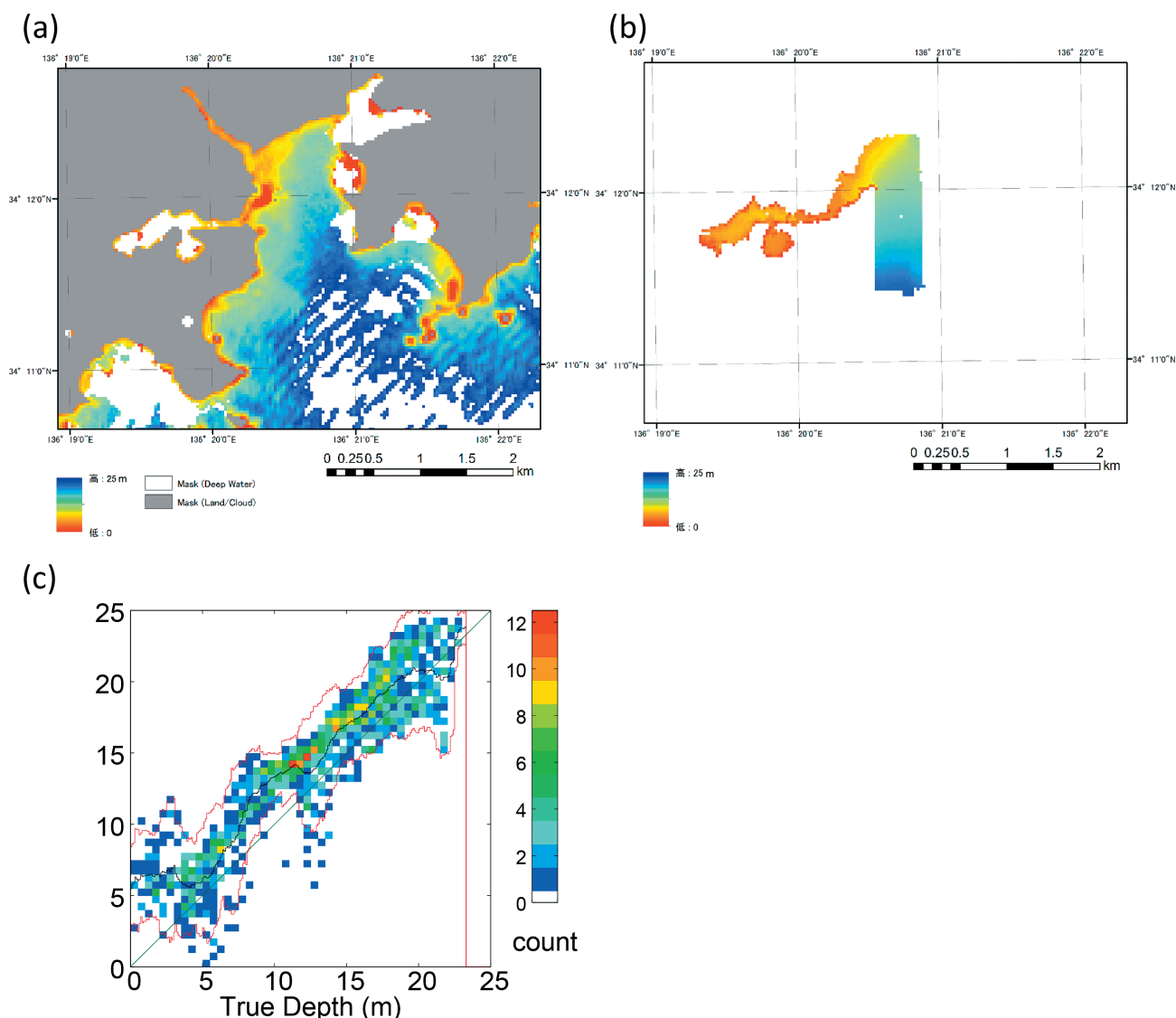


Fig. 12. (a) Enlarged map of the SDB at (7) Nagashima Port. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 12. (a) ⑦長島港を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

ながしま
⑦長島港

長島港は学習海域の中心部から約 17 km 北東の海域である。2010 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 12 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 12 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 12 (c) に示す。

この海域では、水深 8–12 m の範囲で推定水深の 95% 信頼区間が実水深より深い範囲に外れているが、それを除けば水深 4–20 m 程度の範囲で SDB と実水深の間の相関が安定して見られ、誤差の 95% 信頼区間は概ね平均値 ± 2 m 程度に

収まっている。水深 4 m 以浅では実水深より深い方向に推定値が外れていることが多い。なお、湾奥部や入江は SDB でほぼ再現されていない。

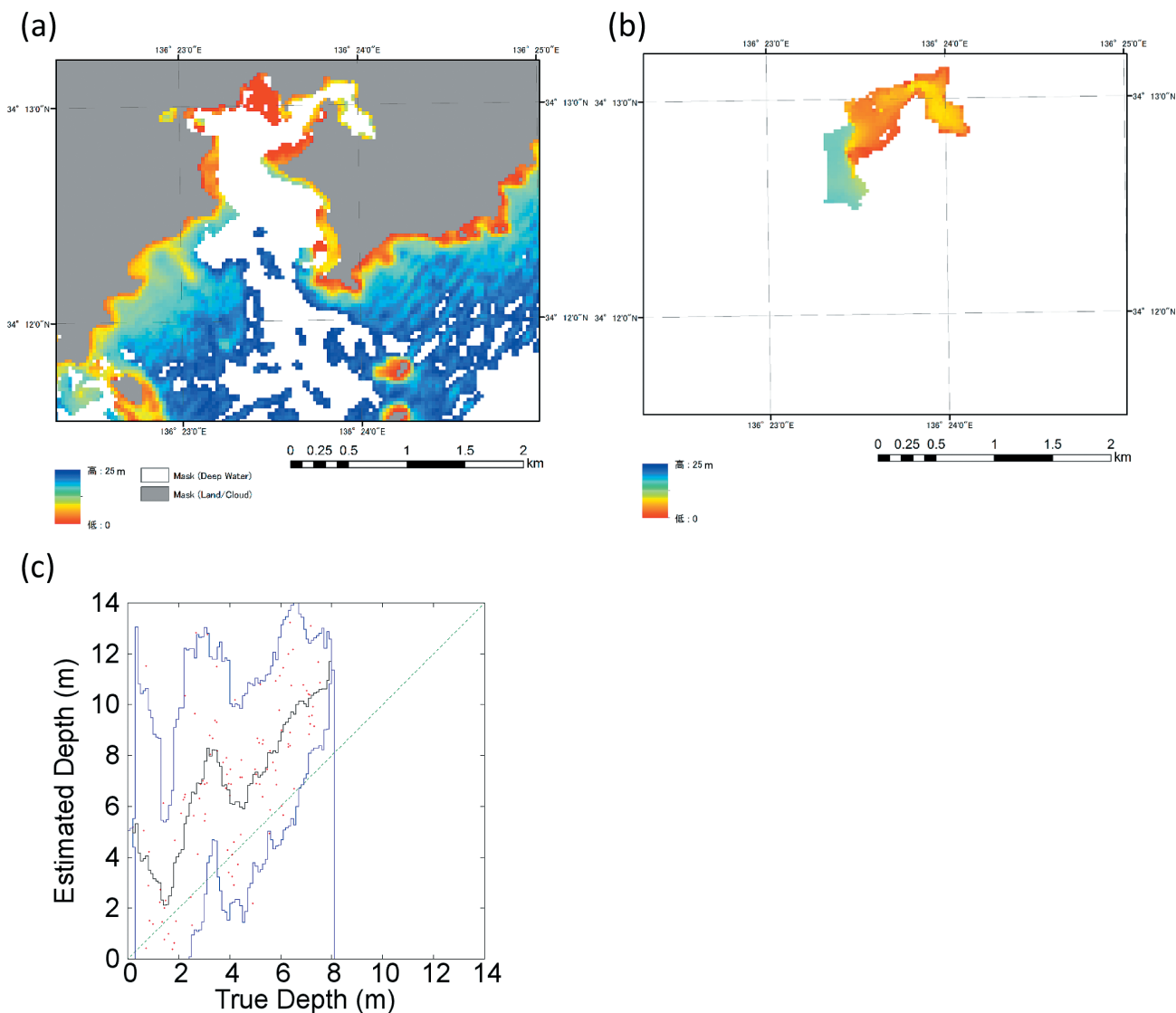


Fig. 13. (a) Enlarged map of the SDB at (8) Nishiki Fishery Port. (b) Ground truth. (c) Scatter plot of SDB depths versus ground truth.

図 13. (a) ⑧錦漁港を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深の散布図.

にしき
⑧ 錦漁港

錦漁港は学習海域の中心部から 22 km 程度北東の海域である。2010 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 13 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 13 (b) に、SDB と実水深の散布図を Fig. 13 (c) に示す (検証点が少数であるため、ヒストグラムとはしない)。

錦漁港は湾奥部に位置しているが、SDB では評価用水深データの範囲の大部分が再現されなかった。沿岸部の実水深 0–8 m の範囲で少数の推定水深が得られているが、実水深より平均 1–

4 m 程度深い方向に推定値が外れている。

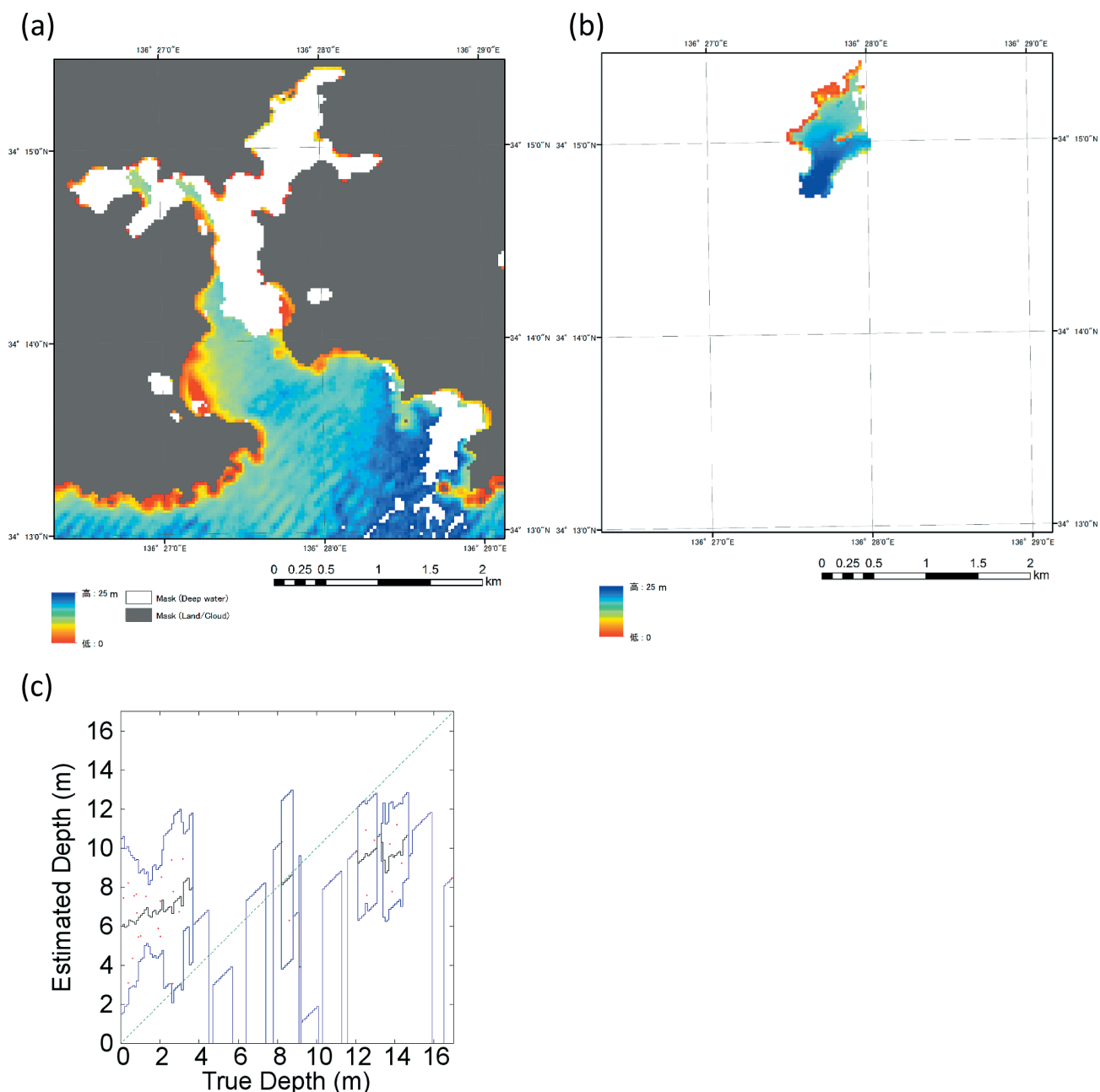


Fig. 14. (a) Enlarged map of the SDB at (9) Kowa-ura. (b) Ground truth. (c) Scatter plot of SDB depths versus ground truth.

図 14. (a) ⑨古和浦を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深の散布図.

⑨^{こわ}古和浦

古和浦は学習海域の中心部から約 29 km 北東の海域である。2009 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 14 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 14 (b) に、SDB と実水深の散布図を Fig. 14 (c) に示す (検証点が少数であるため、ヒストグラムとはしない)。

SDB を見ると、湾口部では評価不能ながら推定水深が多数得られているのに対し、湾奥の古和浦では推定水深がほとんど得られておらず、評価用水深データの範囲の大部分が再現されなかった。検証点は 38 点とわずかであり、実水深との相関もほとんど見られない。

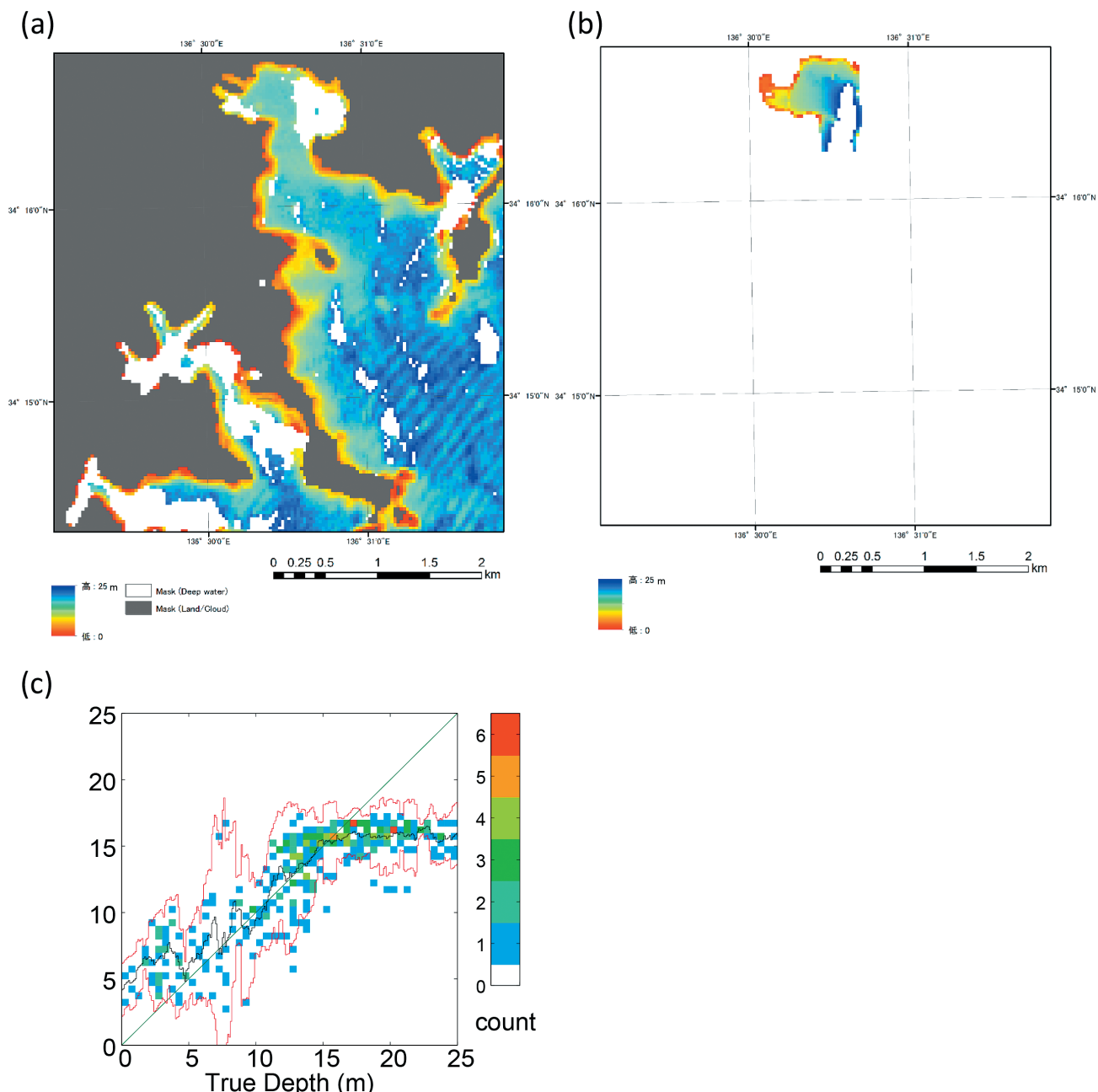


Fig. 15. (a) Enlarged map of the SDB at (10) Yoshizu Port. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 15. (a) ⑩吉津港を拡大した SDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

⑩^{よしづ}吉津港

吉津港は学習海域の中心部から約 34 km 北東の海域である。2009 年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 15 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 15 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 15 (c) に示す。

SDB を見ると、湾の外の浅い沿岸部では評価

不能ながら推定水深が多数得られているのに対し、湾奥の吉津港では推定水深の得られなかった領域が見られる。推定水深と実水深が比較できた領域においては、水深 5–16 m 程度の範囲で SDB と実水深の間の相関は比較的良く、誤差の 95% 信頼区間は概ね $\pm 2-5$ m 程度である。水深 5 m 以浅では実水深より深い方向に推定値が外れていることが多い。

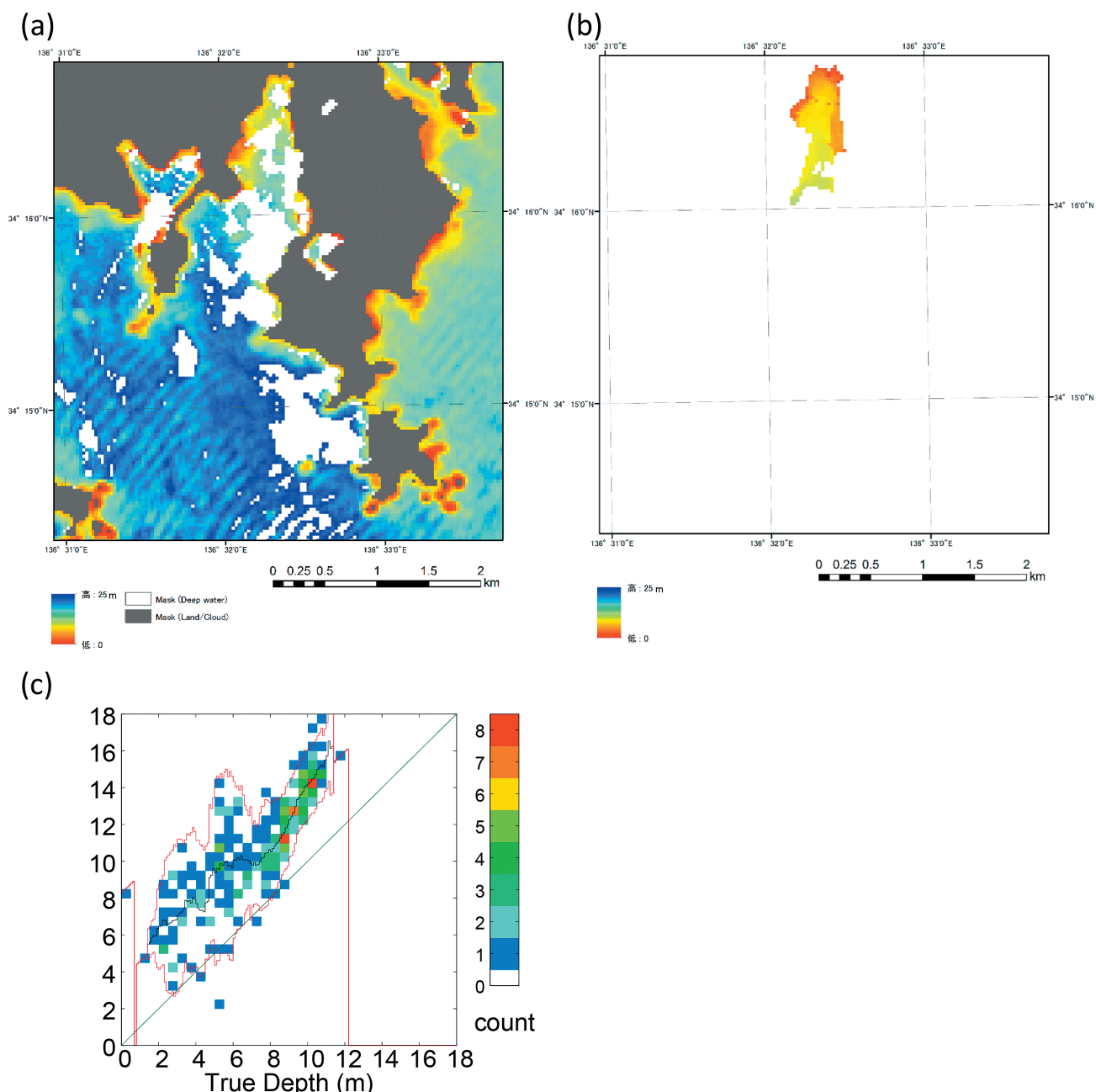


Fig. 16. (a) Enlarged map of the SDB at (11) Naya-ura. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 16. (a) ⑪奈屋浦を拡大したSDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDBと実水深のヒストグラム散布図.

⑪^{なや}奈屋浦

奈屋浦は学習海域の中心部から 36 km 程度北東の海域である。2009 年に実施された水路測量データの評価用として使用した。この海域を拡大した SDB を Fig. 16 (a) に、評価用水深データ (実水深) を Fig. 16 (b) に、SDB と実水深のヒストグラム散布図を Fig. 16 (c) に示す。

SDB を見ると、湾内では推定水深の得られな

かった領域が見られる。得られた推定水深と実水深の間には比較的良い正の相関が見られるものの、平均して 2–4 m 程度深いほうに偏った分布となっており、95%信頼区間が実水深値からほぼ全般的に外れている。

⑫^{おうかうら}相賀浦港

相賀浦港は学習海域の中心部から 46 km 程度

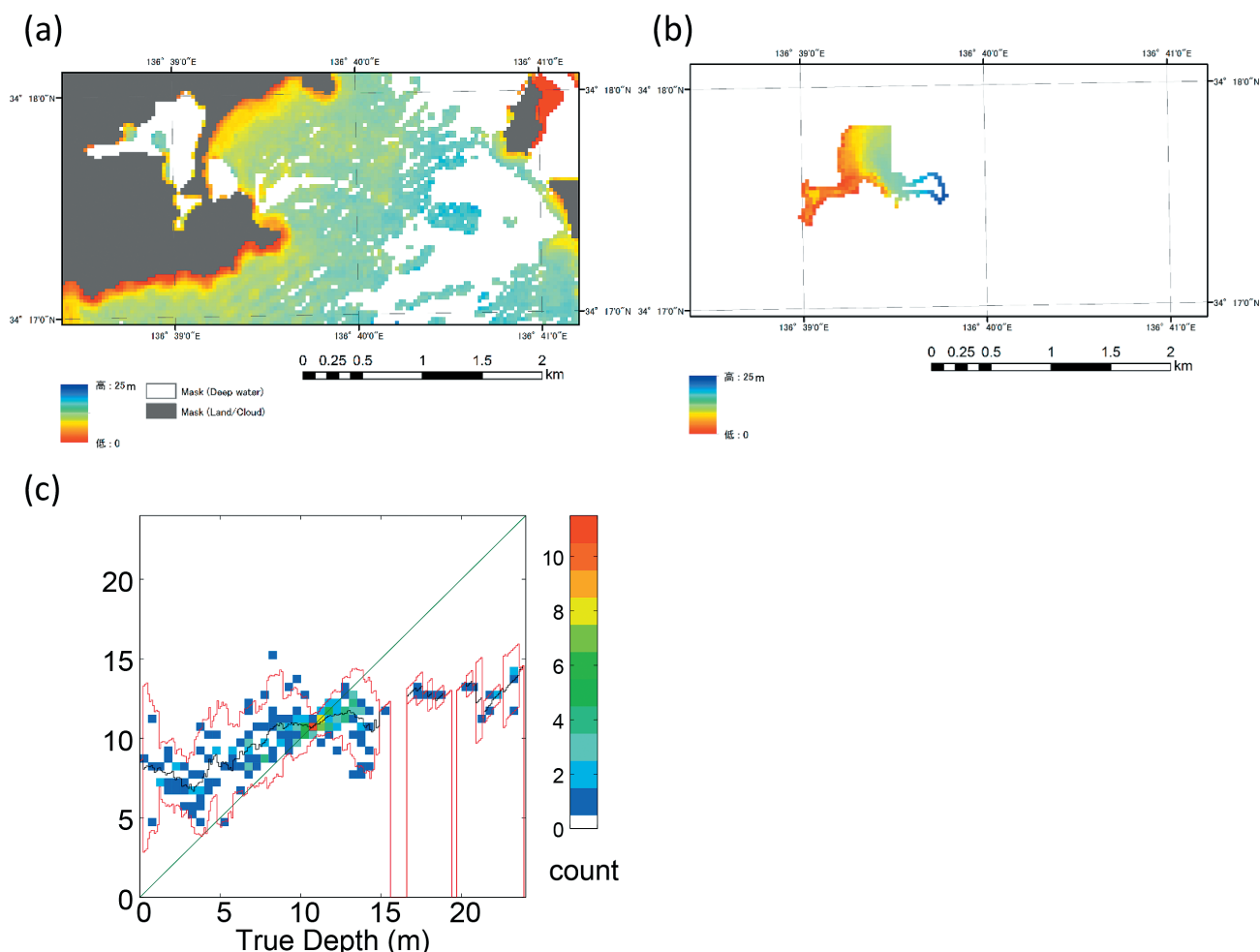


Fig. 17. (a) Enlarged map of the SDB at (12) Okaura Port. (b) Ground truth. (c) Histogram scatter-plot of SDB depths versus ground truth.

図 17. (a) ⑫相賀浦港を拡大したSDB. (b) 評価用水深データ. (c) SDB と実水深のヒストグラム散布図.

東北東の海域である。2008年に実施された水路測量のデータを評価用として使用した。この海域を拡大したSDBを Fig. 17 (a) に、評価用水深データ（実水深）を Fig. 17 (b) に、SDBと実水深のヒストグラム散布図を Fig. 17 (c) に示す。

この海域では推定水深の得られなかった領域が広く、得られた推定水深の実水深との相関は不十分であった。

これより沿岸部を更に北方に進んだ海域においても同様の評価を試みたが、得られた推定水深が不十分で評価不能であるため、本稿では取り扱わない。

4.3 海域間の推定品質の比較

推定水深の精度は各海域内でも一様では無く水

深によって変動がある。また、条件により推定水深が得られない領域が存在する。こうした事情から、推定品質を海域間で比較することは単純ではないが、指標を2つ用いて比較を試みる。

第1に、各海域で評価用の（尾鷲港においては学習用の）実水深が存在する画素のうちでSDBにおいて推定値が得られた画素の割合（有効推定率）を比較する。第4.1節に述べたとおり学習海域である尾鷲港において水深20m程度までSDBと実水深との間に相関があると判断したことから、各海域とも20m以浅を対象として有効推定率を求めたものを Table 3 に示す。⑧錦漁港、⑨古和浦、⑪奈屋浦、⑫相賀浦港といった学習海域から20kmを超える海域で60%を下回る低い有効推定率が見てとれる。特に⑧錦漁港と⑨古和浦

Table 3. The ratio of the number of SDB pixels that contain validly estimated depth values versus the number of pixels that have in-situ (training or ground truth) depth values in each area. Approximate distance to the each area from Owase Port, the training area, is shown in the rightmost column for reference.

表 3. 各海域における SDB の有効推定率（実水深が存在する画素のうちで SDB において推定値が得られた画素の割合）. 対照のため尾鷲港からのおおよその距離を示す.

海域名	実水深が存在する画素数	うち推定水深が得られた画素数	有効推定率	尾鷲港からの おおよその距離
⑫相賀浦港	367	220	59.9%	46 km
⑪奈屋浦	433	249	57.5%	36 km
⑩吉津港	401	312	77.8%	34 km
⑨古和浦	579	38	6.6%	29 km
⑧錦漁港	622	160	25.7%	22 km
⑦長島港	1419	1128	79.5%	17 km
①引本港	1235	739	59.8%	3 km
尾鷲港	1995	1771	88.8%	-
②九木浦	480	320	66.7%	8 km
③三木浦	276	191	69.2%	10 km
④飛島浦	509	478	93.9%	11 km
⑤二木島港	279	176	63.1%	16 km
⑥新鹿湾	867	736	84.9%	18 km

の低さが際立っているが、これらは推定値が得られなかった湾奥部の領域が特に広がったことを反映していると考えられる。なお、学習海域に隣接する①引本港の有効推定率も 59.8% と低いが、これも北東の湾奥部で実水深の多数存在する領域が SDB でほとんど再現されず空白となっていることの影響と考えられる。

第 2 に、SDB の推定水深値の 95% 信頼区間内に実水深が収まった水深の範囲を比較する。Fig. 18 において、海域別に青線で示される水深の範囲では推定水深値の 95% 信頼区間内に実水深が収まっており（すなわち推定が有意であった）、赤線の範囲では 95% 信頼区間外であった（すなわち推定が有意でなかった）ことを示す。線の無い範囲は評価用水深データが無かったことを示す。⑧錦漁港以北の 5 海域では推定水深が有意でない範囲が特に広いことがわかる。⑩吉津港に

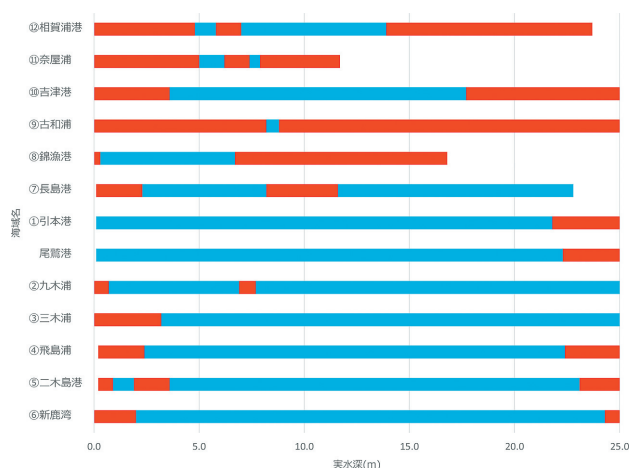


Fig. 18. Comparison of the depth range where depth estimation of SDB was valid in each area. The blue bar indicates the area where the ground truth was included within the 95% confidential interval of the estimated depths; the red bar indicates where it was not. The range without a bar lacks ground truth.

図 18. SDB の推定が有意であった水深範囲の海域ごとの比較. 青線は実水深が推定水深値の 95% 信頼区間内に収まった範囲, 赤線は 95% 信頼区間外であった範囲を示す. 線の無い範囲は評価用水深データが無かったことを示す.

限っては有意な推定となっている範囲が水深 3.6 – 17.7 m と比較的広いものの、本来 SDB に期待する極浅海域の推定が有意でない。また、学習海域とその近隣以外の海域の多くは、極浅海域で有意な推定ができない傾向にある。

5 考察

学習海域からの距離の異なる 12 海域における精度評価から、以下の結果が導かれる。

- ① 水深推定の有効性は概ね学習海域からの距離に応じて劣化する。
- ② 学習海域からの距離が 20 km 程度を超えると、水深の分布を把握するのに実用的ではない。
- ③ 学習海域からの距離に関わらず、湾口の小さい湾や入江では水深推定が有効でない場合がある。

こうしたことが起こる要因として、SDB 解析の原理から大きく 2 点が指摘できる。

第1に、本解析では、一枚の衛星画像内で海水の消散係数などの環境条件は一定と仮定している。実際の海域では、光の水中における減衰率は水質によって異なり、海底面の反射率は底質によって異なるなど、局所的に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。これらの減衰率や反射率が光の波長によって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することにより水質や底質の不均質の影響を取り除いている。だが、限られた学習水深データで広範囲の（特に学習範囲外の）不均質の影響を全て取り除くことは不可能と考えられる。

第2に、本解析で施す大気補正が Landsat 8 のような広域の画像全体で成り立つかどうかという問題がある。今回の解析では、大気中での光の散乱や吸収などによって生じる影響を除去するために、光が海水中で完全に消失する程度に水深が十分に深く輝度が低い領域を学習海域周辺で選定し、その輝度の平均値を大気補正值として画像全体から差し引く手法（暗画素法）をとっている。このため選定した地点と気象条件が異なる地点では、補正值が妥当ではないことが予想される。

上記の2点を考慮すると、結果①が導かれるのは自然である。また、衛星画像全範囲の SDB (Fig. 4) において、学習海域から離れた沖合部が現実的でない浅い値で埋められているのは、大局的に第2の大気補正が成立していないことによると思われる。

結果②は、あくまでこの三重県沿岸部における一例であり、「20 km」という数字は環境条件次第で一般性はないが、SDB が実用的であるためには、学習海域からの距離に一定の限界があると考えらるべきである。

結果③は、学習海域に隣接する①引本港においても推定水深が得られない領域が目立つことに代表されている。この湾奥部では、海面の色が特に暗く、違いが目視でもわかるほどである (Fig. 19)。これは主に第1の海中・海底の条件の違いによるものと思われる。具体的には、入江の内外で水質や海底の植生等の条件が極端に違う、と

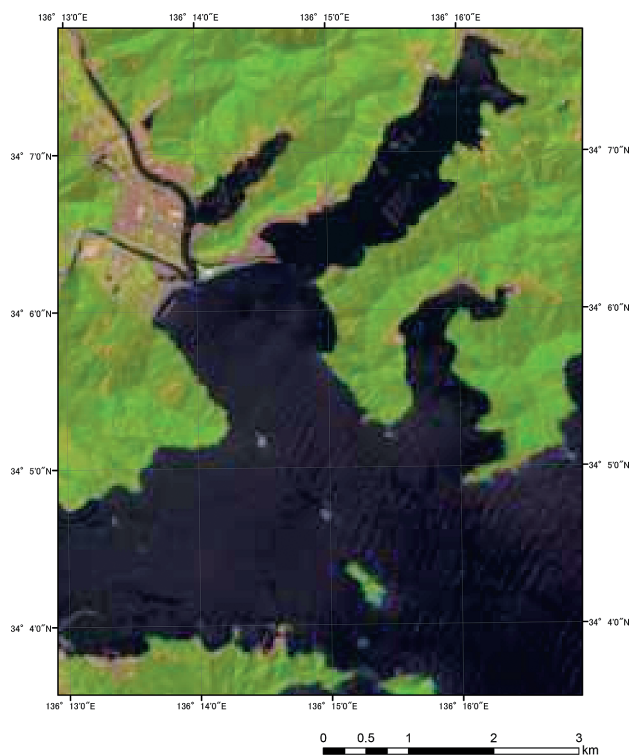


Fig. 19. Enlarged Landsat 8 image at Hikimoto Port. The pixels in the inner part of the bay are darker than the outer.

図 19. 引本港を拡大した Landsat 8 衛星画像。湾奥部の画素が外側より暗いことがわかる。

いったことが想定される。こうした入江のような海域には特に注意して学習用データを用意する必要がある。解析にあたっては、湾口の小さい湾や入江を有する海域も含めて全面を一括で解析するか、別々に解析するかのアプローチが考えられる。同様の例として、松本・他 (2017) が透明度の違いの大きい銚子沖における解析例について指摘したが、分割した解析結果をモザイクすることには接合部の不整合をどう処理するかという問題が残る。SDB を作成する目的や要求される品質に応じて個別に運用を判断する必要がある。

なお、第 4.3 節に示した海域ごとの推定品質の比較において、尾鷲港の北側の海域で南側より総じて品質が低い傾向があるようにも見える。南北の位置関係で推定品質に違いが出る原因としては、例えば、都市圏にある伊勢湾の水質の及ぼす影響が北側領域ほど大きい、あるいは気象条件に南北の勾配がある等が予想できる。だが、今回の

検討では、学習海域から等距離の南北間での比較ができないことはもとより、水質・底質・気象の影響など、局所的にも異なり得る把握できない要因が各種あることから、原因の特定には至らなかった。

6 まとめ

Landsat 8 衛星画像を用いて尾鷲港を学習海域とした紀伊半島東岸の広域の SDB を作成し、尾鷲港から離れた 12 海域の水深の精度評価を行った。

- ① 水深推定の有効性は概ね学習海域からの距離に応じて劣化する。
- ② 学習海域からの距離が 20 km 程度を超えると、水深分布の把握には実用的でない。
- ③ 学習海域からの距離に関わらず、湾口の小さい湾や入江では水深推定が有効でない場合がある。

という結果が得られた。

本来 SDB の作成にあたっては、母集団の水深を推定するのに十分となるよう、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する学習用データを用意すべきであり、これにより推定精度を高めることができる。一方で、現時点で適切な水深データがない海域の調査に向けて、測量計画立案のために迅速・簡便な SDB を作成したいというシーンが想定される。本検討の結果からは、近隣で測量済みの水深データを利用して海底地形の概略が把握できる SDB を作成できる可能性が示唆される。今回の検討には無償で利用できる Landsat 8 画像を利用したが、必要な解像度に応じて他の衛星画像を購入すれば、同等の精度で詳細な水深情報が抽出できると考える。

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した「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」により作成された SDB 解析ソフトウェア Bathymetry Mapper 2.0

を使用させていただきました。楠 勝浩 環境調査課長には査読の上、有益なご指摘と助言をいただき、本稿は改善されました。記して感謝いたします。

文 献

- Lyzenga, D. R. (1978) Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, *Appl. Opt.*, 17, 379-383.
- 松本良浩・栗田洋和・佐川龍之・平岩恒廣 (2017) 衛星画像推定水深を活用した海洋情報業務の展望, *海洋情報部研究報告*, 54, 17-31.
- (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>, Accessed 15 Jun. 2017.
- Sagawa, T., E. Sakata, Y. Matsumoto, and T. Hiraiwa (2016) Satellite based bathymetry measurements in shallow water, *2016 Techno-Ocean (Techno-Ocean)*, Kobe, pp. 97-100. doi: 10.1109/Techno-Ocean.2016.7890627
- USGS (2016) What are the band designations for the Landsat satellites?, <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>, Accessed 15 Jun. 2017.

要 旨

Landsat 8 衛星画像を用いて尾鷲港を学習海域とした紀伊半島東岸の広域の SDB を作成し、尾鷲港から離れた 12 海域の推定水深の精度評価を行った。この結果、①水深推定の有効性は概ね学習海域からの距離に応じて劣化する、②学習海域からの距離が 20 km 程度を超えると、水深分布の把握には実用的でない、③学習海域からの距離に関わらず、湾口の小さい湾や入江では水深推定が有効でない場合がある、という結論が得られた。近隣で測量済みの水深データを利用して、未測量の海域の海底地形の概略が把握できる SDB を作成できる可能性が示唆される。