

平成 27 年度助成事業

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)

平成 28 年 3 月

一般財団法人 日本水路協会

はじめに

本事業は、近年、仏国において衛星画像解析から得た水深情報を海図に採用されつつあることに着目し、衛星画像を利用して、沿岸域等の浅海水深の把握がどの程度の精度で把握できるかを検証することを目的としたもので、平成 26 年度から平成 28 年度の 3 年間の実施が予定されている。

2 年次に当たる今年度は解析手法を発展させ、様々な海域等でのテーマ別精度検証を実施した。報告書では業務中で用いた解析システムや解析結果および解析精度をまとめ、次年度以降で解析手法およびシステムを発展させていくための課題について整理した。

本事業で、ご指導をいただいた小松 輝久委員長をはじめとする各委員の皆様、共同研究として一翼を担っていただいた海洋情報部のご担当の皆様及び調査、解析等を担当していただいた一般財団法人 リモート・センシング技術センターの皆様に厚くお礼申し上げます。

各位におかれましては、これらの報告がご参考になれば幸甚です。

一般財団法人 日本水路協会

目次

第 1 章 業務概要	1
1.1 業務目標	1
1.2 業務実施期間	1
1.3 業務実施体制	1
1.4 事業内容	2
1.4.1 業務項目	2
1.4.2 成果品	3
1.4.3 調査実施スケジュール	3
1.5 本報告書の構成	4
第 2 章 SDB の作成方法と精度算出方法	5
2.1. SDB 作成方法	5
2.1.1. 幾何補正	5
2.1.2. 放射量補正	6
2.1.3. 放射量解析による水深算出	8
2.1.4. 潮高補正	9
2.2. 解析システム	9
2.2.1. システム概要	9
2.2.2. 幾何補正処理	10
2.2.3. 学習データ作成処理	11
2.2.4. SDB 作成処理	13
2.2.5. 潮高補正処理	16
2.2.6. 放射量補正	16
2.2.7. 水深学習画像の設定	16
2.2.8. 水深推定	17
2.2.9. フィルタ処理	17
2.2.10. 残差の算出	17
2.3. 精度評価方法	17
2.4. 解析限界水深の算出	20
2.5. まとめと今後の展望	20
2.6. 参考文献	20
第 3 章 使用データ	21
3.1 衛星画像	21
3.2 水路測量データ	33

第4章 手法の限界調査	47
4.1 実データを用いた調査	47
4.1.1 水深推定可能な最大水深についての調査	47
4.1.2 透明度と水深推定精度の関係の調査	52
4.2 シミュレーション調査	59
4.2.1 シミュレータ概要	59
4.2.2 HydroLight	60
4.2.3 SDB シミュレーション	61
4.2.4 シミュレーション結果	63
4.3 まとめ	69
4.4 参考文献	69
第5章 様々な海域における精度検証	71
5.1 海底面被覆物の影響調査	71
5.1.1 相差漁港周辺の解析結果	72
5.1.2 波照間の解析結果	76
5.2 透明度の影響調査	79
5.3 海底地形の影響調査	85
5.4 学習データの影響調査	87
5.5 まとめ	90
第6章 広域データの解析	91
6.1 広いエリアの衛星画像の解析	91
6.2 様々な海域の衛星画像の解析	96
6.3 まとめ	104
第7章 専門家委員会	106
7.1 第1回委員会	106
7.2 第2回委員会	108
第8章 まとめと将来の展望	110

付録

- 付録A 調査実施計画書
- 付録B 専門家委員会資料
- 付録C SDB 一覧、シミュレーション結果一覧

第1章 業務概要

1.1 業務目標

衛星画像を利用して、沿岸域等の浅海水深の把握がどの程度の精度で把握できるかを検証する。

既に仏国水路部では衛星画像解析からの水深情報(等深線等)を海外領土の海図に採用している。我が国でも一部の大学等で衛星画像からの水深解析の研究が進められているが、各国の情勢を踏まえた海図等への水深採用に関しての研究は皆無である。

東日本大震災時のような、広域に亘る災害発生時の被災港湾における航路障害物調査には、現時点では船による音響測深または航空機によるレーザー測深で対応しているが、広域の調査には相当な時間を要する。

衛星画像を用いて浅海域の水深変化や航路障害物の散乱状況等の概要が把握できれば、船による詳細調査の必要な海域の選別や航路啓開等の災害対応を行う関係者への情報提供を迅速に行うことにより早急な緊急物資の輸送が可能になる。

また、衛星画像を使用した概要調査は、現地インフラの復旧に関係なく、実施可能である。

このように衛星画像を用いた水深解析は、海路による被災地への緊急物資の早期輸送開始に大きく貢献することが期待される。

また、水路協会が海図を参考に作成しているプレジャーボート・小型船用の参考図(Y チャート)、港湾案内(S ガイド)、航海用電子参考図(new pec)等の、海図が刊行されていない海域での等深線描画のデータとしても期待される。

更に、衛星画像は、国内外を問わず得られることから、世界中の必要な浅海域の水深情報を把握することが可能になる。このため、測量能力の貧弱な途上国にとっても強力な調査ツールとなる。

1.2 業務実施期間

平成 27 年 5 月 15 日～平成 28 年 3 月 31 日

1.3 業務実施体制

本事業は、一般財団法人日本水路協会と海上保安庁との共同研究事業であり、その研究調査に関する主な業務を、一般財団法人リモート・センシング技術センターが一般財団法人日本水路協会から受託して実施した。本事業の実施体制を図 1.1 に示す。専門家委員会は一般財団法人日本水路協会によって設置、運営され、研究調査計画、調査研究成果は専門家委員会において評価された。

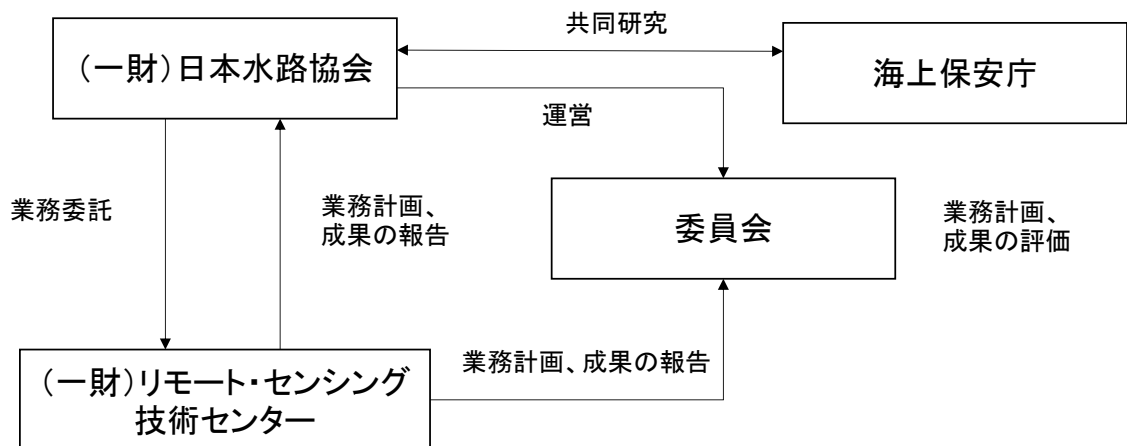


図 1.1 実施体制

1.4 事業内容

本業務では、「平成 26 年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究」において開発した解析手法を発展させ、様々な海域においてテーマ別精度確認を実施した。業務項目および成果品の概要を以下に示す。

1.4.1 業務項目

(1) 調査実施計画作成

業務の着手に当たり、調査実施に係る具体的な作業計画を作成した。

(2) 放射伝達モデルに基づく衛星画像シミュレータの改修

「平成 26 年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究」において、シミュレーション衛星画像の作成試験に使用したシミュレータを、本調査研究の目的に応じて適宜改修した。

(3) 実データ及びシミュレータを用いた手法の限界の調査

衛星画像から水深情報を取得する解析手法が適用できる、水深および透明度の範囲について、実際の衛星画像の解析およびシミュレーションにより調査した。

(4) 様々な海域のテーマ別精度確認

海底被覆物の種類や地形の複雑さ、および学習用水深データの数や分布などの条件を変えて衛星画像解析を実施し、水深推定精度を確認した。

(5) 解析手法の改良

「平成 26 年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究」において、試験解

析の実施に使用した水深情報取得のための衛星画像解析手法について、効率化や精度向上につながる改良を適宜検討した。

(6) 広域データの解析

(3)～(5)の調査を通した解析手法の確立後に、広域データの衛星画像解析を実施し、水深推定精度について評価を行った。

(7) 解析結果の評価

解析全体を通した考察を行い、実利用に向けた解析システムの利用条件、精度、課題等について整理した。

(8) 委員会

専門家委員会において、作業計画、調査結果等についての資料の準備および説明を行う。

1.4.2 成果品

調査報告書 3部

電磁記録媒体資料（調査報告書、購入データ等）（CD-R または HDD）1式

1.4.3 調査実施スケジュール

本業務は表 1.1 のスケジュールで実施された。

表 1.1 調査実施スケジュール

平成27年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究作業予定表													
項番	業務内容	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1000	調査実施計画書作成		↔										
2000	放射伝達モデルに基づく衛星画像シミュレータの改修			←			→						
3000	実データおよびシミュレータを用いた手法の限界調査			←			→						
4000	様々な海域のテーマ別精度確認				←			→					
5000	解析手法の改良			←			→						
6000	広域データの解析								←	→			
7000	解析結果の評価									←	→		
8000	作業部会			▲					▲			▲	
9000	委員会			▲									▲
10000	成果物納品												★

1.5 本報告書の構成

本報告書では、はじめに第1章で本業務の概要について紹介した。第2章では、SDBの作成方法と精度算出方法について説明した。第3章では、本業務で使用したデータについて示した。第4章では、実データおよびシミュレーションによる解析により、手法の限界について調査した。第5章では、様々な海域においてテーマ別に精度検証を実施した。第6章では、広域のデータについて解析を実施した。第7章は専門家委員会の概略について説明した。第8章では、まとめと将来の展望について述べた。

1.4.1 で示した各業務実施項目に対応する本報告書における関連する章を次表にまとめた。

表 1.2 業務実施項目と関連する章

業務実施項目	章
(1) 調査実施計画作成	第1章及び付録A
(2) 放射伝達モデルに基づく衛星画像シミュレータの改修	第4章
(3) 実データ及びシミュレータを用いた手法の限界の調査	第4章
(4) 様々な海域のテーマ別精度確認	第5章
(5) 解析手法の改良	第2章
(6) 広域データの解析	第6章
(7) 解析結果の評価	第4～6章
(8) 委員会	第7章及び付録B

第2章 SDB の作成方法と精度算出方法

2.1. SDB 作成方法

衛星画像を解析し、SDB を作成するフローの概略を図 2.1 に示す。本業務における基本的な処理は、「平成 26 年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究」と同様であり、Lyzenga (1978) の方法を主体として発展させている。

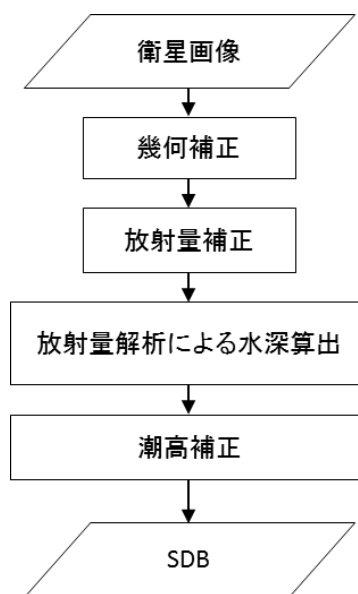


図 2.1 SDB 作成フロー

2.1.1. 幾何補正

幾何補正では、衛星データに含まれる幾何学的な歪みを除去することで、衛星画像上の対象物と地理座標の対応付けを行う。

本業務では WorldView-2 または 3 の衛星画像のオルソレディ標準プロダクト (OR2A) に対してオルソ幾何補正処理を実施している。本製品の「衛星画像プロダクトガイド」によると、オフナディア角 30° 以下の場合で位置精度は 5mCE90% (Circular error with 90 % confidence) である。なお、CE90%とは誤差の 90%がその値を半径とする円に含まれるということである。

なお、本業務では、水平方向の位置精度を確認するために陸域の水平精度も必要と考え、比較的高精度な DEM を用いたオルソ幾何補正処理を実施しているが、海域における位置精度には影響を与えないため、粗い DEM を用いて幾何補正した製品であるスタンダード(2A) を用いても SDB の位置精度には影響しない。

2.1.2. 放射量補正

放射量補正では、センサの姿勢や太陽高度などの幾何的要因や大気中の成分の変化により生じる衛星画像の放射量データのばらつきに対する補正を行う。

図 2.2 は海域において、衛星で観測される放射輝度についての概略図である。衛星で観測される全放射輝度 L_T は次式の簡易的なモデルで表すことができる。

$$L_T(\lambda) = L_M(\lambda) + L_A(\lambda) + L_{MA}(\lambda) + t(\lambda)L_W(\lambda) + t(\lambda)L_G(\lambda) + t(\lambda)L_{WC}(\lambda) \quad (2.1)$$

L_M : 気体分子の散乱光成分

L_A : エアロゾルの散乱光成分

L_W : 海面射出放射輝度 (water-leaving radiance) と呼ばれる、海水中から海面を通過して上向きに放射される光の成分

L_{MA} : 気体分子-エアロゾル相互作用

L_G : サンダリント光

L_{WC} : ホワイトキャップ

λ : 波長

t : 海面から衛星までの間の大気透過率

ここで、

$$t(\lambda) = t_M(\lambda)t_A(\lambda)t_{OZ}(\lambda) \quad (2.2)$$

t_M : 気体分子に由来する透過率

t_A : エアロゾルの透過率

t_{OZ} : オゾン等の吸収による透過率

放射量補正では、衛星データから、式 (2.1) の海水射出放射輝度 L_W の情報を抽出することが目的となる。

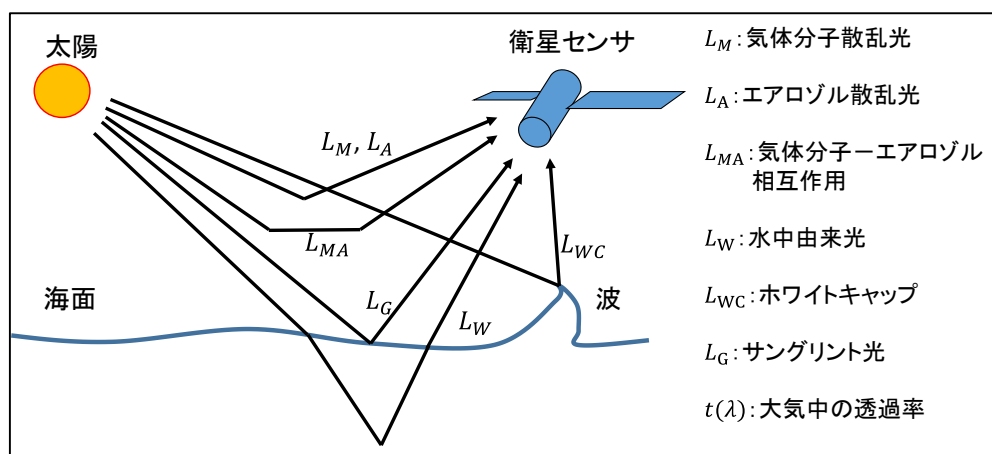


図 2.2 海洋観測衛星により観測される放射輝度成分

本業務では、図 2.3 の放射量補正フローに示した通り、TOA (Top of the Atmosphere) 放射輝度変換、TOA 反射率変換、大気補正を実施した。

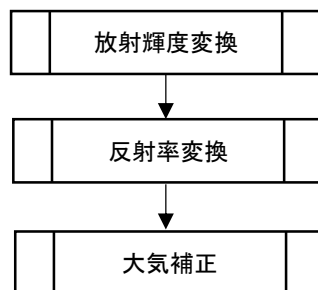


図 2.3 放射量補正処理フロー

放射輝度変換、反射率変換では、デジタルグローブ社公開の「Radiometric use of WorldView-2 imagery」に従い、衛星画像データの輝度値を大気頂上反射率に変換した。

衛星搭載の光学センサは計測した電磁放射の強さを、DN (digital number) 値として記録する。DN 値は同じ強さの電磁放射を記録してもセンサや観測条件により異なる値となるが、センサの設計者や運用者等により変換式および校正係数が提供されれば物理量である放射輝度に変換することが可能である。式 (2.3) に変換式の例を示す。

$$L_{\lambda Pixel, Band} = K_{Band} \cdot DN_{Pixel, Band} / \Delta\lambda_{Band} \quad (2.3)$$

$L_{\lambda Pixel, Band}$: 大気上端の放射輝度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

K_{Band} : 変換係数 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot count^{-1}$)

$DN_{Pixel, Band}$: 衛星画像の値 (count)

$\Delta\lambda_{Band}$: 有効帯域幅 (μm)

変換した放射輝度値は、センサの位置における値のため、地表面等の観測値と区別して TOA 放射輝度とも呼ばれる。

また、季節や衛星センサの観測角による太陽放射量の違いの影響を除去するために、式 (2.4) を用いて、放射輝度を反射率に変換する。

$$\rho_{\lambda Pixel, Band} = \frac{L_{\lambda Pixel, Band} \cdot d_{ES}^2 \cdot \pi}{Esun_{\lambda Bnad} \cdot \cos(\theta_s)} \quad (2.4)$$

$L_{\lambda Pixel, Band}$: 放射輝度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)

d_{ES} : 太陽地球間距離 (AU : Astronomical Units)

$Esun_{\lambda Bnad}$: 分光太陽照度 ($W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)

θ_s : 太陽天頂角 (degrees)

この反射率も、センサの位置における値のため、TOA 反射率とも呼ばれる。

大気補正では、式(2.1)から、 L_w 以外の成分を除去することが目的である。なお、放射輝度と反射率の関係は式(2.4)で示した通り、同じ画像については一定の係数を用いて変換できるため、どちらの単位で扱う場合でも基本的な補正の考え方は変わらない。

式(2.1)のうち、 L_{wc} は極力影響の少ない画像を解析対象として選択することで避けることとする。他の成分について、 L_G 以外の成分を L_S とすると、 L_S は同じ画像については、画像内でほぼ一定考え、水深の深い海域の輝度を差し引く方法がある。

$$L' = L - \bar{L}_{deep} \quad (2.5)$$

L' : 補正後の放射輝度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)

\bar{L}_{deep} : 水深の深い輝度の平均値 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)

L_G については、 L_{wc} と同様に、画像選択時に極力影響の少ない画像を選択するが、影響が小さい場合には補正処理により除去できる可能性がある。 L_G は海面傾斜により、画像中でもばらつきを持つが、各可視バンドにおける L_G の値は、近赤外バンドの値と相関があることが報告されている (Lyzenga et al., 2006; 神野ら, 2008)。バンド i のサングリント光 L_{iG} は、2つの近赤外バンド o 、 p のサングリント光 L_{oG} 、 L_{pG} と次式で関連付けられる。

$$L_{iG} = \alpha + \beta L_{oG} + \gamma L_{pG} \quad (2.6)$$

ここで、 α 、 β 、 γ は回帰係数である。式(2.5)から L_{iG} をさらに差し引くことで、サングリント補正が実施できる。

2.1.3. 放射量解析による水深算出

水深の算出は放射量データを解析することにより行うがここでは Lyzenga (1978)の方法に基づいて実施する。Lyzenga (1978) のモデルでは、大気補正後の放射輝度は次式で表される。

$$L'_i = \alpha_i r_i \exp(-K_i g Z) \quad (2.7)$$

L'_i : i バンドの補正後の放射輝度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)

α_i : i バンドの太陽の分光放射照度で、大気中及び水面での光の透過率さらに海面での光の屈折による減衰を含む係数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)

r_i : i バンドの光の海底面の反射率

K_i : i バンドの水中の光の拡散消散係数 (m^{-1})

g : 水中での光の通過距離を考慮する幾何的係数

Z : 水深 (m)

ここで、両辺の \ln を取ると次式に変換できる。

$$\ln L_i' = \ln \alpha_i \rho_i - K_i g Z \quad (2.8)$$

さらに、 $X_i = \ln L_i'$ と置くと、 X_i は Z と線形の関係であることが分かる。これに基づき、Lyzenga (1978) は以下の式で水深を推定することを提案している。

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i \quad (2.9)$$

ここで、 N は可視域のバンド数、 β_i は回帰係数である。Lyzenga et al (2006) によると、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。

(2.9) 式の線形回帰モデルの回帰係数は学習データを用いて最小二乗法で求めることができる。

2.1.4. 潮高補正

潮高補正では、潮汐の影響を考慮して、衛星画像から推定した水深を最低水面からの水深に換算するための補正を行う。図 2.4 に水深と潮高補正值の関係を示す。放射量解析により水深を推定する際は、衛星観測時の水深 B を水深として扱う。このため、学習に使用する水路測量データなどは、補正が必要となる。水深推定後、SDB は最低水面からの水深 A として出力するための補正を行う。

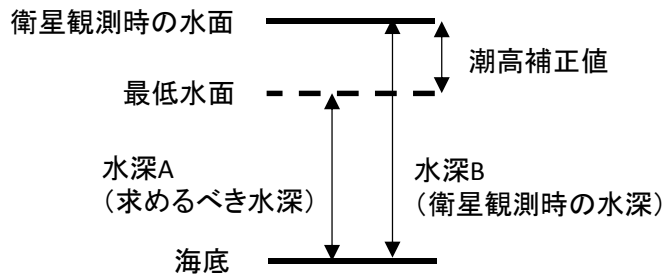


図 2.4 水深と潮高補正值の関係

2.2. 解析システム

2.2.1. システム概要

本業務における解析システムの構成を図 2.5 に示す。まず、前処理として、幾何補正を ArcGIS (Ver10.1、ESRI 社) で行い、学習データの加工を TNTmips (TNTmips 2013、MicroImages 社) で行った。SDB 作成および精度算出处理は Visual studio (Microsoft Visual Studio Professional 2013、Microsoft 社) の C++ 言語で実施できる環境を整えた。

幾何補正ではオルソ幾何補正および GCP を利用した補正を実施するが、これらは ArcGIS

の標準的な機能を利用している。

TNTmips によるデータ加工処理では、C++言語で扱える形式に画像データの加工を行うための処理であり、標準的な機能だけでなく、同ソフトで扱えるマクロ言語である SML 言語等も用いている。SML 言語については RESTEC 保有のプログラムを一部改変して使用した。

メインプログラムは RESTEC 保有の沿岸域解析用プログラムを本業務用に改変した。本システムは、基本的には「平成 26 年度衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握調査研究」で開発したシステムと同様だが、様々な海域における解析実施結果を反映させて、処理の効率化、高精度化のために各処理の改良を実施している。

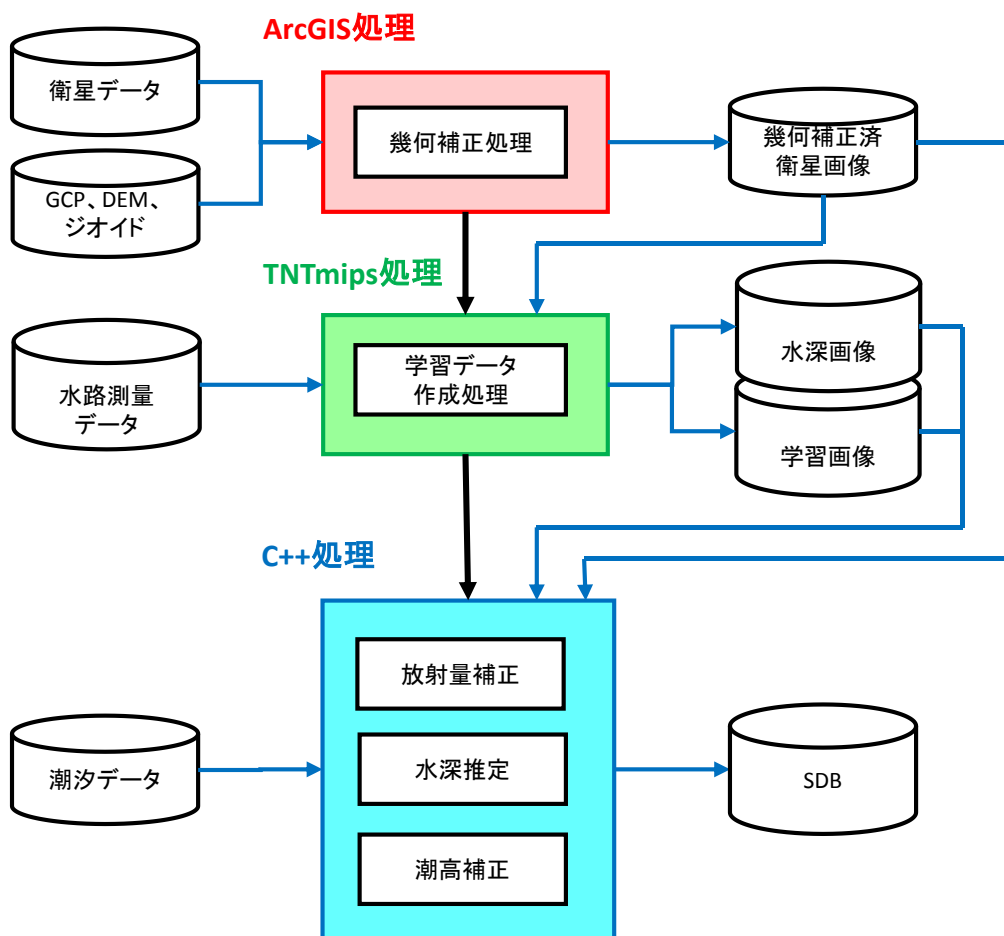


図 2.5 解析システム概要

2.2.2. 幾何補正処理

幾何補正は、WorldView-2 または 3 の簡易補正済みの標準プロダクト (2A) を扱う場合には実施の必要は無い。オルソレディ標準プロダクト (OR2A) を扱う場合は、ArcGIS の機能を用いて幾何補正を実施する。

幾何補正処理フローを図 2.6 に示す。入力データとしては、衛星データと数値標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) があればよい。DEM には国土地理院発行の 10m メッシュの

DEM を用いた。ジオイド情報は ArcGIS のライブラリを利用するが、EGM96(Earth Gravity Model 1996)を用いている。幾何補正処理入出力データの一覧を表 2.1 にまとめた。

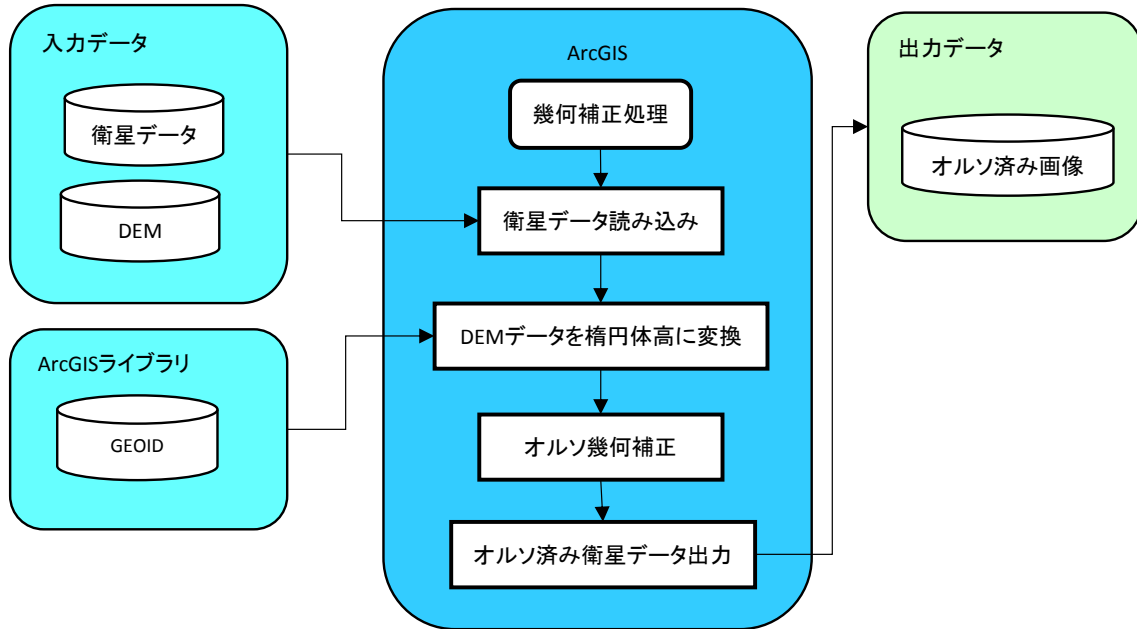


図 2.6 幾何補正処理フロー

表 2.1 幾何補正処理入出力データ一覧

データ		入出力	形式	説明
衛星データ	衛星画像	入力	geotiff/16bit/int	WorldView-2 または 3 のオルソレディ標準プロダクト(OR2A)。
	メタデータ	入力	IMD	WorldView-2 または 3 付属のメタデータ。
	RPC ファイル	入力	RPB	WorldView-2 または 3 付属の RPC データ。
GEOID		入力	ArcGIS のライブラリ	EGM96。ArcGIS のライブラリに格納。
オルソ済み衛星データ	大気補正画像	出力	geotiff/16bit/int	オルソ幾何補正後の衛星画像。

2.2.3. 学習データ作成処理

学習データ作成処理では、水路測量データ、衛星画像データを用いて、衛星画像解析に必要な学習画像を作成し、データのリサンプリングやフォーマットの統一を行う。TNTmips を用いた学習データ作成の処理フローを図 2.7 に、入出力データ一覧を表 2.2 に示す。

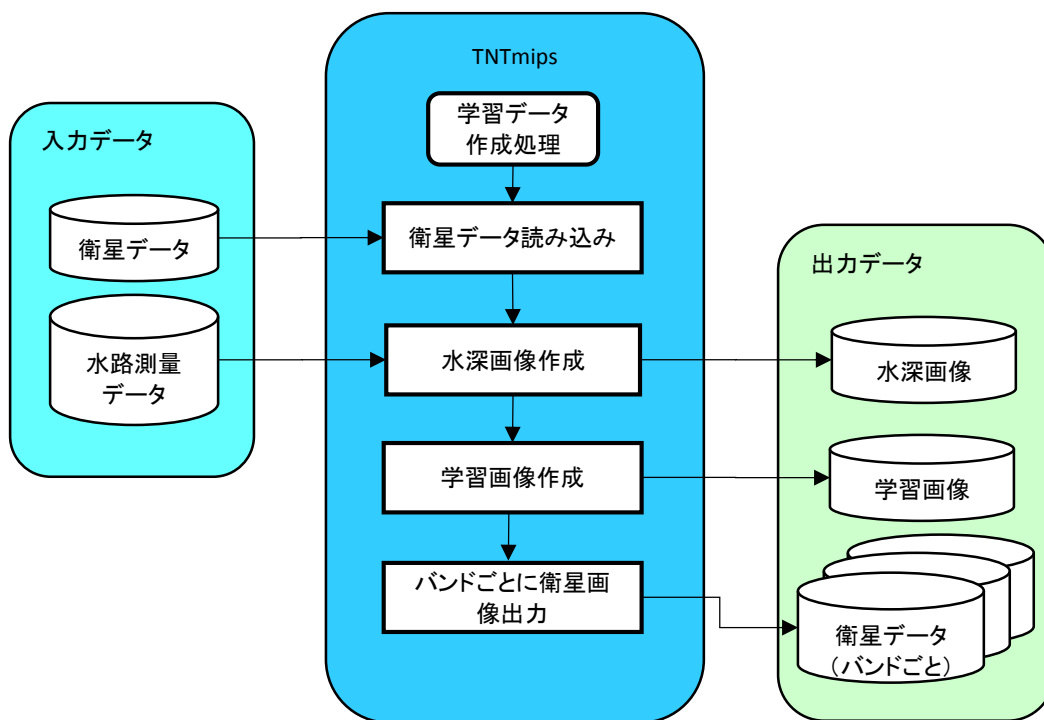


図 2.7 学習データ作成フロー

表 2.2 学習データ作成処理入出力データ一覧

データ	入出力	形式	説明
衛星データ	入力	geotiff/16bit/int	WorldView-2 または 3 のオルソレディ標準プロダクト (OR2A)。
水路測量データ	入力	txt	位置と水深の情報。
水深画像	出力	geotiff/32bit/float	衛星画像と同じ解像度、範囲の水路測量データをリサンプリングした画像。
学習画像	出力	geotiff/8bit/unsigned char	学習に用いるデータの場所を示した画像。
衛星データ (バンドごと)	出力	geotiff/16bit/int	バンドごとのグレースケール画像。非タイル形式。

入力する水路測量データ（正解とする水深データ）は様々な形式である可能性があるが、解析中では衛星画像に対応した画像データとして扱うため、水深画像作成において画像に変換する処理を行う。水深画像は、解像度、範囲が衛星画像と同じもので、水深データは元のデータから最近傍法でリサンプリングして取得する。

学習画像作成は、目視判読によるマニュアル作業により行う。学習画像は、図 2.8 に示すように、水深学習用、大気補正用、サンダリント補正用に用いる画素データの場所を示す。これらのデータは特に教師データ（supervised data）とも呼ばれる。

水深学習用データは、学習に使用したい水路測量データのある場所を指定する。大気補

正用データは水深が深く、輝度が低い場所を指定する。サンダリント補正用データは、水深が深く、サンダリントの影響でデータにばらつきがある場所を指定する。

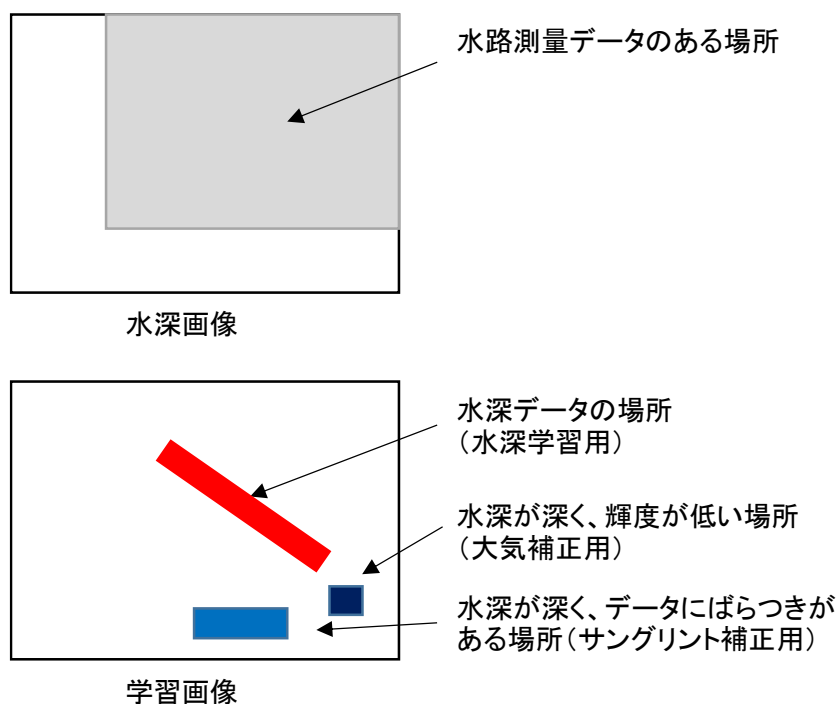


図 2.8 水深画像、学習画像のイメージ

2.2.4. SDB 作成処理

SDB 作成処理は、C++言語で作成されたシステムを用いて行う。図 2.9 に SDB 作成処理フロー、表 2.3 に入出力データ一覧を示す。

まず、準備作業として、入力データ情報、解析方法などに関する設定ファイルを作成する。入力データとしては、衛星データ、水深画像、学習画像、潮汐データが必要である。解析に使用する光学特性データベースとして、衛星センサの応答関数、太陽放射輝度、海底面反射率のデータを持っている。出力データとしては、大気補正画像、マスク画像、SDB が主な結果として出力される。

処理部は大きく、初期化処理部、解析処理部、終了処理部に分けられるが、初期化部は主に、処理メモリの確保やデータの入力処理を行う。解析処理部がメインの処理であり、一連の解析作業を実施する。終了処理では、データの出力、メモリの開放を行う。

解析処理フローについては、図 2.10 にさらに詳しいフローを示す。主な処理として、潮高補正、放射量補正、水深学習画像の設定、水深推定、フィルタ処理、残差算出を行っている。

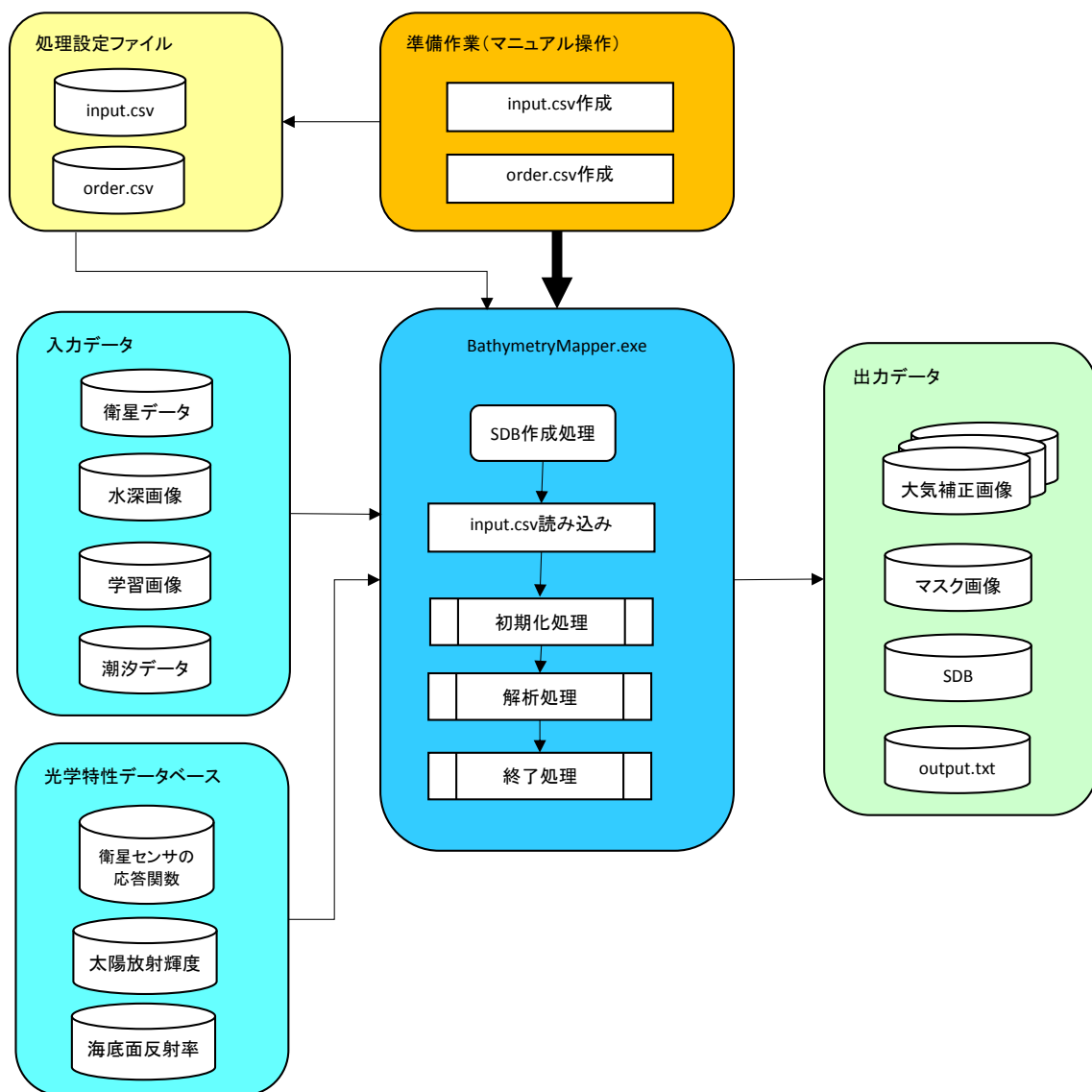


図 2.9 SDB 作成処理フロー

表 2.3 SDB 作成処理入出力データ一覧

データ	入出力	形式	説明	
設定ファイル	input.csv	入力	csv	処理する画像セットに関する情報のリスト。
	order.csv	入力	csv	処理に方法などの設定ファイル。
入力データ	衛星画像	入力	geotiff/8bit/unsigned char または 16bit/int/非タイル形式	バンドごとの衛星画像。
	メタデータ	入力	IMD	WV2, WV3 のみ対応。
	水深画像	入力	geotiff/32bit/float	正解とする水深データ。

	学習画像	入力	geotiff/8bit/unsigned char	学習に使用する画素を指定。1:大気補正、2: 水深推定、3: 藻場やサンゴ、4: 波補正。
	潮汐データ	入力	txt	気象庁のデータベースから取得する潮汐データ。
光学特性データベース	太陽放射輝度	入力	csv	大気圏外太陽放射輝度。
	海底面反射率	入力	csv	藻場、砂、岩などの反射率。
	衛星センサの応答関数	入力	csv	衛星センサの応答関数。
出力データ	大気補正画像	出力	geotiff/16bit/int	バンドごとの大気補正画像。
	SDB 画像	出力	geotiff/16bit/int	SDB 画像。
	output.txt	出力	txt	出力結果の要約。

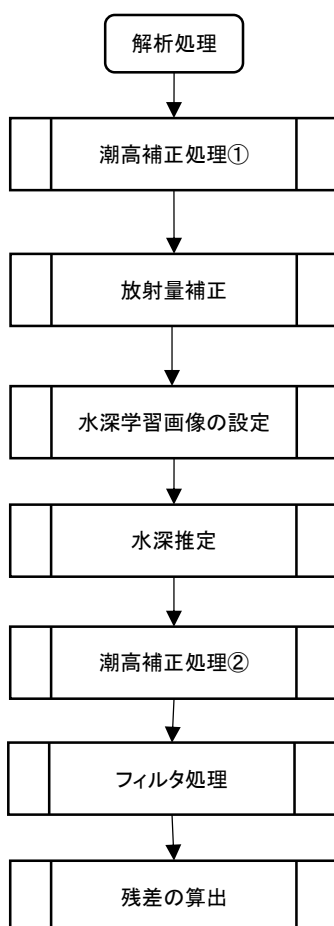


図 2.10 解析処理フロー

2.2.5. 潮高補正処理

潮高補正は水深推定の前後で行うが、水深推定前は、水深画像を衛星観測時の水深に変換する補正を行う。水深推定後は SDB を最低水面からの水深に変換する補正を行う。潮高補正値は気象庁 HP から取得できる潮位データを用いる（図 2.11）。

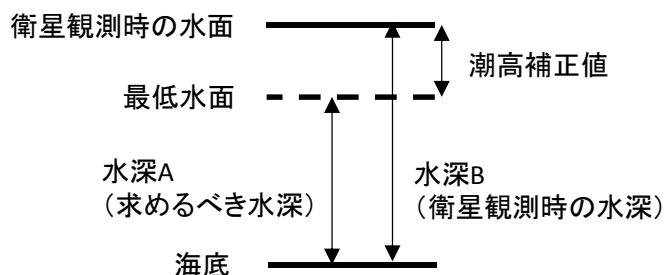


図 2.11 水深と潮高補正値の関係

2.2.6. 放射量補正

放射量補正の概略は 2.1.2 で示した通りであり、ここでは図 2.12 のフロー流れで実施している。サングリント補正は画像によっては必ずしも必要ではないので状況に応じて実施する。

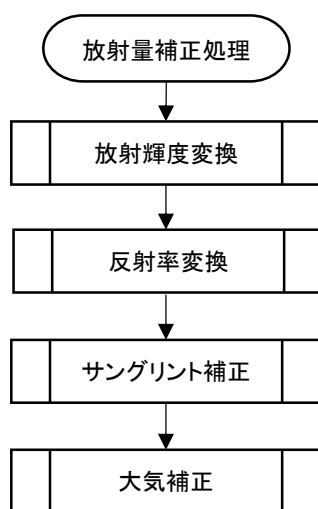


図 2.12 放射量補正フロー

2.2.7. 水深学習画像の設定

学習画像で入力した学習用水深データのある画素のうち、所定の条件を満たすものを再選択し、水深学習画像に記録する。選択条件としては、学習に使用する水深の範囲、マスク画像、データ分布を考慮する。

データ分布の考慮では、データが空間および水深について偏りがないように再選定する（図 2.13）。

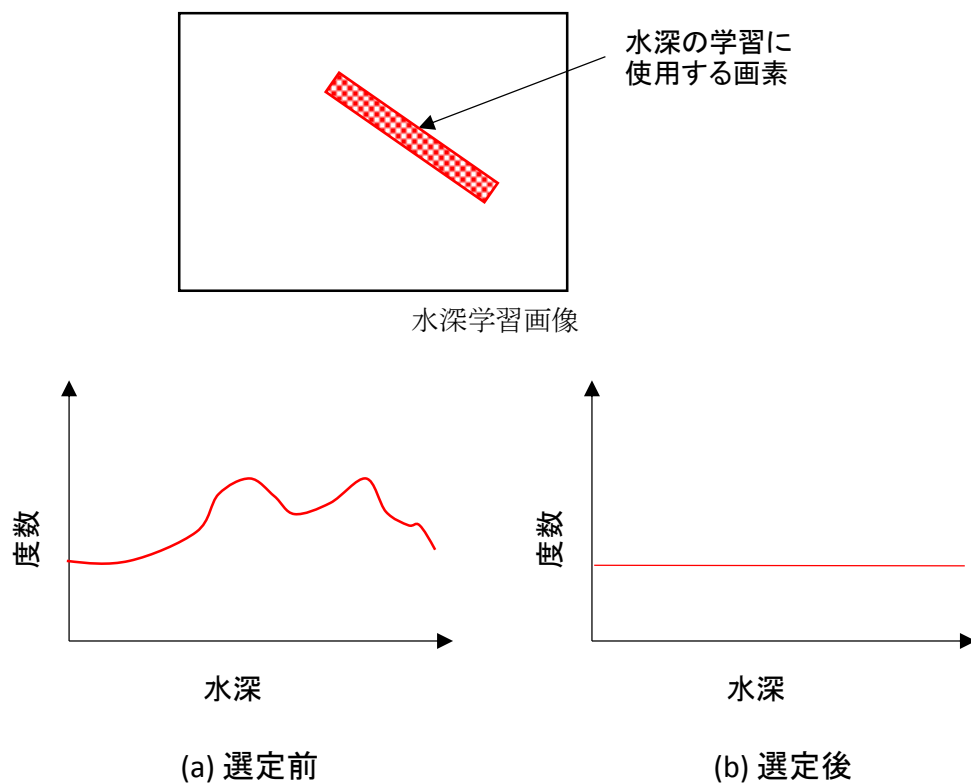


図 2.13 データ分布のうち水深に考慮した選定イメージ

2.2.8. 水深推定

水深学習画像と衛星画像を比較することで水深の教師データを取得し、式(2.9)の係数を最小二乗法により算出する。

2.2.9. フィルタ処理

マスクデータについてのフィルタ処理を行う。陸域や海の深い場所は、近赤外や大気補正値を用いてマスクしているが、データのばらつきに伴い、うまくマスクできないことがある。周辺画素のマスクの有無を確認し、多数決的によりマスクの穴埋め処理を行う。

2.2.10. 残差の算出

残差として SDB の 95%信頼区間の値を算出する。

2.3. 精度評価方法

SDB の精度として、SDB と学習用水深データとの比較および評価用水深データとの比較を行った。学習用水深データと評価用水深データはともに水路測量データを用いる。学習用水深データは、2.2.3 項で示した通り、海域ごとの水路測量の全データのうち、一部のデータを選んで用いた。一方、評価用水深データは水路測量の全データを用いた。精度を示す情

報として、SDB と水路測量データの散布図を学習用データと評価用データについてそれぞれ作成した。

SDB と水路測量データの散布図は、データ量が多い場合にはヒストグラムで表示している。水路測量データがシングルビーム測量のデータの場合は、図 2.14 の例のように水路測量データのある衛星画像の画素のデータを赤点でプロットしている。図の縦軸が SDB の水深、横軸が水路測量の水深を表し、黒い実線は水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間の SDB の水深の平均値、青線が水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間の SDB の水深の 95% 信頼区間（平均値 $\pm 1.96 \times$ 標準偏差）を表している。

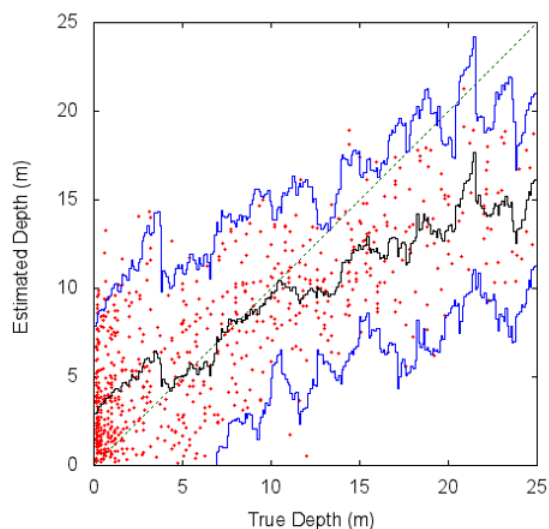


図 2.14 SDB と水路測量データの散布図の例

水路測量データがマルチビーム測量やレーザー測量による計測データの場合は、図 2.15 の例のようにグラフを 0.5m 間隔のメッシュに分割し、各メッシュ内のデータ数を色で表しヒストグラム表示している。黒い実線は水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間の SDB の水深の平均値、赤線が水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間の SDB の水深の 95% 信頼区間（平均値 $\pm 1.96 \times$ 標準偏差）を表している。

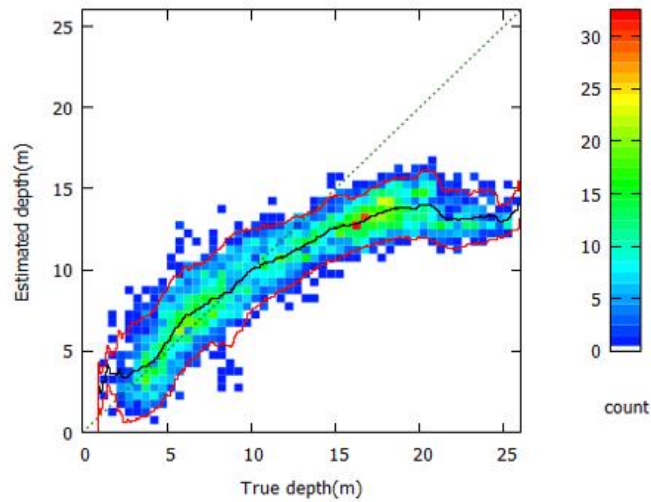


図 2.15 ヒストグラム表示の散布図の例

学習用水深データに対する SDB の水深の差を残差、評価用水深データに対する SDB の水深の差を誤差とした。誤差または残差は以下の式で算出した。

$$\text{誤差 (残差)} = \text{SDB の水深} - \text{水路測量の水深}$$

残差または誤差グラフでは、図 2.16 の例のように、縦軸に残差または誤差、横軸に水路測量の水深を表している。黒い実線は水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間における残差または誤差の平均値、青い実線は水路測量の水深 Z に対し、 $Z \pm 0.5\text{m}$ 区間における残差または誤差の 95% 信頼区間（平均値 $\pm 1.96 \times$ 標準偏差）を示している。

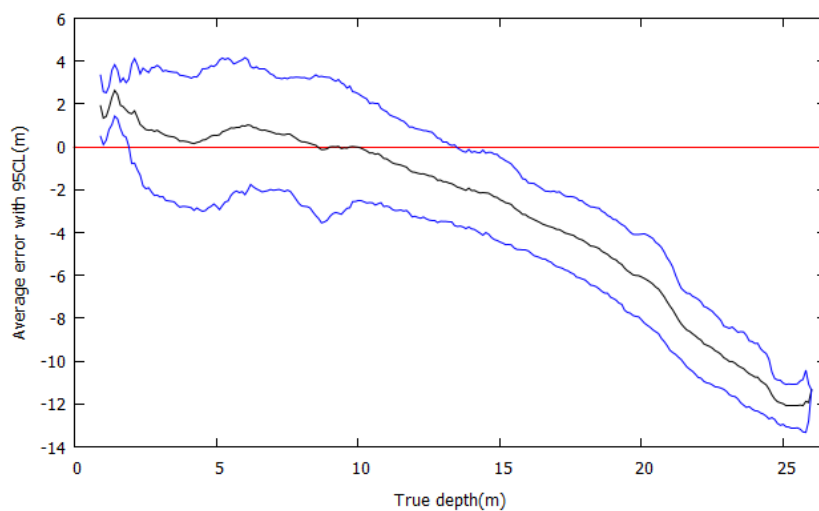


図 2.16 残差または誤差グラフの例

2.4. 解析限界水深の算出

残差の平均がある程度大きくなると、解析できる限界の水深を超えたと考えられる。ここでは、ある水深の残差平均の絶対値が全水深の残差の標準偏差以上となる最大水深を解析の限界水深とした。図 2.17 に残差グラフと解析限界水深の例を示す。

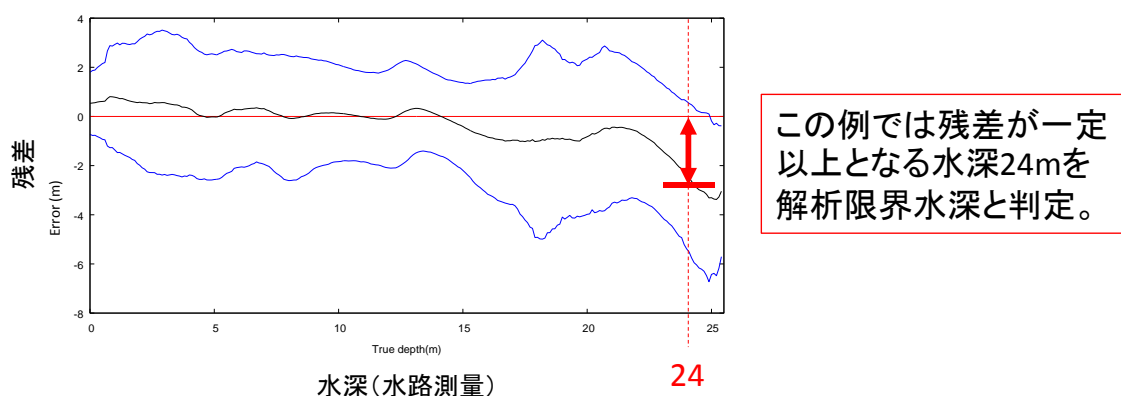


図 2.17 残差グラフと解析限界水深の例

2.5. まとめと今後の展望

SDB 作成方法について改良し、精度評価するためのグラフ等の作成方法についても整理した。SDB 作成では商用の GIS も利用しているが、すべての処理を C++ のプログラムの処理に追加することで作業を効率化できる。そのためには、データフォーマットなどを決める必要がある。現状の処理システムでは、SDB 作成に必要な個々の処理のプログラムはあるが、それらを制御するための統合的なソフトウェアはなく次年度業務で開発予定している。大気補正、マスク処理、解析の限界水深などの処理は、閾値の調整や計算方法の変更により改善の余地がある。調整が必要なパラメータは GUI から入力できるようにすると効率的である。

2.6. 参考文献

株式会社エヌ・ティ・ティ・データ, 2014, 衛星画像プロダクトガイド.

DigitalGlobe Inc., 2010, Radiometric use of WorldView-2 imagery.

Lyzenga, D.R., 1978, Passive remote-sensing techniques for mapping water depth and Bottom Features. Applied Optics, 17, 379-383.

Lyzenga, D.R., Malinas, N.P. and Tanis, F.J., 2006, Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 44, 2251-2258.

第3章 使用データ

SDB 作成および精度検証に使用したデータとして、衛星画像データ、水路測量データについて示す。衛星画像データはここでは WorldView-2 および 3 の衛星画像を用いているが、解析に使用しているマルチスペクトル画像の仕様は同じである。水路測量データは SDB を作成するための学習データ及び精度評価データとして使用した。水路測量データの種類の、計測方法について、レーザー測量、マルチビーム音響測量およびシングルビーム音響測量の 3 種類がある。一部沿岸海の基本図のデータがあるが、これはシングルビーム音響測量で計測したデータに該当する。

3.1 衛星画像

解析に使用した衛星画像一覧を表 3.1 に示す。本業務中では各衛星画像に識別番号をつけている。識別番号は「p+ 都道府県コード (2 桁) + n+ 通し番号 (3 桁)」とした。都道府県コードは総務省で使用されているコードを参考にした。都道府県コードを表 3.2 に示す。図 3.1~3.21 に各衛星画像のトゥルーカラー画像 (WorldView-2 または 3 のバンド番号の 2,3,5 を B,G,R に対応させて表示) を示す。

表 3.1 解析データ一覧

識別番号	購入年度	画像 ID	エリア	撮影日	オフナディア角	衛星	面積
p04n001	2014	103001001F64B500	仙台沖	2013/1/28	24.1	Worldview2	26km ²
p04n002	2014	103001002F044300	仙台沖	2014/4/2	25.98	Worldview2	26km ²
p04n003	2014	103001001AC8E500	仙台沖	2012/7/19	16.21	Worldview2	26km ²
p12n001	2014	1030010003859900	銚子港	2010/1/27	21.32	Worldview2	25km ²
p14n001	2015	103001001238AC00	鎌倉沖	2012/3/27	18.93	Worldview2	25km ²
p14n002	2015	103001002B42BA00	鎌倉沖	2013/12/28	21.99	Worldview2	25km ²
p15n001	2015	103001000D4B2800	両津湾	2011/9/24	26.3	Worldview2	25km ²
p22n001	2015	10300100085CED00	浜名港	2011/1/13	19.7	Worldview2	25km ²
p24n001	2015	1040010005093B00	尾鷲湾	2014/12/21	24	Worldview3	25km ²
p24n002	2014	103001002A584F00	相差漁港	2014/1/7	23.49	Worldview2	25km ²
p35n001	2014	103001001308D800	深川湾	2012/4/1	19.2	Worldview2	25km ²
p38n001	2014	103001002EC88400	佐田岬	2014/3/27	26.69	Worldview2	35km ²
p38n002	2014	10300100121A3E00	佐田岬	2012/4/9	12.95	Worldview2	35km ²
p39n001	2015	103001001D7B2C00	高知沖	2012/12/31	9.47	Worldview2	25km ²
p39n002	2015	103001001D7B2C00	高知沖	2012/12/31	8.54	Worldview2	75km ²
p47n001	2015	103001002746BE00	石西礁湖	2013/9/28	21.16	Worldview2	187km ²

p47n002	2015	103001001C0E5F00	石西礁湖	2012/10/2	18.91	Worldview2	157km ²
p47n003	2015	103001002665D100	石西礁湖	2013/9/28	18.42	Worldview2	157km ²
p47n004	2014	1030010022421B00	石西礁湖	2013/4/29	22.29	Worldview2	145km ²
p47n005	2014	103001002746BE00	石西礁湖	2013/9/28	21.16	Worldview2	28km ²
p47n010	2014	1030010023C7A300	波照間島周辺	2013/5/18	23.32	Worldview2	75km ²

表 3.2 都道府県コード

0	全国	24	三重県
1	北海道	25	滋賀県
2	青森県	26	京都府
3	岩手県	27	大阪府
4	宮城県	28	兵庫県
5	秋田県	29	奈良県
6	山形県	30	和歌山県
7	福島県	31	鳥取県
8	茨城県	32	島根県
9	栃木県	33	岡山県
10	群馬県	34	広島県
11	埼玉県	35	山口県
12	千葉県	36	徳島県
13	東京都	37	香川県
14	神奈川県	38	愛媛県
15	新潟県	39	高知県
16	富山県	40	福岡県
17	石川県	41	佐賀県
18	福井県	42	長崎県
19	山梨県	43	熊本県
20	長野県	44	大分県
21	岐阜県	45	宮崎県
22	静岡県	46	鹿児島県
23	愛知県	47	沖縄県

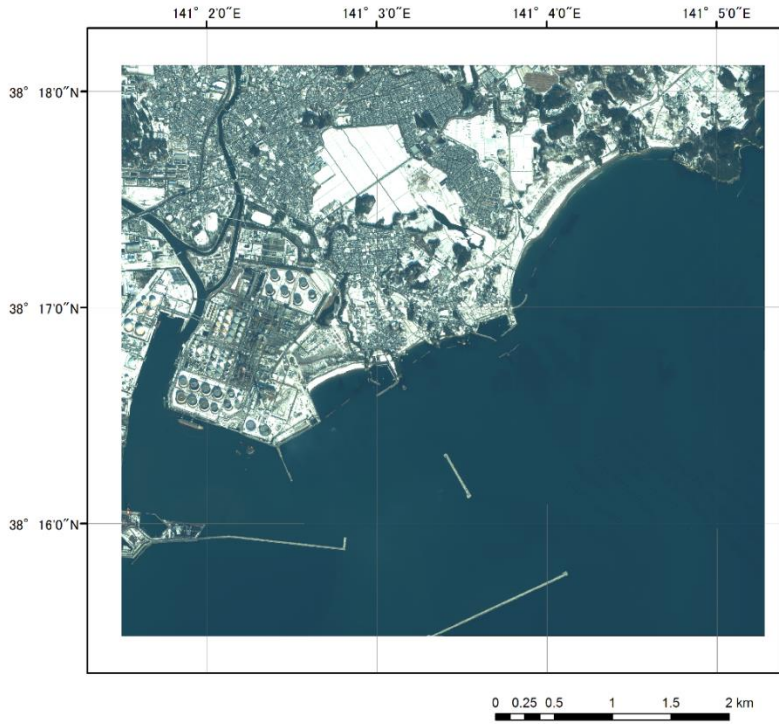


图 3.1 仙台沖衛星画像 (p04n001)

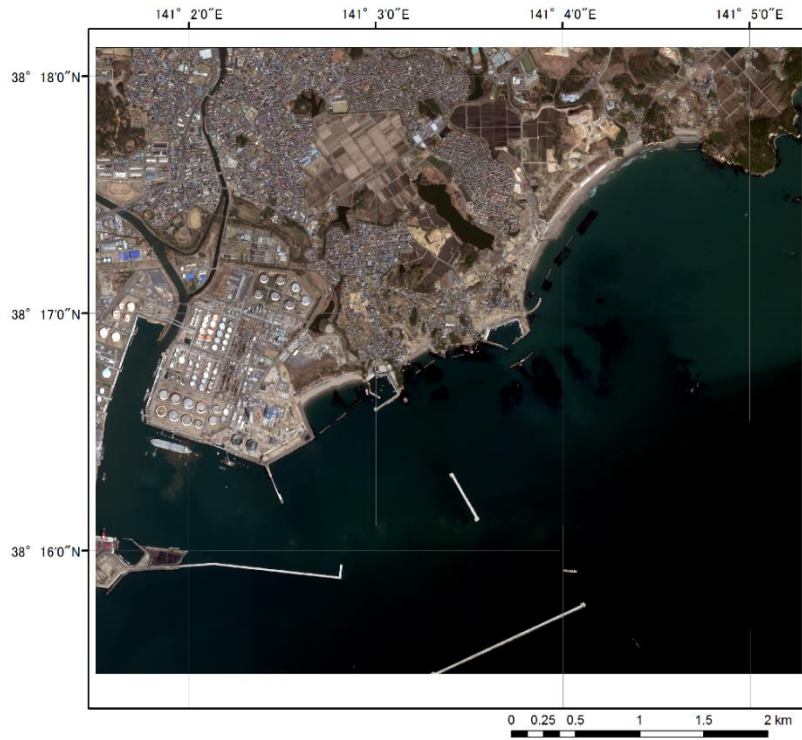


图 3.2 仙台沖衛星画像 (p04n002)

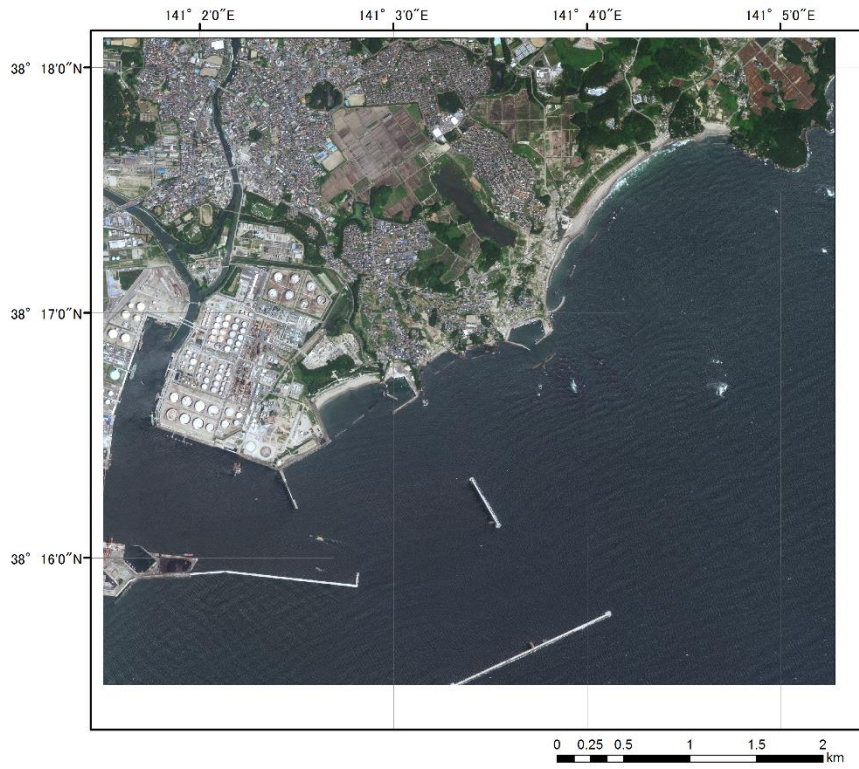


図 3.3 仙台沖衛星画像 (p04n003)

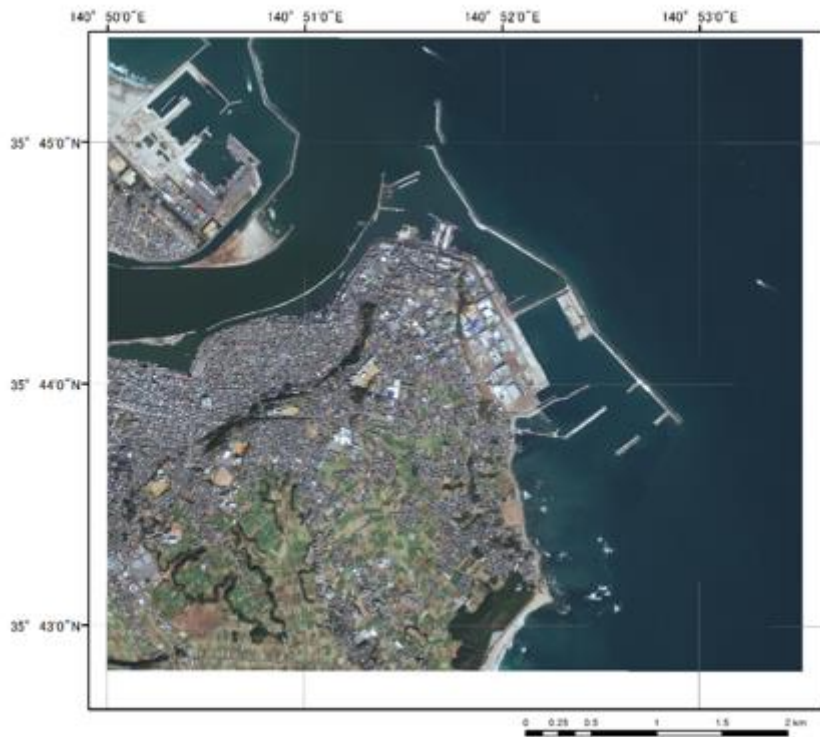


図 3.4 銚子沖衛星画像 (p12n001)

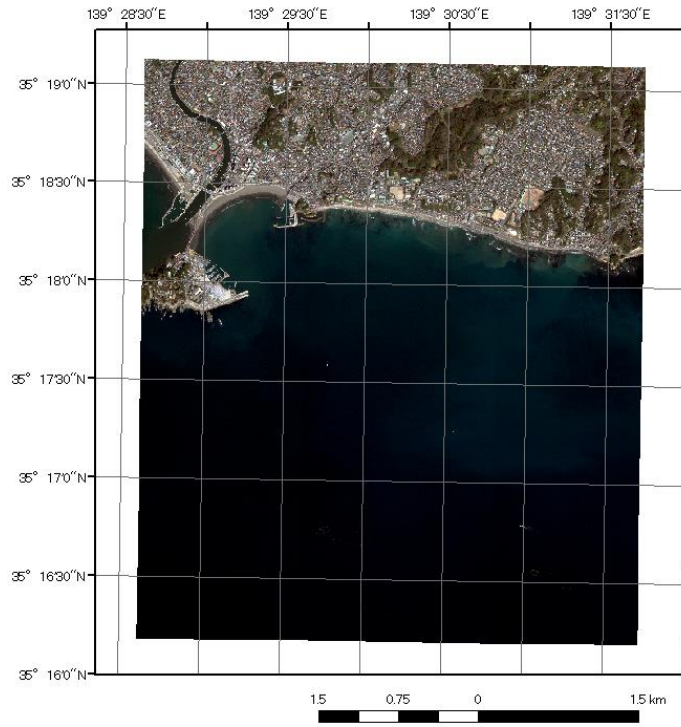


図 3.5 鎌倉沖衛星画像 (p14n001)

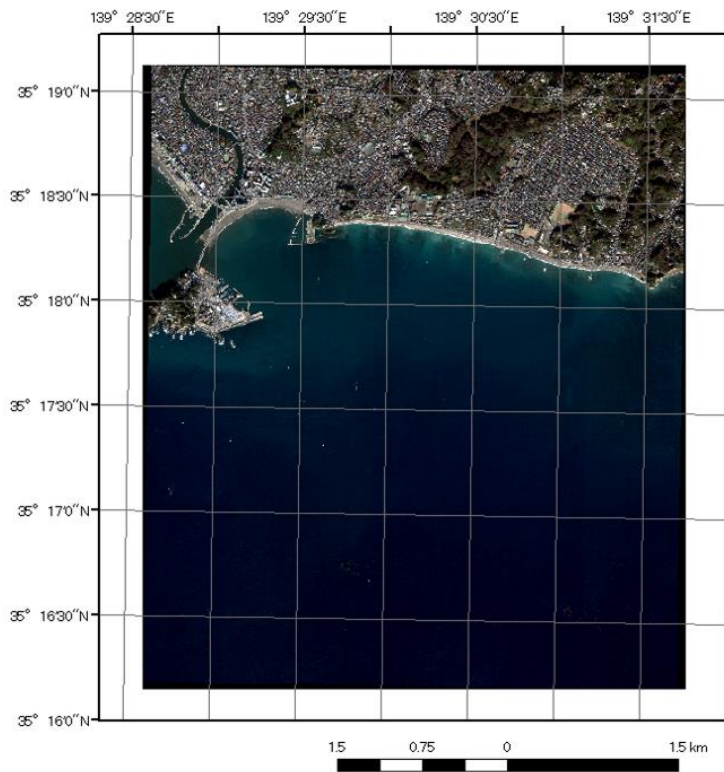


図 3.6 鎌倉沖衛星画像 (p14n002)

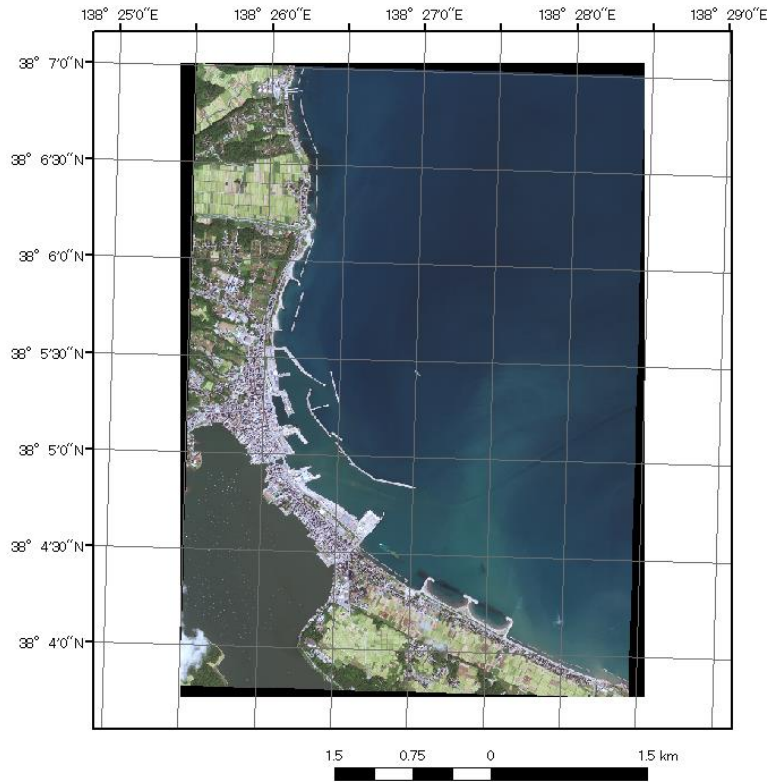


図 3.7 両津湾衛星画像 (p15n001)

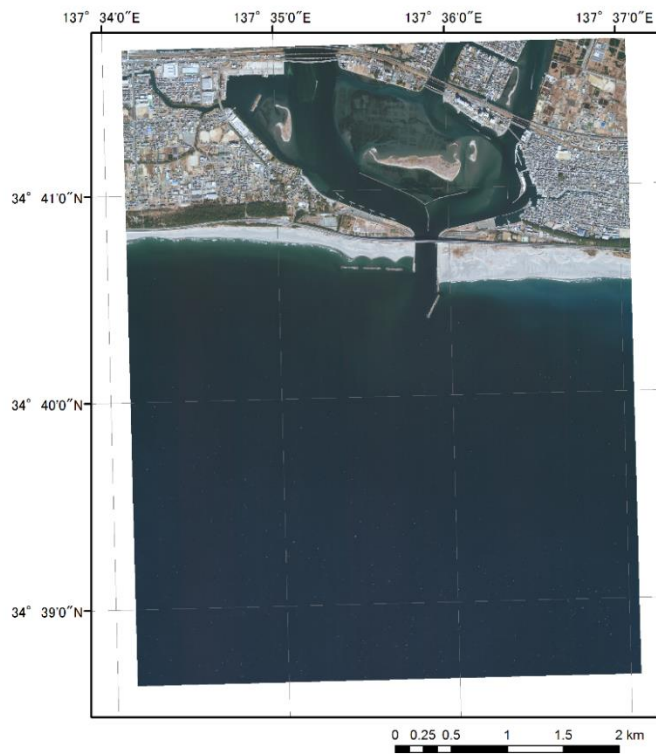


図 3.8 浜名港衛星画像 (p22n001)

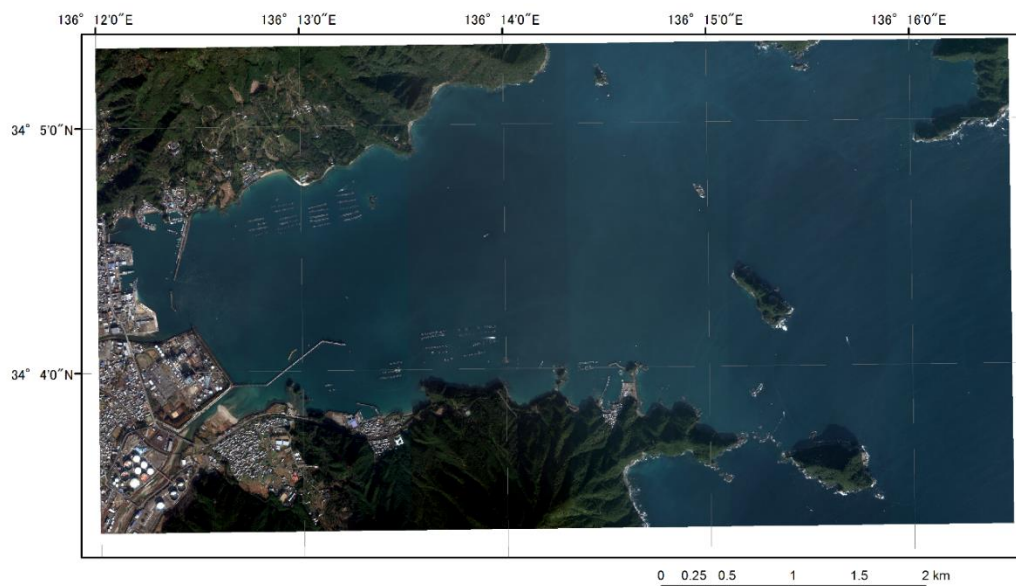


図 3.9 尾鷲湾衛星画像 (p24n001)

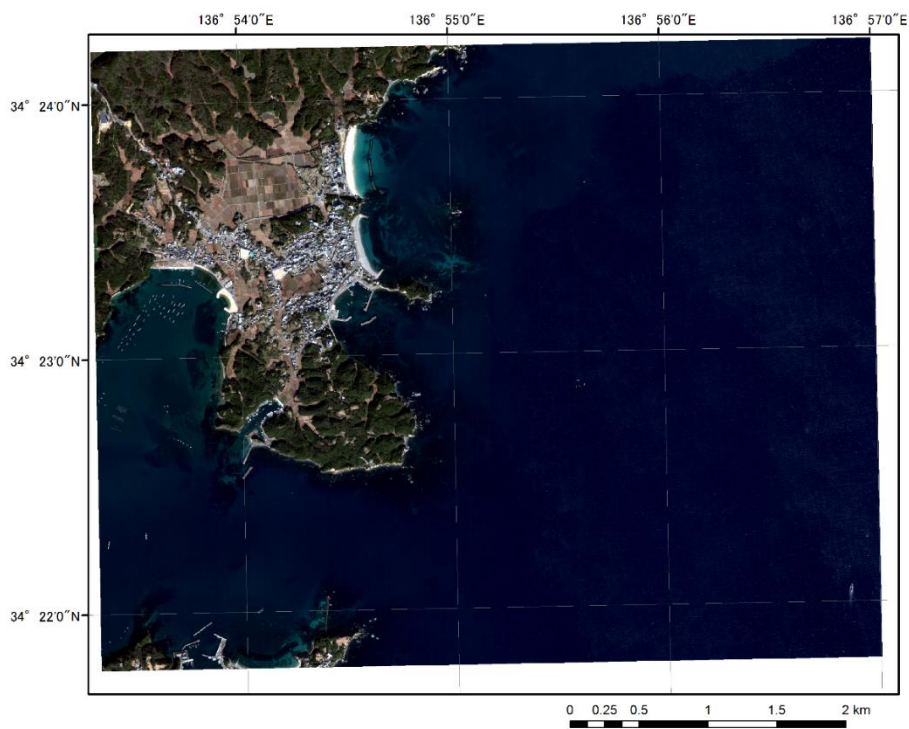


図 3.10 相差漁港衛星画像 (p24n002)

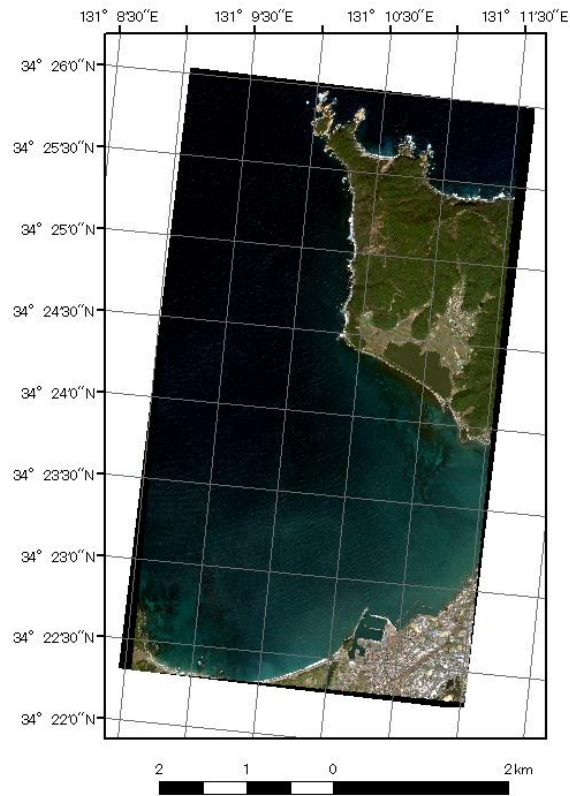


図 3.11 深川湾衛星画像 (p35n001)

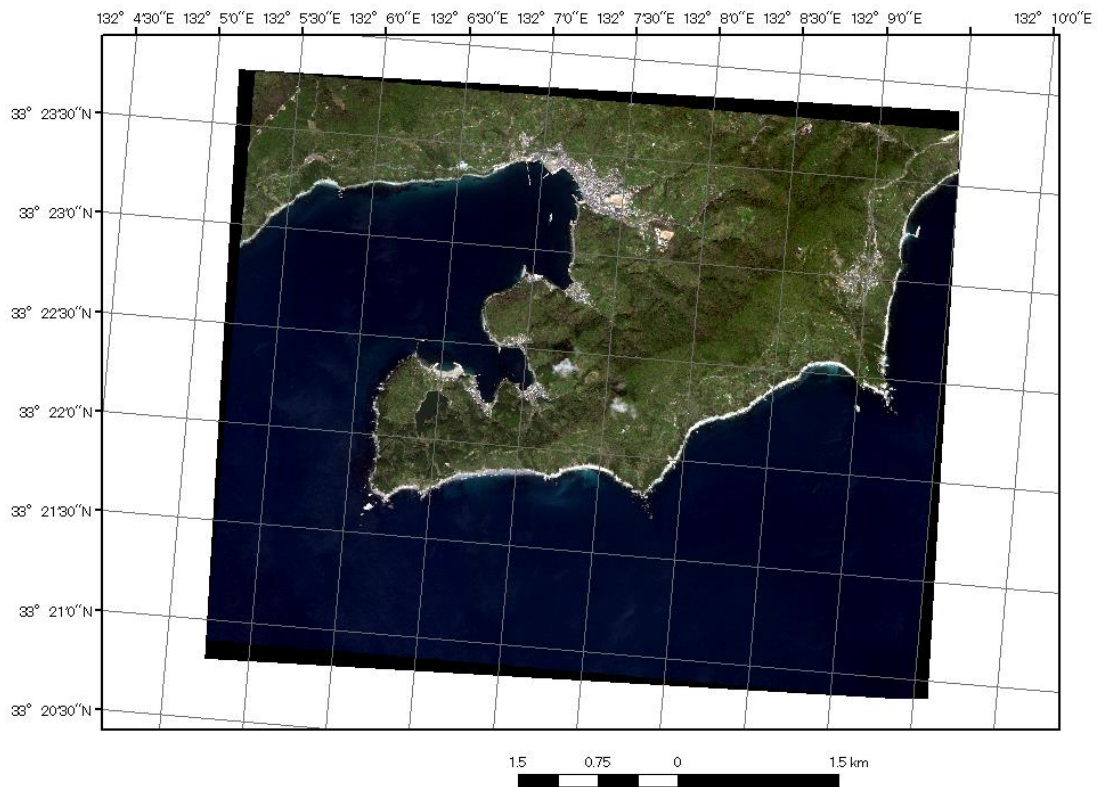


図 3.12 佐田岬衛星画像 (p38n001)

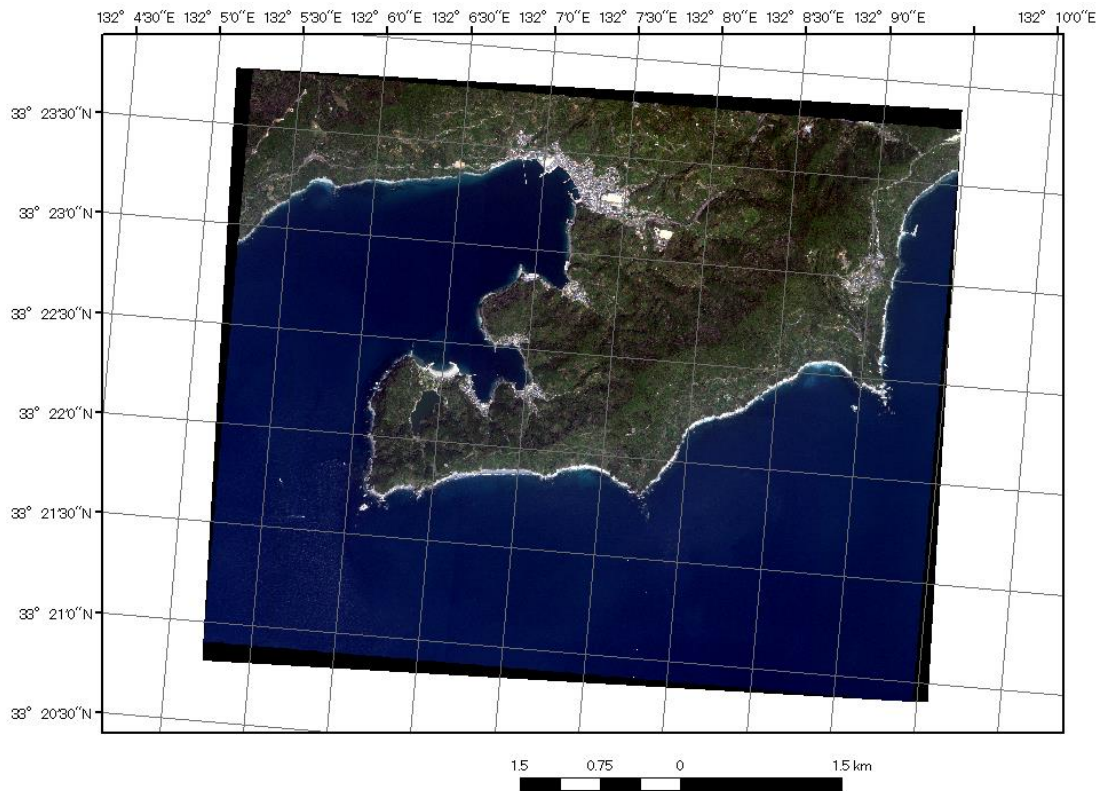


図 3.13 佐田岬衛星画像 (p38n002)

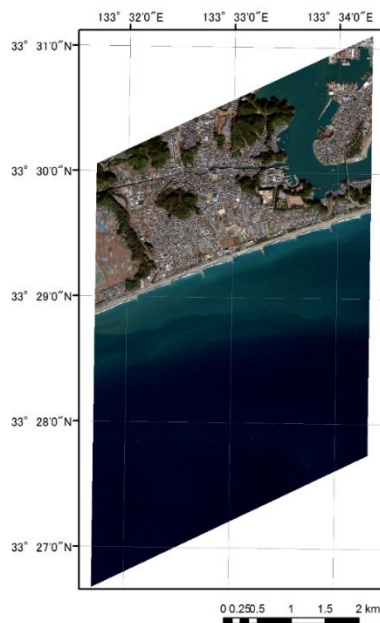


図 3.14 高知沖衛星画像 (p39n001)

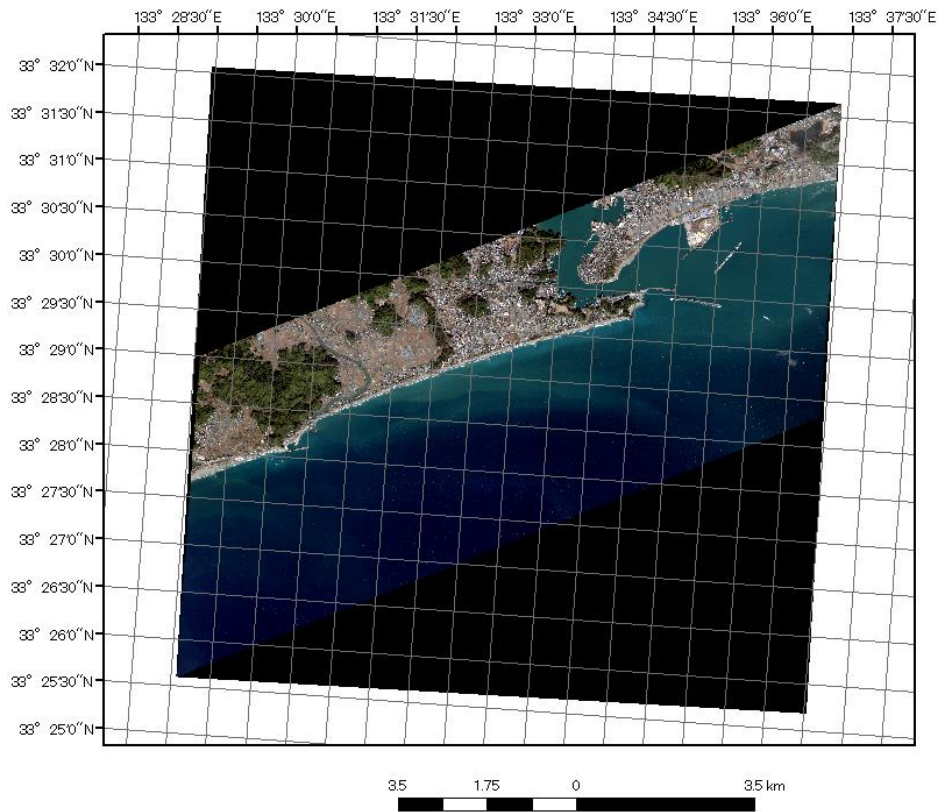


図 3.15 高知沖衛星画像 (p39n002)

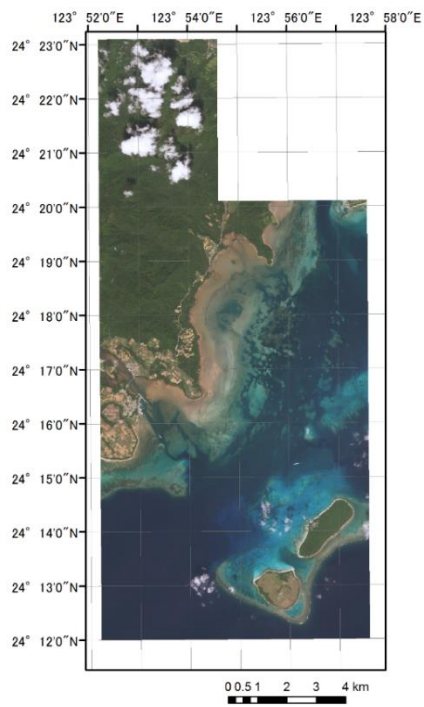


図 3.16 石西礁湖衛星画像 (p47n001)

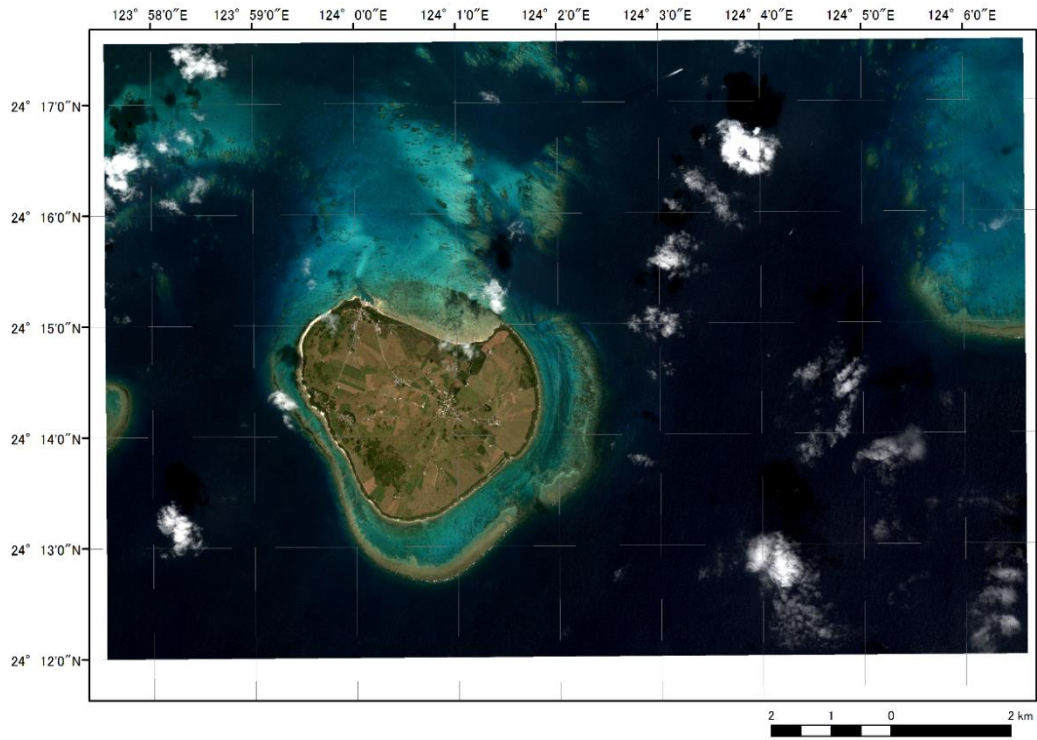


図 3.17 石西礁湖衛星画像 (p47n002)

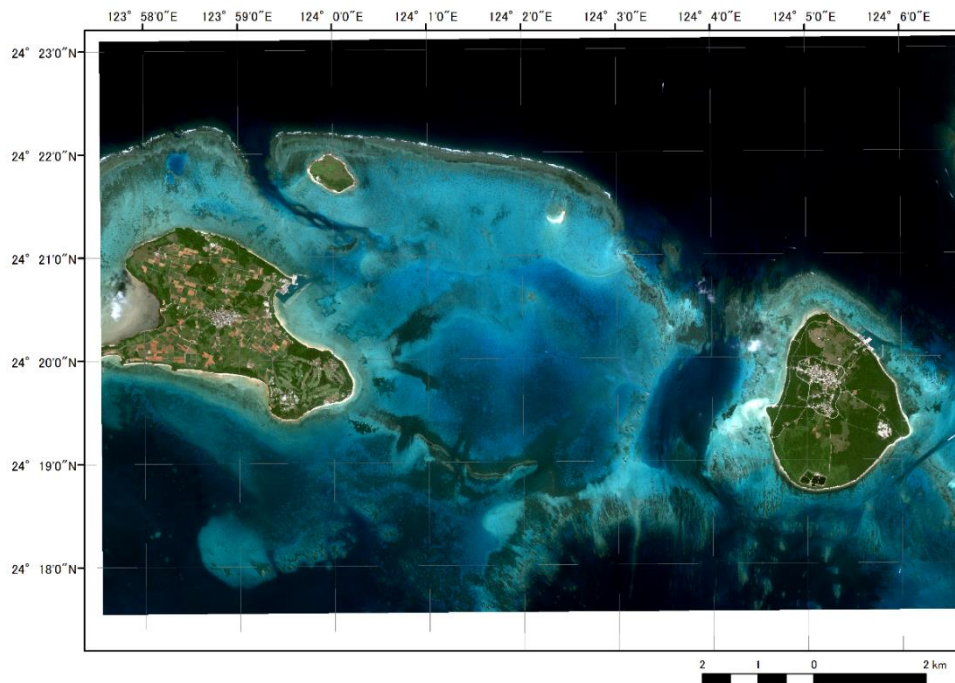


図 3.18 石西礁湖衛星画像 (p47n003)

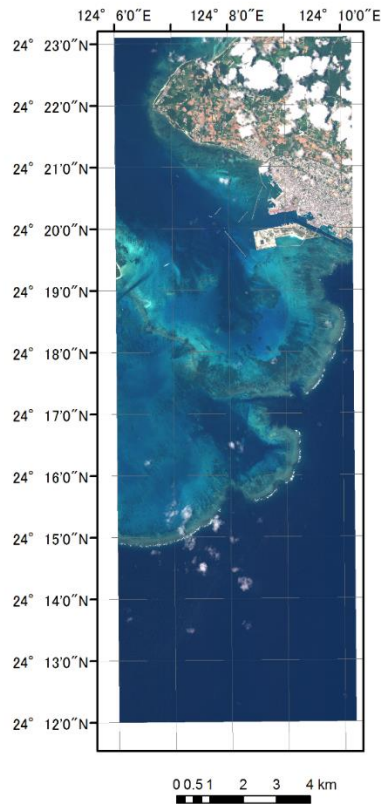


図 3.19 石西礁湖衛星画像 (p47n004)

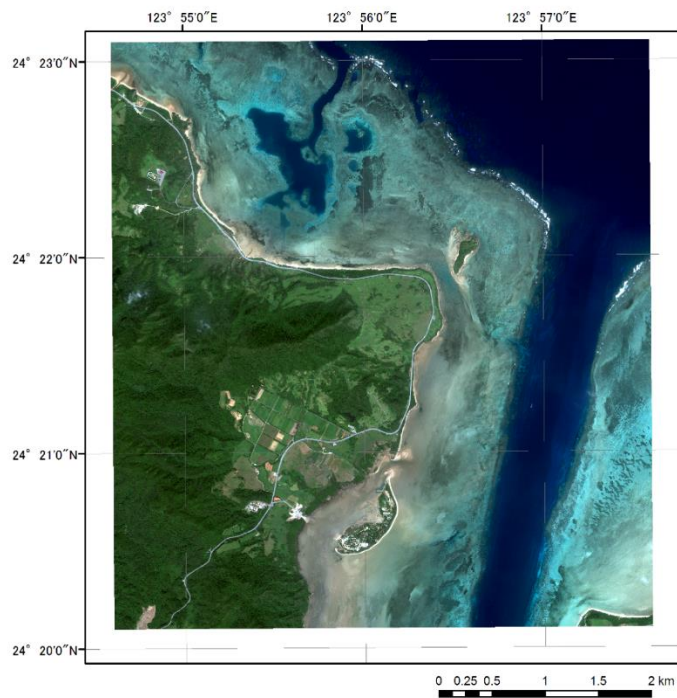


図 3.20 石西礁湖衛星画像 (p47n005)

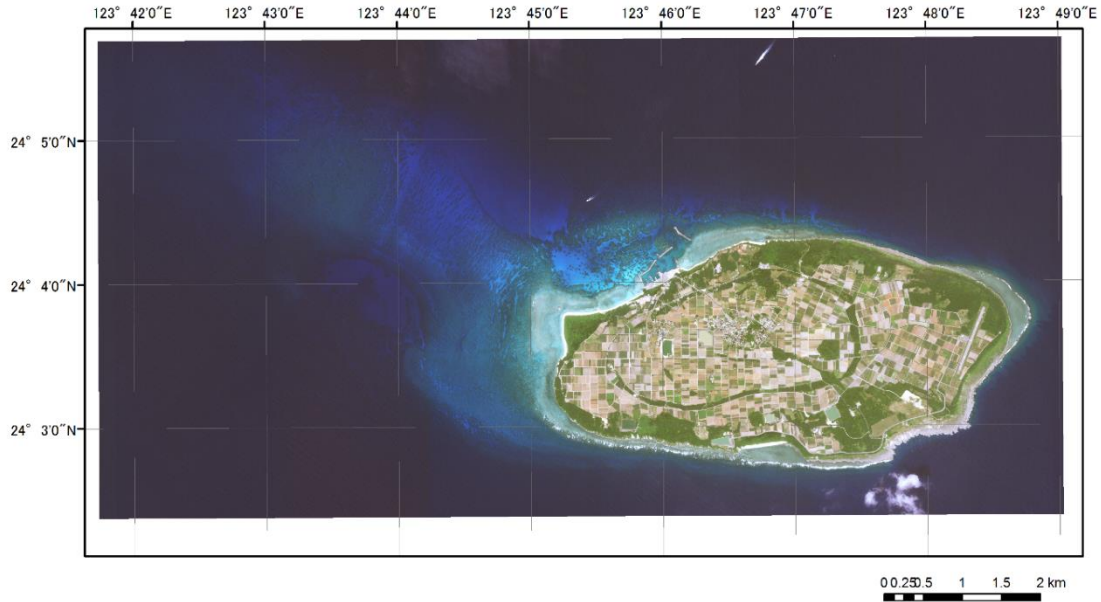


図 3.21 波照間島周辺衛星画像 (p47n010)

3.2 水路測量データ

使用した水路測量データ一覧を表 3.3 に示す。また、各衛星画像に対応する水路測量データを図 3.22～3.44 に示す。なお、図中の水深データは水深分布が分かりやすくなるように、データがない場所についても補間処理を行っているが、SDB の解析では衛星画像の画素に対応するように最近傍法でリサンプリングしたデータを使用しており、データの無い場所への補間処理等は行っていない。

表 3.3 水路測量データ一覧

海域	枝番号	図名	原図番号	測量年月	備考
仙台	1	仙台	A011301	2011.11	航空レーザー
	2	仙台塩釜港	E213011	2011.9-11, 2012.5-8	マルチビーム
	3	仙台塩釜港	E213012	2011.9-11, 2012.6-8,12,2013.8	マルチビーム
銚子	1	銚子港及付近	A013301	2013.8	航空レーザー
	2	鹿島港南部	A013302	2013.8	航空レーザー
	3	銚子港	E313023A	2013.5	マルチビーム

	4	銚子港	E314013	2014.7	マルチビーム、一部シングルビーム
鎌倉	1	相模湾	E314024	2014.1	マルチビーム
両津湾	1	両津湾	907003	2007.7	マルチビーム
浜名港	1	浜名港	E303031A	2003.7-10	マルチビーム、一部シングルビーム
尾鷲	1	尾鷲湾	E404049A	2004.5-10	マルチビーム、一部シングルビーム
	2	尾鷲港	E404051A	2004.5-10	マルチビーム、一部シングルビーム
	3	尾鷲港	E412018A	2012.4-7, 9, 11	マルチビーム、一部シングルビーム
	4	尾鷲港付近	E404016A	2004.5-10	マルチビーム、一部シングルビーム
的矢	1	相差漁港	E405022A	2005.7-10	マルチビーム、一部シングルビーム
宇和島湾	1	宇和島湾	A0063024	2006.7	航空レーザー
佐田岬	1	佐田岬灯台付近	A006302	2006.7	航空レーザー測量
高知	1	高知港及び付近	E502033A	2002.8	マルチビーム
青海島	1	青海島付近	E710503	2010	マルチビーム
石垣	1	西表島東方(その1)	DB91001	1990.9	シングルビーム (4素子)
	2	西表島東方(その2)	DB91002	1990.9	シングルビーム (4素子)
	3	竹富・小浜航路	EB04003	2004.6	シングルビーム (4素子)
	4	石垣港	EB12002	2012.7	マルチビーム
	5	石垣港	EB13003	2013.7	マルチビーム
	6	石垣港付近	EB13004	2013.11	マルチビーム
	7	波照間島	10502	1987	沿岸の海の基本図
	8	西表島北部	10580	1990	沿岸の海の基本図
	9	石垣島南部	10601	1991	沿岸の海の基本図
波照間島	1	波照間島	-	2015.2	航空レーザー

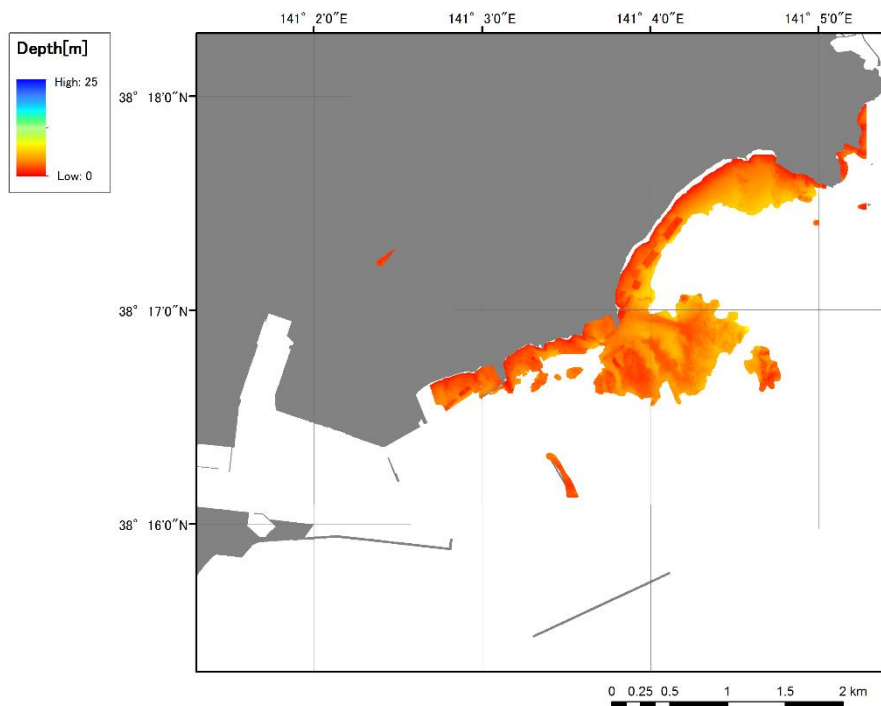


図 3.22 仙台沖水路測量データ（航空レーザー）（p04n001, p04n002, p04n003）

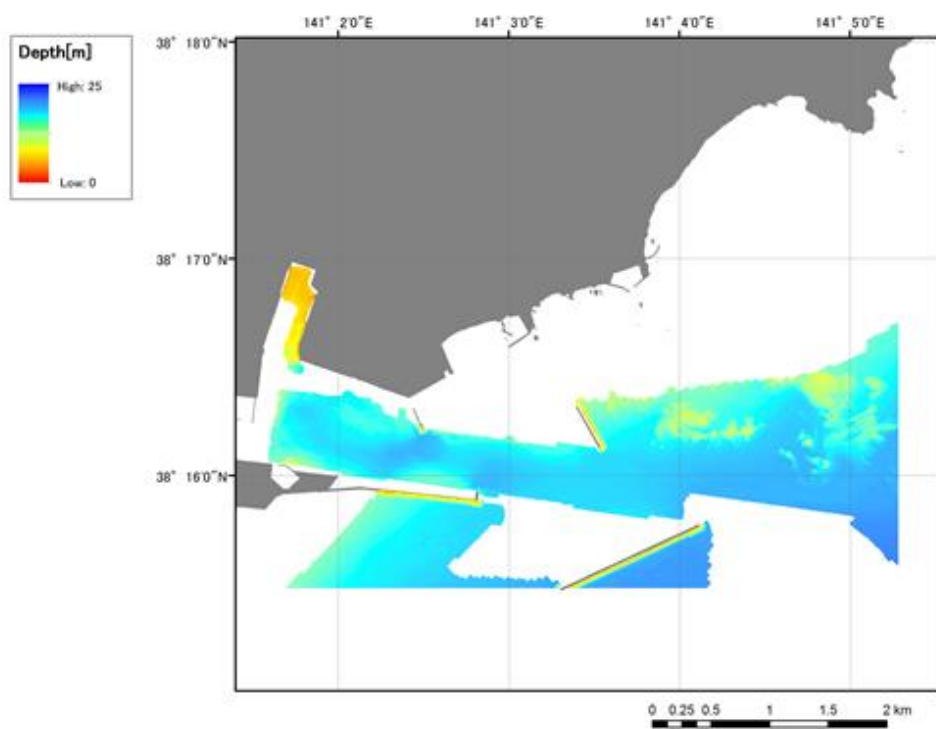


図 3.23 仙台沖水路測量データ（マルチビーム）（p04n001, p04n002, p04n003）

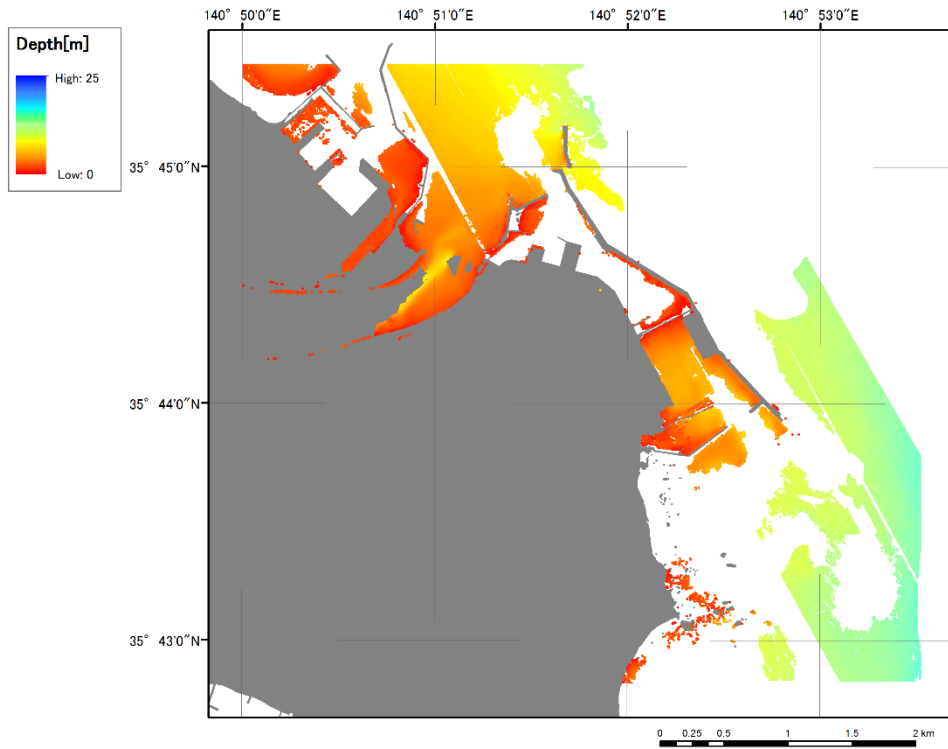


図 3.24 銚子沖水路測量データ（航空レーザー）(p12n001)

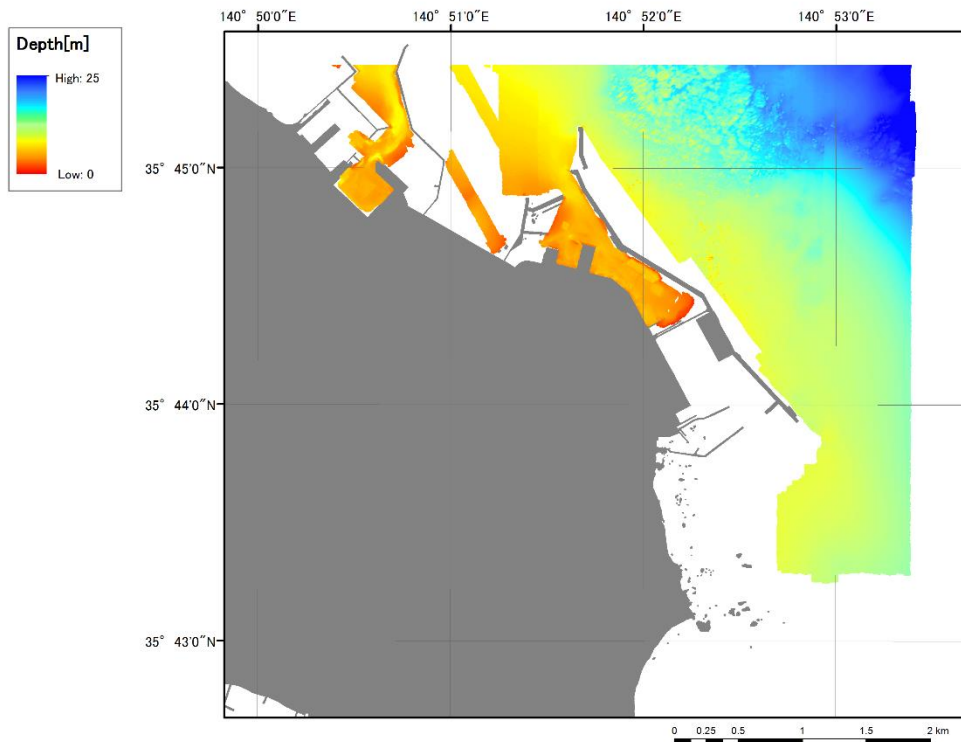


図 3.25 銚子沖水路測量データ（マルチビーム、シングルビーム）(p12n001)

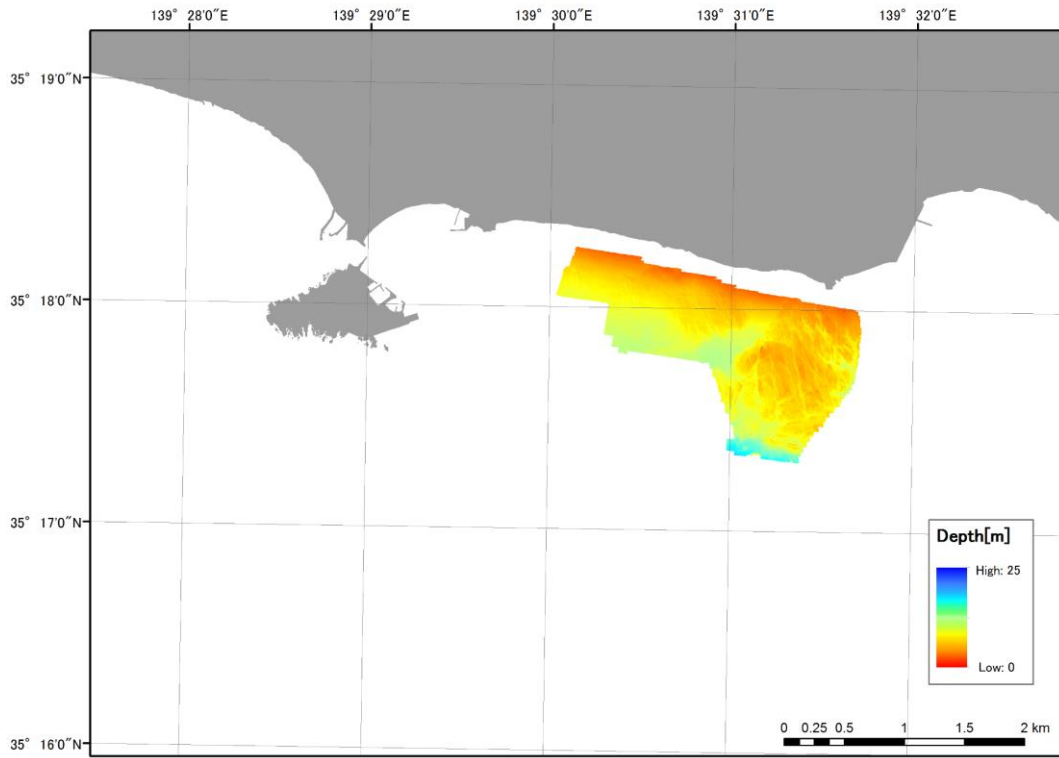


図 3.26 鎌倉沖水路測量データ (マルチビーム) (p14n001)

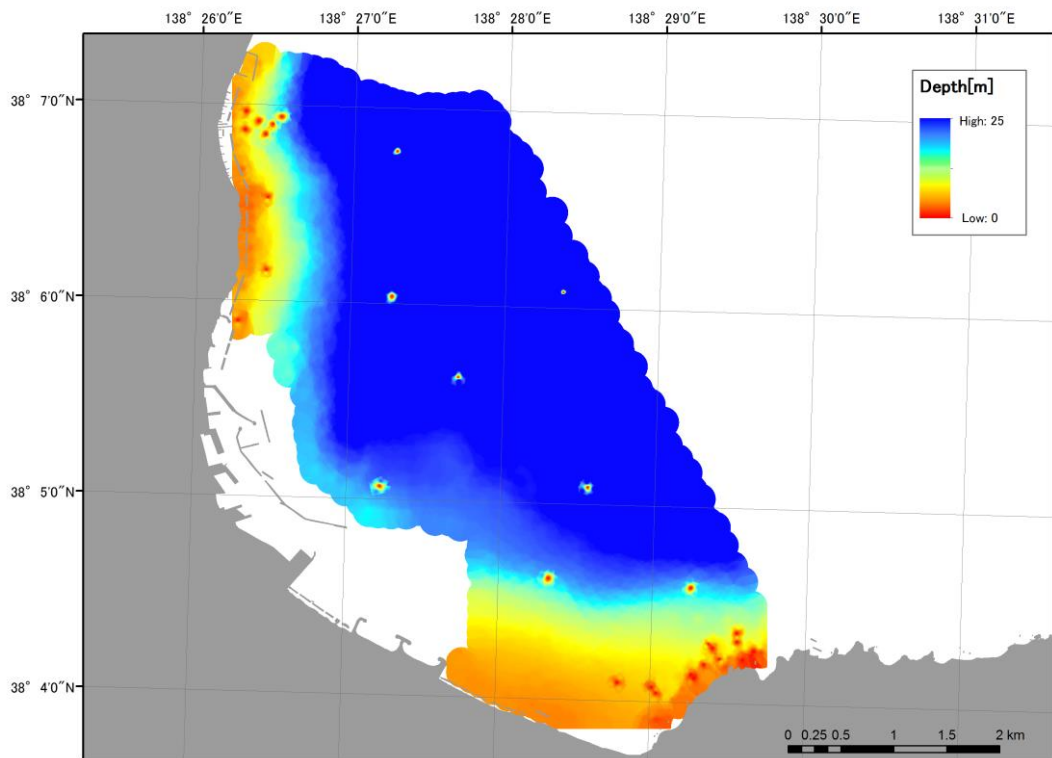


図 3.27 両津湾水路測量データ (マルチビーム) (p15n001)

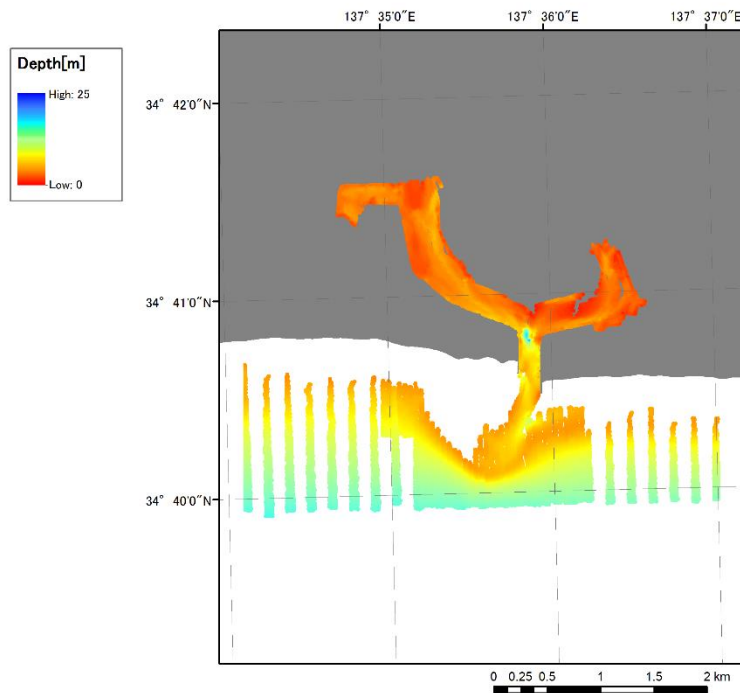


図 3.28 浜名港水路測量データ (マルチビーム、シングルビーム) (p22n001)

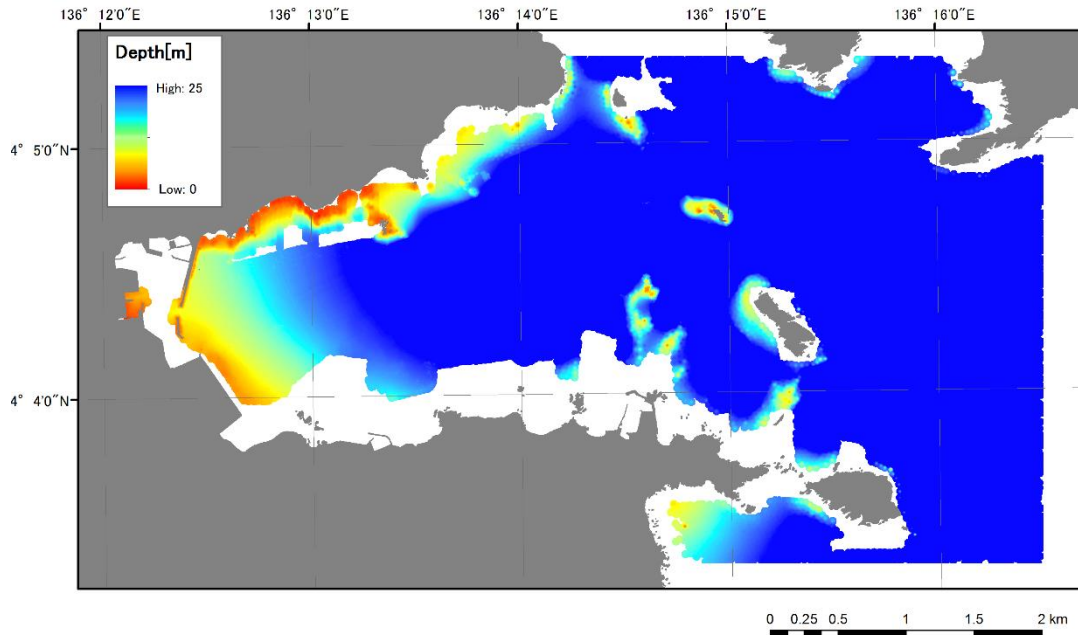


図 3.29 尾鷲湾水路測量データ (マルチビーム、シングルビーム) (p24n001)

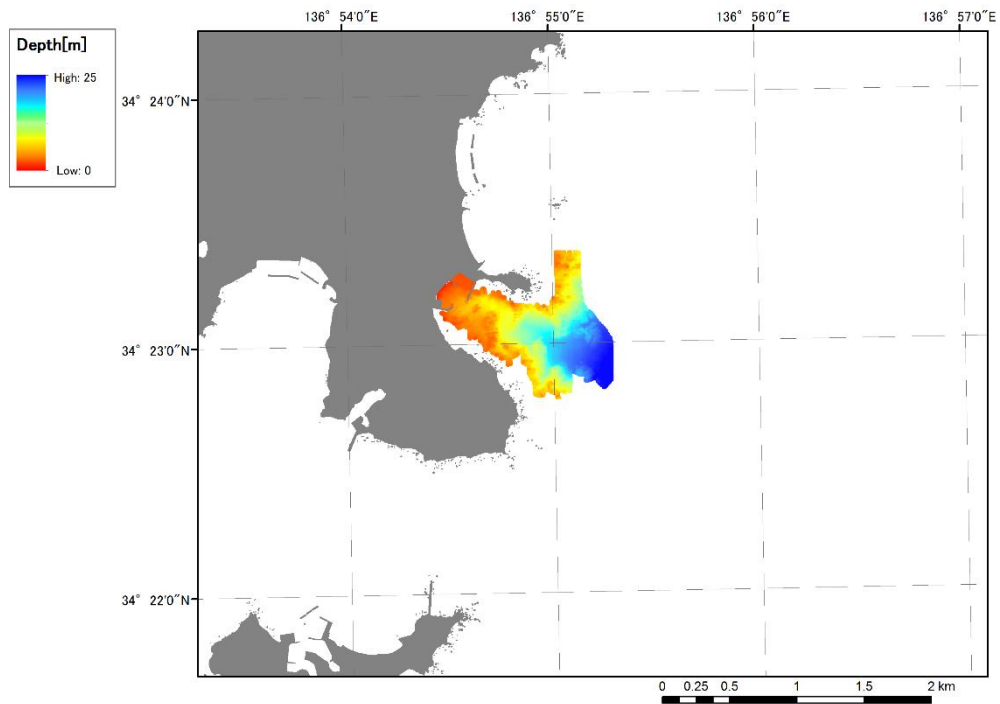


図 3.30 相差漁港水路測量データ (マルチビーム、シングルビーム) (p24n002, p24n003)

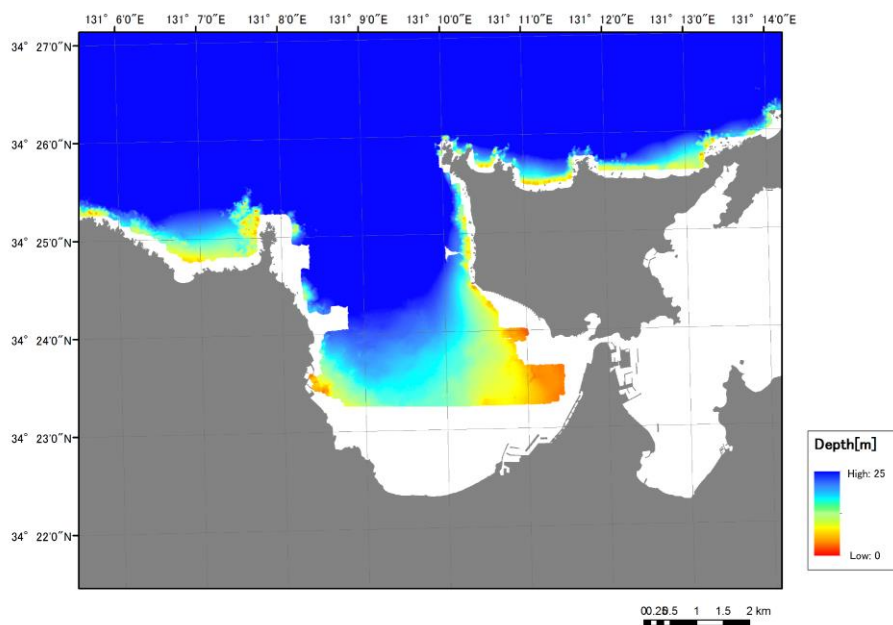


図 3.31 深川湾水路測量データ (マルチビーム) (p35n001)

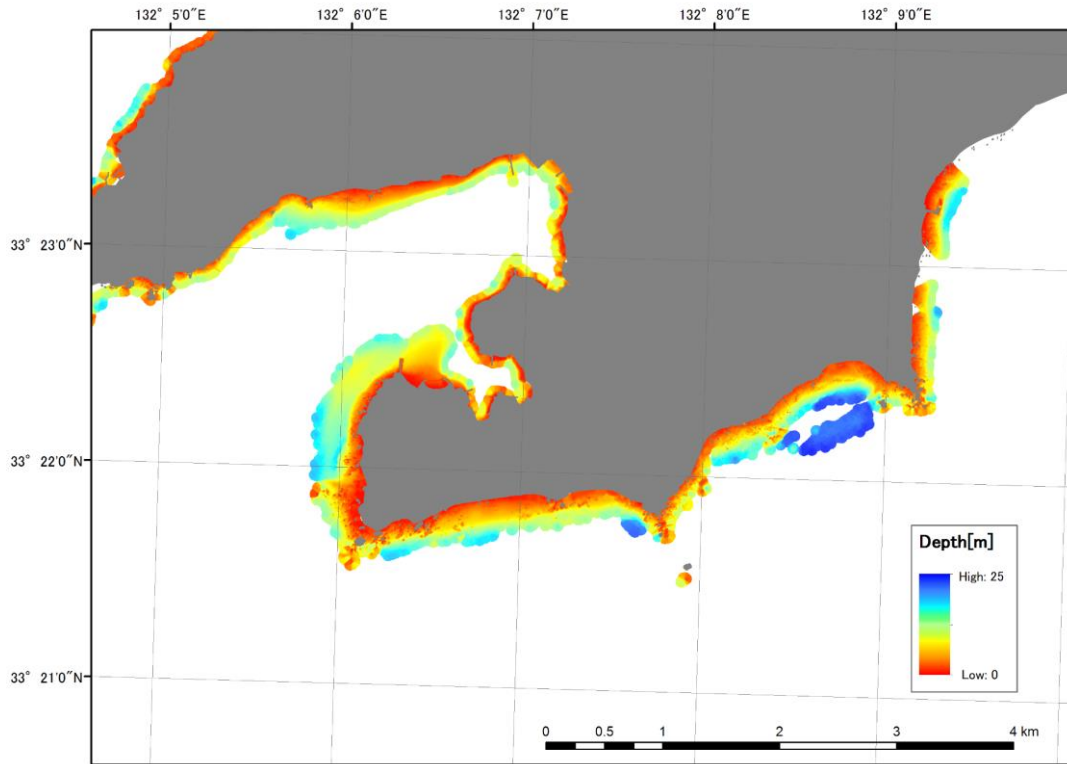


図 3.32 佐田岬水路測量データ (航空レーザー) (p38n001)

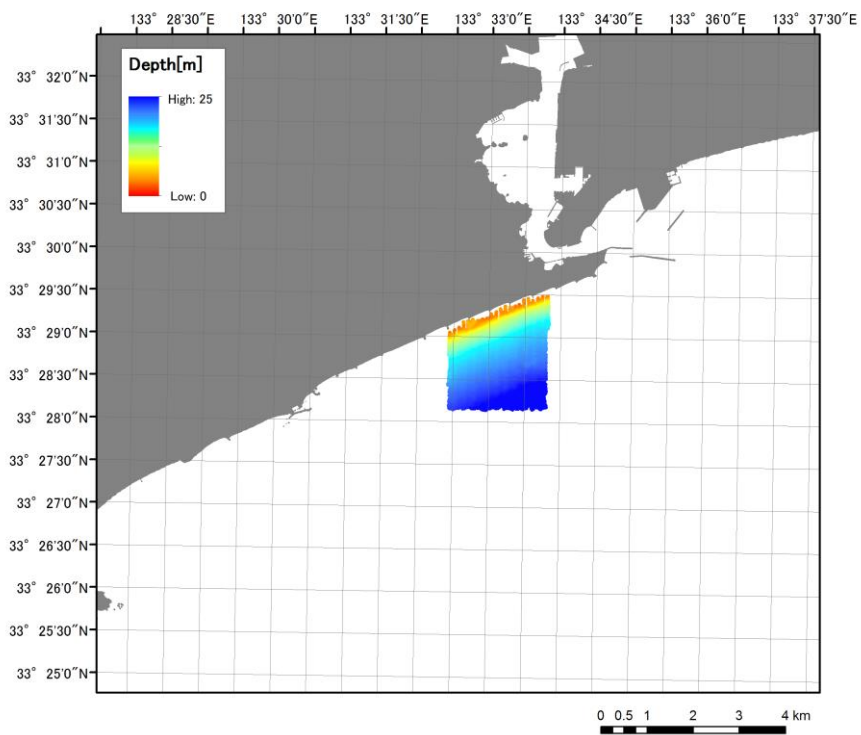


図 3.33 高知沖水路測量データ (マルチビーム) (p39n001、p39n002)

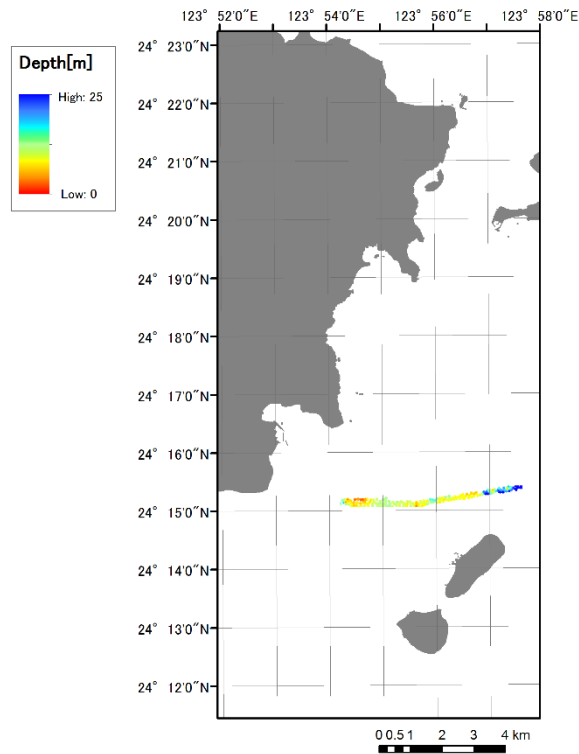


図 3.34 石西礁湖水路測量データ（シングルビーム）(p47n001, p47n005)

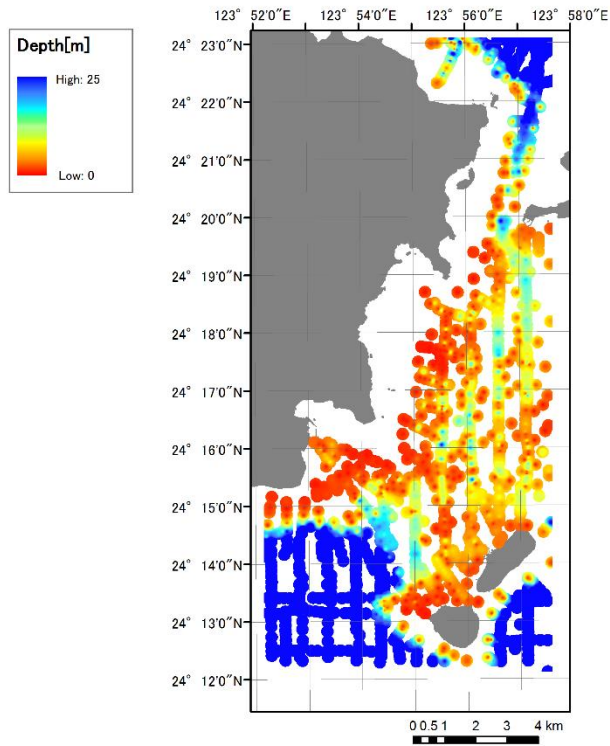


図 3.35 石西礁湖水路測量データ（沿岸の海の基本図）(p47n001, p47n005)

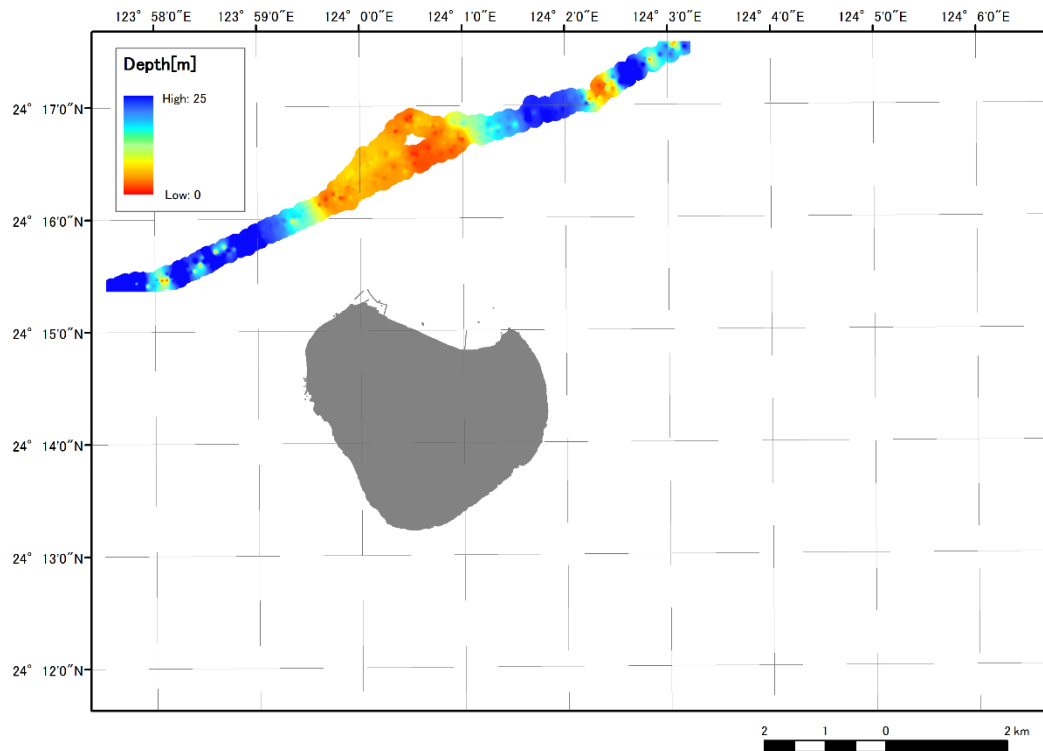


図 3.36 石西礁湖水路測量データ（シングルビーム測深）（p47n002）

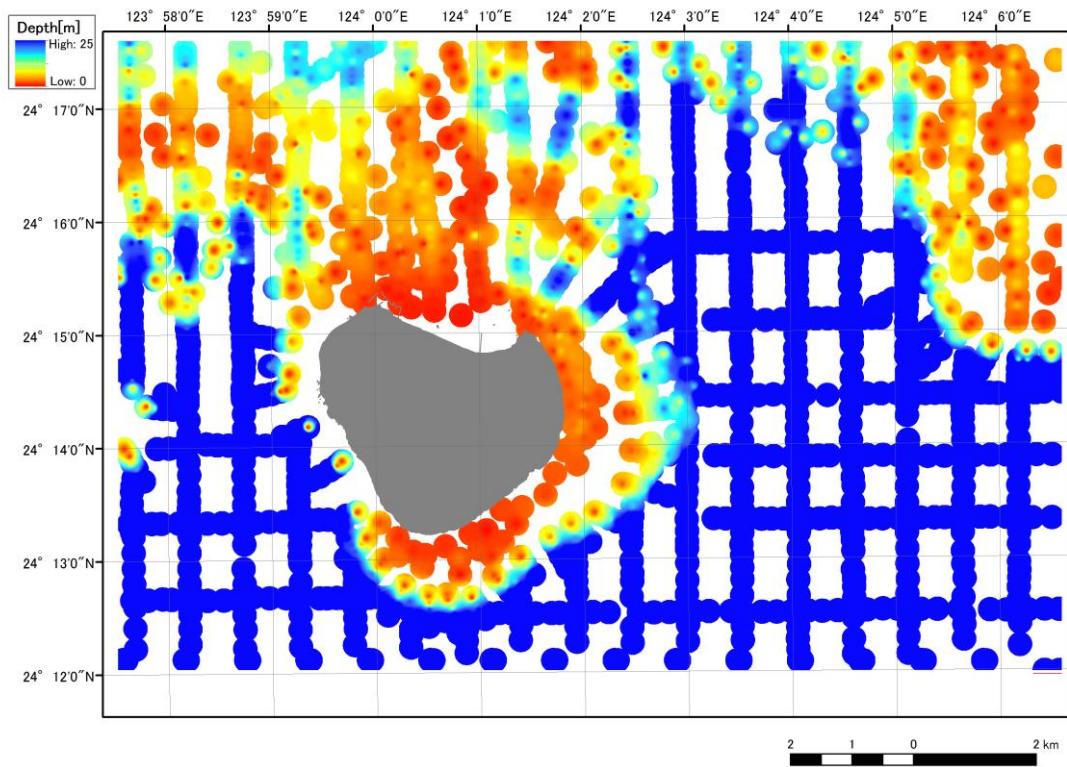


図 3.37 石西礁湖水路測量データ（沿岸の海の基本図）（p47n002）

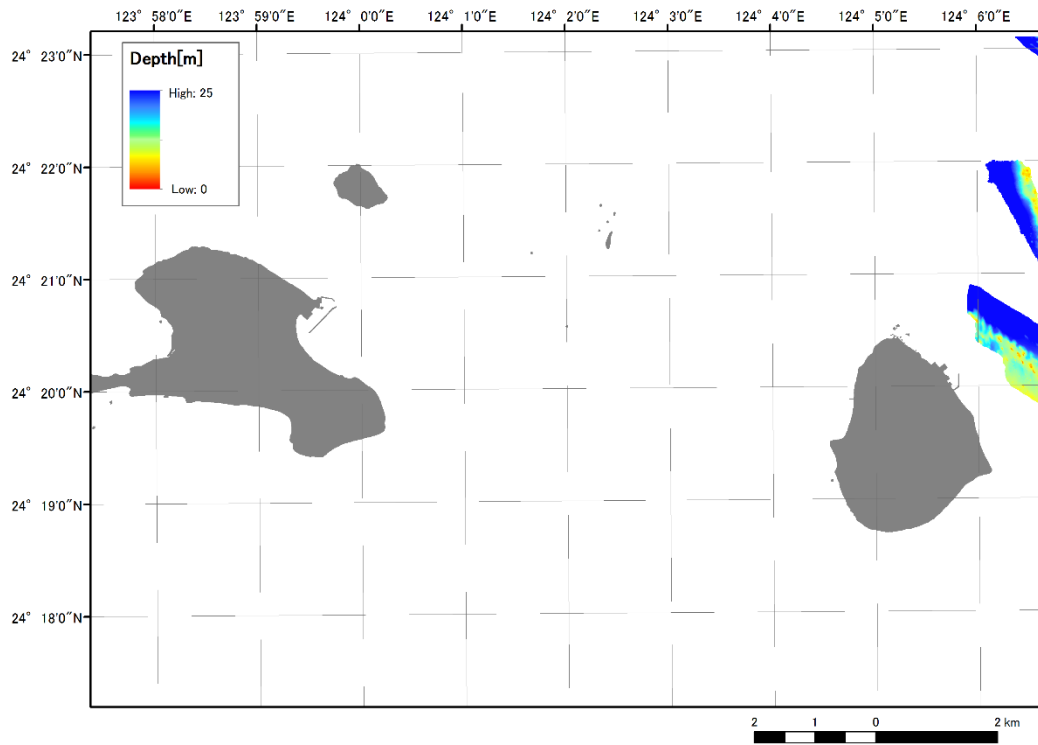


図 3.38 石西礁湖水路測量データ (マルチビーム) (p47n003)

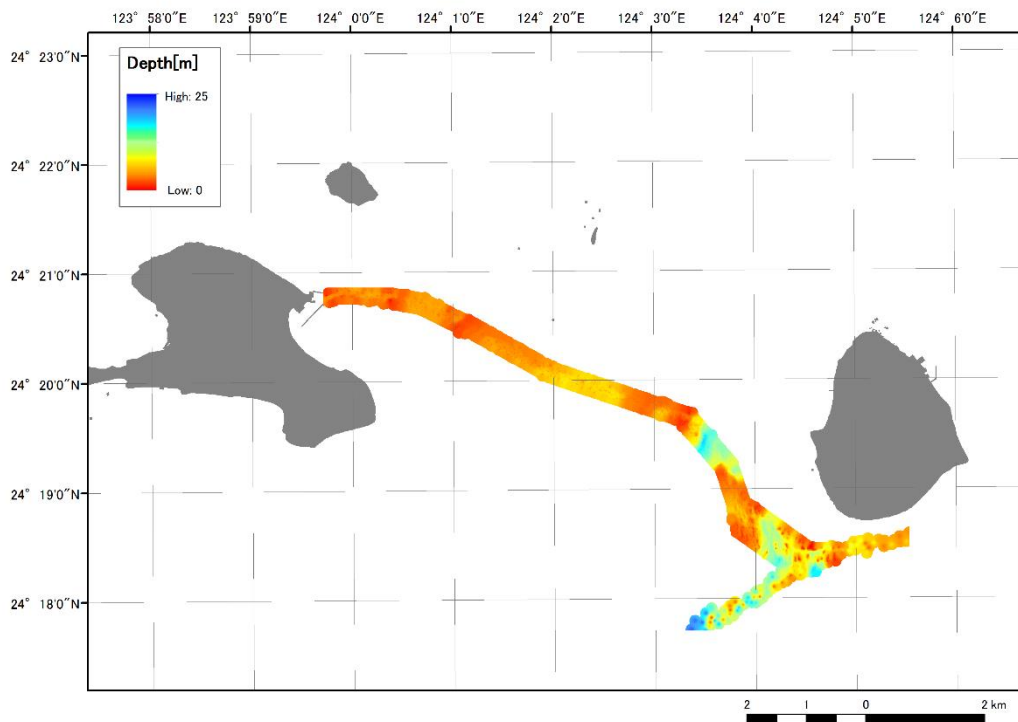


図 3.39 石西礁湖水路測量データ (シングルビーム) (p47n003)

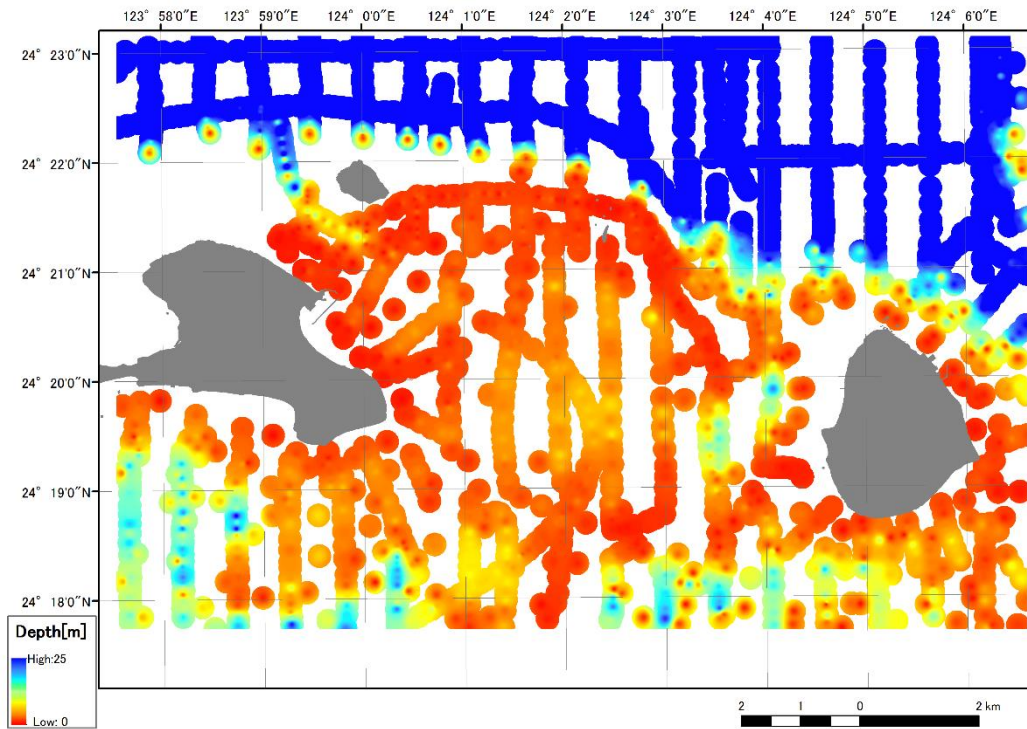


図 3.40 石西礁湖水路測量データ（沿岸の海の基本図）（p47n003）

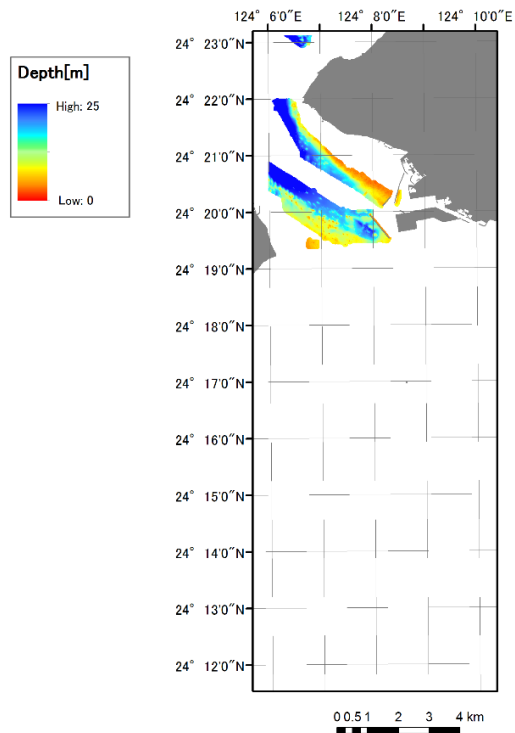


図 3.41 石西礁湖水路測量データ（マルチビーム）（p47n004）

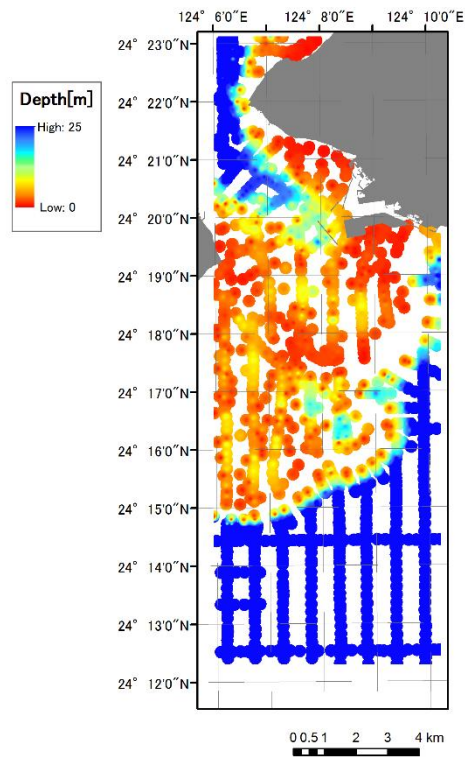


図 3.42 石西礁湖水路測量データ（沿岸の海の基本図）（p47n004）

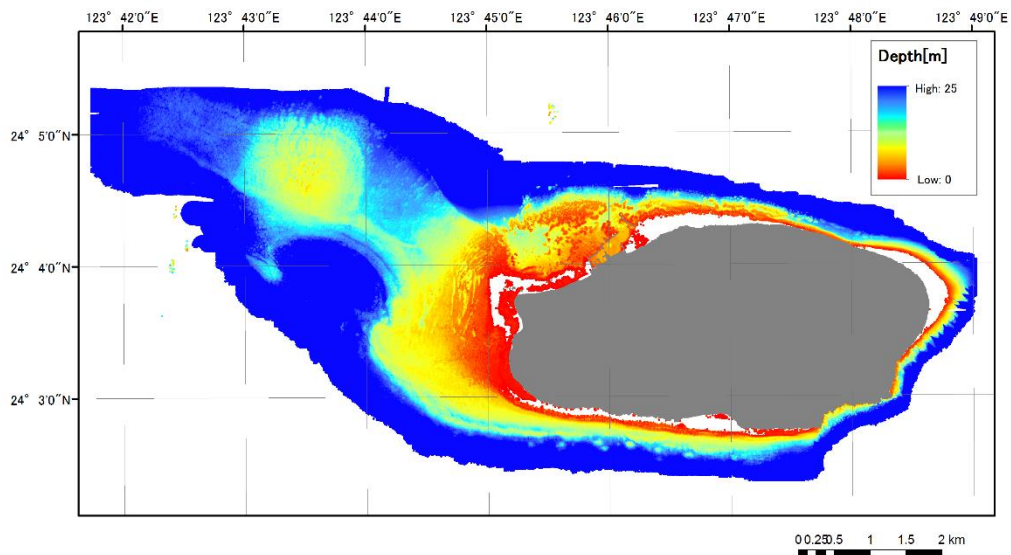


図 3.43 波照間水路測量データ（航空レーザー）（p47n010）

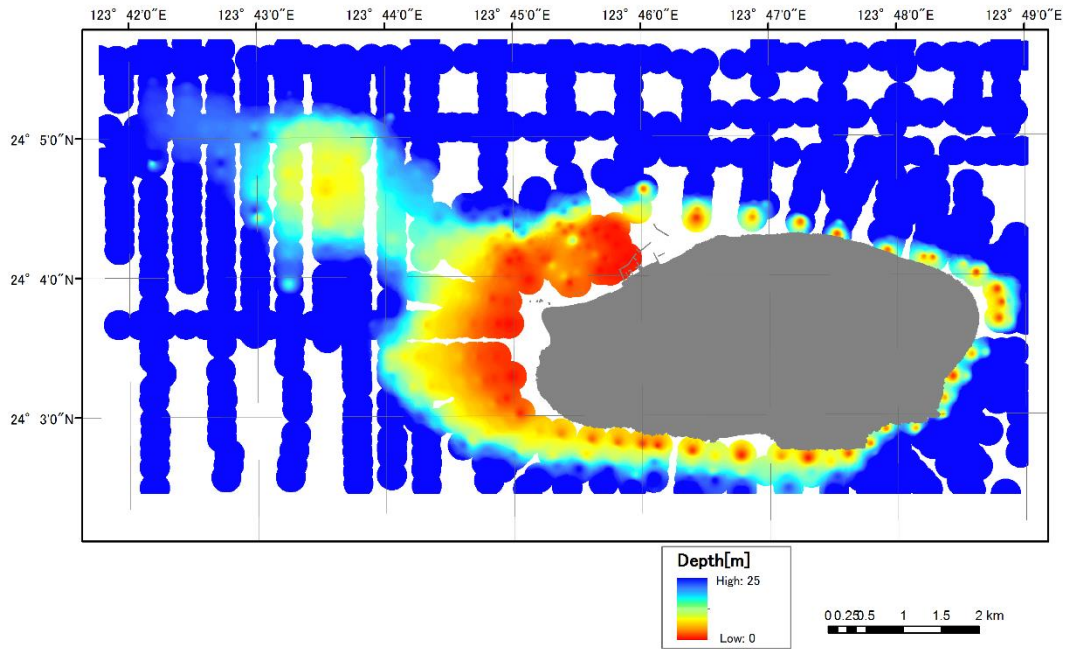


図 3.44 波照間水路測量データ（沿岸の海の基本図）(p47n010)

第4章 手法の限界調査

水深推定手法の適用限界は、主に水深の大きさと透明度によって決まるが、具体的な関係は明らかになっていないため、実データを用いた解析およびシミュレーションによる調査を行う。

4.1 実データを用いた調査

水深推定可能な最大水深について調査するために、透明度が高い海域において SDB を作成し、水深推定精度を算出する。また、透明度と水深推定精度の関係を調査するために、同じ海域で複数の衛星画像から SDB を作成して比較する。

4.1.1 水深推定可能な最大水深についての調査

透明度が高い海域として、波照間島および尾鷲湾の周辺海域を調査海域に選定した。波照間と尾鷲の衛星画像について、海域の輝度のコントラストを強調した画像を図 4.1、4.2 に示す。また、それぞれの衛星画像の範囲の水路測量データを図 4.3、4.4 に示す。ここで、図の表示にあたって、データがない場所は周辺データから補間表示している。

波照間の衛星画像からは、全体として透明度が高く、海底の底質の違いを水深 20m 前後まで目視判読によって確認できる。環境省の自然環境保全基礎調査（第 4 回、第 5 回）によると、波照間島周辺にはサンゴ礁が分布しており、一部海草藻場も分布している。また画像全体として波の影響がある。このため、放射量補正処理におけるサングリント補正が有効と考えられる。

尾鷲の衛星画像をみると、湾の南北の沿岸付近はやや海底が見えているように見える。しかしながらこの付近の水路測量データは湾の北西の一部があるだけである。湾の西側は水路測量データがあり、地形は遠浅でながらかであるが、衛星画像上では同様の地形に沿った輝度変化は確認できず、波などの影響による海面での照り返しの影響などが強いようである。また、画像中の南北方向に帯状に左右の輝度差が見られ、これは衛星搭載の複数のセンサ間の感度差の影響と考えられる。ただし、感度差はピクセル深度で 1~2 ぐらいの差しかなく微小である。コントラスト強調をした際はこのような微小な輝度差も見えるようになる。また、湾の東側は波照間と同様に波の影響があるように見える。

それぞれの海域について作成した SDB を図 4.5、4.6 に、SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図を図 4.7、4.8 に、誤差グラフを図 4.9、4.10 に示す。

波照間については、水深 24m まで解析できた。図 4.5 と図 4.3 を比較すると、全体的には水深分布がよく一致していることが分かる。図 4.7 を見ると、SDB と水路測量データの相関が高いことが分かる。また、図 4.9 を見ると、誤差の 95%信頼区間は水深 10m 未満では平均±4m であるが、水深 20m 付近では平均±6m であった。水深の増大とともに SDB の水深

は実際より小さくなり、誤差が大きくなっている。

尾鷲については、水深 19m まで解析できた。しかしながら、図 4.6 と図 4.4 を比較すると、比較的一致している海域は湾の北西部付近に限定される。図 4.8、図 4.10 を見ると、SDB と水路測量データの相関はあまり高くなく、どの水深でも誤差が大きい。

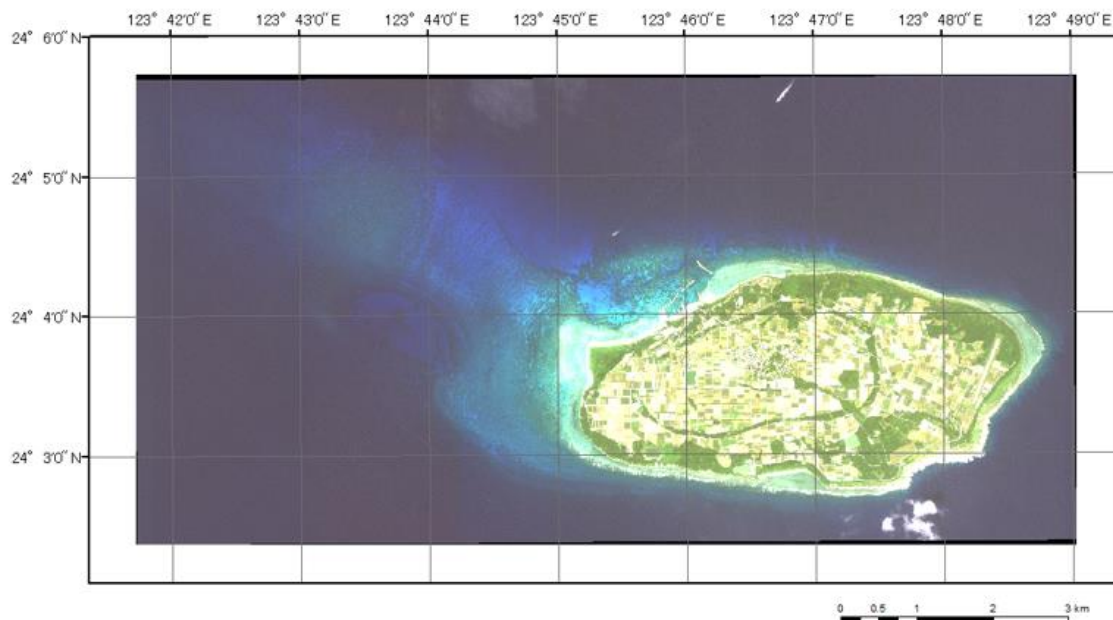


図 4.1 衛星画像（波照間）

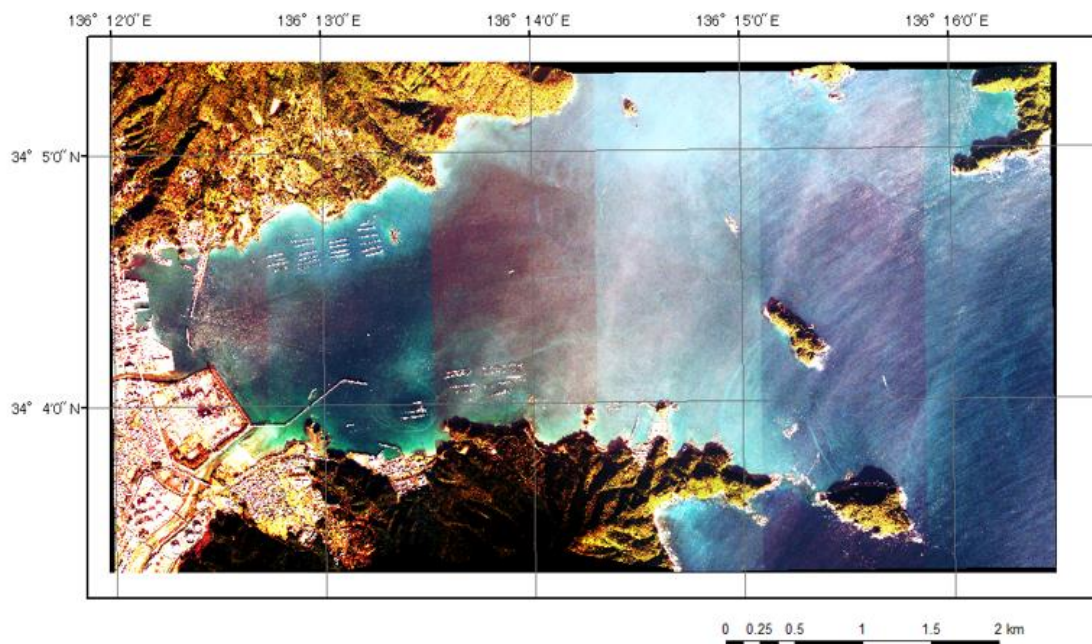


図 4.2 衛星画像（尾鷲）

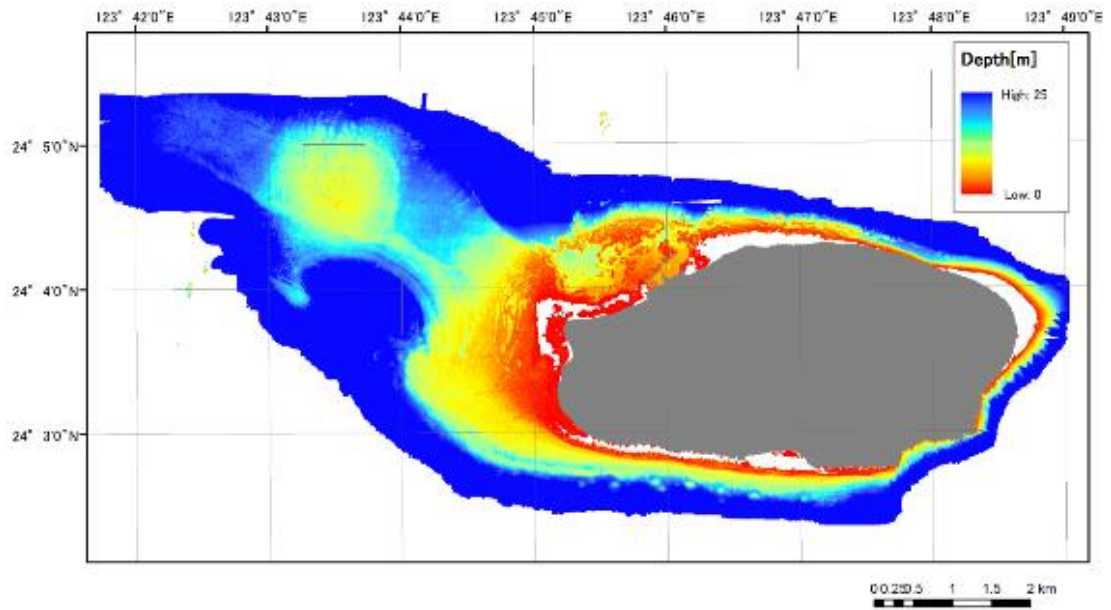


図 4.3 水路測量データ（波照間）

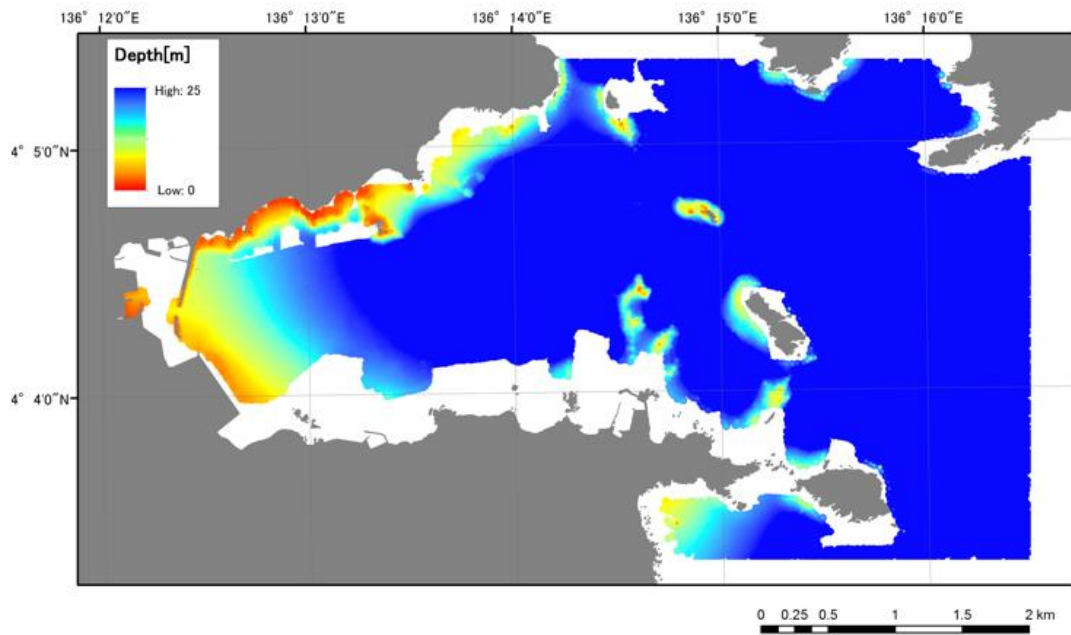


図 4.4 水路測量データ（尾鷲）

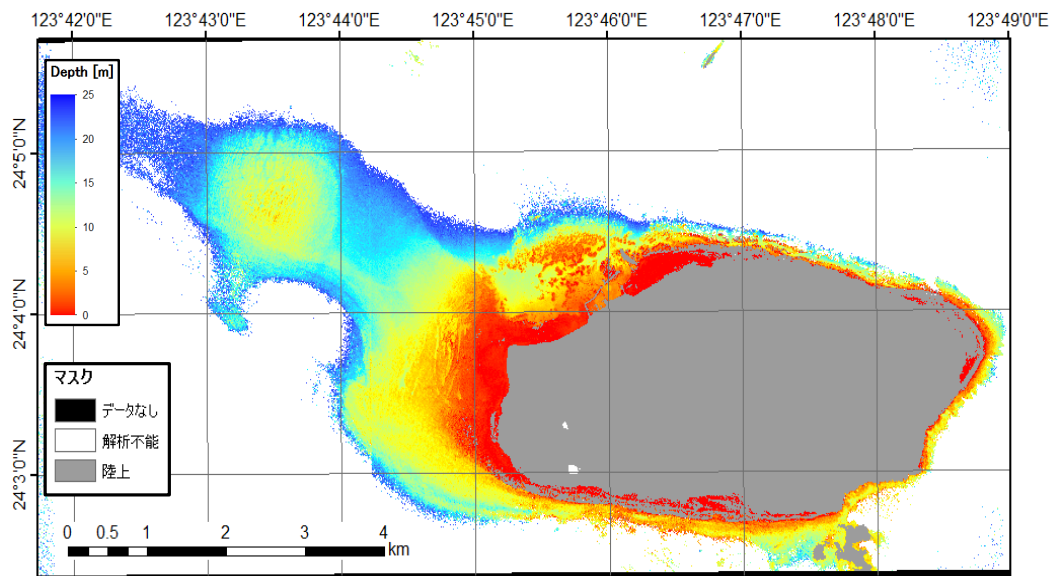


図 4.5 SDB (波照間)

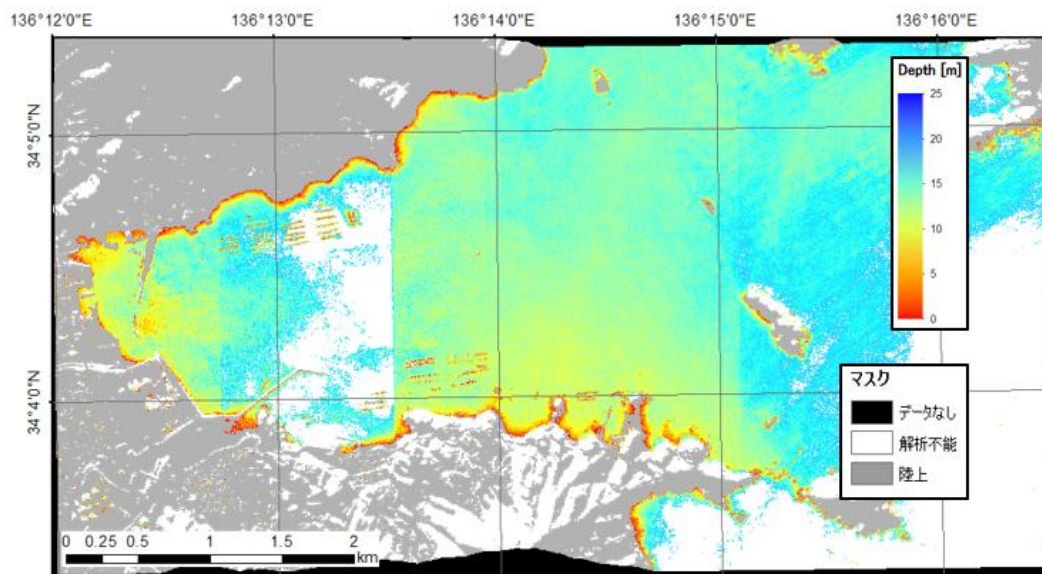


図 4.6 SDB (尾鷲)

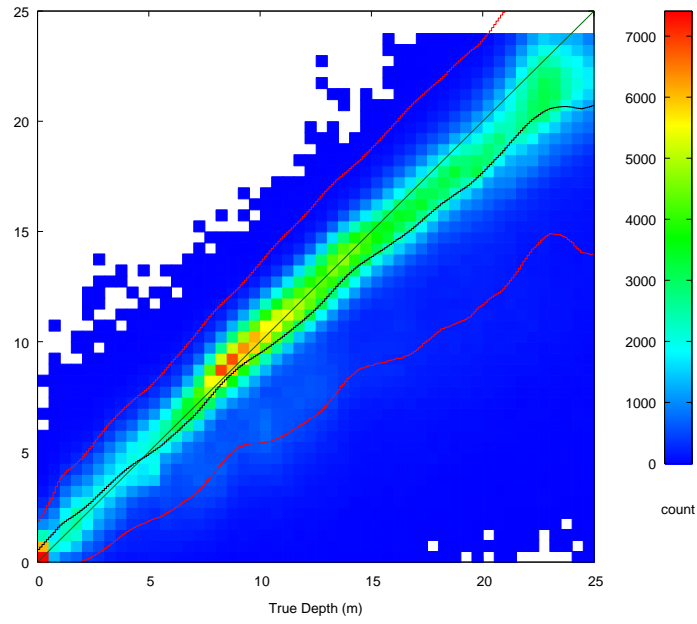


図 4.7 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (波照間)

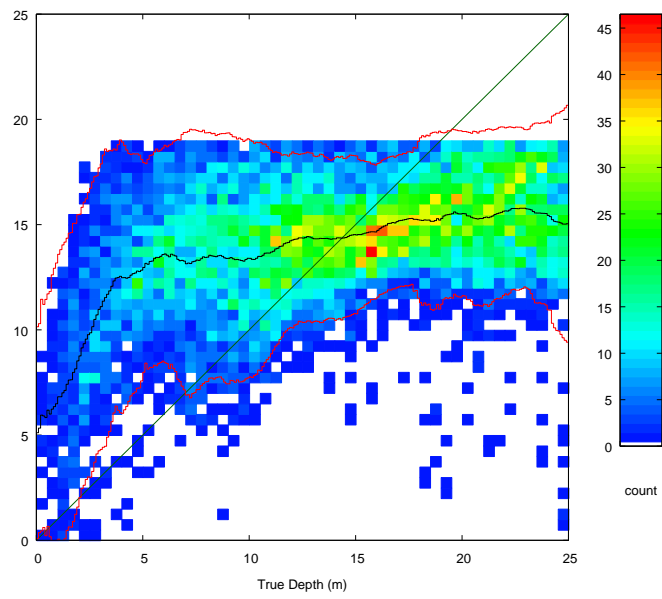


図 4.8 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (尾鷲)

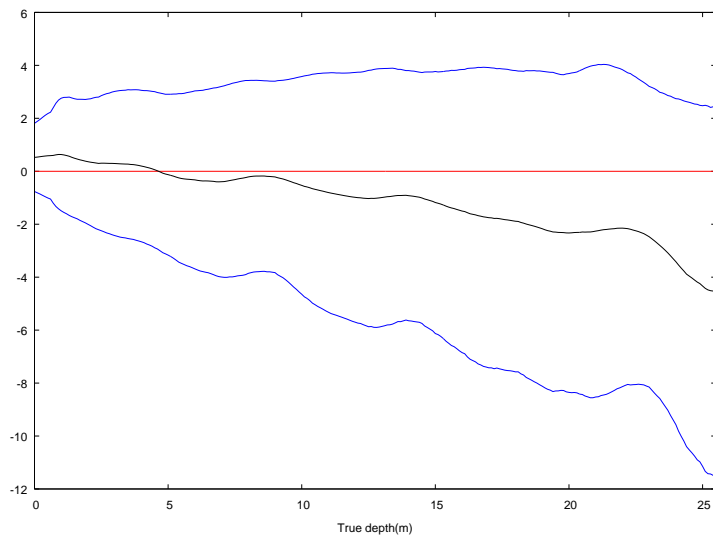


図 4.9 誤差グラフ (波照間)

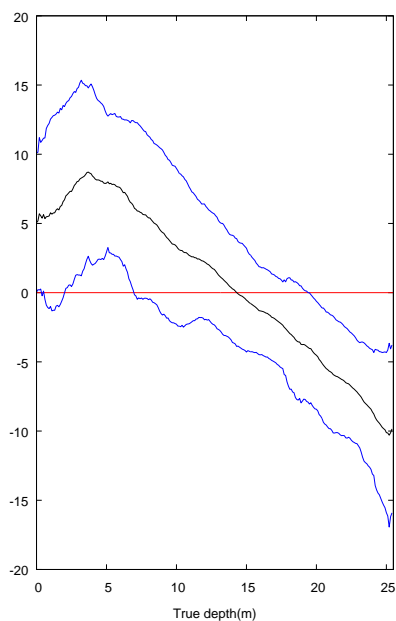


図 4.10 誤差グラフ (尾鰭)

4.1.2 透明度と水深推定精度の関係の調査

仙台沖において、異なる 3 時期の衛星画像を解析し、SDB とその精度について比較した。衛星画像は、2012/7/19、2013/1/18、2014/4/2 の時期に撮影されたものを使用した。海域のコントラストを強調したものを図 4.11～4.13 に示す。

どのケースも水深 5m まで解析しているが、分布は異なる。SDB と水路測量の散布図を見ると、どの結果も水深約 4m までは SDB は深く、それ以深で浅く推定しているが傾向は大きく変わらない。水深 4m までの平均誤差は 0～2m、95%信頼区間は平均誤差±1～2m で

あった。

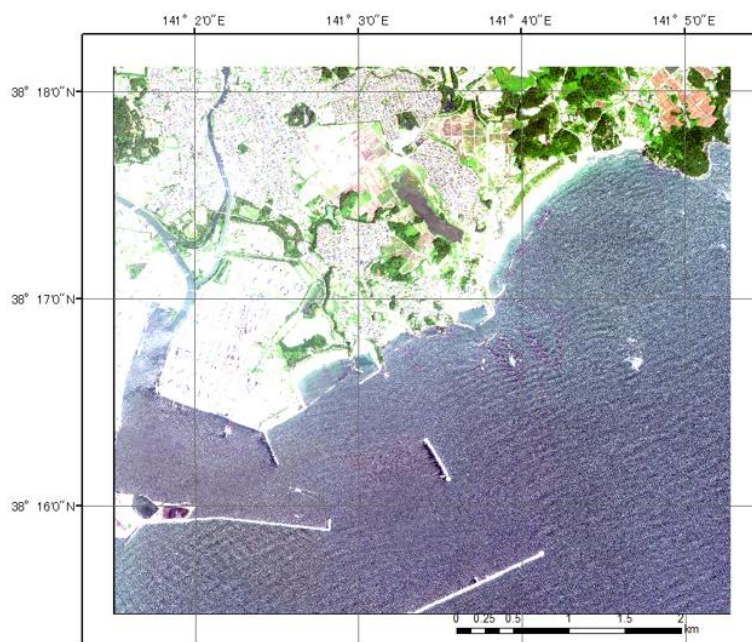


図 4.11 衛星画像 (仙台、2012/7/19)

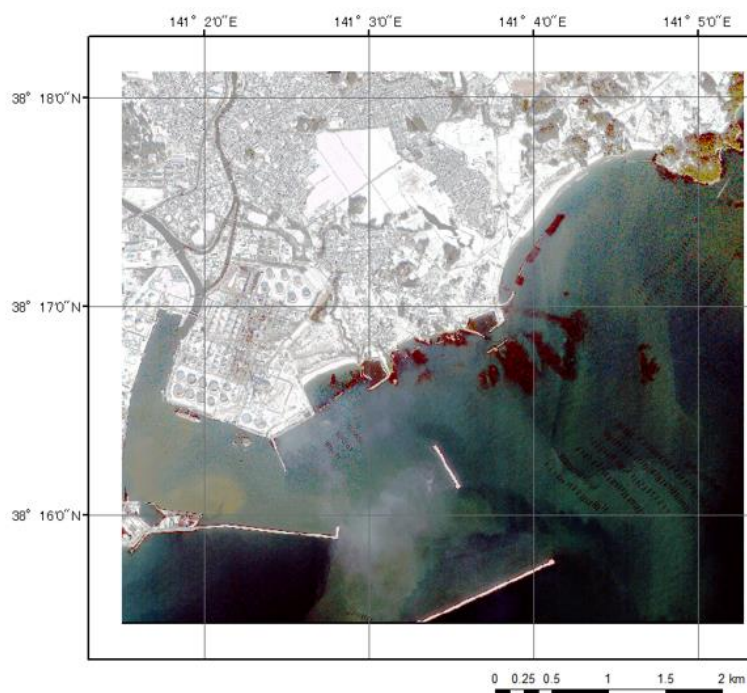


図 4.12 衛星画像 (仙台、2013/1/18)

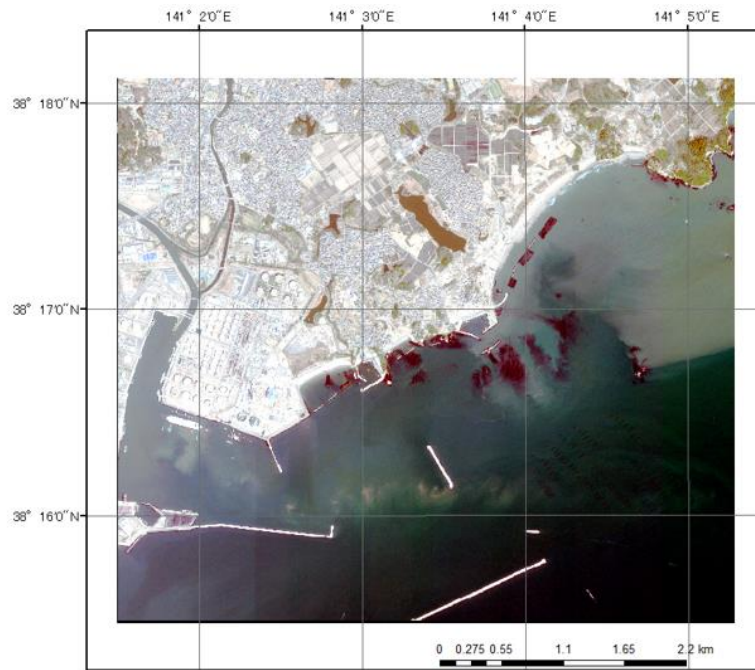


図 4.13 衛星画像（仙台、2014/4/2）

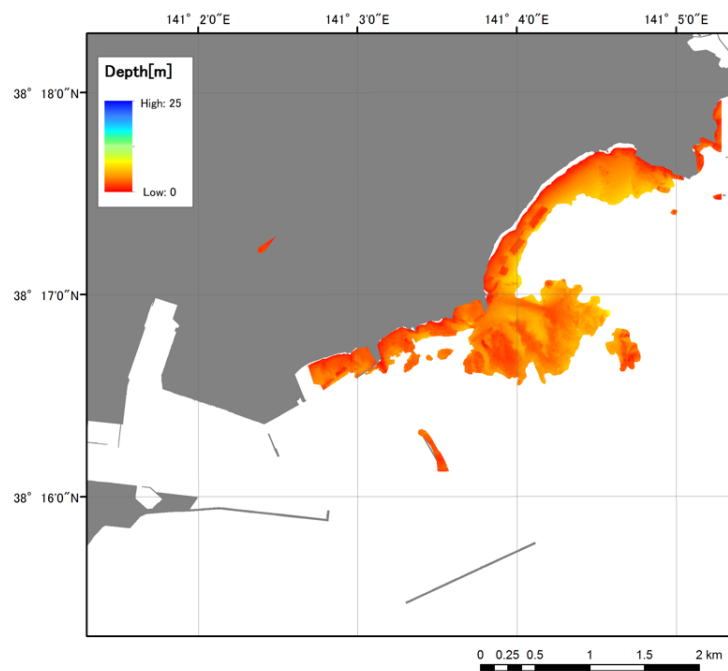


図 4.14 水路測量データ（仙台）

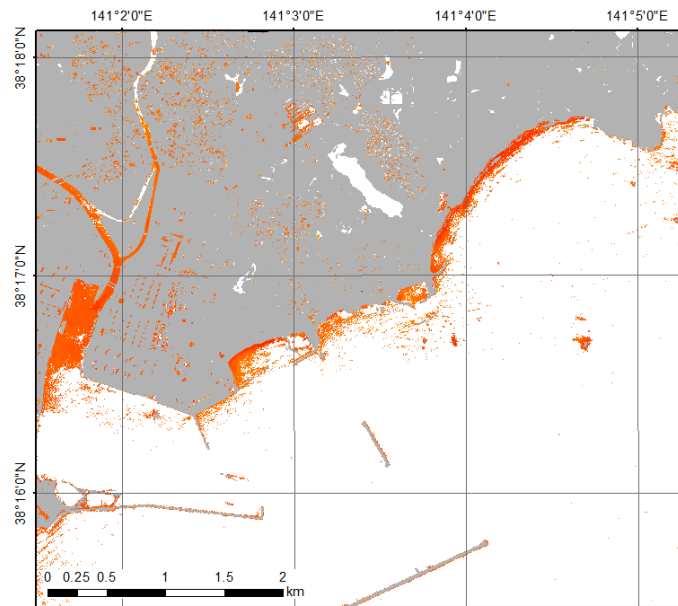


図 4.15 SDB (仙台、2012/7/19)

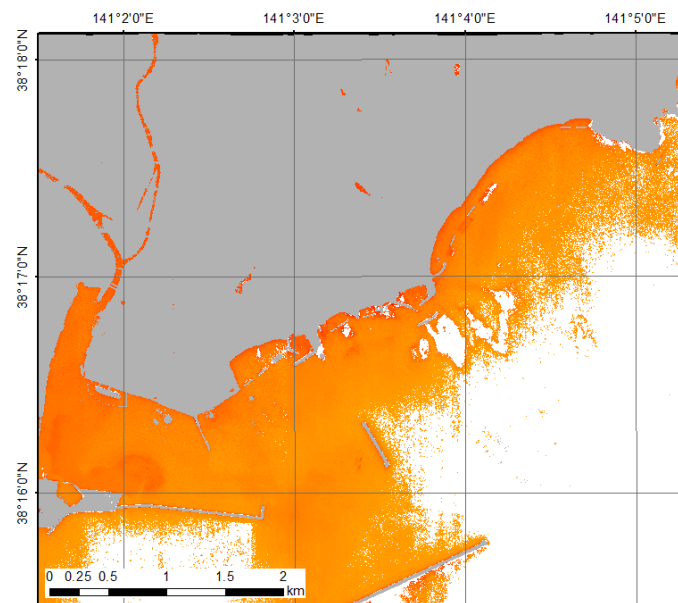


図 4.16 SDB (仙台、2013/1/18)

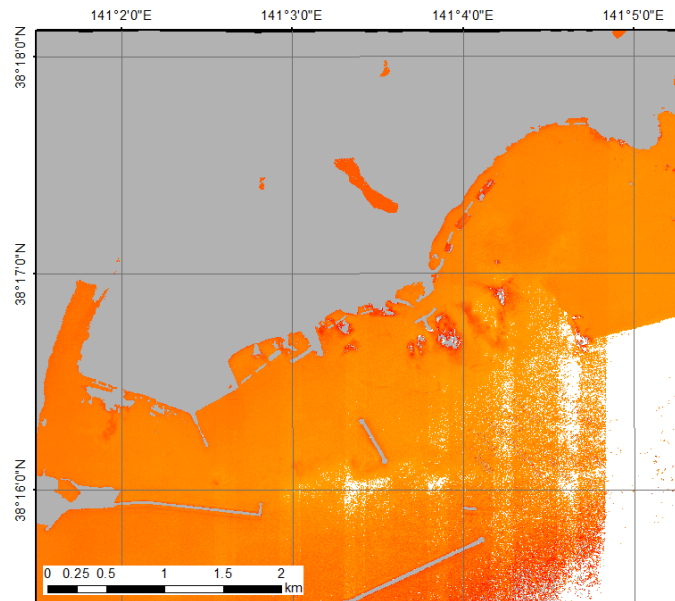


図 4.17 SDB (仙台、2014/4/2)

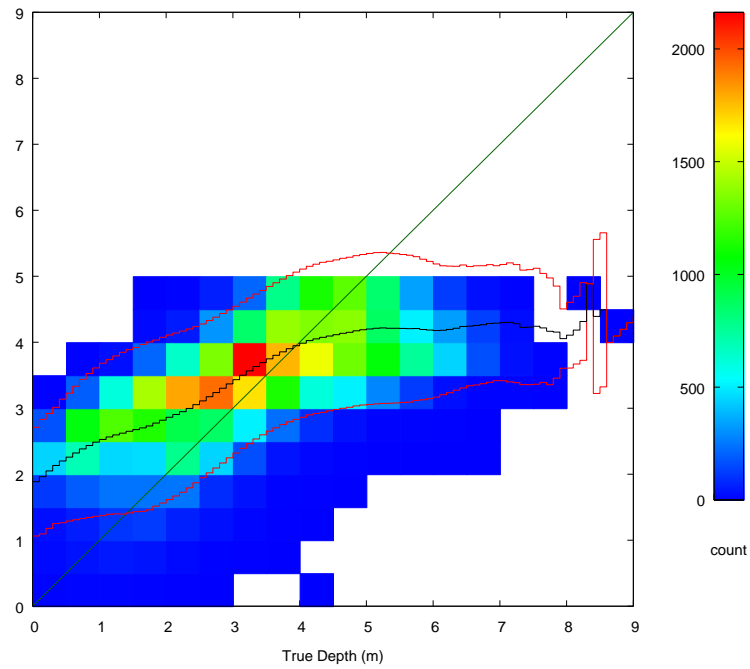


図 4.18 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2012/7/19)

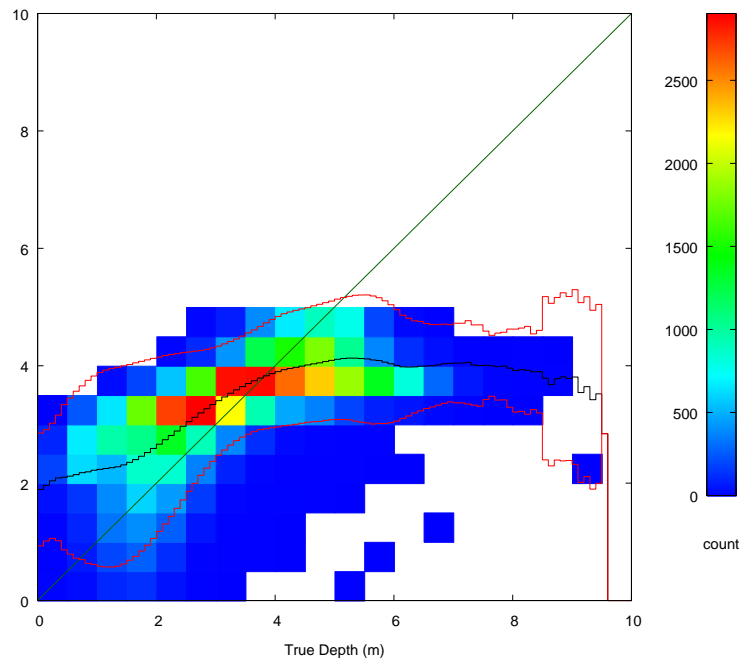


図 4.19 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2013/1/18)

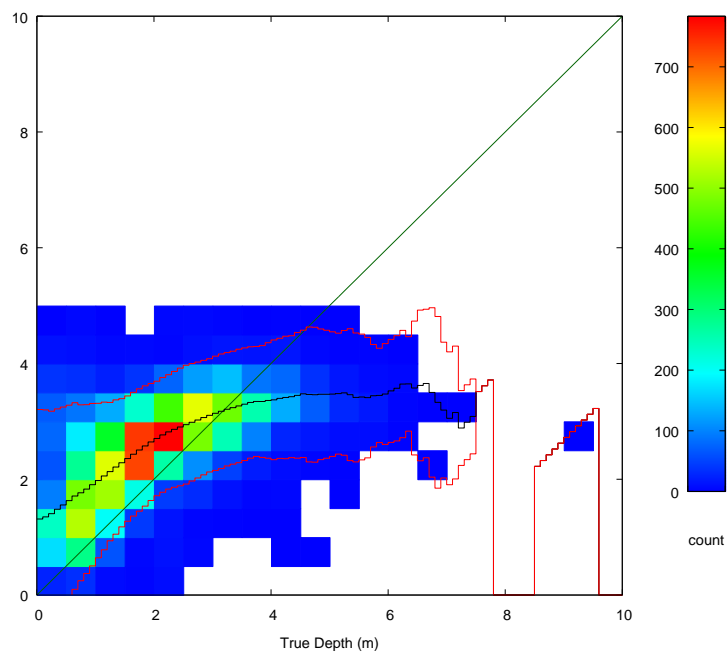


図 4.20 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2014/4/2)

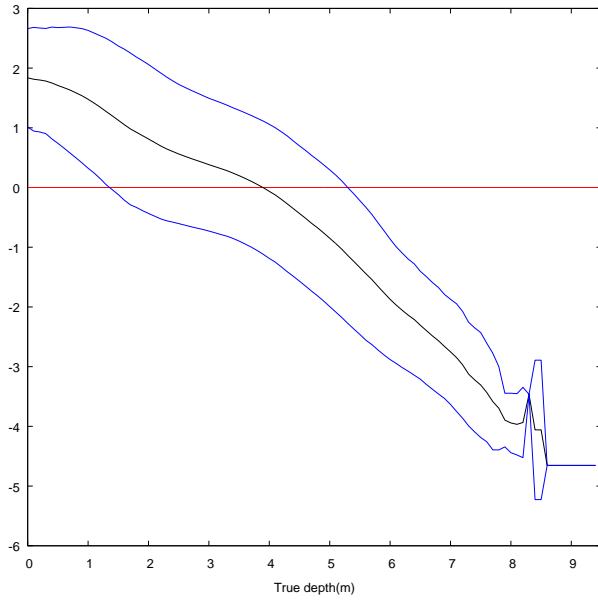


図 4.21 誤差グラフ (仙台、2012/7/19)

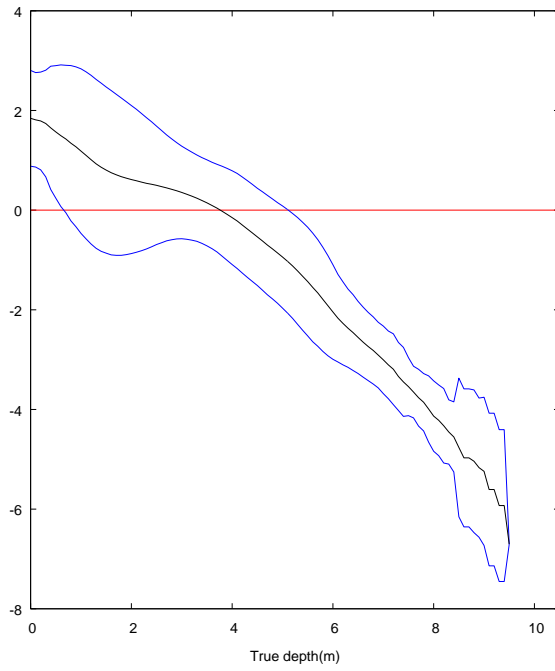


図 4.22 誤差グラフ (仙台、2013/1/18)

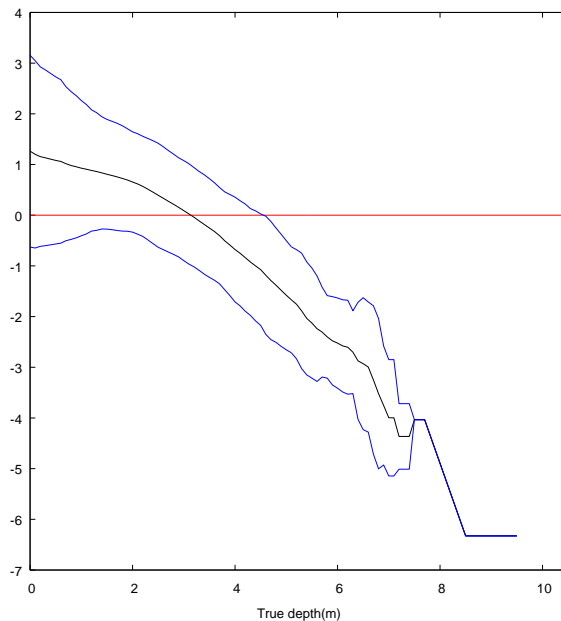


図 4.23 誤差グラフ (仙台、2014/4/2)

4.2 シミュレーション調査

衛星画像から水深情報を取得する解析手法が適用できる、水深および透明度の範囲について、実際の衛星画像の解析およびシミュレーションにより調査した。

4.2.1 シミュレータ概要

解析精度の検証は、実際のデータを用いて行うことが望ましいが、検証したい内容によっては、必要なデータを用意することが必ずしも容易ではない。例えば、同じ海域で透明度の違いが解析に与える影響を検証したい場合、透明度のみが異なり、他の条件が同じ環境下で撮影された衛星画像データが必要となるが、そのようなデータを得ることはほとんど不可能である。

衛星で観測されるデータは、放射伝達モデルでモデル化できるが、このモデルを用いれば、任意の環境パラメータを与えることで、衛星センサが計測する放射輝度を算出できる。このようなシミュレーションで作成された衛星画像をここではシミュレーション画像と呼ぶが、シミュレーション画像を解析すれば、モデルが正しいという前提で、理論上の水深推定精度について検討することができる。

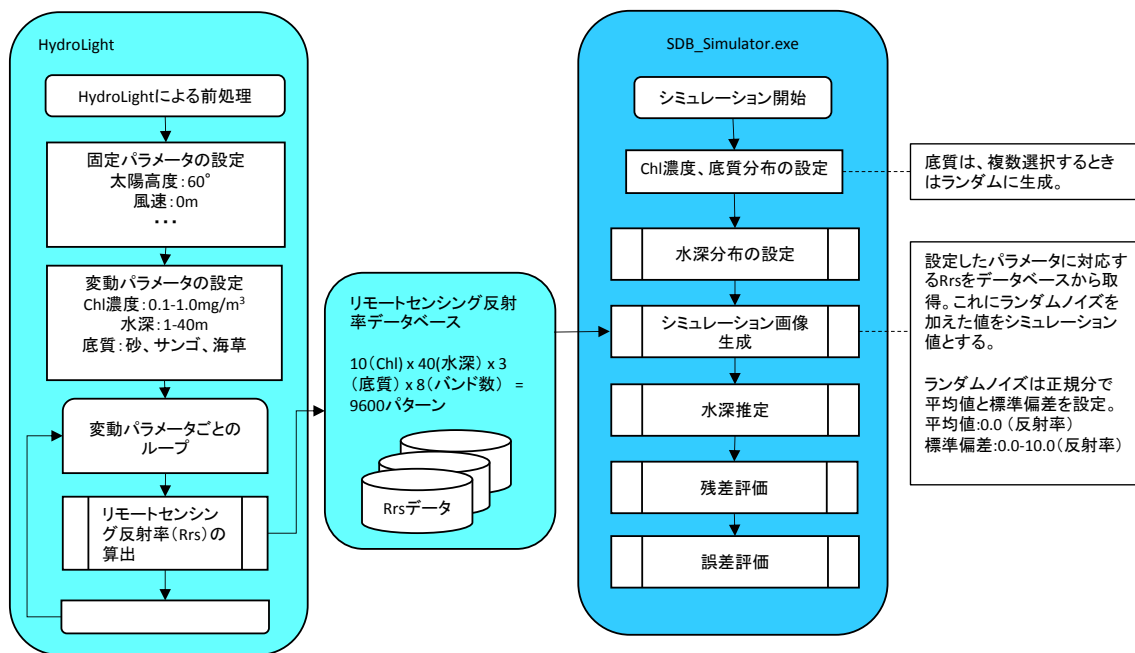


図 4.24 シミュレーションフロー

4.2.2 HydroLight

HydroLight は水域の放射伝達に関する数値モデルで、多様な環境条件における放射量の計算ができる。ここでは、変動パラメータとして、クロロフィル濃度、水深、底質を変化させて海面直上におけるリモートセンシング反射率 R_{rs} を算出した。リモートセンシング反射率は海面直上における海水射出放射輝度 L_w と太陽光の下向き放射照度 E_d の比 L_w/E_d である。この R_{rs} は衛星画像の大気補正処理後の値に相当すると考えることができる。ここでは、クロロフィル濃度を $0.1-1.0\text{mg}/\text{m}^3$ の間で 0.1 刻みに 10 通り、水深を $1-40\text{m}$ の間で 40 通り、底質を 3 通り（砂、サンゴ、海草）、光の波長を衛星センサのバンドに合わせて 8 通りの計 9600 ($10 \times 40 \times 3 \times 8$) 通りの R_{rs} を発生させリモートセンシング反射率データベースを作成した。シミュレーションではこのデータベースを用いてシミュレーション画像を作成する（図 4.24）。

クロロフィル濃度を考えるに当たっては、透明度（消散係数）との関係を考える必要がある。Jerlov(1976)は消散係数により海域のタイプ(JWT: Jerlov Water Types)を I ~ IIIに分けており、数字が小さいほど透明度が高い。JWT I は透明度の高いほうからさらに JWT I、JWT I A、JWT I B と分けられるが Simonot and Le Truet (1986)によると日本近海は JWT I B ~ JWT IIIに相当する。Morel(1988)はクロロフィル濃度と消散係数の関係をモデル化しており、これによると JWT I B ~ JWT IIIのクロロフィル濃度は $0.1 \sim 1.0 \text{mg}/\text{m}^3$ に相当する。よって、ここではクロロフィル濃度を $0.1-1.0\text{mg}/\text{m}^3$ の間で設定した。

水深については、これまで SDB で最大 30m 程度まで解析できていることが SHOM（フランス海軍水路部）の実績から分かっているため、 $1-40\text{m}$ の範囲で十分と考えた。底質については、 3 種類以上のパターンを試すこともできるが、反射率の大きく異なる砂、サンゴ、海

草で検証することで大きな傾向は把握できると考えた。

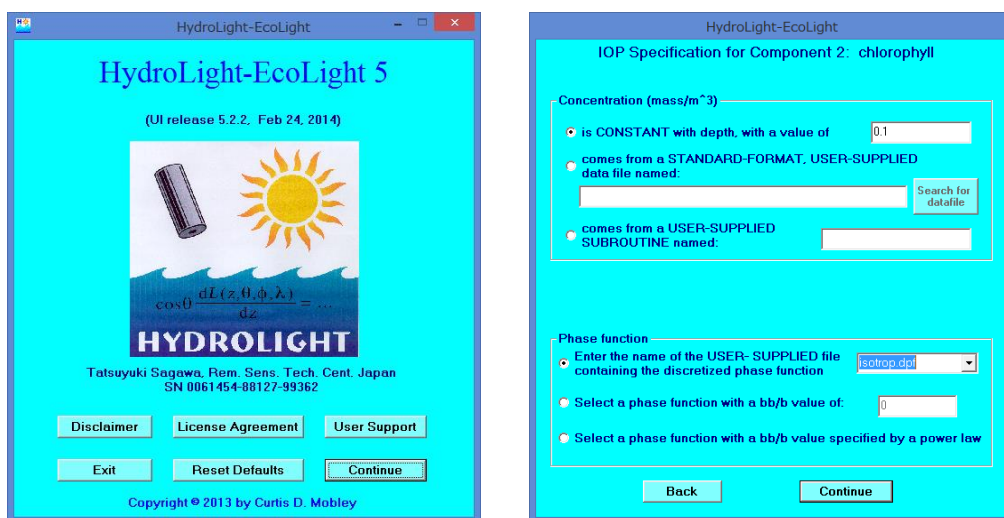


図 4.25 HydroLight のイメージ

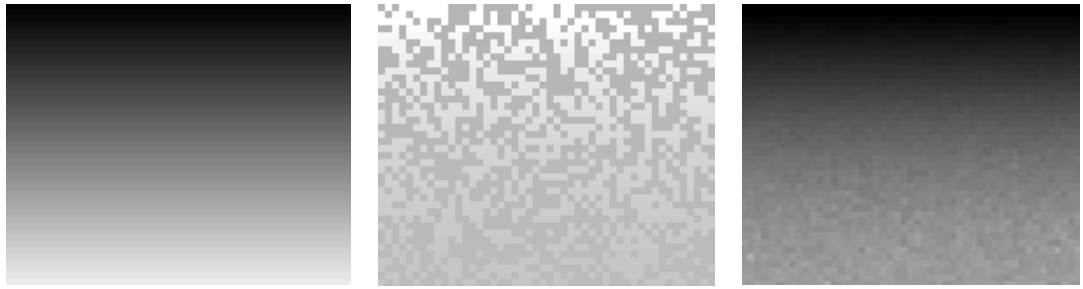
4.2.3 SDB シミュレーション

SDB シミュレーションは、図 4.24 のフローに示した通り、HydroLight を使用して作成したリモートセンシング反射率のデータベースを利用してシミュレーション画像を作成し、解析を行う。

まず変動パラメータとして、クロロフィル濃度、底質を設定する。次に水深画像を作成する。ここでは 1-40m 水深の値を持った画像を作成するが、学習データには水深 0-15m のデータを用いるように設定した。

シミュレーション画像は水深画像の水深とその他の設定した変動パラメータに対応する R_{rs} の値をリモートセンシング反射率データベースから取得する。この値に、ランダムノイズを発生させ、シミュレーション値とする。ランダムノイズは正規分布に従うようにし、その標準偏差を設定する。変動パラメータのうち、底質を複数選択する場合は、ランダムにいずれかの底質を選ぶ。

シミュレーション画像について、水深推定を行い、SDB を作成する。水深画像、シミュレーション画像、シミュレーション SDB の例を図 4.26 に示す。この SDB と水深画像を比較することで、精度検証を行う。出力として、学習用水深データと SDB の関係を理解するために、学習用水深とシミュレーション SDB の散布図を作成した。また、水深と誤差の関係を示すために、評価用水深データと SDB を比較し、水深と誤差の関係を示す誤差グラフを作成した。散布図と誤差グラフの例をそれぞれ図 4.27、4.28 に示す。



水深画像の例

シミュレーション画像の例

シミュレーション SDB の例

図 4.26 シミュレーション画像の例

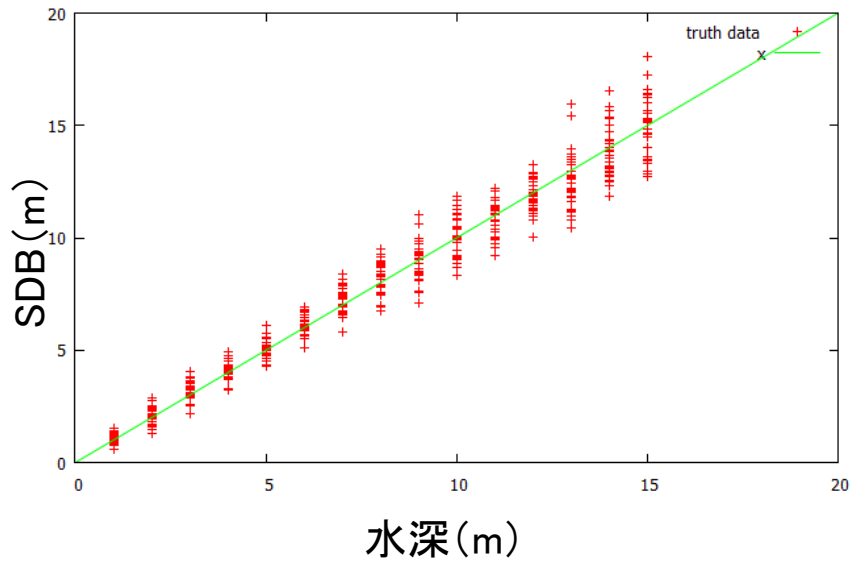


図 4.27 学習用水深とシミュレーション SDB の散布図の例

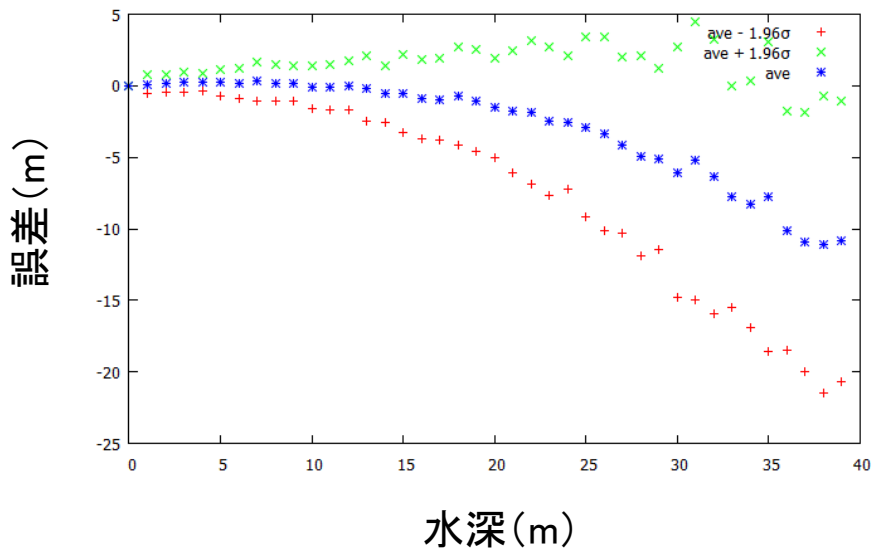


図 4.28 シミュレーション SDB の誤差グラフの例

4.2.4 シミュレーション結果

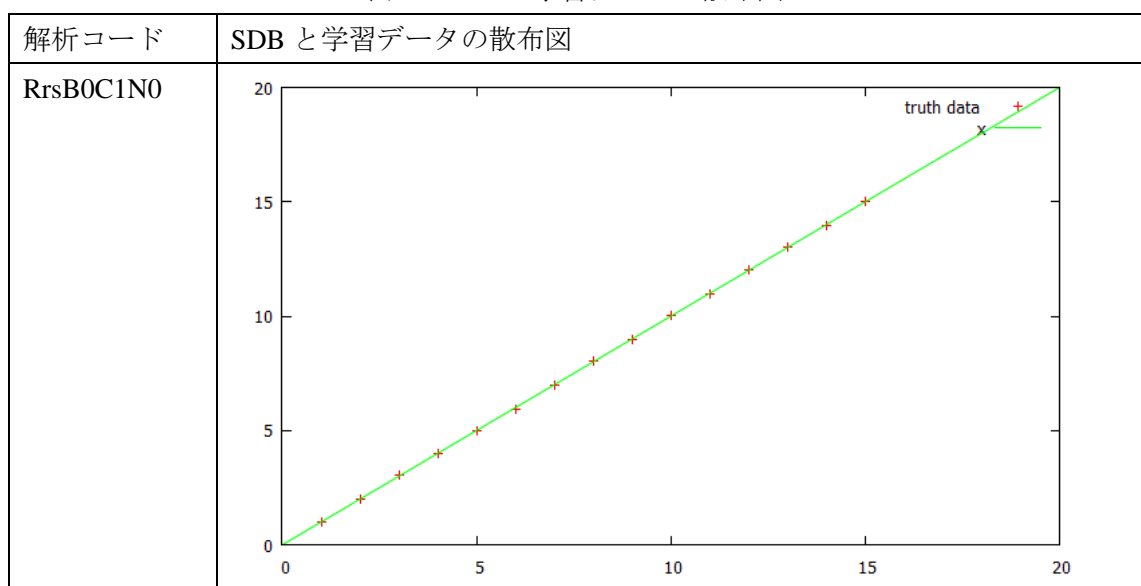
シミュレーションの結果を整理するため、各解析結果にコード名をつけた。解析コード名は「RrsB +底質のコード+C+クロロフィル濃度のコード+N+ノイズのコード」となっている。ここで、各コードの表す意味を表 4.1 に整理した。なお、底質については、砂とサンゴのように複数の場合、シミュレーションごとにランダムに発生させているため、データ数としてはほぼ同じ数だけ発生する。結果が多いため、ここでは代表的な結果について SDB と学習データの散布図を表 4.2 に、誤差グラフを表 4.3 にまとめた。すべての結果については付録 C にまとめた。

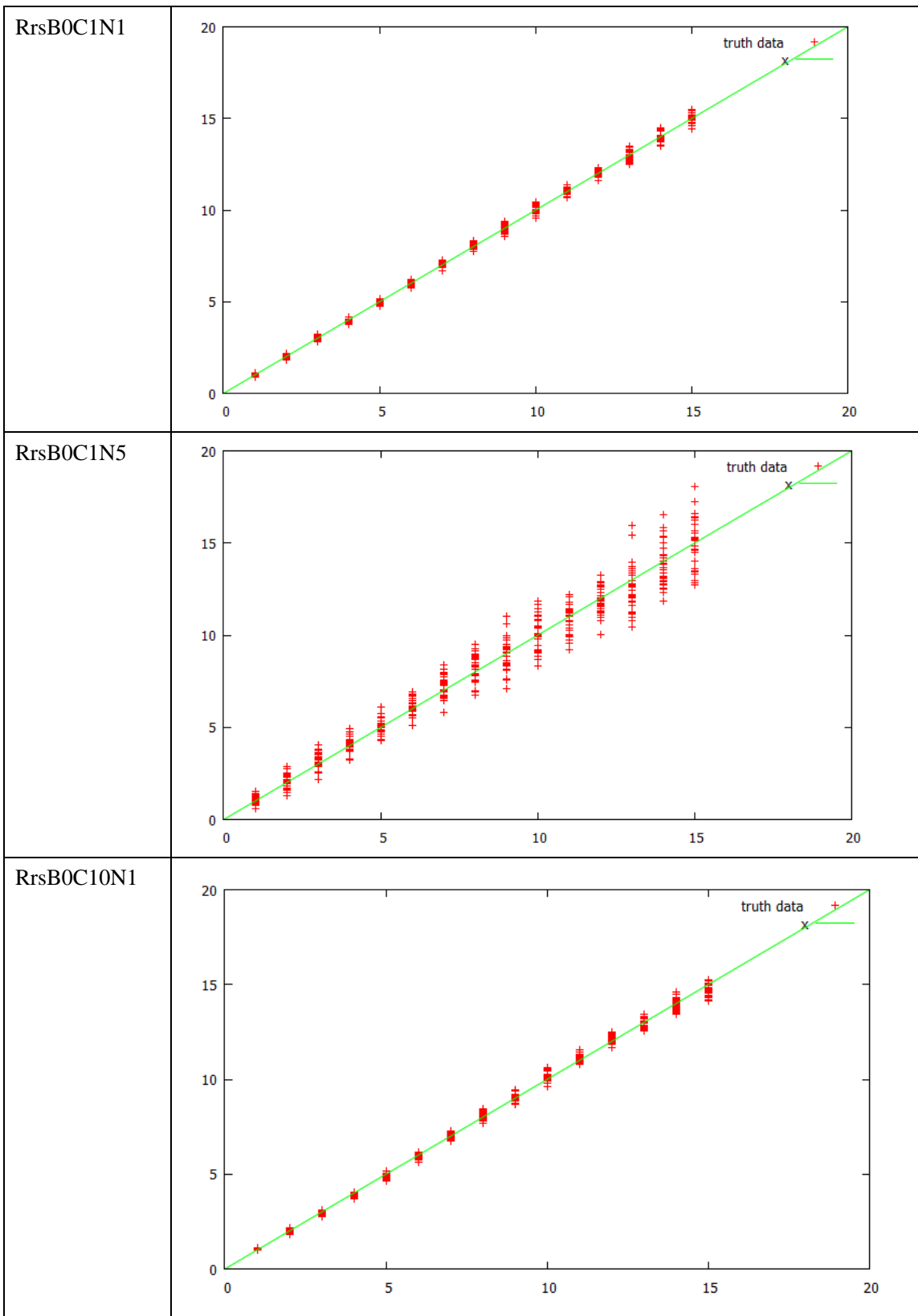
シミュレーションではクロロフィル量が $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ で底質が砂である条件の良い場合においても水深 20m を超えるあたりから誤差平均が負の値に大きくなる傾向にあった。誤差の 95%信頼区間の幅はセンサノイズの増大とともに水深に比例して大きくなった。底質の種類を増やした場合は誤差を増大させるが、その影響は複雑であり、誤差の大きさは必ずしも水深に比例しなかった。

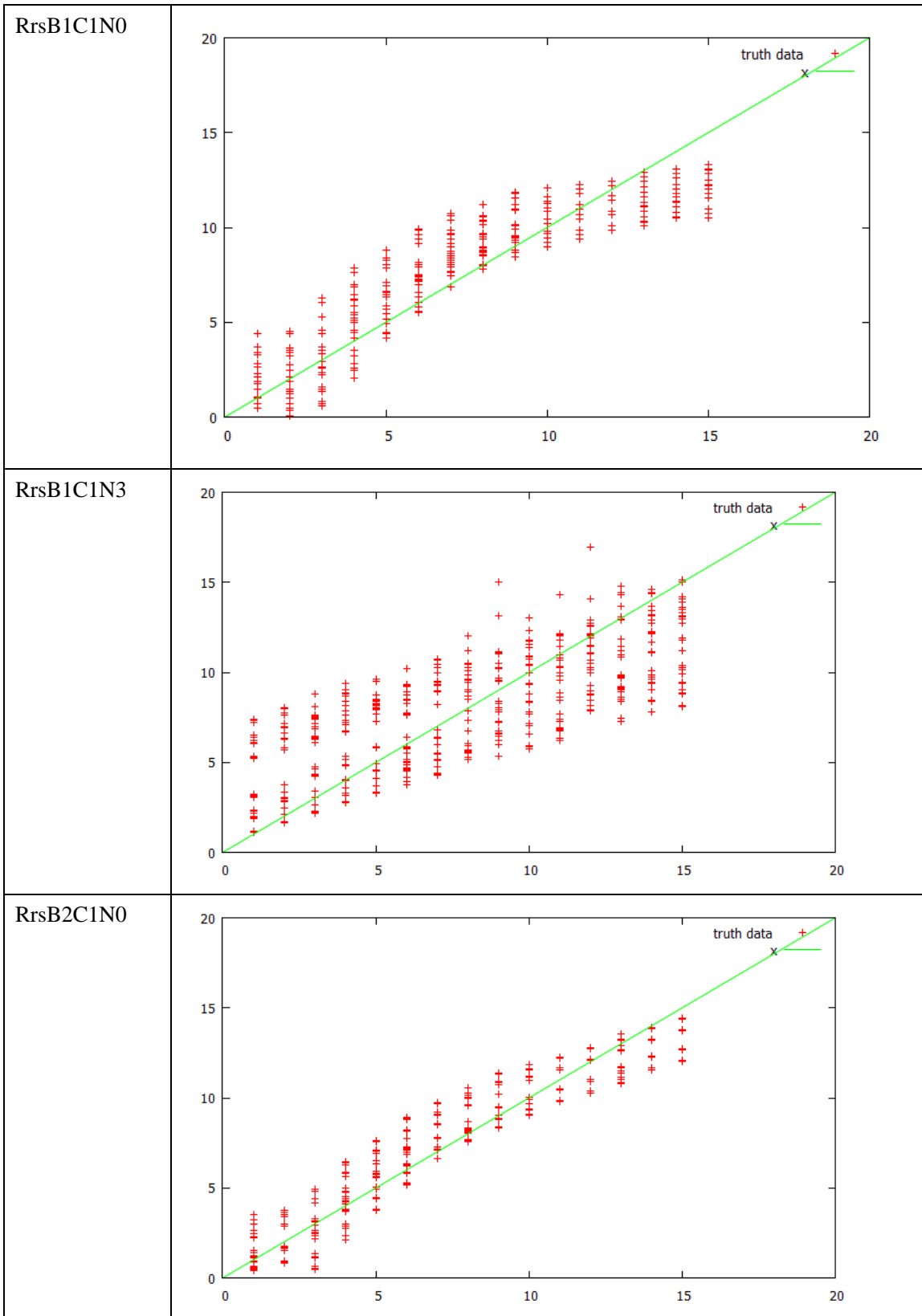
表 4.1 解析コードの説明

コードの種類	説明
底質のコード	0: 砂地、1: 砂とサンゴ、2:砂と海草
クロロフィル濃度のコード	クロロフィル濃度 = コード $\times 0.1$ (mg/m^3)
ノイズのコード	ノイズの標準偏差 = コード $\times 0.0001$ (反射率)

表 4.2 SDB と学習データの散布図







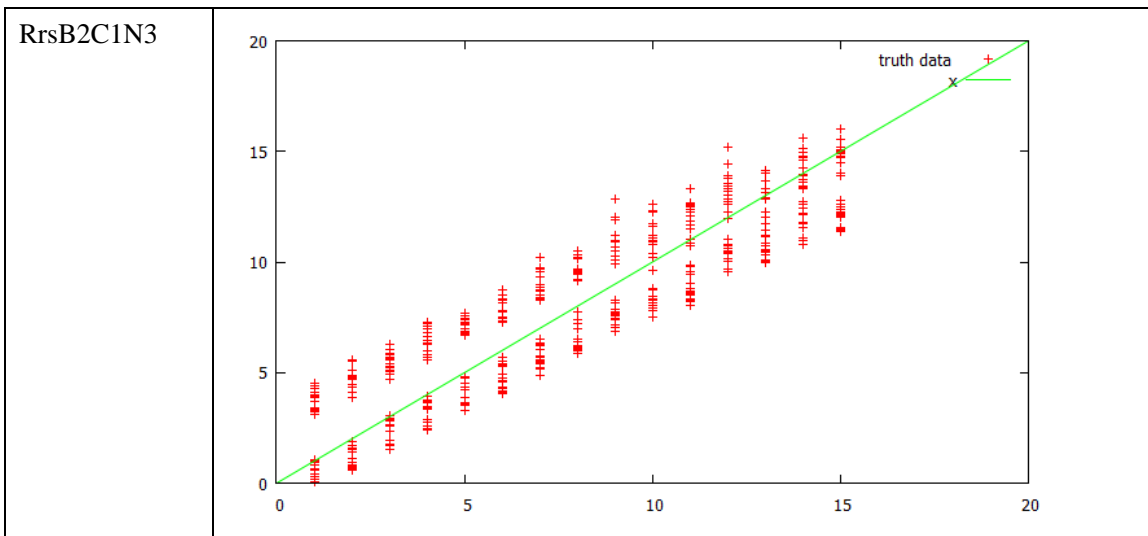
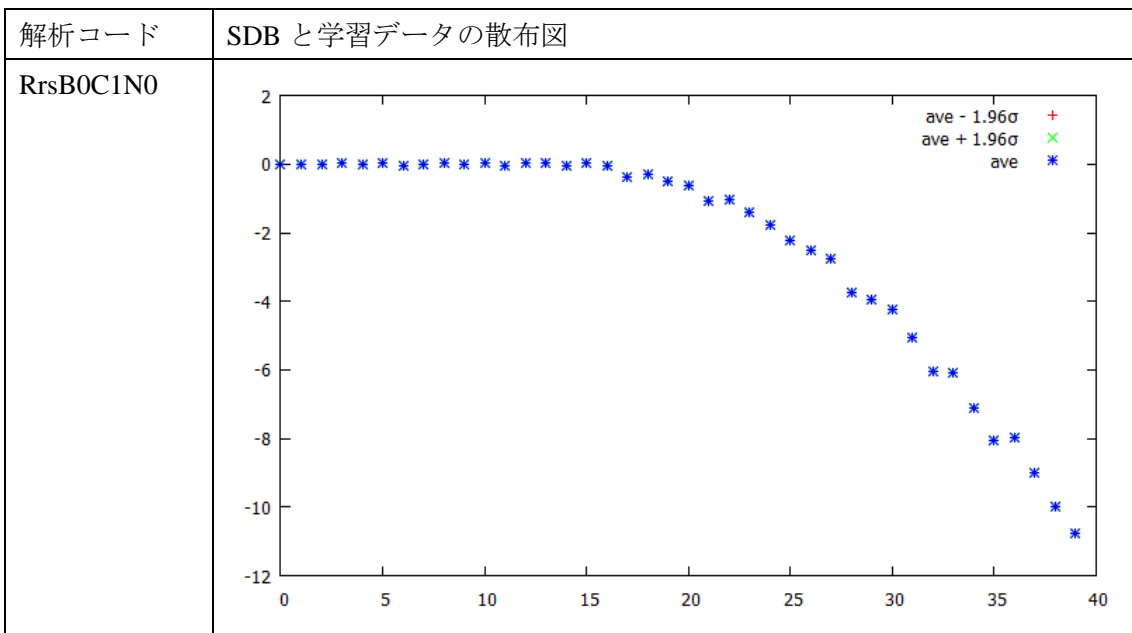
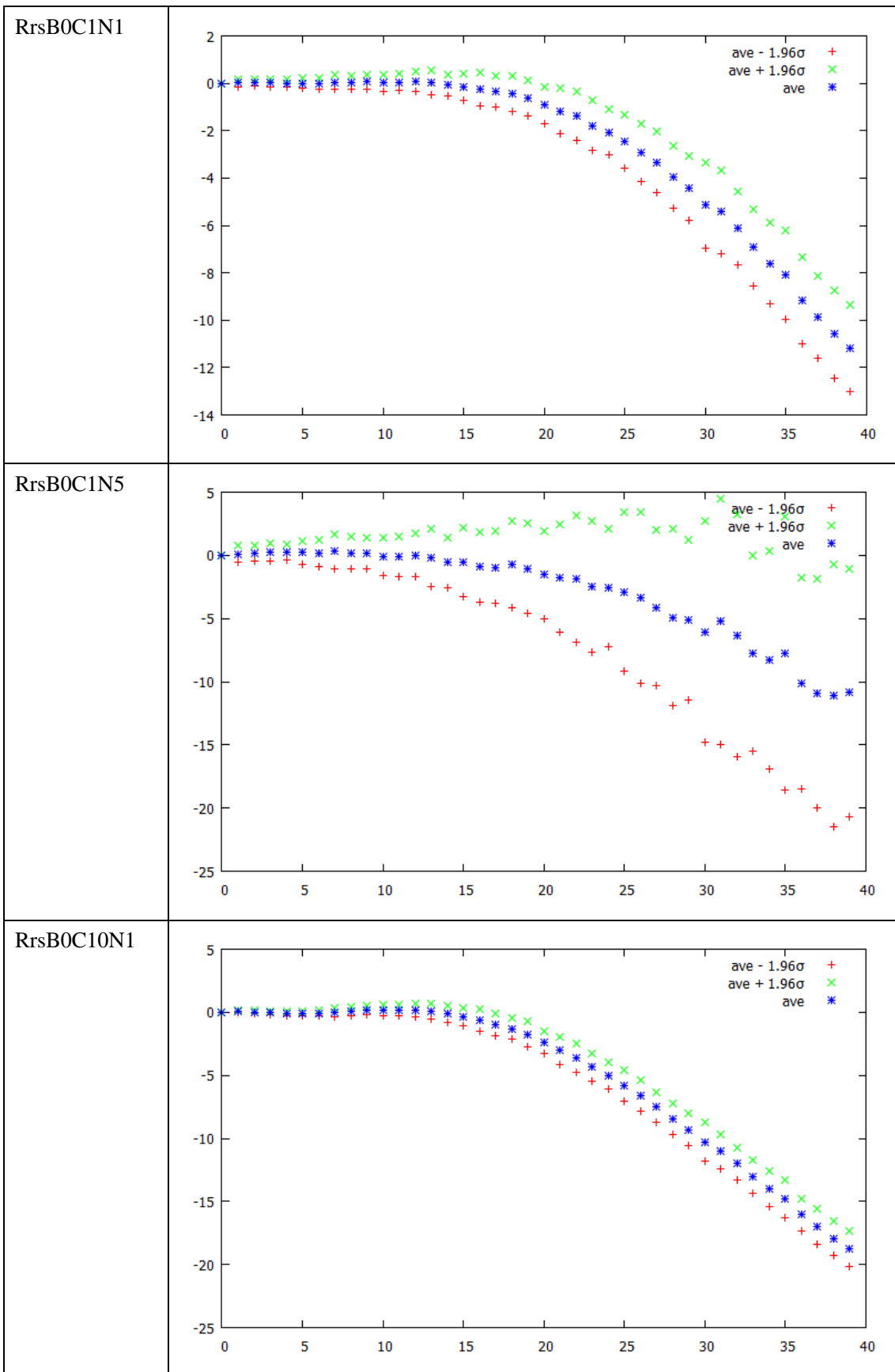
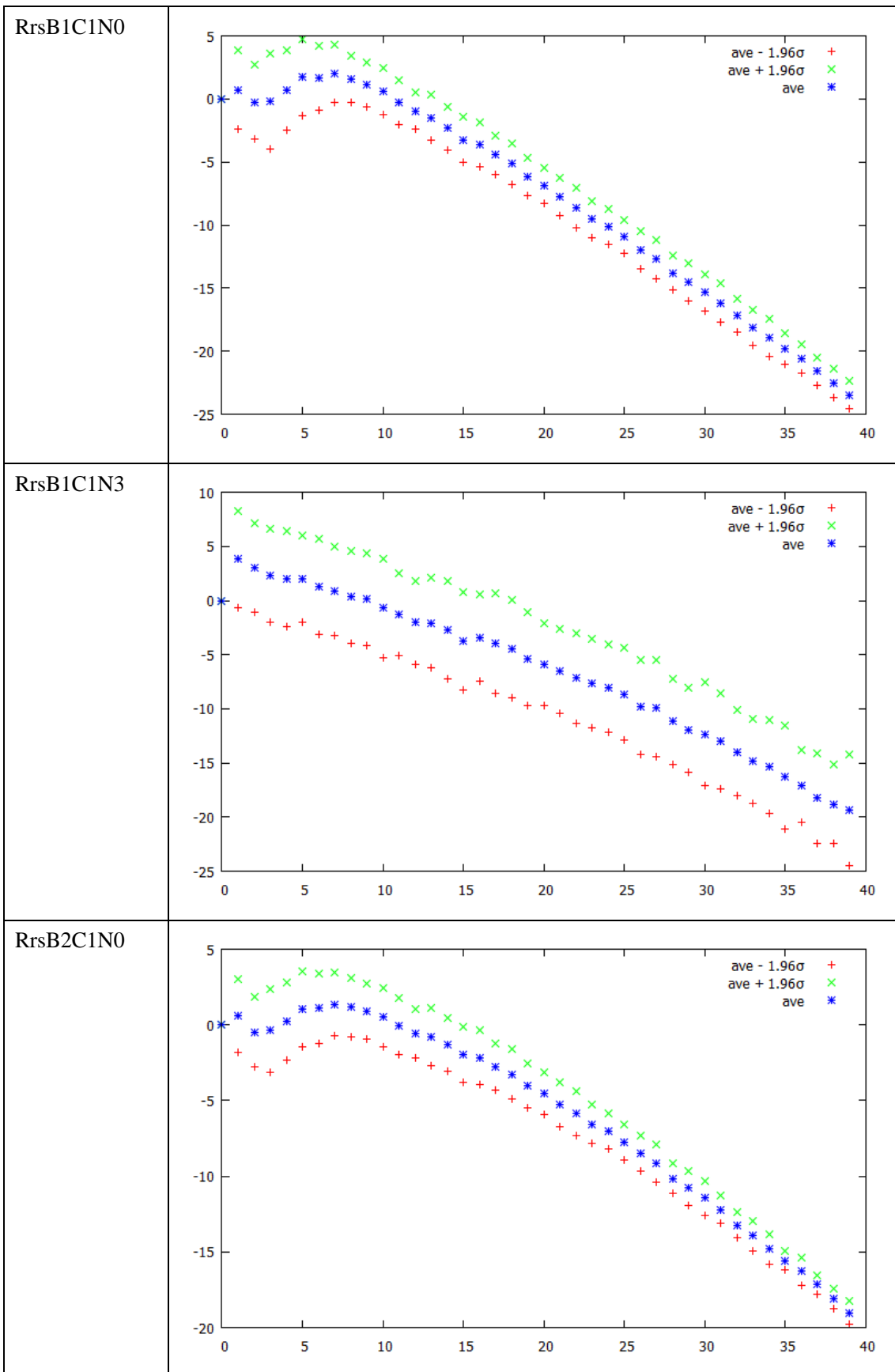
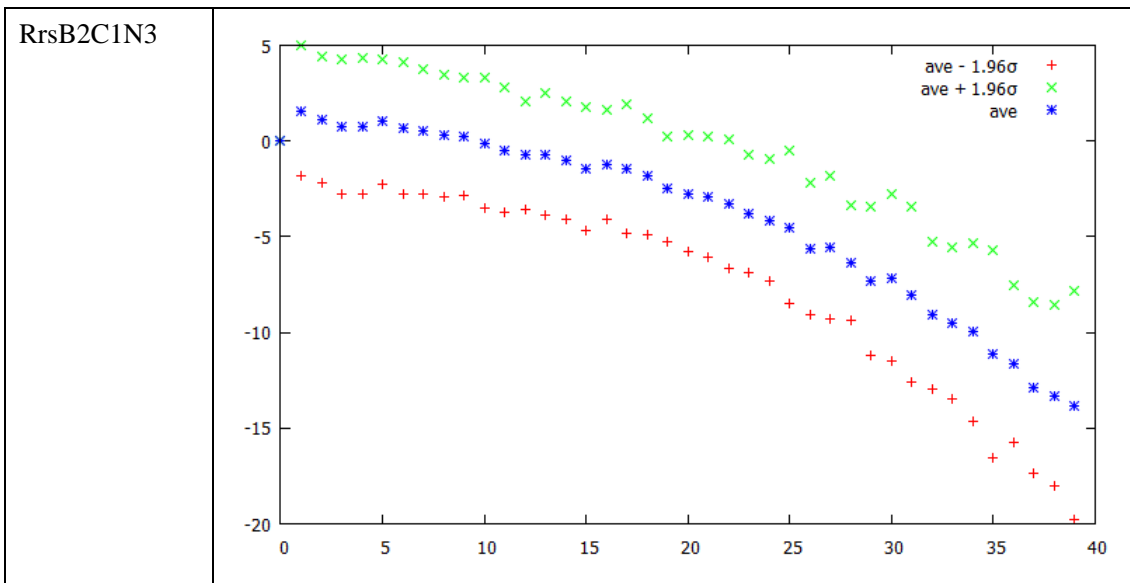


表 4.3 誤差グラフ









4.3 まとめ

実データを用いた調査において、透明度が高い波照間では、水深約 24m まで解析できた（水深ごとの残差平均と全水深の残差の標準偏差との比較において）。誤差の 95%信頼区間は水深 10m 未満では平均誤差±4m であるが、水深 20m 付近では平均誤差±6m であり、水深に対する誤差の割合は 30%～40%となった。水深の増大とともに SDB の水深は実際より小さくなり、誤差が大きくなっている。

尾鷲では、波や濁りの影響が強いためか、SDB と水路測量データの一致が見られるのは一部の沿岸に限られ、どの水深でも誤差が大きい結果となった。また、尾鷲の画像はセンサの感度ムラの影響がみられたため、このような場合は補正を検討する必要がある。

仙台において複数時期に撮影された画像で SDB を作成したが、各解析結果の誤差が大きく、比較が困難であった。

シミュレーションではクロロフィル量が $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ で底質が砂である条件の良い場合において水深 20m まで解析できることが分かった。波照間の衛星画像解析結果は水深 20m あたりから誤差平均値が負の値に大きくなっており、好条の場合のシミュレーション結果と同様の傾向がある。底質の影響は大きく、種類を増やした場合は誤差を増大させるが、その影響は複雑であり、誤差の大きさは必ずしも水深に比例しなかった。底質の影響については、第 5 章における衛星画像の解析を通して検証していきたい。

シミュレーションは、今後も新たな課題が出てきた場合に有効であり、海面の風速などの他の条件の影響調査や新しい解析手法を開発する際など様々な用途への活用も期待される。

4.4 参考文献

Jerlov, N.G., 1976, *Marine Optics*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Morel, A., 1988, *Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content* (Case

I waters). J. Res., 91, 10749-10768.

Simonot, J. and Le Truet, H., 1986, A climatological field of mean optical properties of the world ocean J. Geophys. Res. 91, 6642-6646.

第5章 様々な海域における精度検証

海底被覆物の種類や地形の複雑さ、および学習用水深データの数や分布などの条件を変えて衛星画像解析を実施し、水深推定精度を確認する。

5.1 海底面被覆物の影響調査

底質を目視判読で砂地（明るい画素）とそれ以外の藻場、岩場、サンゴ礁（暗い画素）に分類し、底質を区別しない場合と、砂地だけで解析した場合で解析結果を比較した。図 5.1 に目視判読で砂地と藻場または岩場を区別した例を示す。

調査海域として、藻場などを対象として相差漁港周辺を、サンゴ礁などを対象として波照間島周辺の海域を選んだ。それぞれ海域の輝度のコントラストを強調した画像を図 5.2、5.3 に示す。

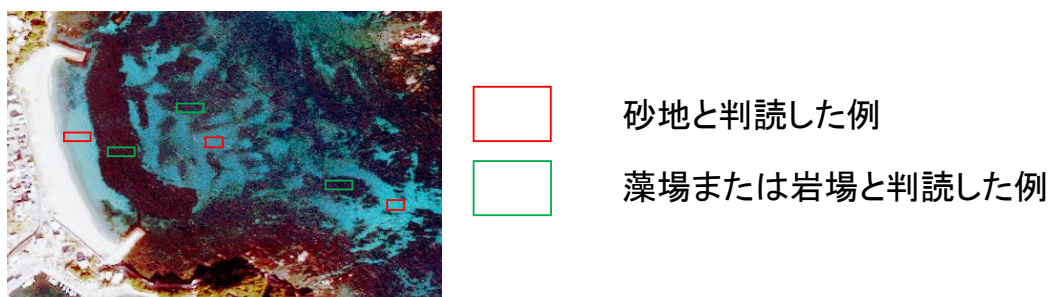


図 5.1 底質の目視判読の例

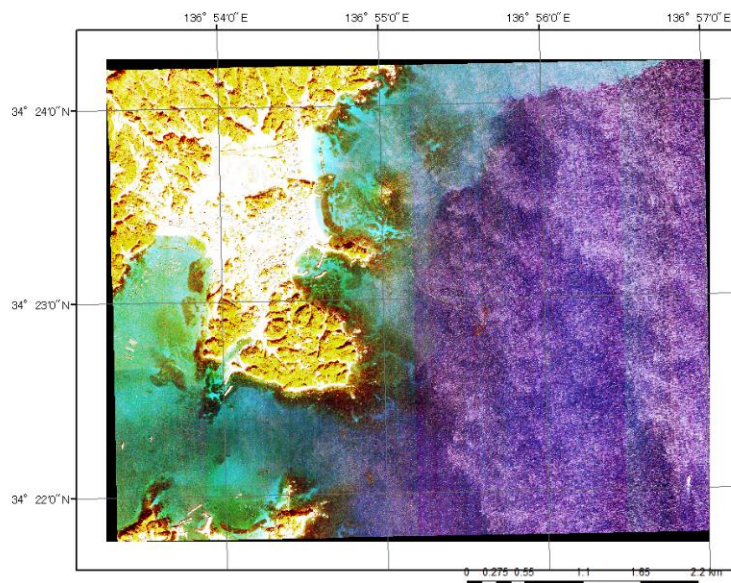


図 5.2 相差漁港周辺の衛星画像（コントラストを強調）

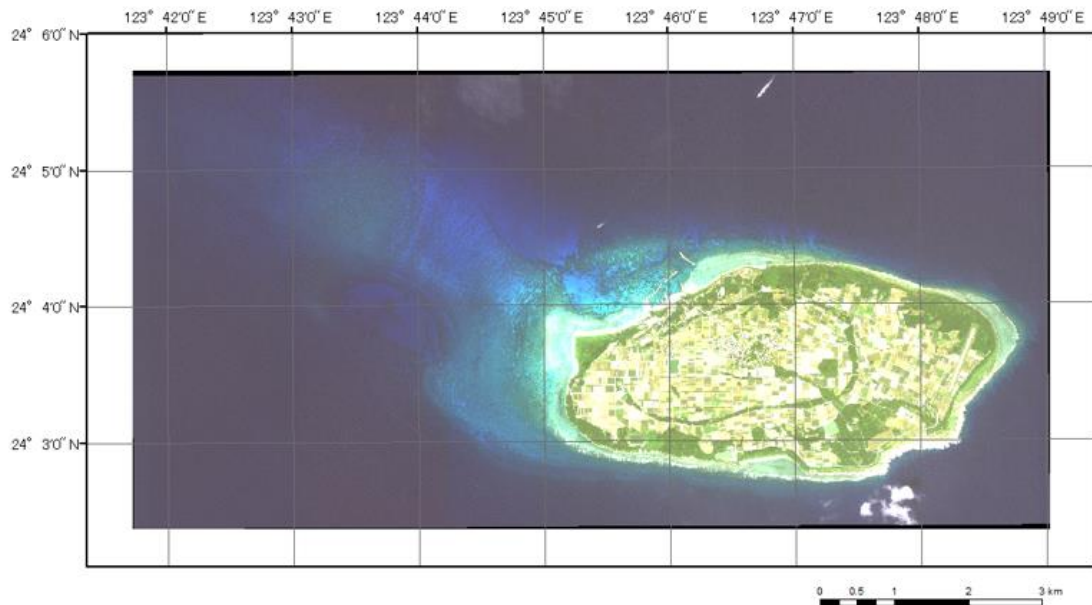


図 5.3 波照間の画像（コントラストを強調）

5.1.1 相差漁港周辺の解析結果

相差漁港周辺において、底質を区別しないで水深学習用データを取得した場合の SDB を図 5.4 に、底質を目視判読し、砂の場所の水深学習用データのみで作成した SDB を図 5.5 に示す。水深学習用データが砂地のみの場合は、底質がランダムな場合と比較し、全体的に水深を大きく推定する傾向がある。詳しく見ると、判読では藻場や岩場のように輝度の暗い場所が大きい水深となっている。これは砂地と比較し、相対的に輝度が暗いため実際より深く推定している可能性がある。

図 5.6、5.7 はそれぞれ SDB と学習用水深データの散布図である。底質がランダムな場合の残差は 3m 前後であるが、水深 7m 付近で残差が正であり、その前後の水深で負の値をとるよう傾向がある。一方、底質が砂地の場合の残差は約 1m で、水深よる偏りは小さいように見える。

図 5.8、5.9 はそれぞれ SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図である。底質がランダムな場合は、水深 10m ぐらいまでは 95%信頼区間の誤差が 4m ぐらいだが、その後は誤差が負の値に大きくなっている。一方、底質が砂地の場合は、どの水深でも誤差が大きく、水路測量データとの相関が低いように見える。これは、画像を目視判読した場合に、藻場や岩場と考えられる場所が非常に大きく、砂地で学習した水深モデルから大きく外れる画素が多かったためと考えられる。

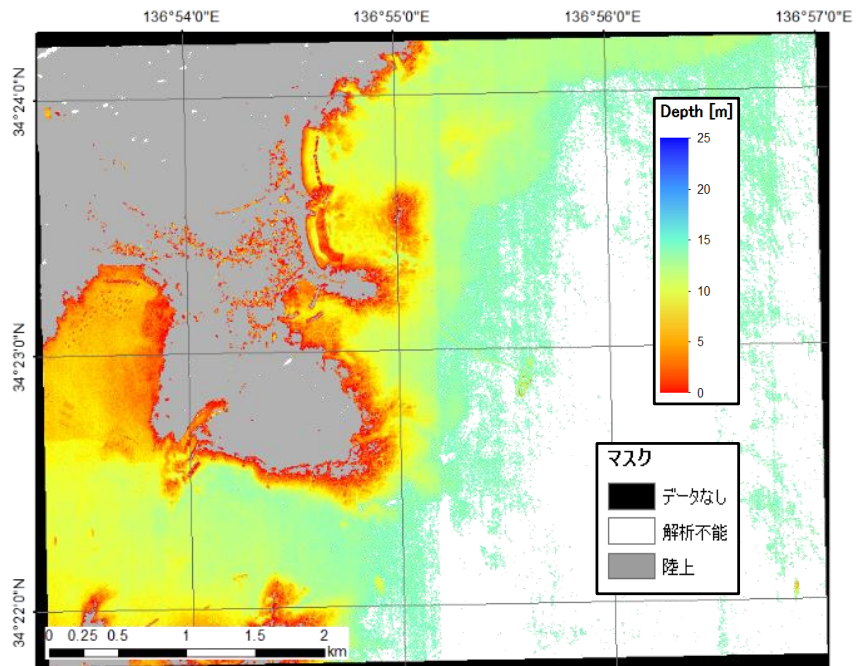


図 5.4 相差漁港周辺の SDB (学習データの底質がランダム)

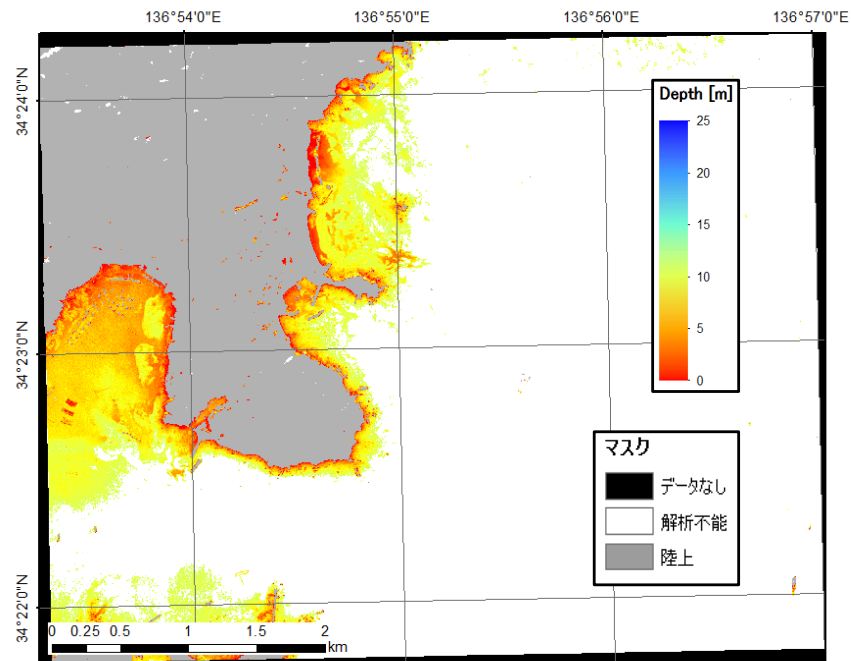


図 5.5 相差漁港周辺の SDB (学習データの底質が砂)

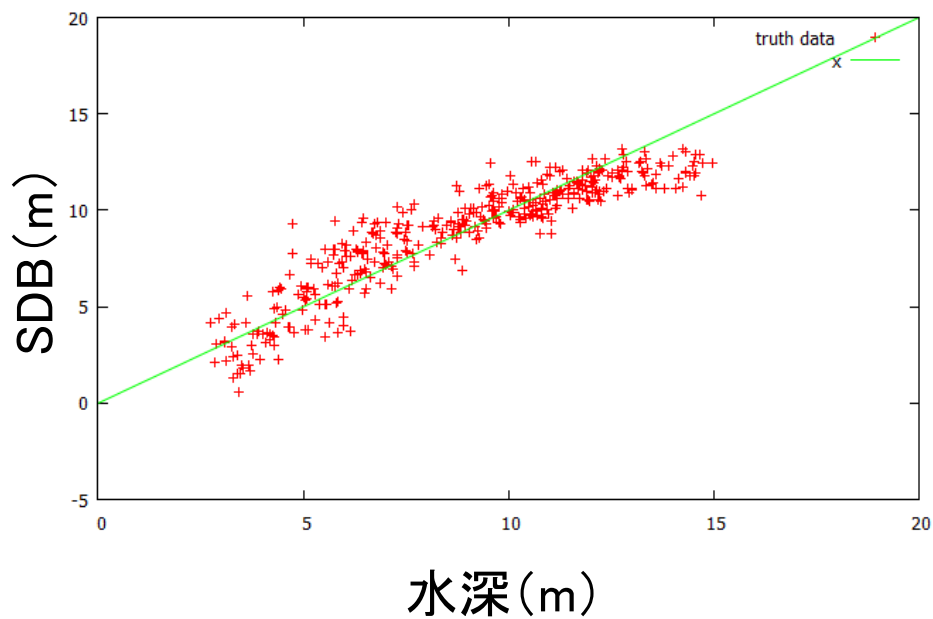


図 5.6 相差漁港周辺の SDB と学習用水深データの散布図 (学習データの底質がランダム)

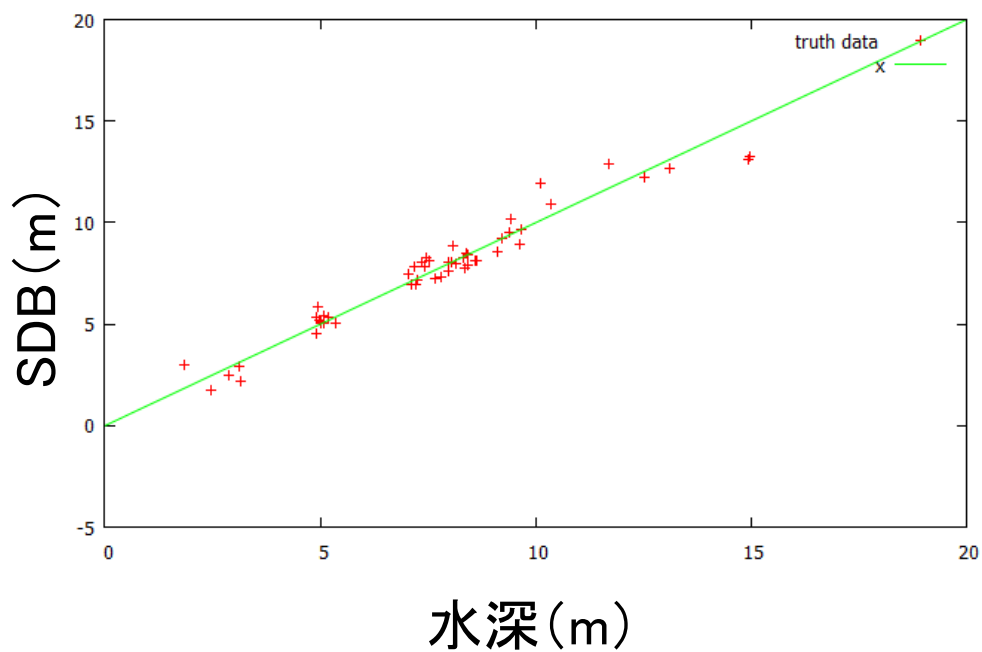


図 5.7 相差漁港周辺の SDB と学習用水深データの散布図 (学習データの底質が砂)

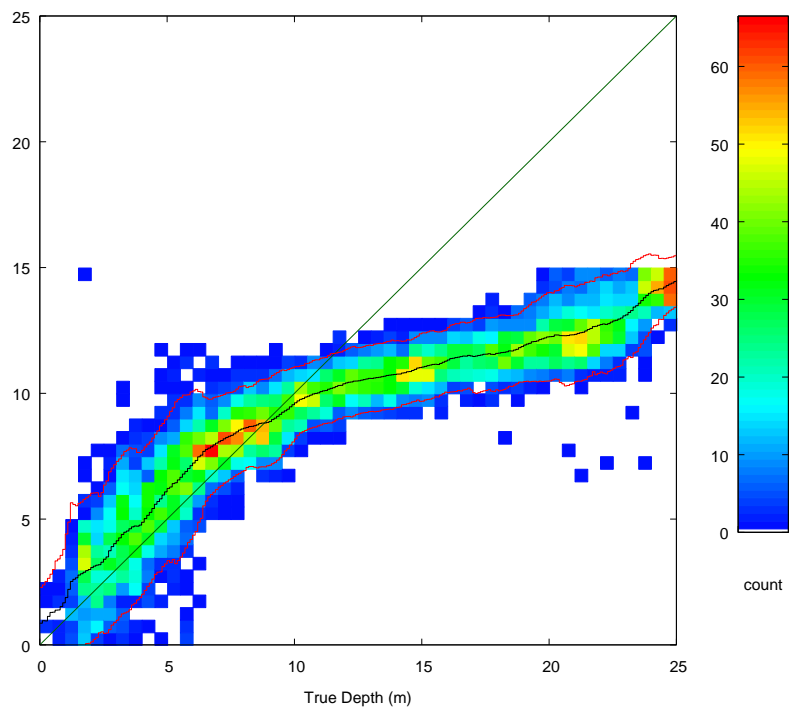


図 5.8 相差漁港周辺の SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図
(学習データの底質がランダム)

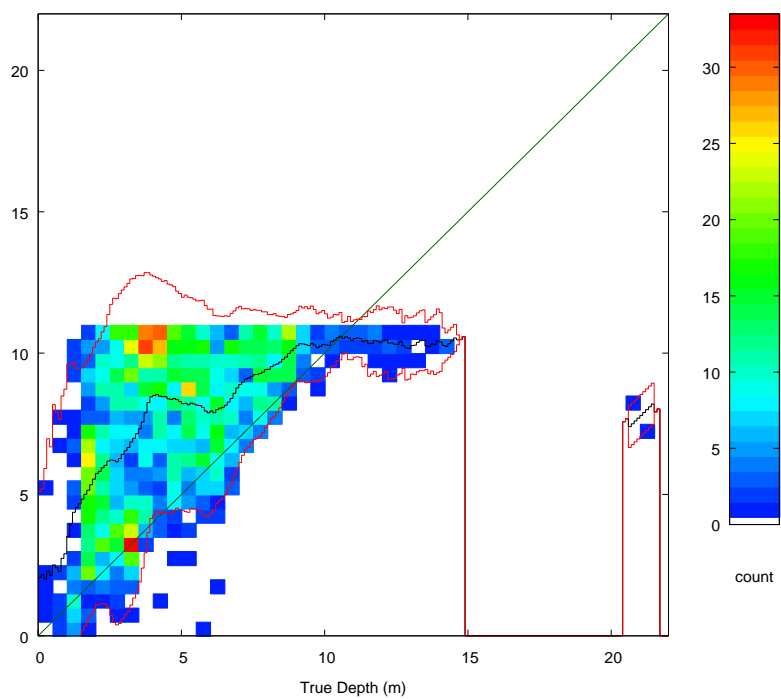


図 5.9 相差漁港周辺の SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図
(学習データの底質が砂)

5.1.2 波照間の解析結果

波照間において、底質を区別しないで水深学習用データを取得した場合の SDB を図 5.10 に、底質を目視判読し、砂地の場所の水深学習用データのみで作成した SDB を図 5.11 に示す。水深学習用データが砂地のみの場合は、底質がランダムな場合と比較し、全体的に水深を大きく推定しており、水深 5m 前後で推定された地形は場所により大きく異なる。

図 5.12、5.13 はそれぞれ SDB と学習用水深データのヒストグラム散布図である。底質がランダムな場合は、95%信頼区間の残差は水深 20m までは 3m 前後である。一方、底質が砂地の場合は、95%信頼区間の残差は水深 20m までは約 1m である。

図 5.14、5.15 はそれぞれ SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図である。底質がランダムな場合は、学習用水深データと比較したヒストグラム散布図と類似の傾向にあるが、水深が大きくなるにつれ誤差が大きくなる。水深が 15m を超えたあたりから誤差平均が負の値に大きくなっているが、これは、解析の過程において、SDB で推定できる限界水深が 24m 付近と自動的に算出され、それより深い水深をマスクエリアとして除外しているために大きく間違える誤差が減少し、結果として誤差の平均値が負の値に大きくなっているとも考えられる。

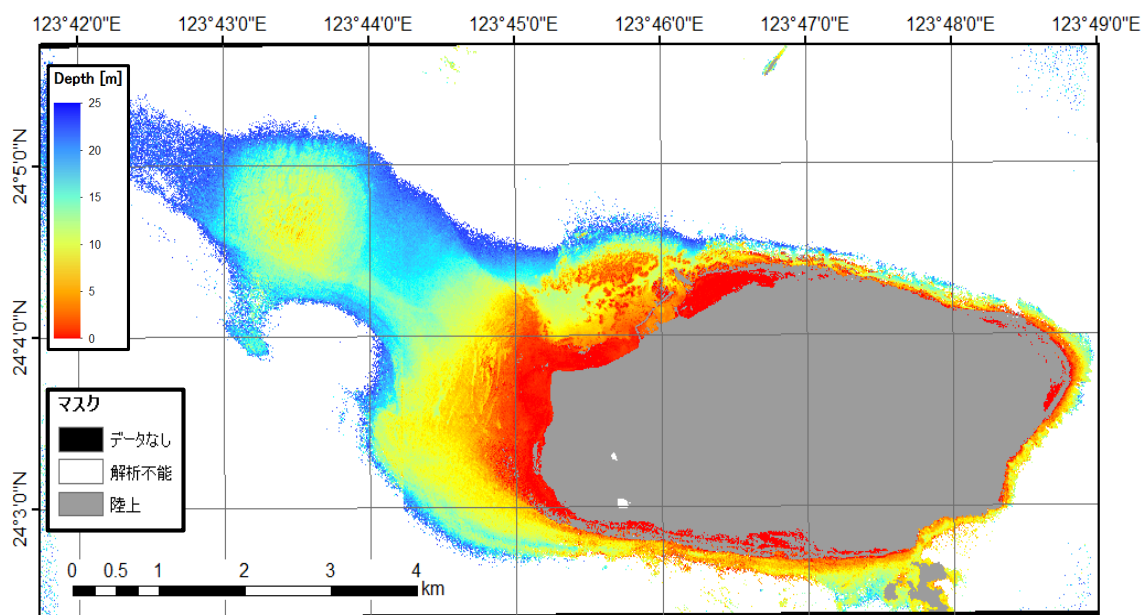


図 5.10 波照間の SDB (学習データの底質がランダム)

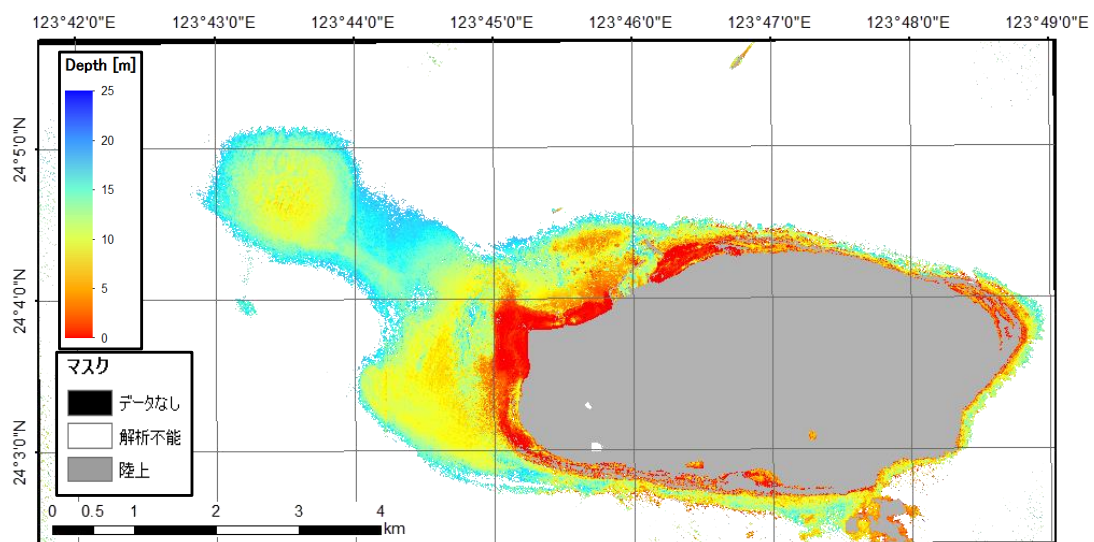


図 5.11 波照間の SDB (学習データの底質が砂)

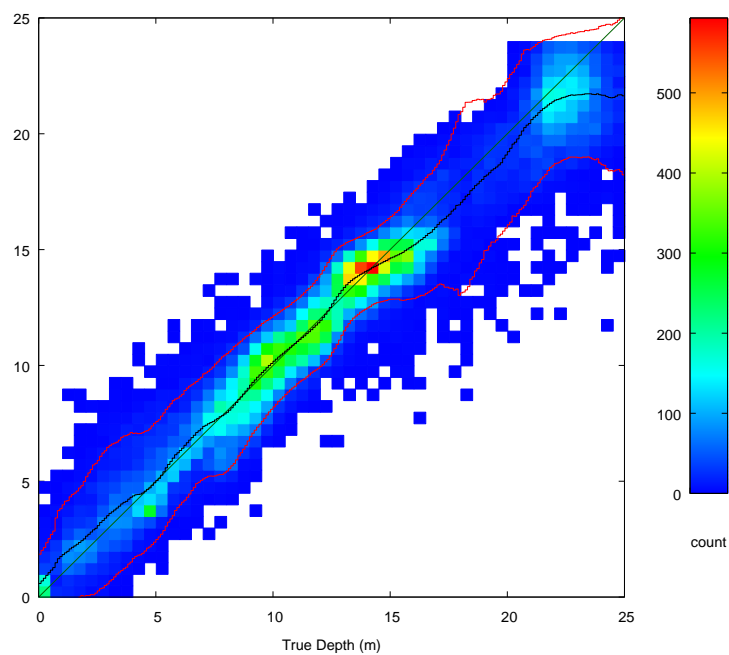


図 5.12 SDB と学習用水深データのヒストグラム散布図 (学習データの底質がランダム)

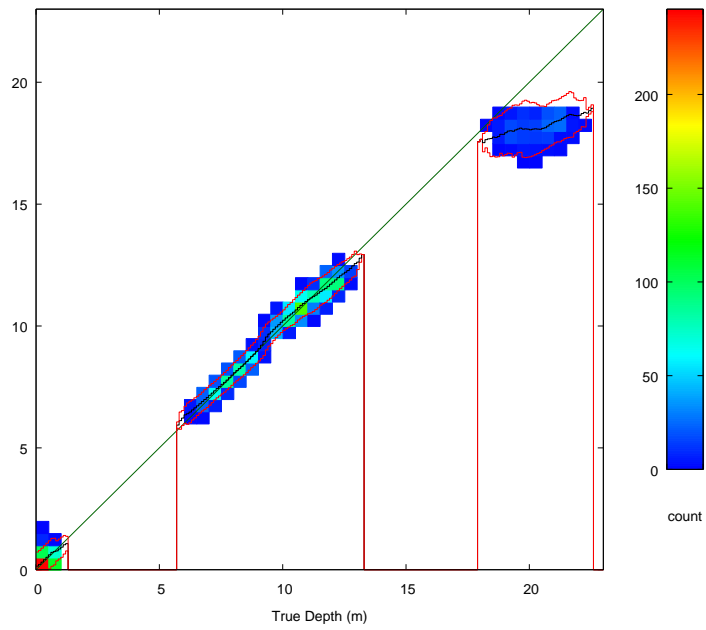


図 5.13 SDB と学習用水深データのヒストグラム散布図 (学習データの底質が砂)

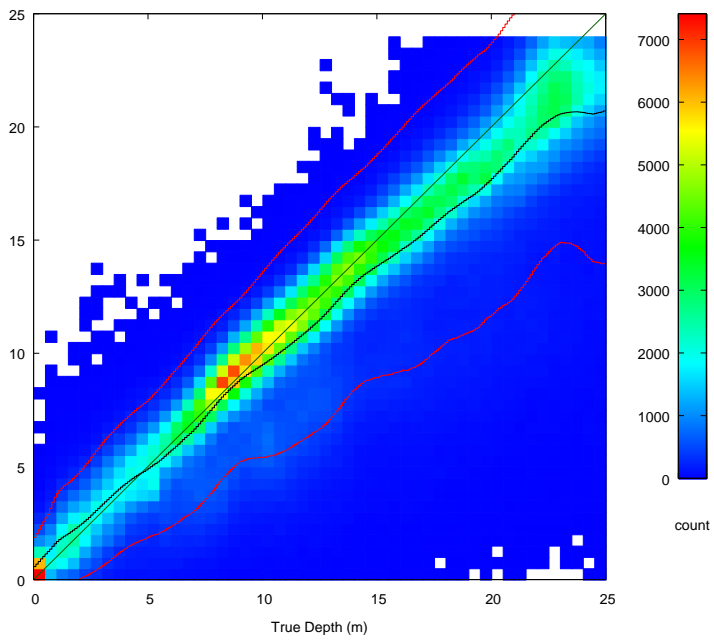


図 5.14 SDB と評価用水深データのヒストグラム図 (学習データの底質がランダム)

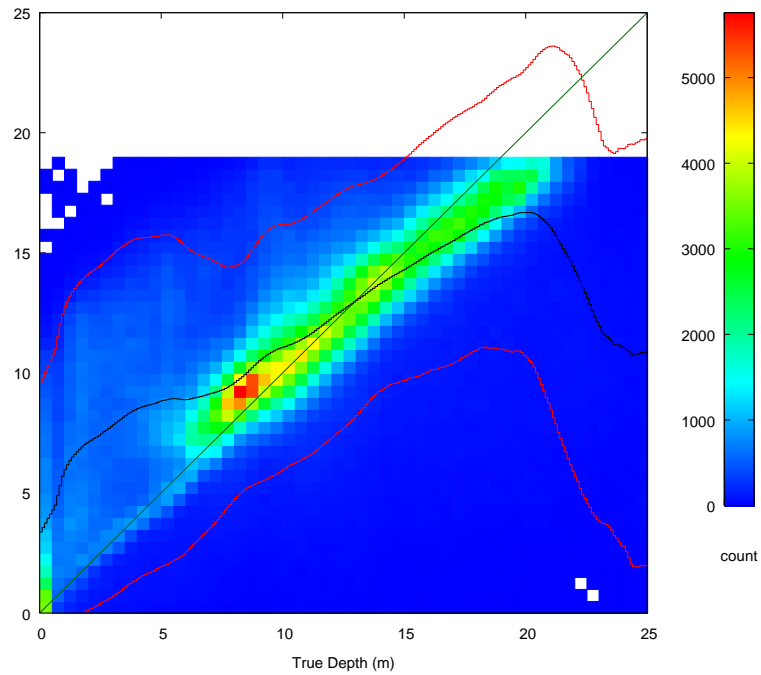


図 5.15 SDB と評価用水深データのヒストグラム図（学習データの底質が砂）

5.2 透明度の影響調査

図 5.16 の銚子沖の衛星画像のように、画像によっては透明度の高い海域と低い海域が混在している場合がある。このような場合に、学習用水深データを取得する際の透明度の影響を考慮するため、(ア) 透明度の低いエリアのデータのみ使用した場合、(イ) 透明度の高いエリアのデータのみ使用した場合、(ウ) 透明度の低いエリアも高いエリアも両方含む場合、の3通りの学習用水深データを作成し、それぞれについて SDB を作成した。

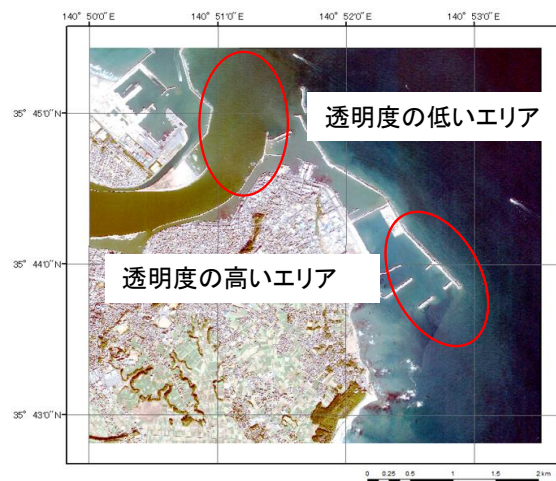


図 5.16 銚子沖の衛星画像

図に (ア) ~ (ウ) のケースに対応する SDB をそれぞれ示す。解析できた最大水深はそれぞれ、10 m、14 m、6 m となり、解析範囲もそれぞれ異なっている。水深 6m ぐらいまで見ると、どの結果も推定した海底地形は類似しているが、①のケースでは、やや水深を深めに推定している。

(ア) ~ (ウ) の SDB について、学習データと比較した場合の SDB と水路測量データの散布図を図に、評価データと比較した場合の SDB と水路測量データの散布図を図にそれぞれ示す。

水深 6m 以下の誤差に着目した場合、(ア) と (ウ) で似たようなデータ分布をしており、(イ) の結果より若干平均誤差が小さいが、これは透明度が低いエリアが河口付近に限定され、全体としては透明度の高い海域を多く含むためと考えられる。

現状のシステムで解析する場合には、学習用水深データは透明度のついてもなるべくランダムに取ることが望ましいと考えられる。一方で、精度を向上させるためには、解析エリアをあらかじめ目視判読で分けて実施する方法も考えられる。

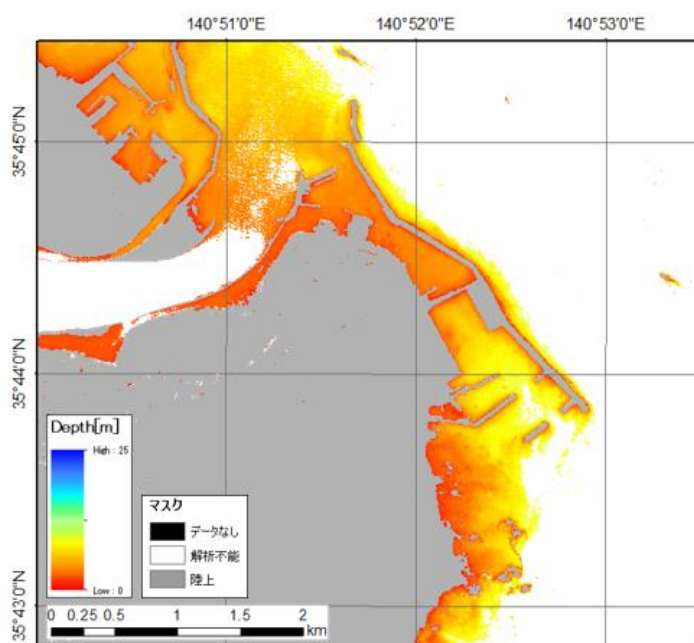


図 5.17 (ア) 透明度の低いエリアのデータのみ使用した場合の SDB

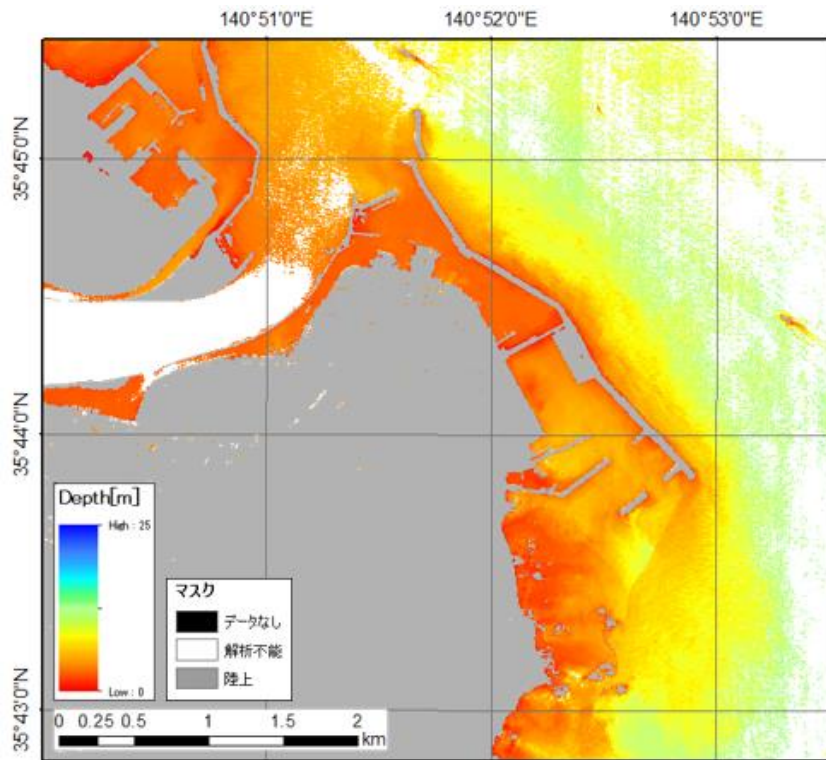


図 5.18 (イ) 透明度の高いエリアのデータのみ使用した場合の SDB

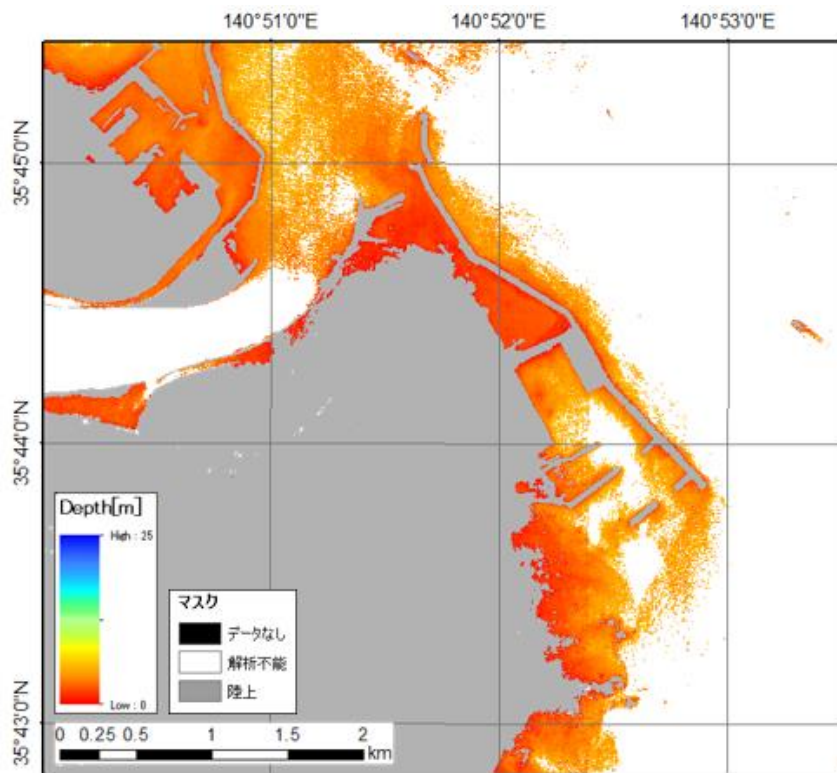


図 5.19 (ウ) 両方のエリアのデータを使用した場合の SDB

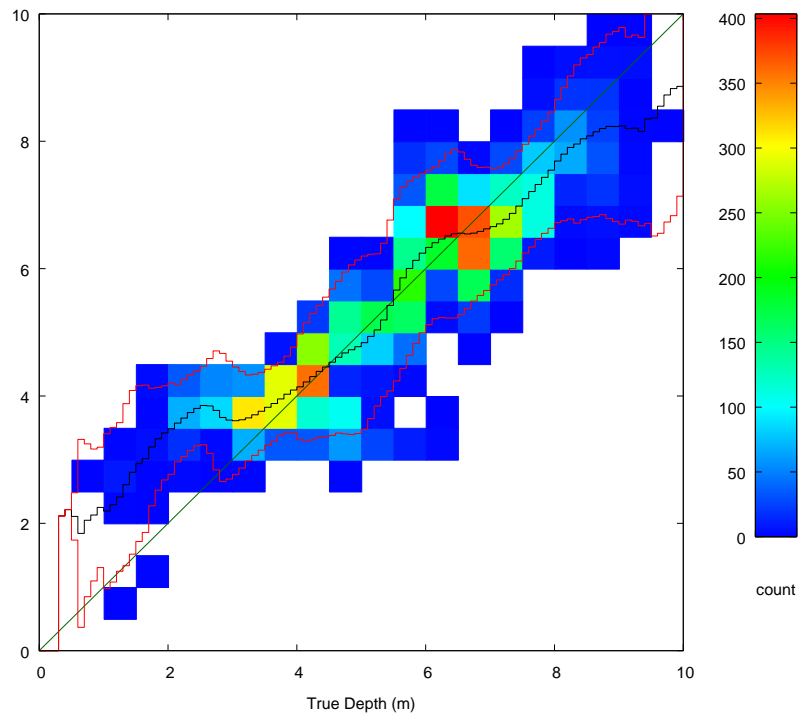


図 5.20 (ア) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

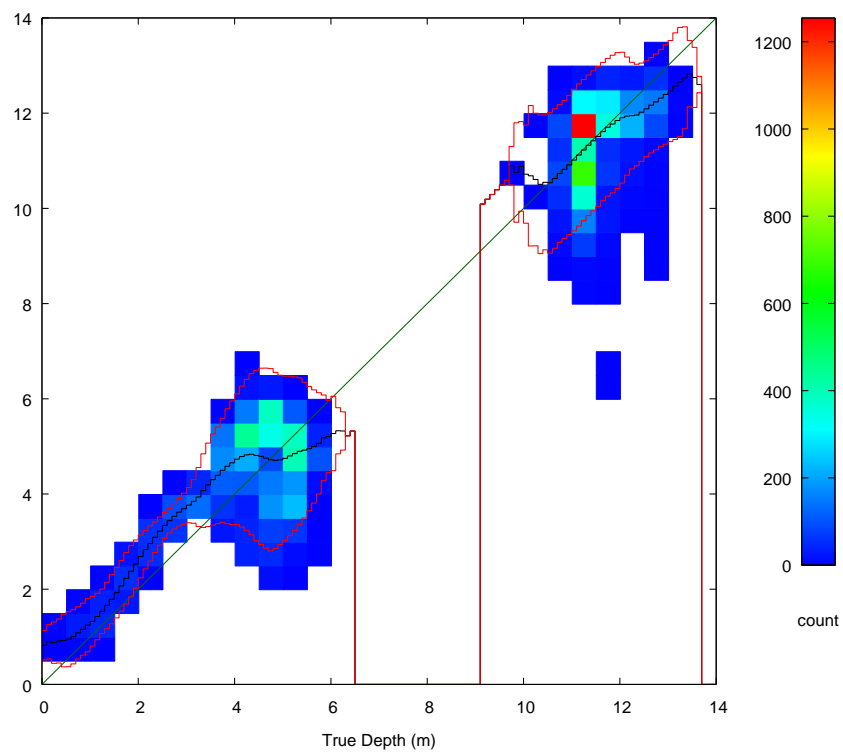


図 5.21 (イ) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

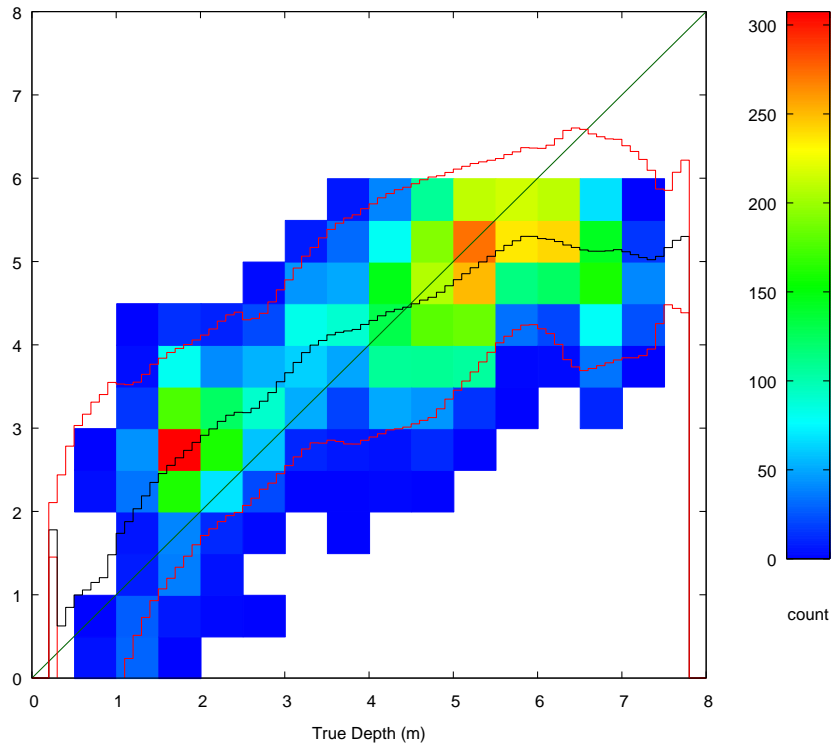


図 5.22 (ウ) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

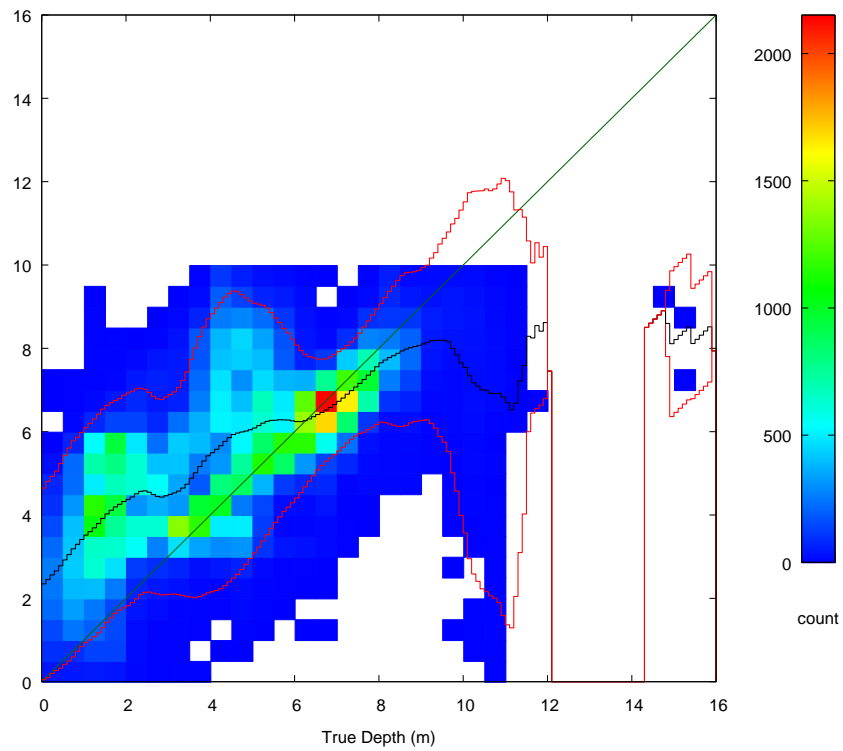


図 5.23 (ア) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

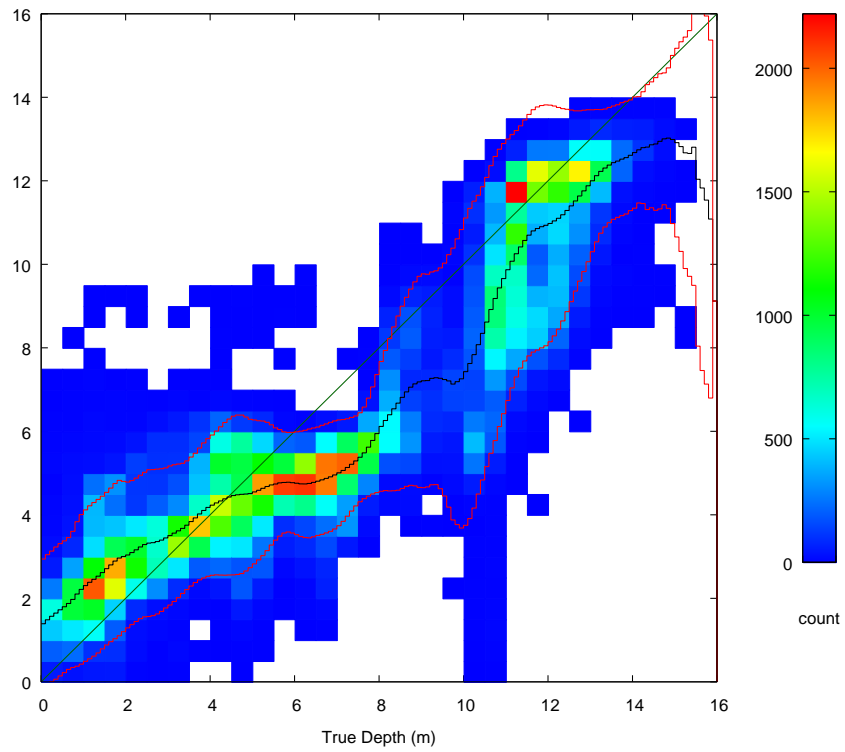


図 5.24 (イ) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

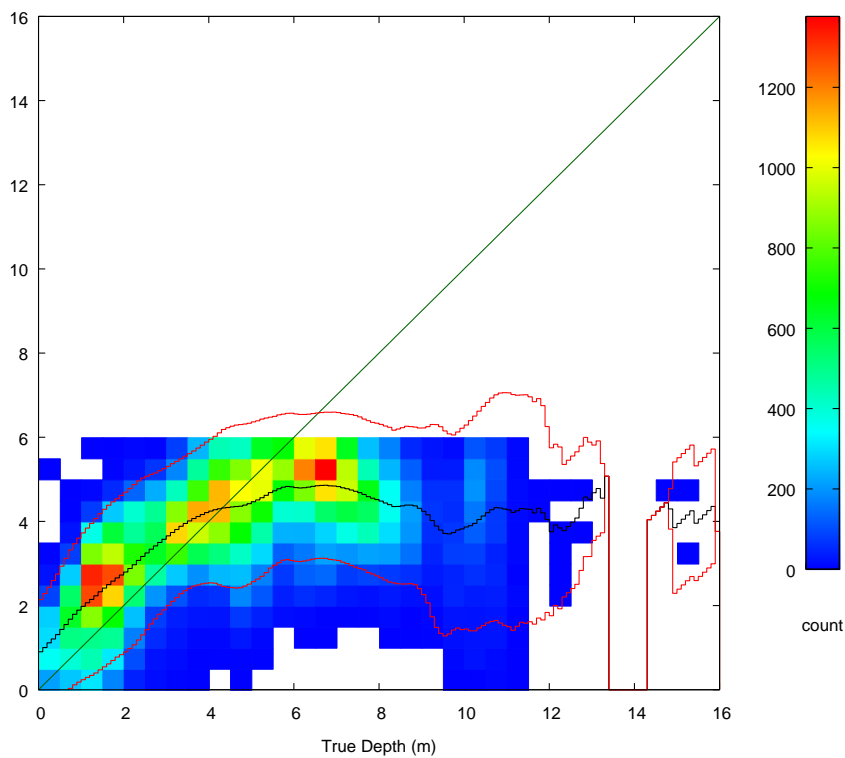


図 5.25 (ウ) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

5.3 海底地形の影響調査

波照間では、比較的広域で深い水深まで SDB を作成することができた。ここでは、海底地形による SDB への影響があるかを調査するために、波照間の SDB から図 5.26 に示す 5 か所について、衛星画像、SDB、水路測量データを目視判読により比較した。

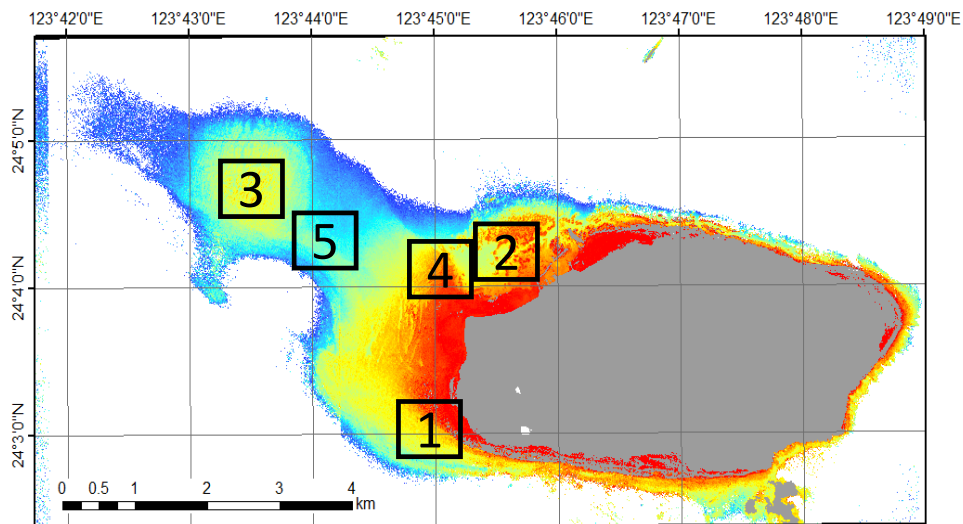

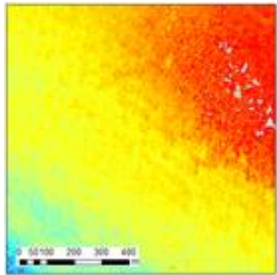
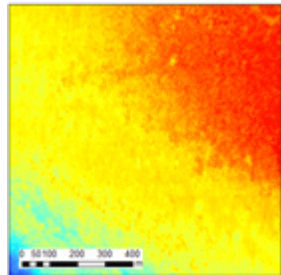
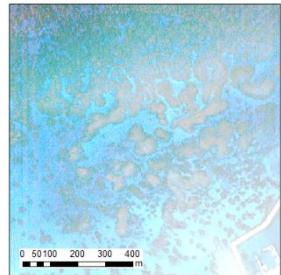
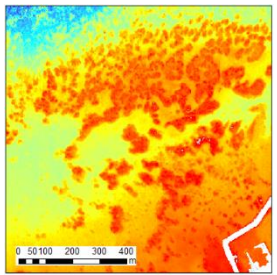
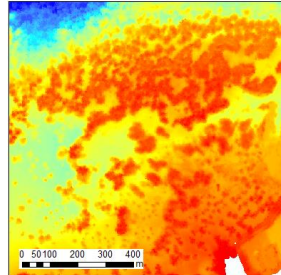
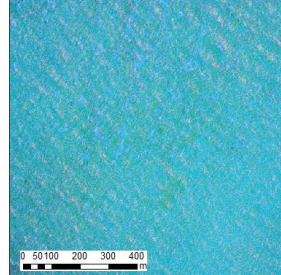
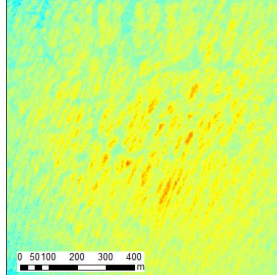
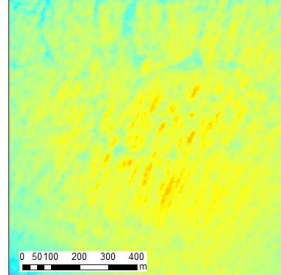
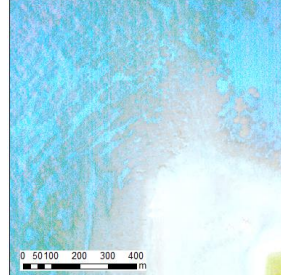
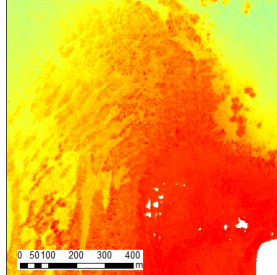
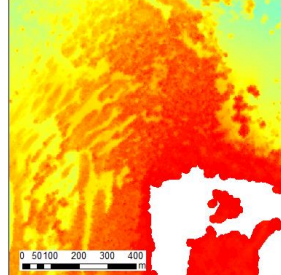
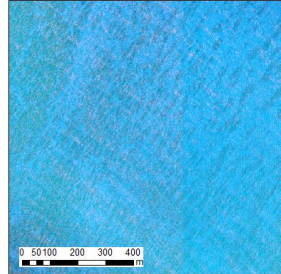
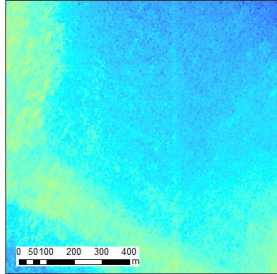
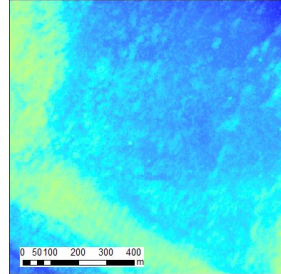


図 5.26 波照間の SDB において目視判読した場所

表 5.1 に図 5.26 の 1～5 番の範囲に対応する、衛星画像、SDB 画像、水路測量画像についてまとめた。表 5.1 の 1 の範囲の画像を見ると、比較的なだらかな地形であることが分かる。SDB と水路測量データを比較するとよく一致している。表 5.1 の 2 の範囲について見ると、サンゴ礁などがあり複雑な地形だが、こちらも SDB と水路測量データを比較するとよく一致している。また、表 5.1 の 3、4 の範囲も同様に SDB と水路測量データがよく一致していた。表 5.1 の 5 の範囲では、水深 15m より深い場所で SDB と水路測量データで地形が異なっているが、これは水深が深いため SDB の誤差が大きくなっていると考えられる。

本業務における水深推定方法は周辺画素の影響ほとんどを考慮しないため、地形が水深推定精度には直接影響しないと考えられ、ここでの判読結果からも地形と精度の間の相関関係は確認できない。しかしながら、地形の複雑さがサンゴ礁のように変化する場合は、衛星画像観測時と水路測量時の状況の違いにより、誤差として表れる可能性がある。表 5.1 の 4 の範囲も画像の左側で細かな地形の違いが SDB と水路測量データの間に見られるが、これは観測時期の違いによりサンゴ礁の形状も変化している可能性が考えられる。

表 5.1 図 5.26 の 1-5 に対応する、衛星画像、SDB および水路測量データ

番号	衛星画像	SDB	水路測量 (レーザー)
1			
2			
3			
4			
5			

5.4 学習データの影響調査

学習用水深データを取得する調査ラインの数を変えた場合に水深推定精度に与える影響を調査するために、データの数と分布域が多い波照間で解析を実施した。ここでは、調査ライン数を1、2、3、5本設定し、それぞれのケースについてSDBを作成し、誤差の検証を行った。図5.27に各ライン数の学習画像における、学習用水深データの位置を赤色のラインで示す。

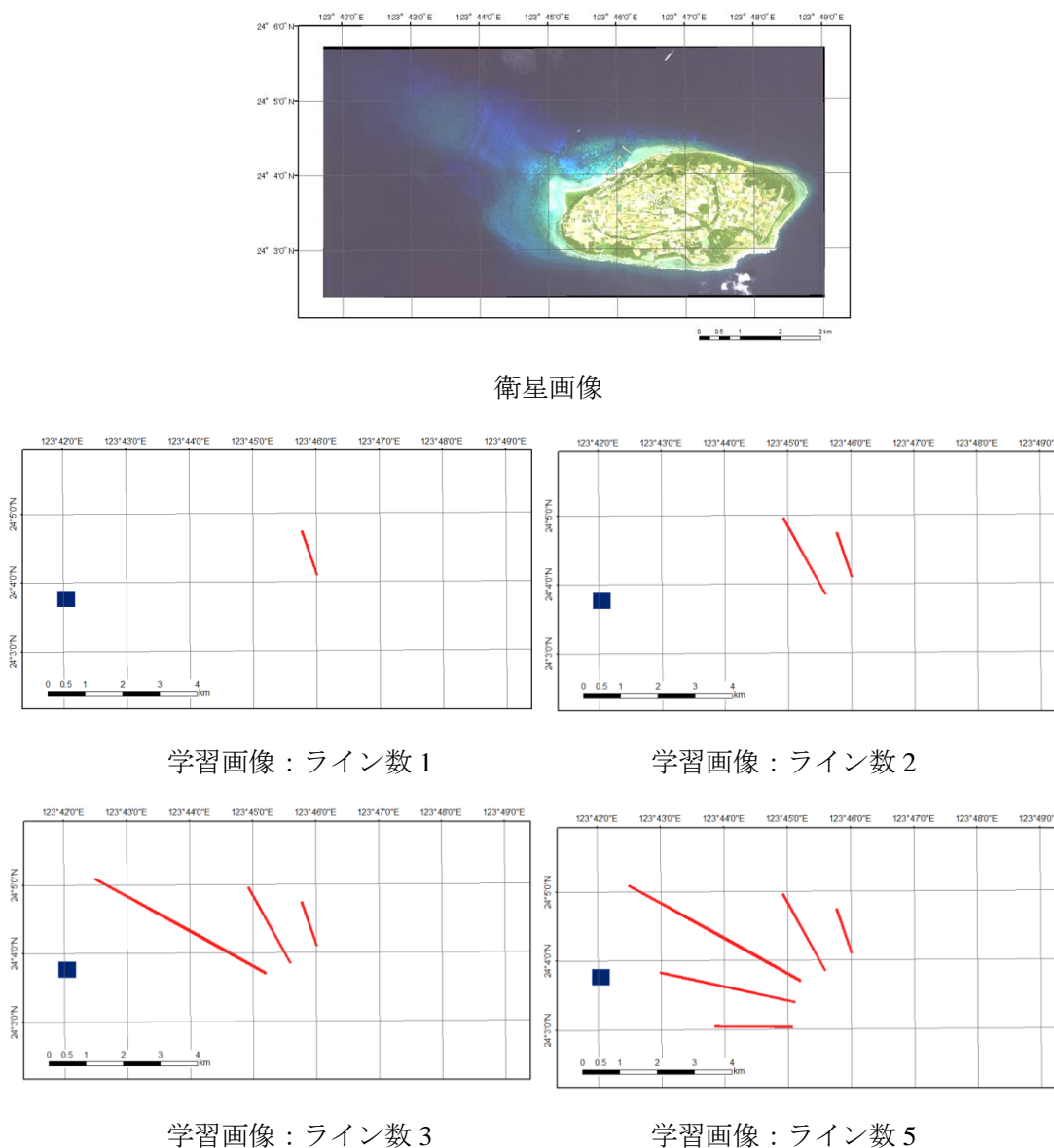


図 5.27 波照間の衛星画像と学習画像

学習画像に対し作成したSDBと評価データの散布図を図5.28～5.31に示す。学習用水深データは統計的に母集団を反映するための十分なデータ量があればよい。今回調査ラインに見立ててライン上にデータを取得したが、一つの調査ラインで十分なデータ量を含むた

めに学習に使用した調査ラインの本数は水深推定精度にほとんど影響を与えなかった。ただ、解析できた最大水深は若干異なり、ライン数 1, 2, 3, 5 に対し、それぞれ 21m、19m、24m、24m という結果となった。学習用水深データのラインの分布をみるとライン数 1, 2 の場合はライン長が短く、水深 20~25m 付近のデータが十分でなかった可能性がある。どの結果もデータ密度の高いエリアが水路測量データと SDB が一致する直線上に分布しており、ほぼ同様の傾向がある。水深 20m 付近において誤差の平均値及び 95% 信頼区間が異なるのは、解析最大水深が異なる影響が大きいと考えられる。現状、解析最大水深より深い海域はマスクされている。そのためそれより深く推定されるデータはないために、平均値は実施よりも小さくなる。

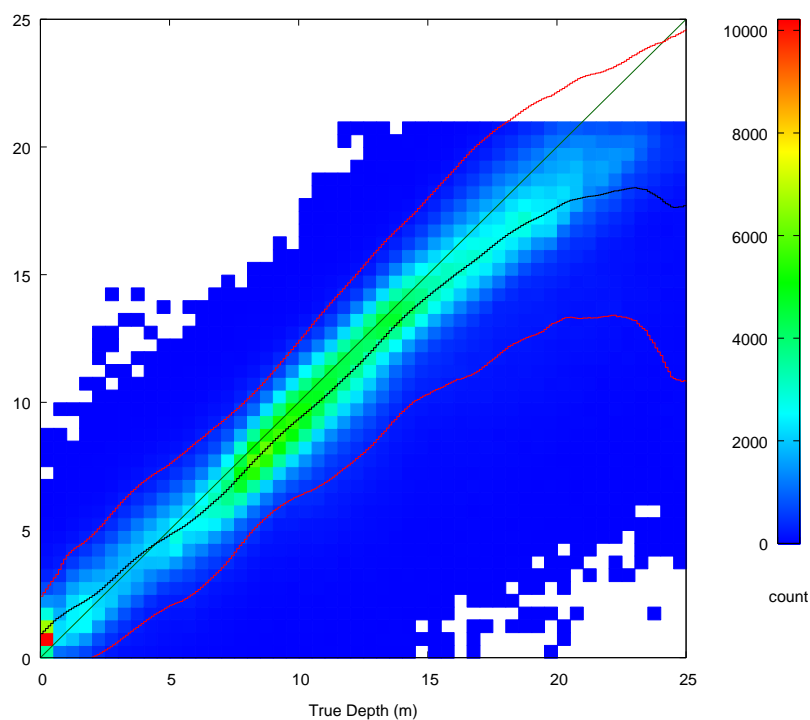


図 5.28 SDB と評価データの散布図 (ライン数 1)

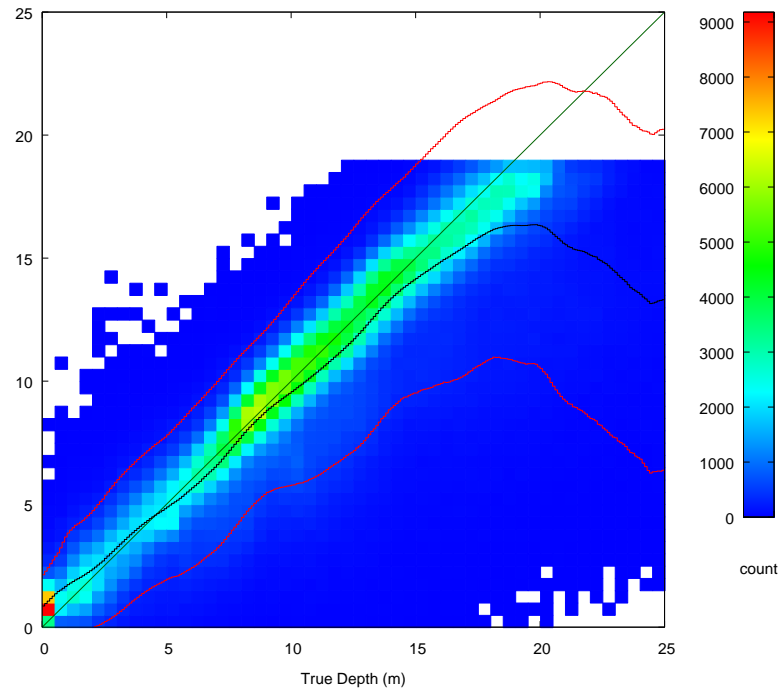


図 5.29 SDB と評価データの散布図 (ライン数 2)

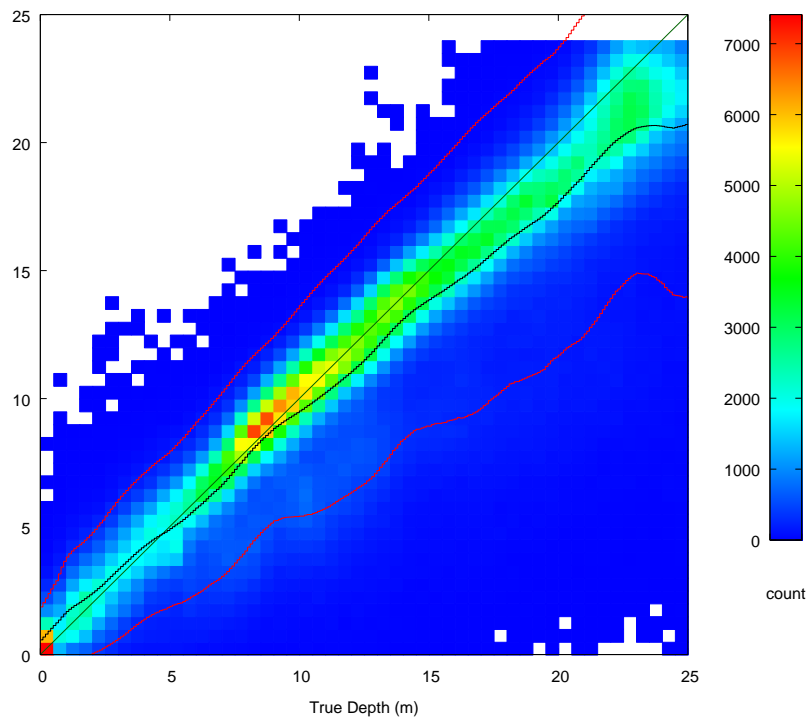


図 5.30 SDB と評価データの散布図 (ライン数 3)

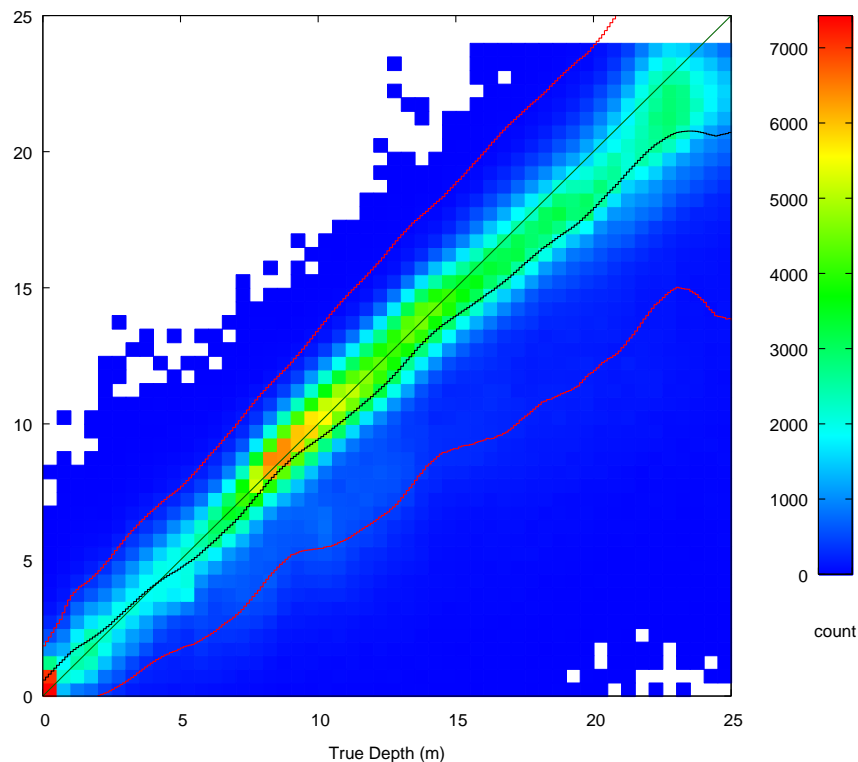


図 5.31 SDB と評価データの散布図（ライン数 5）

5.5 まとめ

SDB を作成する際に、学習用水深データの与える影響は大きい。データ数についてはデータの母集団を表すのに必要な一定数以上あればよい。今回の調査では、実際の学習用水深データの取得方法としてシングルビーム測深による調査を想定し、元のレーザー測深のデータからライン状に学習用データを選択した。しかしながら、レーザー測深のデータはデータ密度が高いため、ライン状に取得してもデータ数は多いように思える。解析に必要な学習用データの最低数を知るには別途詳細な調査が必要である。

データ数以上に精度に大きく影響を与えると考えられるのが、底質、海水の透明度である。基本的に現状の方法で高い精度を得るにはデータはなるべくランダムに取得し、特定の底質や透明度のデータに偏らないことが精度を安定するには必要であり、これについては学習用水深データ取得時に衛星画像を目視判読して場所を選ぶことである程度対応できると考えられる。しかしながら、底質や透明度のばらつきによる誤差の大きさへの影響が多すぎる場合は、目視判読により解析する海域範囲を分割するなどの工夫も有効である可能性がある。

第6章 広域データの解析

本章では広い面積の衛星画像や地理的に様々な海域の衛星画像データを解析して SDB を作成した。広いエリアの海域としては石西礁湖と高知沖を選定した。その他国内の様々な海域（7シーン）で SDB を作成した。

6.1 広いエリアの衛星画像の解析

石西礁湖と高知沖の解析に使用したデータを表 6.1 にまとめた。石西礁湖については複数時期のデータで構成される。各画像の詳細は第 3 章参考のこと。

図 6.1 は石西礁湖のモザイク処理である。本業務では衛星画像データとしてオルソレディ標準プロダクト（OR2A）を使用し、幾何補正処理を行っている。この際、水平方向の位置が移動する可能性があるため、隣り合う画像間は重なる領域ができるようにデータを取得している。ここでは 100m（50 画素）程度重複領域を設定した。

石西礁湖と高知沖の画像について、それぞれ水路測量データとして沿岸海の基本図、マルチビーム測量データを用いて SDB 画像を作成した。各水路測量データの詳細は第 3 章参考のこと。石西礁湖については、各画像について SDB を作成したのちモザイク処理を行うことで、全結果を結合した。

表 6.1 石西礁湖と高知沖の衛星画像データ

識別番号	購入年度	画像 ID	エリア	撮影日	オフナディア角	衛星	面積
p47n001	2015	103001002746BE00	石西礁湖	2013/9/28	21.16	Worldview2	187km ²
p47n002	2015	103001001C0E5F00	石西礁湖	2012/10/2	18.91	Worldview2	157km ²
p47n003	2015	103001002665D100	石西礁湖	2013/9/28	18.42	Worldview2	157km ²
p47n004	2014	1030010022421B00	石西礁湖	2013/4/29	22.29	Worldview2	145km ²
p47n005	2014	103001002746BE00	石西礁湖	2013/9/28	21.16	Worldview2	28km ²
p39n002	2015	103001001D7B2C00	高知沖	2012/12/31	8.54	Worldview2	75km ²

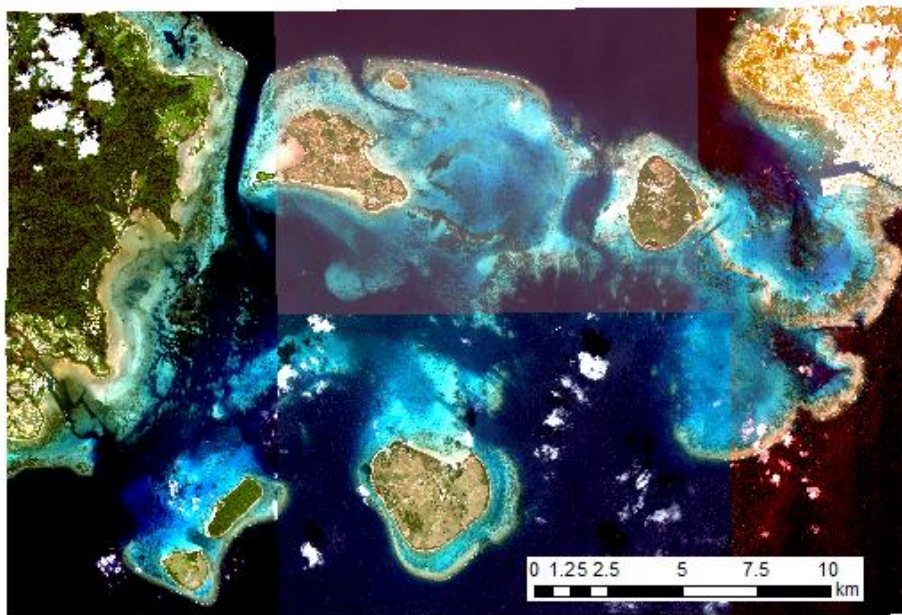


図 6.1 石西礁湖の衛星画像（複数のデータのモザイク）



図 6.2 高知沖の衛星画像

石西礁湖と高知沖の SDB をそれぞれ図 6.3、図 6.4 に、各画像に対する SDB と水路測量データを比較した誤差グラフを図 6.5～6.9 に示す。

石西礁湖の結果では、SDB と水路測量データを目視判読で比較すると全体的にはよく一致していた。どの画像についても 25m まで解析できているが、誤差グラフで詳細を確認すると水深 10m を超えたあたりから平均誤差は負の値に大きくなっている。本業務で使用した解析システムでは、解析の限界水深を算出するに平均誤差の絶対値と全体誤差の標準偏

差を比較しているが、ここでは全体誤差の標準偏差が大きいために実際の解析の限界よりも深くまで解析してしまっていると考えられる。どの結果も誤差の 95%信頼区間は平均誤差 $\pm 5\text{m}$ 程度である。平均誤差は一定の傾きで水深の増加と面に正の値から負の値に変化している。

高知沖の結果について見ると、SDB と水路測量データを目視判読で比較すると大きな傾向は一致しているが、中央付近の 10m以深の濁りの影響があると考えられる海域は解析ができていなく周辺も誤差を含んでいるように見える。誤差グラフについて見ると、水深 18mまでは比較的平均誤差の絶対値が小さく、水深 20m 付近が解析の限界水深と考えられる。95%信頼区間は石西礁湖と同じく平均誤差 $\pm 5\text{m}$ 程度である。

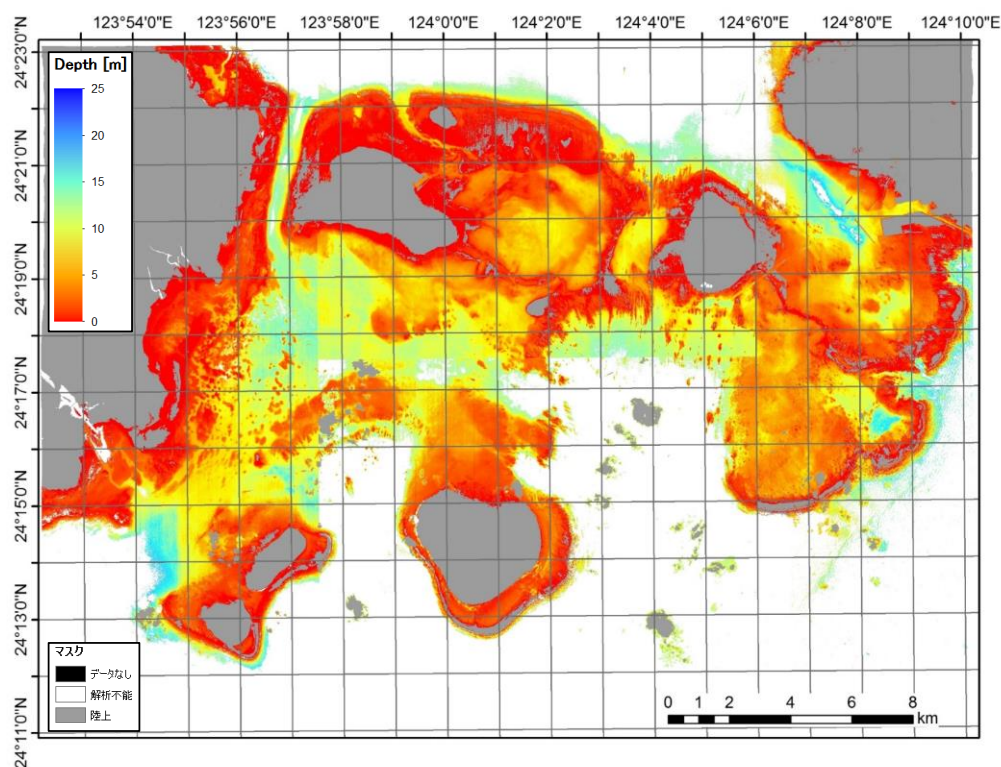


図 6.3 石西礁湖 SDB

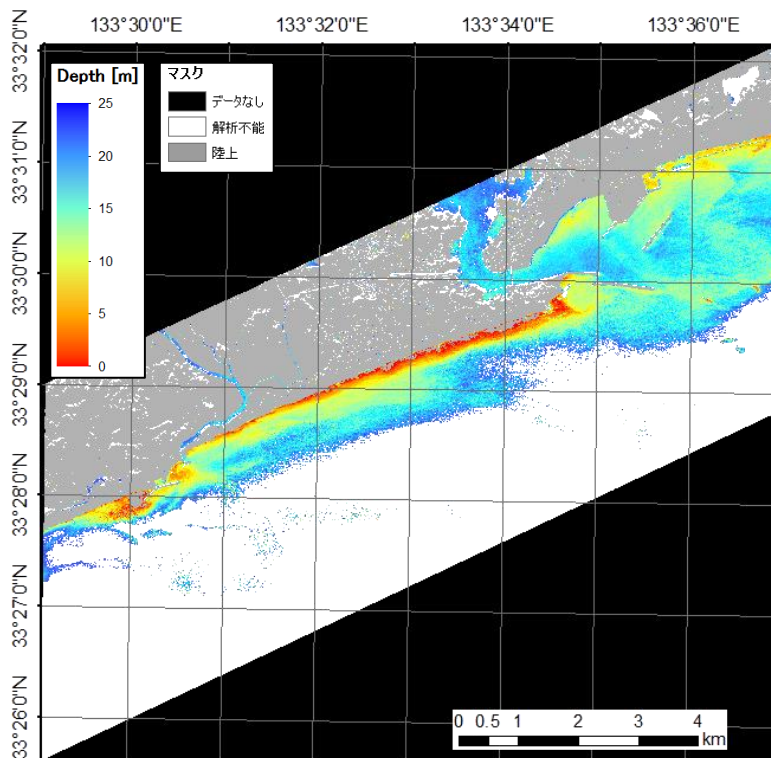


図 6.4 高知沖 SDB

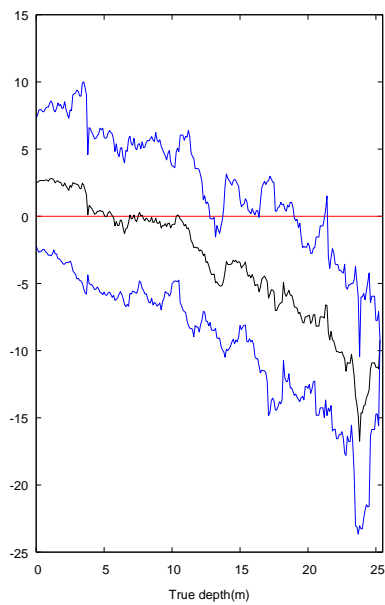


図 6.5 石垣沖の誤差グラフ (p47n001, p47n005)

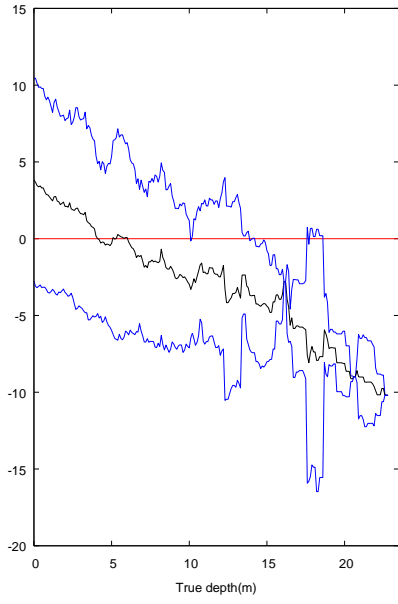


図 6.6 石垣沖の誤差グラフ (p47n002)

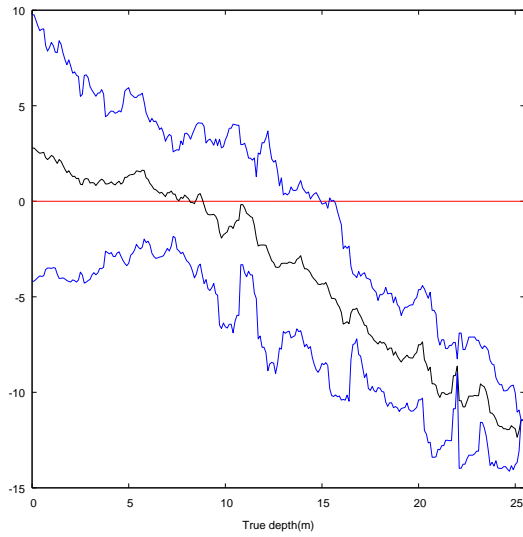


図 6.7 石垣沖の誤差グラフ (p47n003)

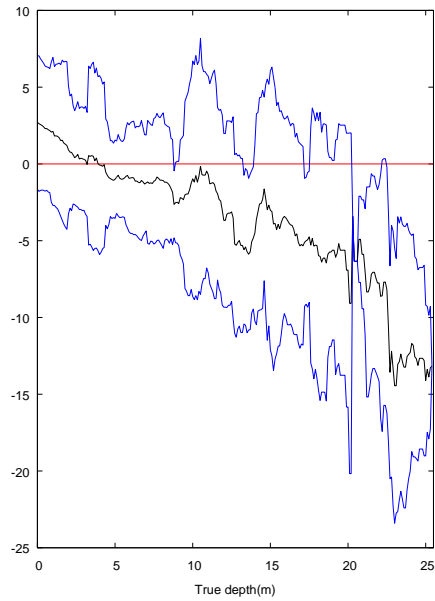


図 6.8 石垣沖の誤差グラフ (p47n004)

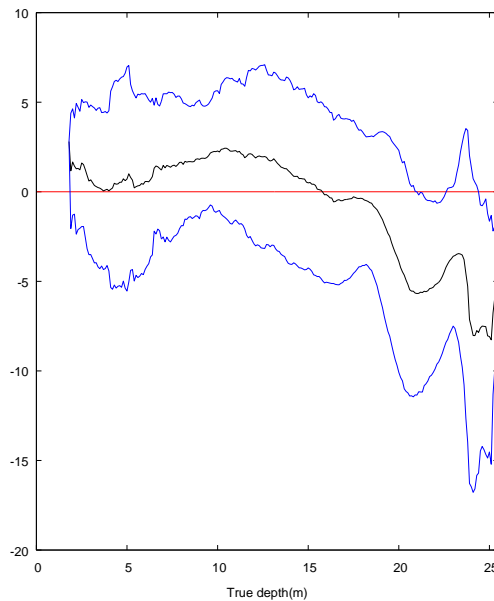


図 6.9 高知沖の誤差グラフ (p39n001、p39n002)

6.2 様々な海域の衛星画像の解析

ここでは、これまで本業務で解析していない本州の多様な海域で検証するため、表 6.2 に示すエリアの衛星画像を解析し、SDB を作成した。また、水路測量データとしては、表 6.3 で示したデータをそれぞれ用いた。なお、衛星画像、水路測量データの詳細は第 3 章を参考のこと。

表 6.2 解析した衛星画像一覧

識別番号	購入年度	画像 ID	エリア	撮影日	オフナディア角	衛星	面積
p14n001	2015	103001001238AC00	鎌倉	2012/3/27	18.93	Worldview2	25km ²
p14n002	2015	103001002B42BA00	鎌倉	2013/12/28	21.99	Worldview2	25km ²
p15n001	2015	103001000D4B2800	両津湾	2011/9/24	26.3	Worldview2	25km ²
p22n001	2015	10300100085CED00	浜名港	2011/1/13	19.7	Worldview2	25km ²
p35n001	2014	103001001308D800	深川湾	2012/4/1	19.2	Worldview2	25km ²
p38n001	2014	103001002EC88400	佐田岬	2014/3/27	26.69	Worldview2	35km ²
p38n002	2014	10300100121A3E00	佐田岬	2012/4/9	12.95	Worldview2	35km ²

表 6.3 解析に使用した水路測量データ一覧

海域	枝番号	図名	原図番号	測量年月	備考
鎌倉	1	相模湾	E314024	2014.1	マルチビーム
両津湾	1	両津湾	907003	2007.7	マルチビーム
浜名港	1	浜名港	E303031A	2003.7-10	マルチビーム、一部シングルビーム
佐田岬	1	佐田岬灯台付近	A006302	2006.7	航空レーザー測量
青海島	1	青海島付近	E710503	2010	マルチビーム

SDBの結果を図 6.10～6.16 に、誤差グラフを図 6.17～23 にそれぞれ示す。鎌倉沖の SDB を見ると、p14n001、p14n002 のどちらの結果も水深 13m まで解析できており、水路測量データのある場所は目視判読ではよく一致している。誤差の傾向はどちらも似ているものの、p14n001 のほうがやや大きく、誤差の 95%信頼区間は平均誤差±1～3m であり、p14n002 の場合は平均誤差±1m である。

両津湾では、目視判読で SDB と水路測量データを比較すると、沿岸のごく一部を除きあまり一致していない。元の衛星画像を見ると海水が濁っている。誤差の 95%信頼区間は大きい水深帯で平均誤差±10m に達している。

浜名港は、目視判読では SDB と水路測量データがよく一致していると言える。誤差も 16m までは小さく、誤差の 95%信頼区間は平均誤差±2m 程度である。

深川湾は、目視判読で見ると、水路測量データと SDB 作成範囲の重なる一部の海域では比較的一致している。しかしながら、誤差の 95%信頼区間は平均誤差±3～5m 程度とやや大きい。

佐田岬は、目視判読で SDB と水路測量データを比較すると、p38n001、p38n002 のどちらの場合も沿岸部は比較的一致しているように見える。誤差はどちらの場合もやや大きく、誤差の 95%信頼区間は水深 10 未満で平均誤差±2～4m 程度であった。

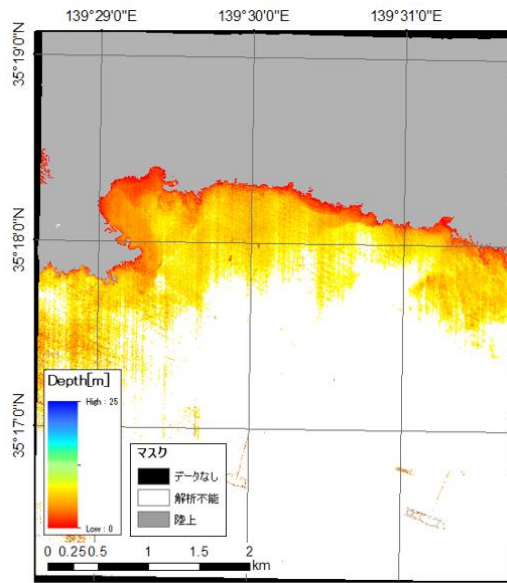


図 6.10 鎌倉沖 SDB (p14n001)

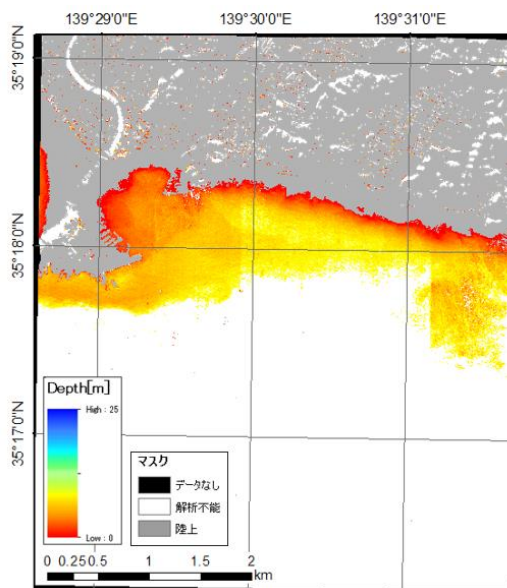


図 6.11 鎌倉沖 SDB (p14n002)

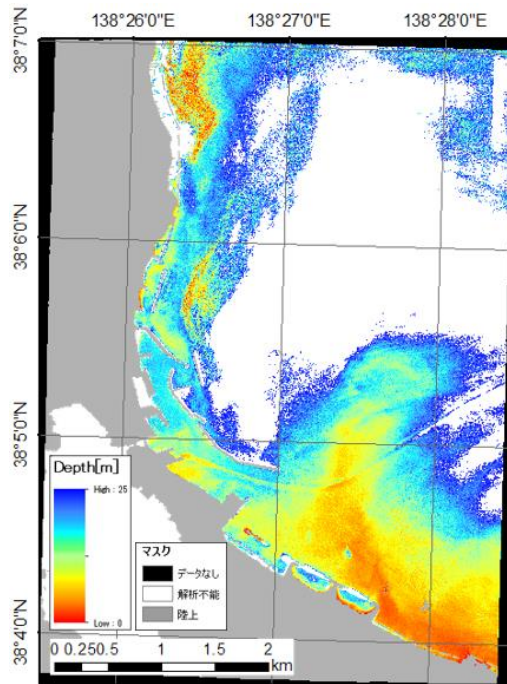


図 6.12 両津湾 SDB (p15n001)

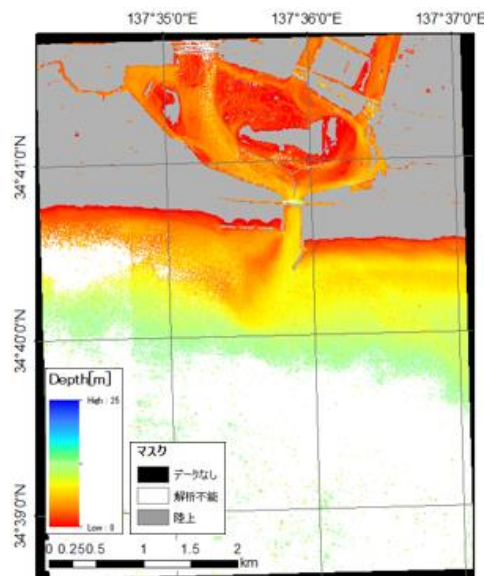


図 6.13 浜名港 SDB (p22n001)

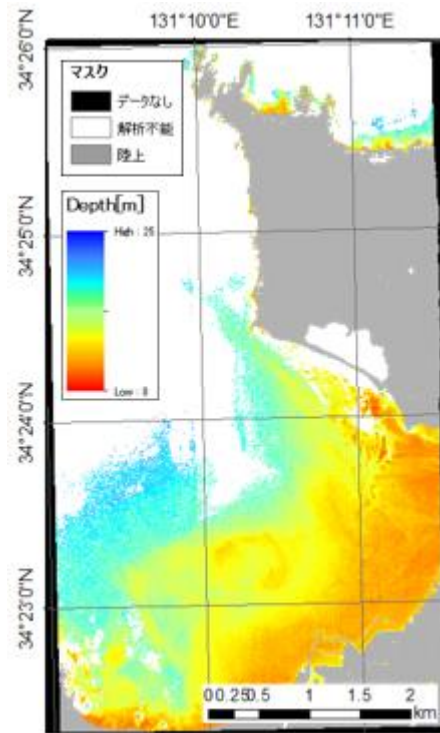


図 6.14 深川湾 SDB (p35n001)

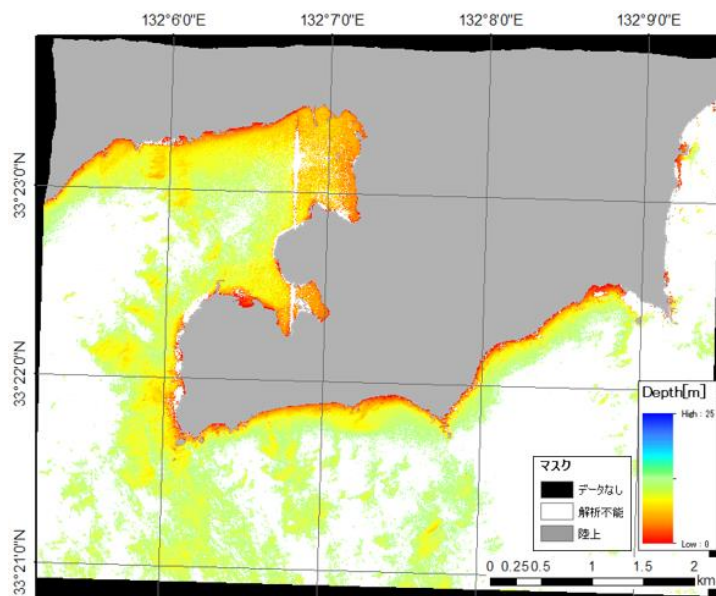


図 6.15 佐田岬 SDB (p38n001)

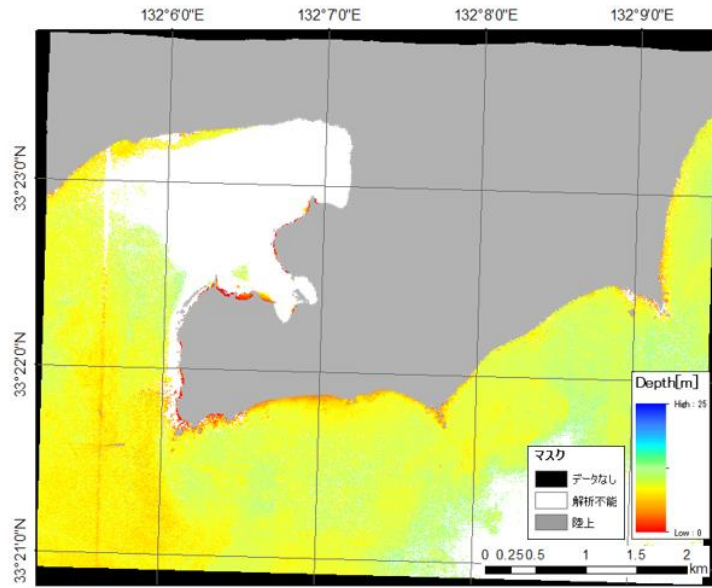


図 6.16 佐田岬 SDB (p38n002)

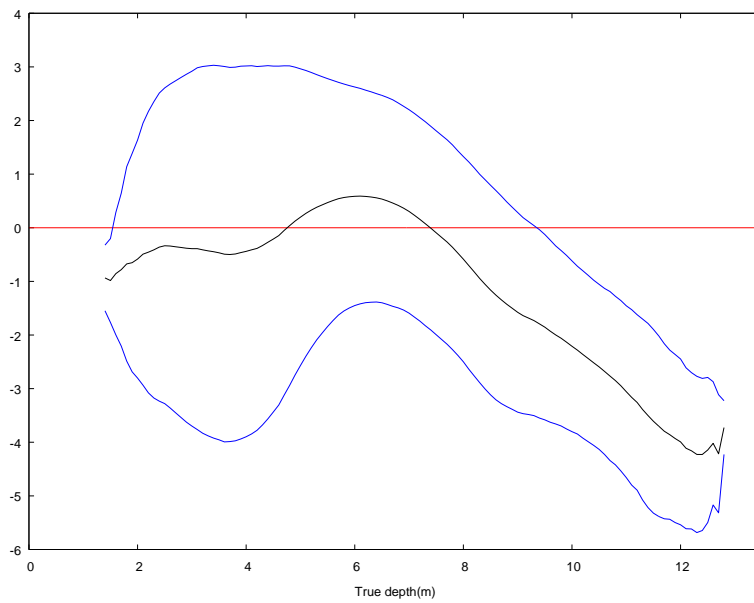


図 6.17 鎌倉沖の誤差グラフ (p14n001)

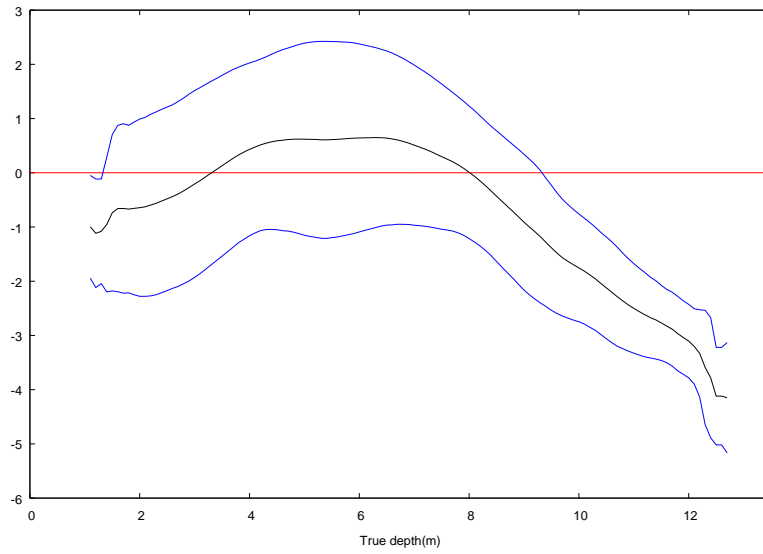


図 6.18 鎌倉沖の誤差グラフ (p14n002)

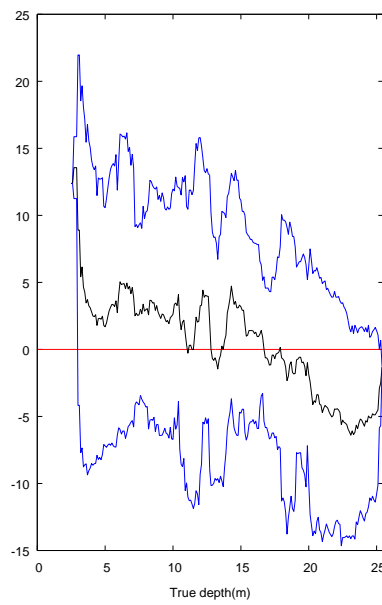


図 6.19 両津湾の誤差グラフ (p15n001)

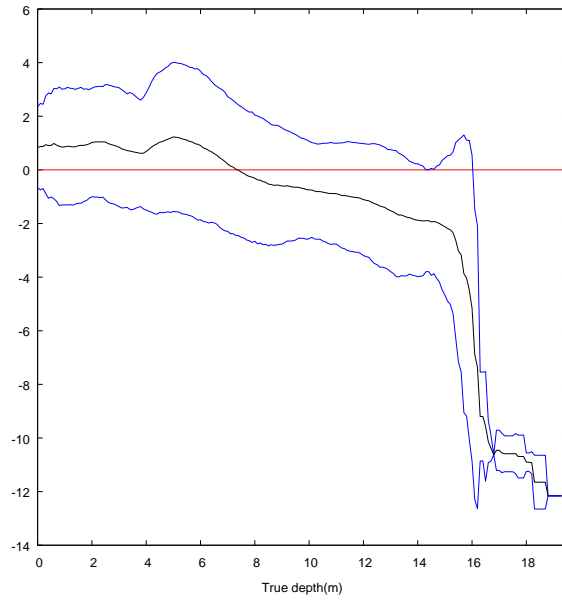


図 6.20 浜名港の誤差グラフ (p22n001)

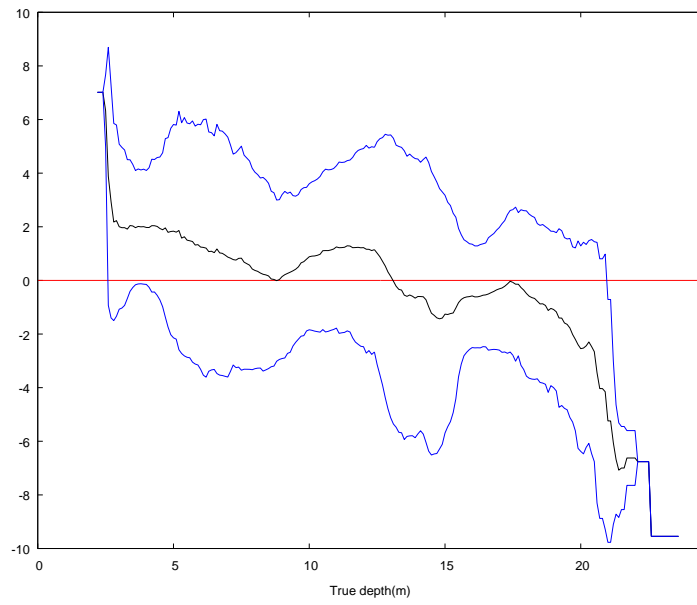


図 6.21 深川湾の誤差グラフ (p35n001)

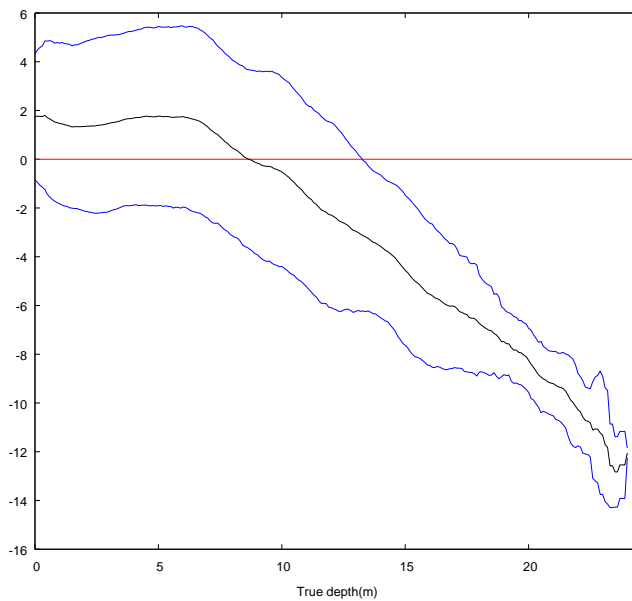


図 6.22 佐田岬の誤差グラフ (p38n001)

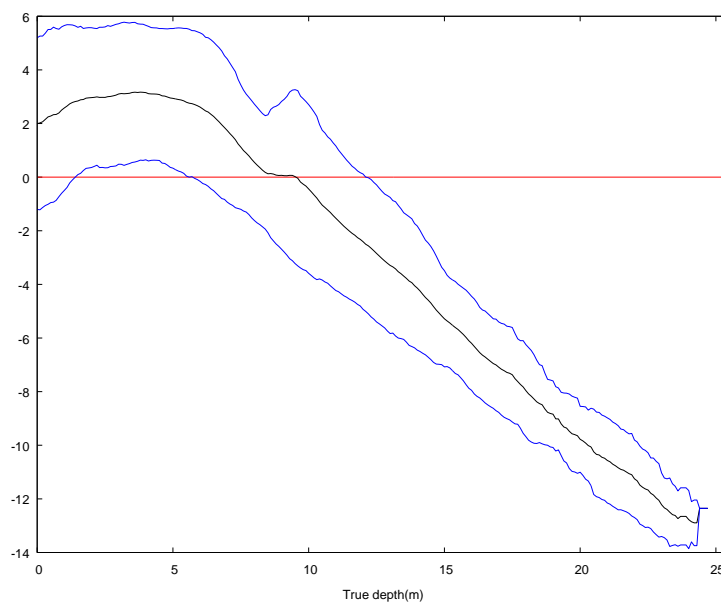


図 6.23 佐田岬の誤差グラフ (p38n002)

6.3 まとめ

現状の手法では海水の消散係数など環境条件は一枚の画像内で一定と仮定している。しかしながら、広域を解析するとこの条件が必ずしも成り立たず、水深推定のモデルと条件が異なる海域では誤差が大きくなる。このことは複数の画像を解析してモザイク処理を行う場合は、接合部では必ずしも SDB の水深が一致しない結果をもたらす。

空間的な環境条件のばらつきを学習用水深データから推定する方法もあるが、現状の手法と比較し、より広域で多くの学習用水深データが必要となると考えられる。

モザイク処理をする場合は、幾何補正処理により画像の水平位置が変わるため、隣り合う画像間で重複領域を取ったほうがよい。

誤差の95%信頼区間は多くの海域では水深約10mまでは平均誤差±2m前後であったが、平均誤差は0mから2mの間で水深により変化しているケースが多い。また、一部の結果では誤差の95%信頼区間が平均誤差±5mより大きくなり、平均誤差も大きい場合は5mに達した。

第7章 専門家委員会

本業務の内容は、年2回の専門家委員会で報告し、専門家委員の方々の意見、助言をいただいた。専門家委員は海域における衛星画像解析や音響計測解析の専門家、一般財団法人日本水路協会および海上保安庁の代表者で構成された。

専門家委員会は、平成27年6月4日（第1回）と平成28年3月11日（第2回）の2回開催され、研究調査計画および成果について評価、了承された。

7.1 第1回委員会

(1) 日時

平成27年6月4日（木）10時～11時

(2) 場所

海上保安庁海洋情報部 10階 中会議室

(3) 参加者

【出席】

委員：

小松 輝久（東京大学大気海洋研究所 准教授）

平譚 享（北海道大学大学院水産科学研究院 准教授）

神野 有生（山口大学大学院理工学研究科 助教）

長屋 好治（海上保安庁海洋情報部 技術・国際課長）

岩渕 洋（海上保安庁海洋情報部 海洋調査課長）

松本 良浩（海上保安庁海洋情報部 海洋研究室上席研究官）

加藤 晴太郎（一般財団法人日本水路協会専務理事）

事務局：

平岩 恒廣（一般財団法人日本水路協会 調査研究部）

鈴木 直子（一般財団法人日本水路協会 調査研究部）

坂田 英一（一般財団法人リモート・センシング技術センター 研究開発部長）

佐川 龍之（一般財団法人リモート・センシング技術センター 研究開発部研究員）

小野 清孝（一般財団法人リモート・センシング技術センター ソリューション事業部係長）

元村 和史（一般財団法人リモート・センシング技術センター ソリューション事業部研究員）

【欠席】

委員：

鯉淵 幸生（東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授）

小嶋 哲哉（第十一管区海上保安本部 海洋情報企画調整官）

（４）議事次第

1. 開会
2. 挨拶
3. 委員紹介
4. 議題
 - ・ 事業概要
 - ・ 平成 27 年度実施計画
5. その他、次回委員会日程について
6. 閉会

（５）概要

第 1 回委員会では、日本水路協会より事業概要の説明があり、RESTEC より調査研究実施計画についての説明を行った。各実施予定項目について議論を行い、計画通り実施することが了承された。

（６）資料

委員会当日は以下の資料が配布された。配布資料、議事次第、議事録は付録 B に収録した。

- ・ 当日配布資料

資料-1 衛星画像を用いた浅海域水深情報の把握の調査研究事業 委員の構成

資料-2 事業概要

資料-3 平成 27 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計画

7.2 第2回委員会

(1) 日時

平成 28 年 3 月 11 日(金)10～11 時

(2) 場所

海上保安庁海洋情報部 10 階 中会議室

(3) 参加者

委員：

小松 輝久（東京大学大気海洋研究所 准教授）

鯉渕 幸生（東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授）

神野 有生（山口大学大学院理工学研究科 助教）

西澤 あずさ（海上保安庁海洋情報部 技術・国際課 海洋研究室長）

岩渕 洋（海上保安庁海洋情報部 海洋調査課長）

松本 良浩（海上保安庁海洋情報部 海洋研究室上席研究官）

小嶋 哲哉（海上保安庁第十一管区海上保安本部 海洋情報企画調整官）

伊藤正巳（一般財団法人日本水路協会 専務理事）

事務局：

平岩 恒廣（一般財団法人日本水路協会 調査研究部）

鈴木 直子（一般財団法人日本水路協会 調査研究部）

坂田 英一（一般財団法人リモート・センシング技術センター 研究開発部長）

佐川 龍之（一般財団法人リモート・センシング技術センター 研究開発部主任研究員）

小野 清孝（一般財団法人リモート・センシング技術センター ソリューション事業部主査）

元村 和史（一般財団法人リモート・センシング技術センター ソリューション事業部研究員）

【欠席】

委員：

平澤享（北海道大学大学院水産科学研究院 准教授）

(4) 議事次第

1. 開会
2. 挨拶
3. 資料確認
4. 議事

議題 1) 平成 27 年度調査研究実施報告について

議題 2) その他

5. 閉会

(5) 概要

第 2 回委員会では、日本水路協会より事業概要の説明があり、RESTEC より調査研究実施報告を行った。各業務項目の実施内容を専門家委員に確認いただき、ご助言をいただいた。詳細は、議事録参照のこと（付録 B に収録）。

(6) 資料

委員会当日は以下の資料が配布された。配布資料、議事次第、議事録は付録 B に収録した。

・当日配布資料

「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」事業委員会委員の構成

資料 1

「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究」事業(2014～2016)

資料 2

平成 27 年度衛星画像を用いた浅海水深情報の調査研究実施報告

資料 3

「衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の研究」事業 平成 27 年度第一回委員会議事録

資料 4

第8章 まとめと将来の展望

SDB は波照間のケースでは水深 24m まで解析することができた。本業務で使用した SDB 作成システムでは、解析可能な水深を平均誤差の絶対値が全体誤差の標準偏差以下となる水深と定めている。誤差グラフを見ると実際には 23m 付近から平均誤差が負の値に大きくなり、その手前で解析できる最大水深に達していることが分かった。シミュレーションの結果からは水深約 20m が推定できる限界と考えられた。誤差グラフで平均誤差を比較すると、透明度の高いケース（クロロフィル濃度が 0.1mg/m^3 ）は波照間の解析結果と類似していた。本業務すべての解析結果を比較しても、波照間のケースは突出して深い水深までの精度が高く、日本国沿岸においては水深 20m 付近が解析できる限界と考えてよいだろう。SDB の誤差は、水路測量データとの相関が高かった波照間において、誤差の 95% 信頼区間は水深の $\pm 30\sim 40\%$ 程度である。論文などで多く用いられる RMS 誤差に換算する場合はこの約半分の値であり、 $15\sim 20\%$ 程度になる。

一方、多くの海域では、システム上算出される解析限界水深は $20\sim 25\text{m}$ 付近の値をとる結果が多かったものの、誤差グラフを判読することにより推定される解析の限界水深は $10\sim 15\text{m}$ にあると考えられた。これは、どの水深でも平均誤差の絶対値が大きく、全体の誤差が大きすぎるためである。システム上は、残差を最小二乗法によって最小とするため、解析可能な水深帯においては、平均誤差はほぼ 0m であることを想定している。しかしながら実際の結果は異なり、水深が小さくても 2m 以上の平均誤差の絶対値をとるケースが多い。シミュレーションの結果も合わせて考察するとこれらの大きな誤差の原因は底質のばらつきと考えられ、実際の解析結果からは、沖縄のようなサンゴ礁域よりも本州のように岩場や藻場がある海域のほうが誤差に与える影響が大きいようであった。現状の方法で安定した SDB の精度を得るためには、底質が大きく違う場合に、目視判読などにより海域を分ける方法なども考えられる。SHOM などでは、画像処理と目視判読を組み合わせるサンゴ礁と砂地を分けて SDB を作成している。

また、現状の SDB 作成システムについては、前処理に複数の商用ソフトを用いるために処理が煩雑なところがあるが、すべて一つのソフトで処理できるようにシステムを改変することで処理を効率化できる。また、現状の処理では放射量補正や水深推定の過程で処理係数によっては調整が必要であるが、現状のシステムではこの作業の実施が必ずしも容易ではない。ソフトウェアの GUI の作成などユーザーインターフェースの向上がこれらの作業効率の向上につながる。

本業務では、実用を意識して SDB 作成システムを開発し、多くの衛星画像を実際に解析し、SDB を作成した。これまで論文等でいくつかの試験海域での報告はされていたが、日本沿岸では本業務で扱ったほどの解析事例はなく、貴重なデータを得ることができた。一方で、一般に公開されている手法やその組み合わせだけでは、そのまま実利用は難しいことも

示唆された。一番の問題は水深推定精度の高低ではなく、精度が安定せず予測が難しいことにある。たとえ精度が低くとも安定した精度が得られる場合には、その精度に応じた用途が考えられる。今後は、衛星画像の補正や解析技術を向上させるとともに、利用できる地理空間データを組み合わせたり、目視判読等による知見を取り入れたりと多様な観点から調査研究を行うことで、実利用につながる技術に発展できる可能性がある。