

## 第10章 SDB の適用限界に関する調査

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。本章では、水深推定手法の適用限界を明らかにするために、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結果を示す。

### 10.1 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。

#### 10.1.1 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 10.1、10.2 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 10.3、10.4 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プリング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程度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 10.5、10.6 に、SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図を図 10.7、10.8 に、誤差グラフを図 10.9、10.10 に示す。

波照間については、水深 24m まで解析できた。図 10.5 と図 10.3 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 10.7 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 10.9 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 10.6 と図 10.4 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 10.8、図 10.10 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。

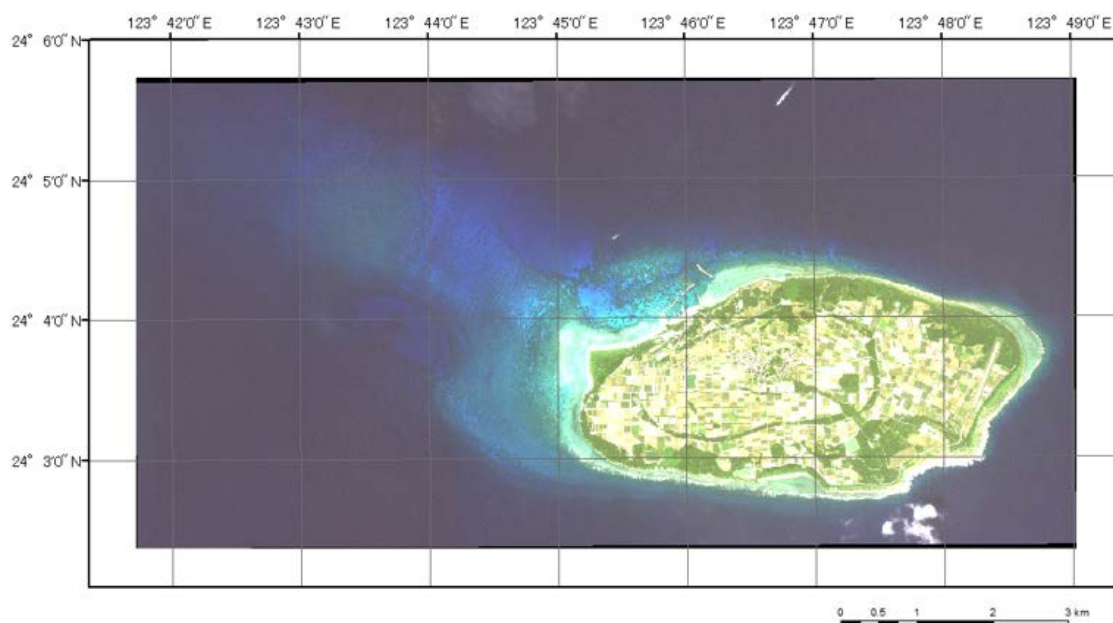


図 10.1 衛星画像（波照間）

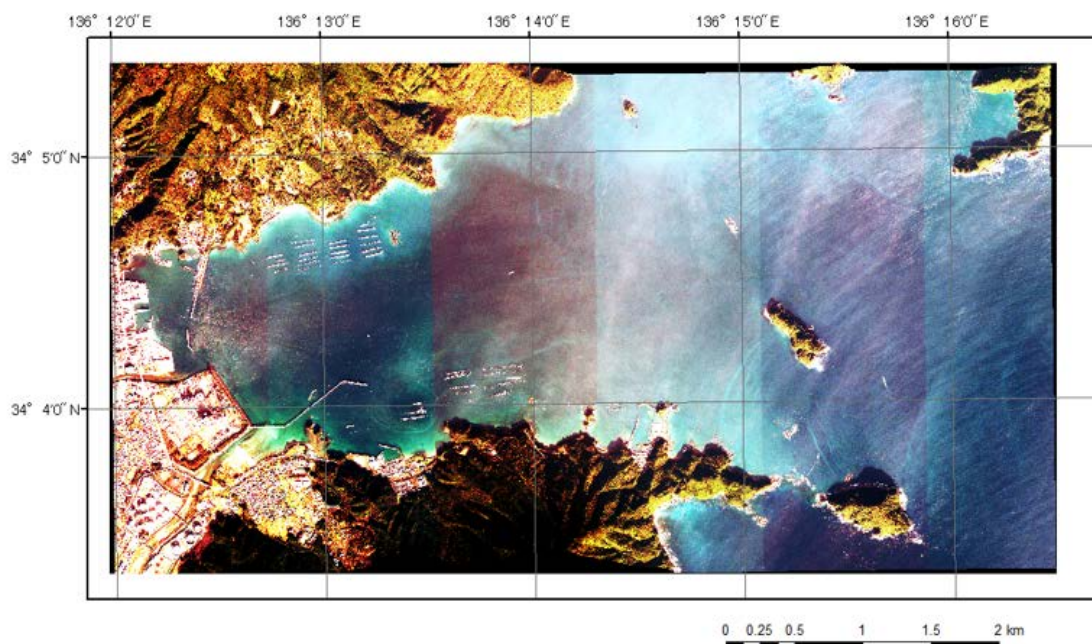


図 10.2 衛星画像（尾鷲）

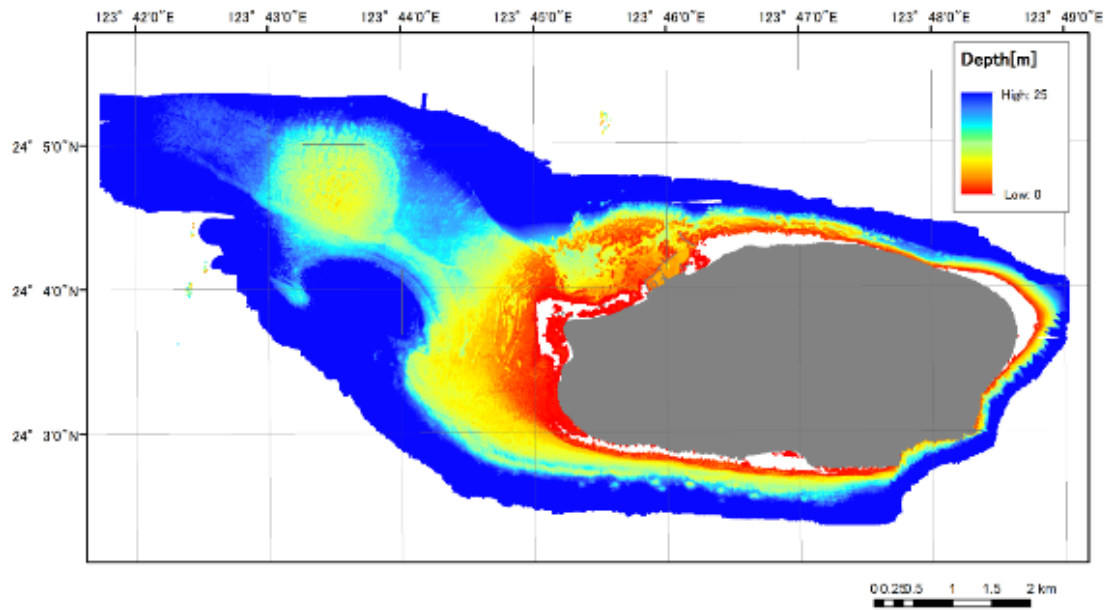


図 10.3 水路測量データ (波照間)

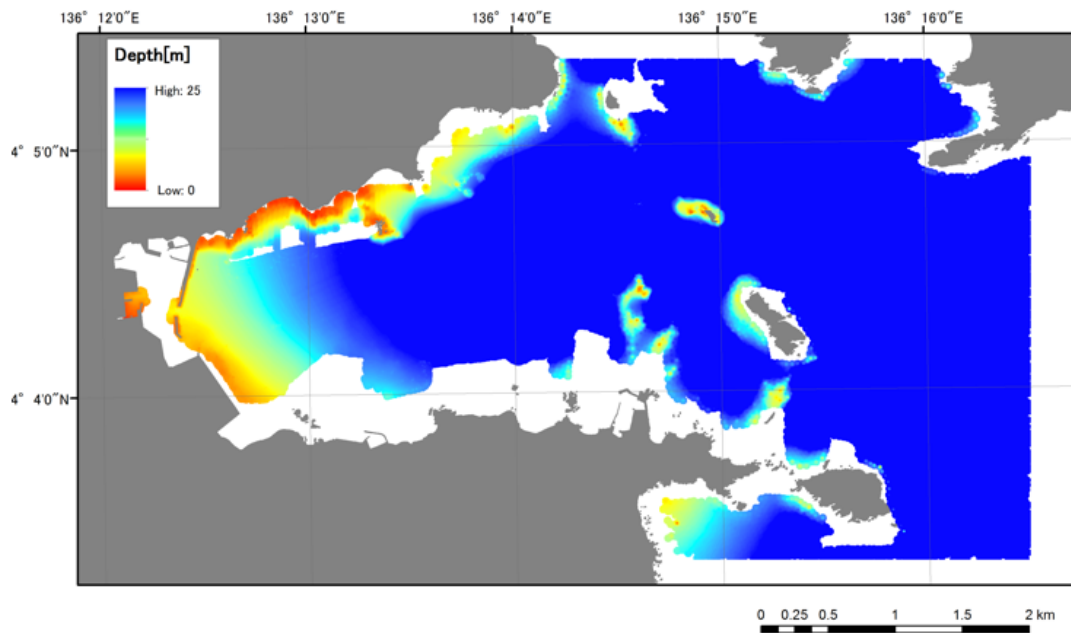


図 10.4 水路測量データ (尾鷲)

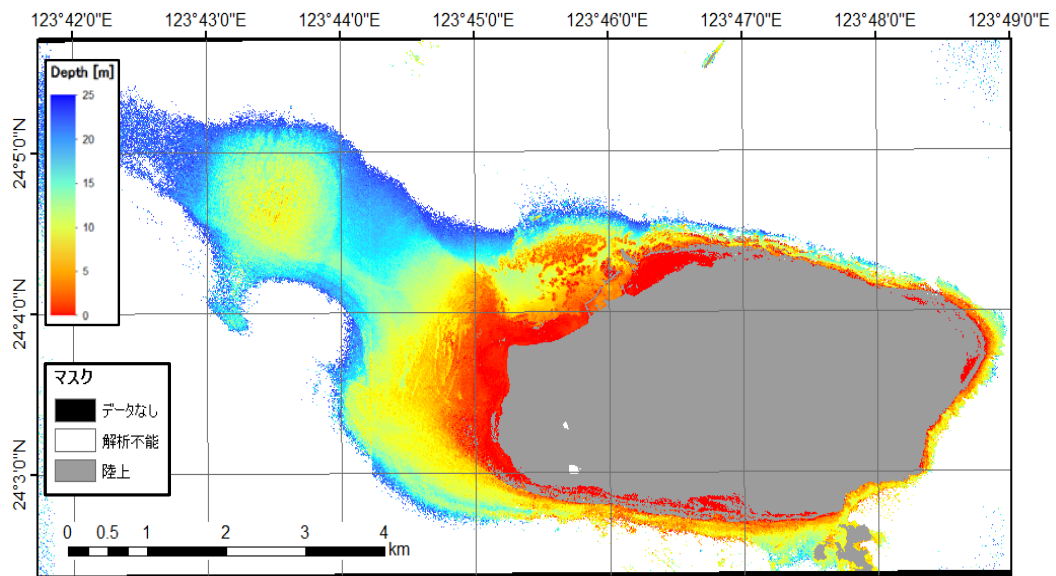


図 10.5 SDB (波照間)

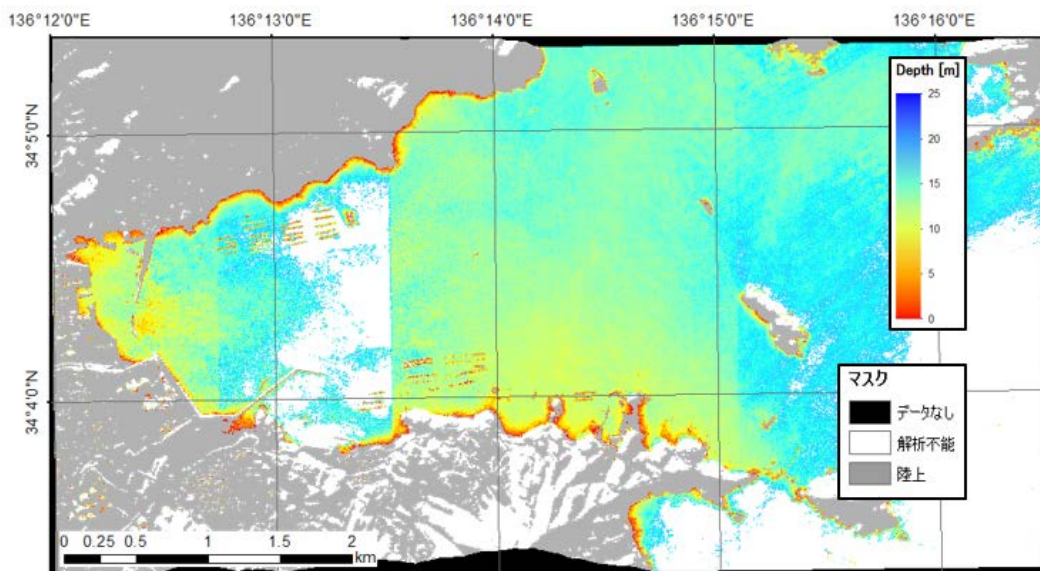


図 10.6 SDB (尾鷲)

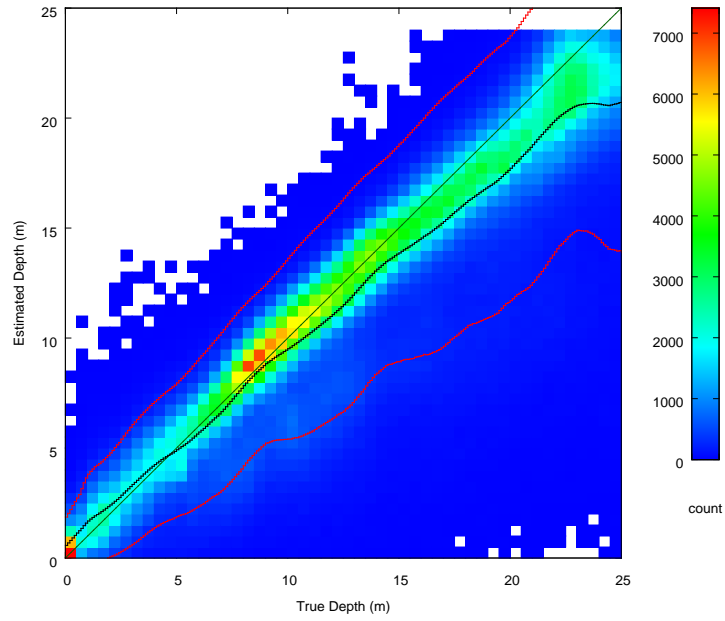


図 10.7 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (波照間)

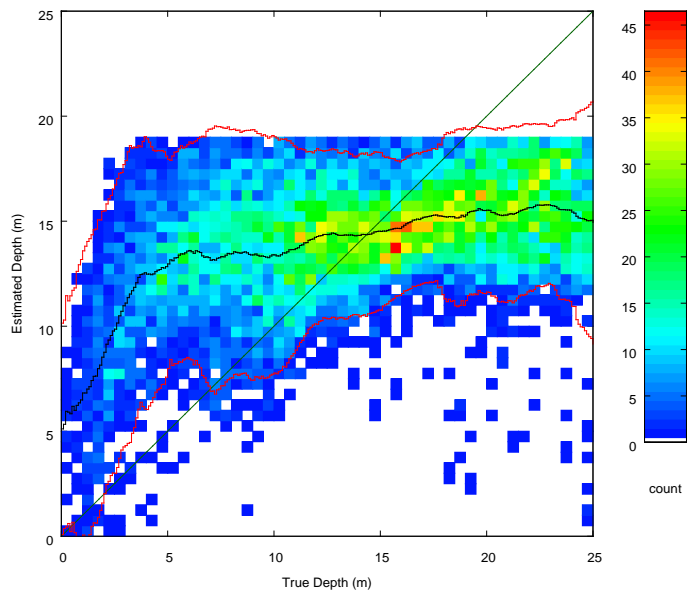


図 10.8 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (尾鷲)

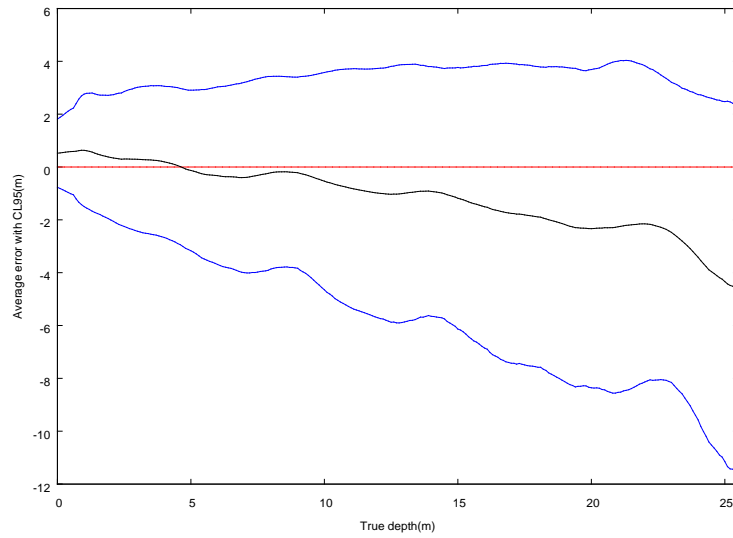


図 10.9 誤差グラフ (波照間)

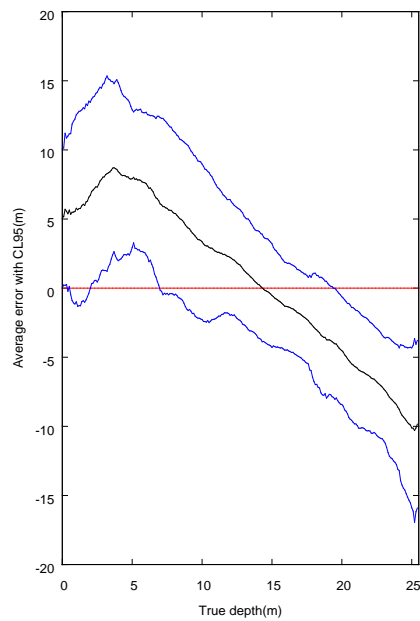


図 10.10 誤差グラフ (尾鷲)

### 10.1.2 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10.11～10.13に示す。また解析および評価に使用した水路測量データの分布を図10.14に示す。衛星画像と水路測量データを比較すると、図10.11と図10.12では海面に波があることが推察され、図10.14と比較しても海底地形

の情報がほとんど得られていないと考えられる。一方、図 10.12 および図 10.13 では、図 10.14 で非常に浅く示されている地形を捉えているようにも見え、水深推定をできる可能性がある。

各時期の衛星画像に対応する SDB を図 10.15～図 10.17 に示す。どのケースも水深 5m まで解析しているが、分布は大きく異なる。図 10.18～図 10.20 に SDB と水路測量の散布図を、図 10.21～図 10.23 に誤差グラフをそれぞれ示したが、どの結果も水深約 4 m 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 4 m 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。

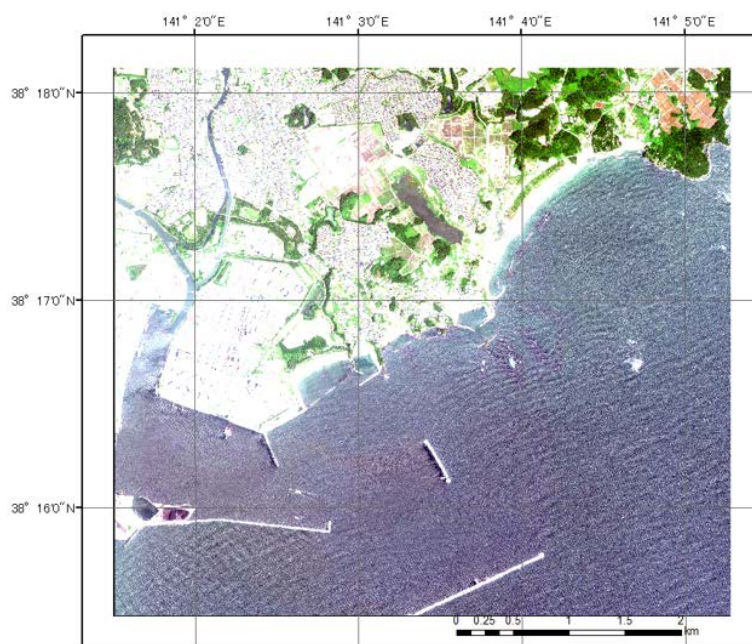


図 10.11 衛星画像（仙台、2012/7/19）

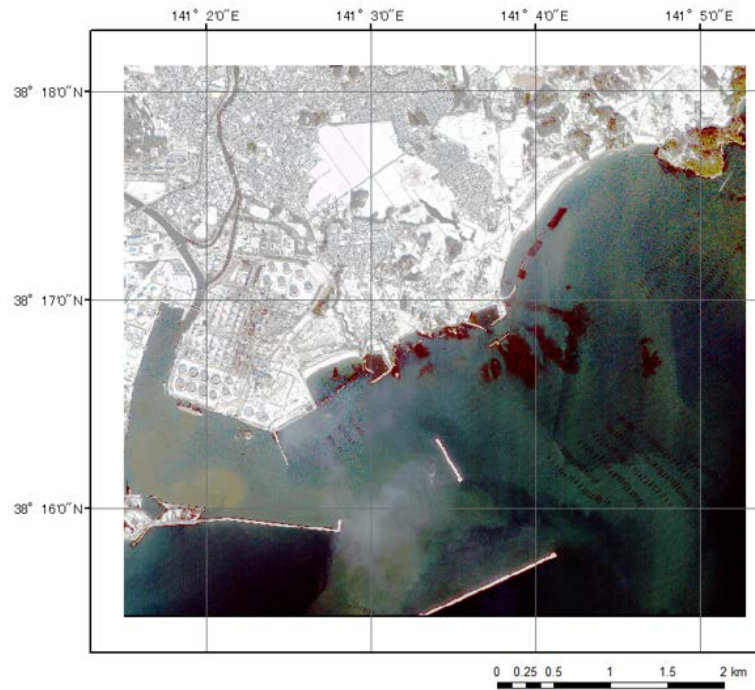


图 10.12 衛星画像 (仙台、2013/1/18)

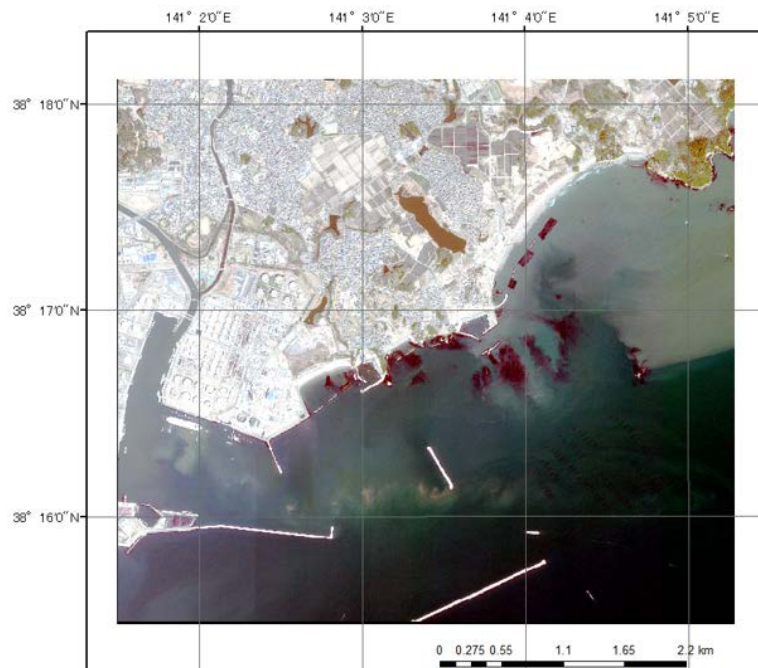


图 10.13 衛星画像 (仙台、2014/4/2)



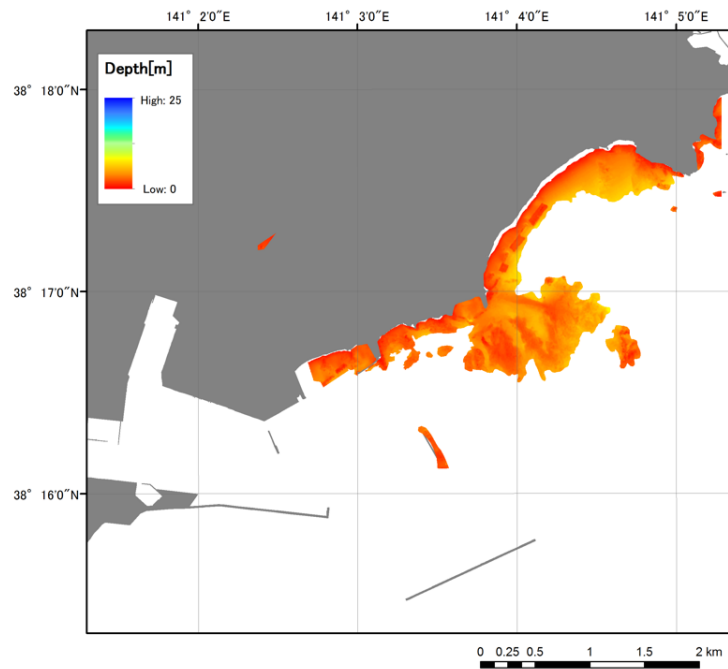


図 10.14 水路測量データ (仙台)

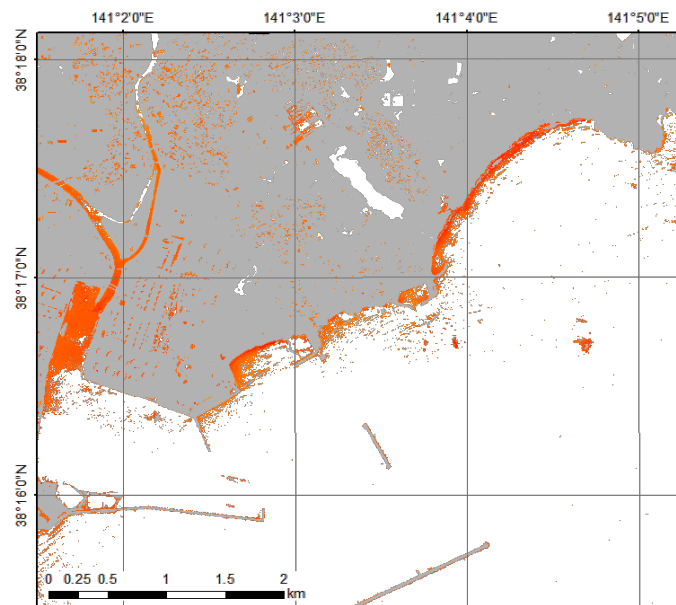


図 10.15 SDB (仙台、2012/7/19)

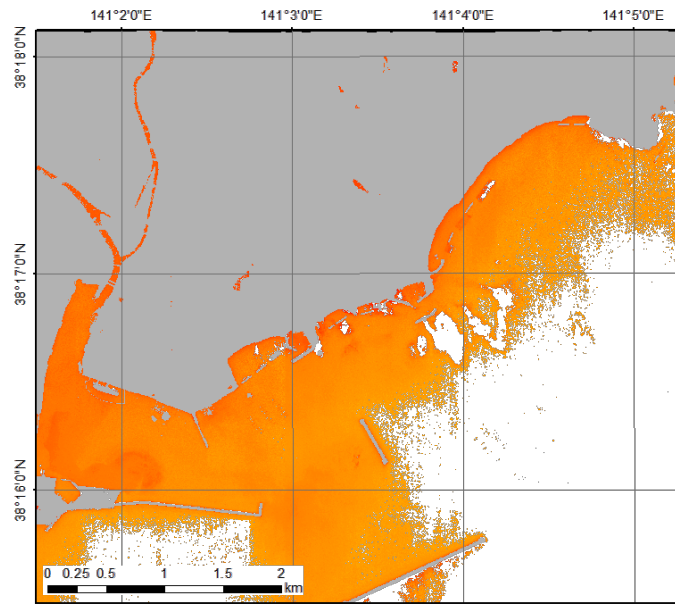


図 10.16 SDB (仙台、2013/1/18)

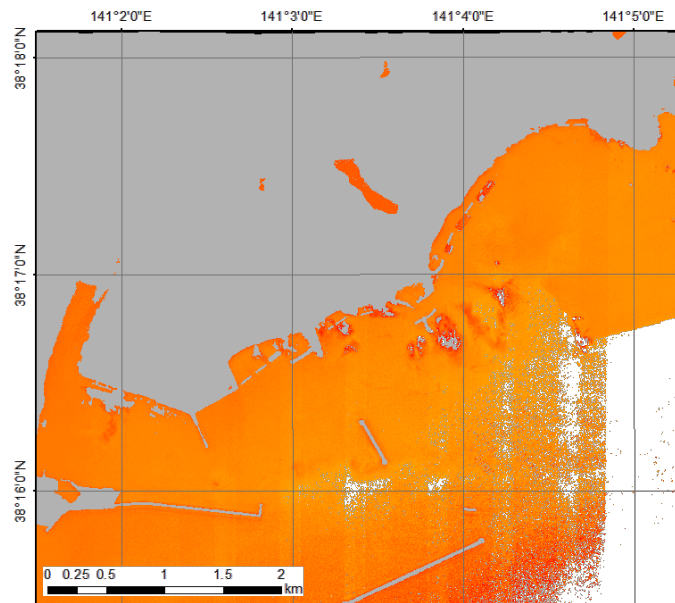


図 10.17 SDB (仙台、2014/4/2)

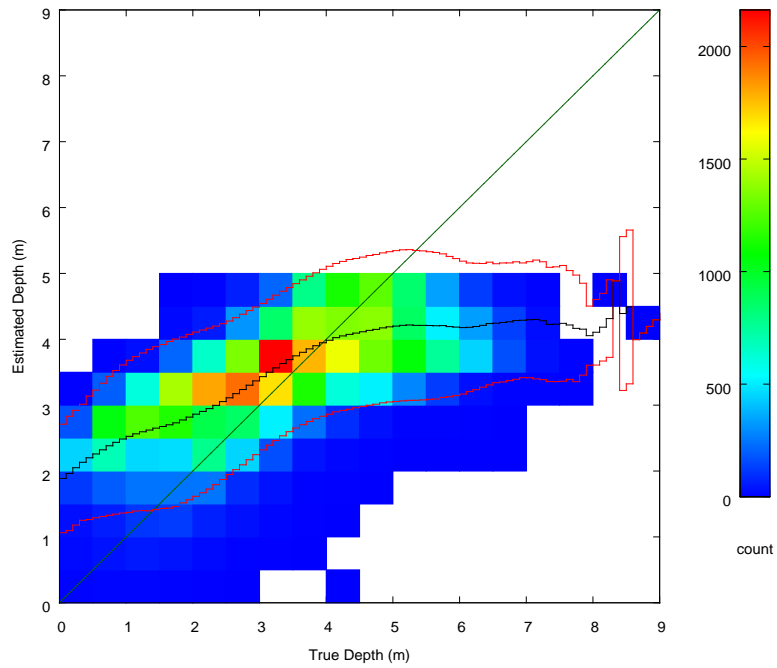


図 10.18 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2012/7/19)

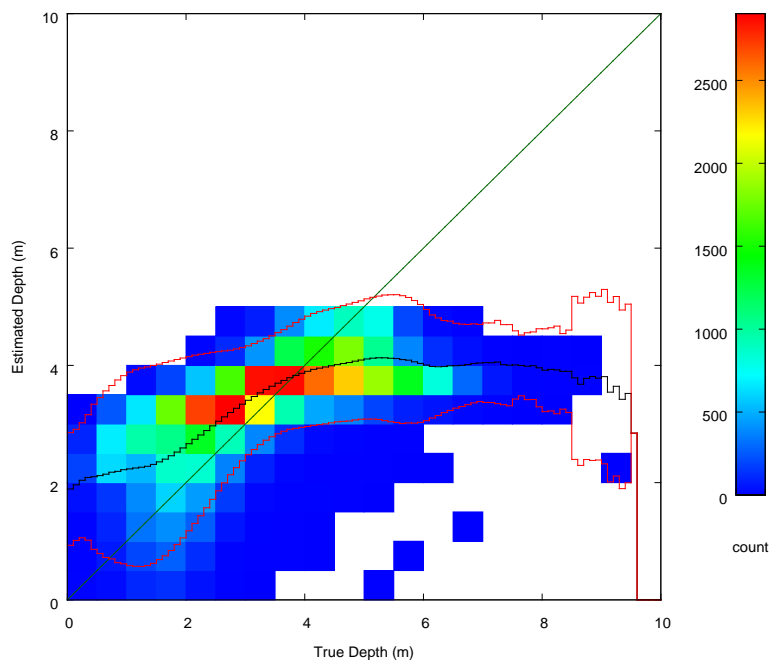


図 10.19 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2013/1/18)

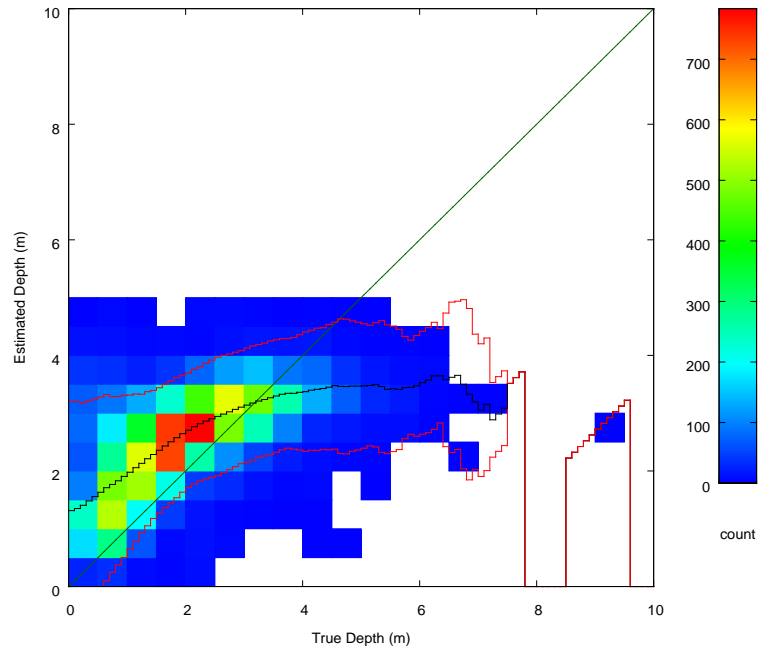


図 10.20 SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図 (仙台、2014/4/2)

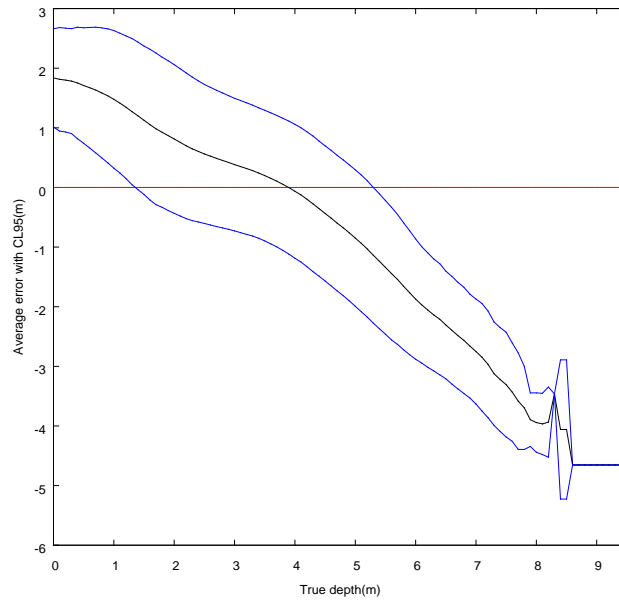


図 10.21 誤差グラフ (仙台、2012/7/19)

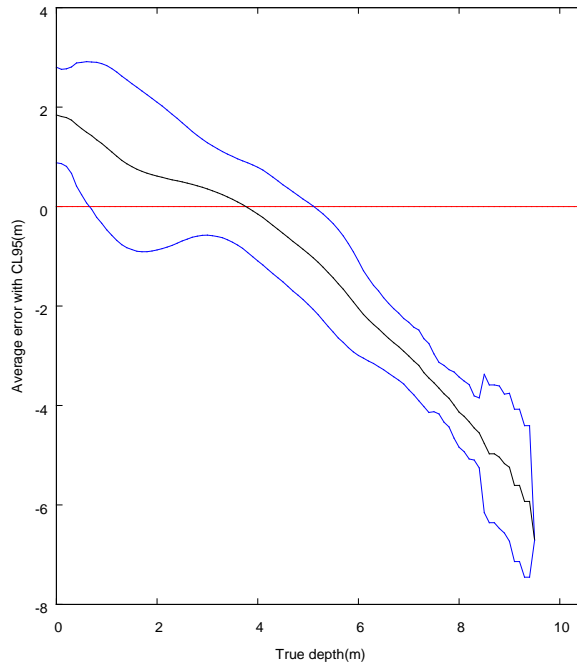


図 10.22 誤差グラフ (仙台、2013/1/18)

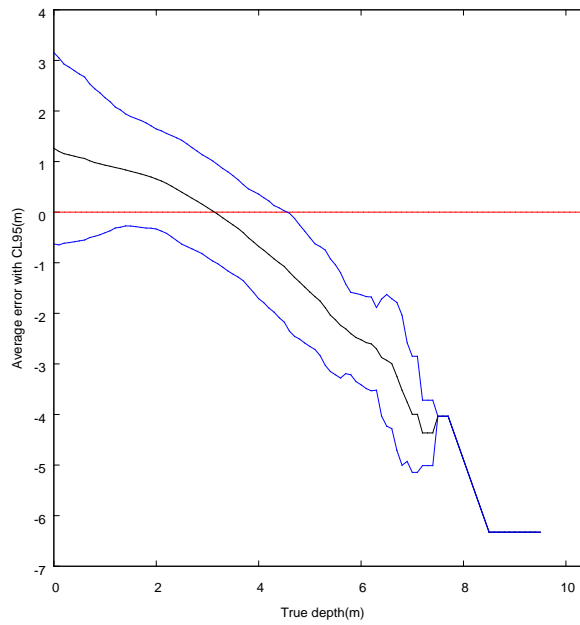


図 10.23 誤差グラフ (仙台、2014/4/2)

## 10.2 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。

### 10.2.1 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。

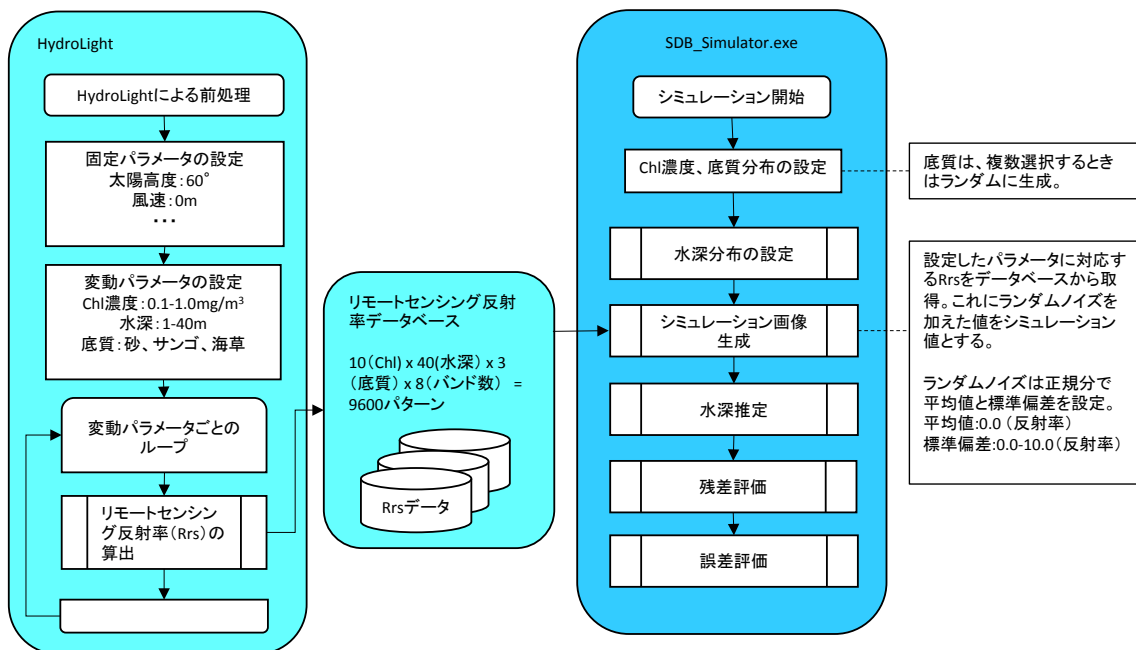


図 10.24 シミュレーションフロー

### 10.2.2 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 Rrs 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 Rrs 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  $0.1-1.0\text{mg/m}^3$  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（10×40×3×8）通りのRrs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10.25）。

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 IA、JWT IBと分けられるがSimonot and Le Truet（1986）によると日本近海はJWT IB～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 IB～JWT IIIのクロロフィル濃度は0.1～1.0 mg/m<sup>3</sup>に相当する。よって、ここではクロロフィル濃度を0.1-1.0mg/m<sup>3</sup>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、1-40m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。

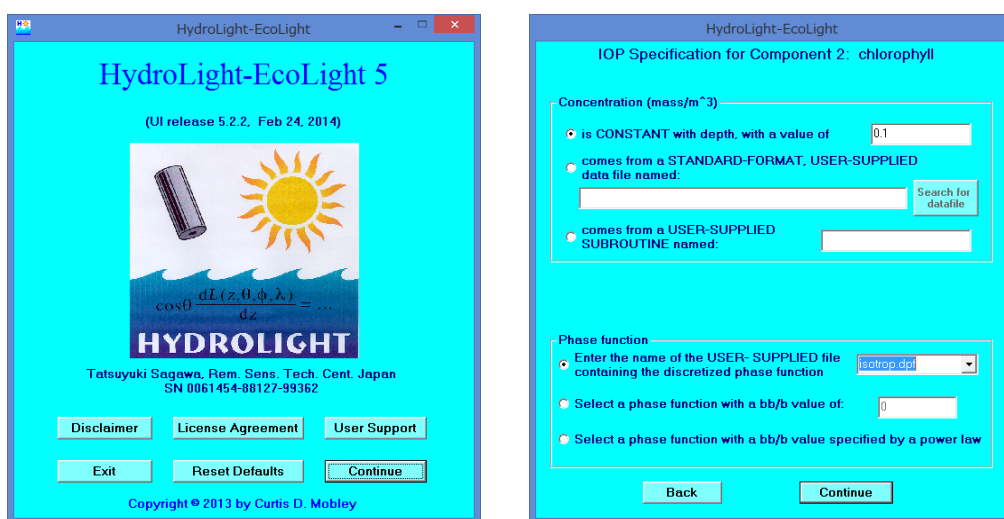


図 10.25 HydroLight のイメージ

### 10.2.3 SDB シミュレーション

SDB シミュレーションは、図 10.24 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 10.26 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 10.27、10.28 に示す。

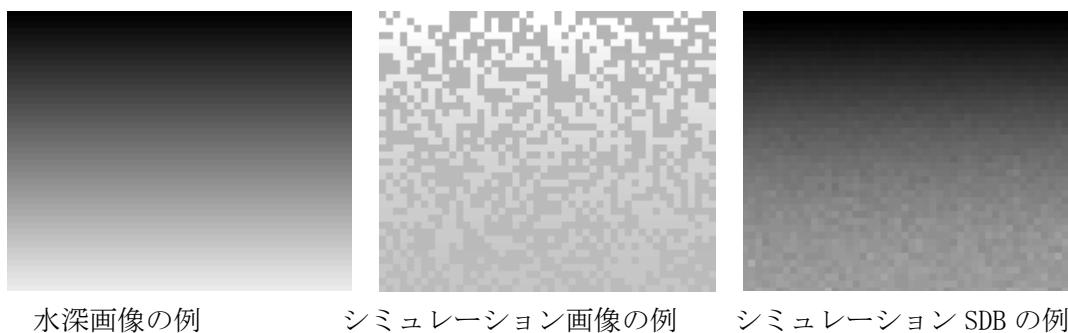


図 10.26 シミュレーション画像の例

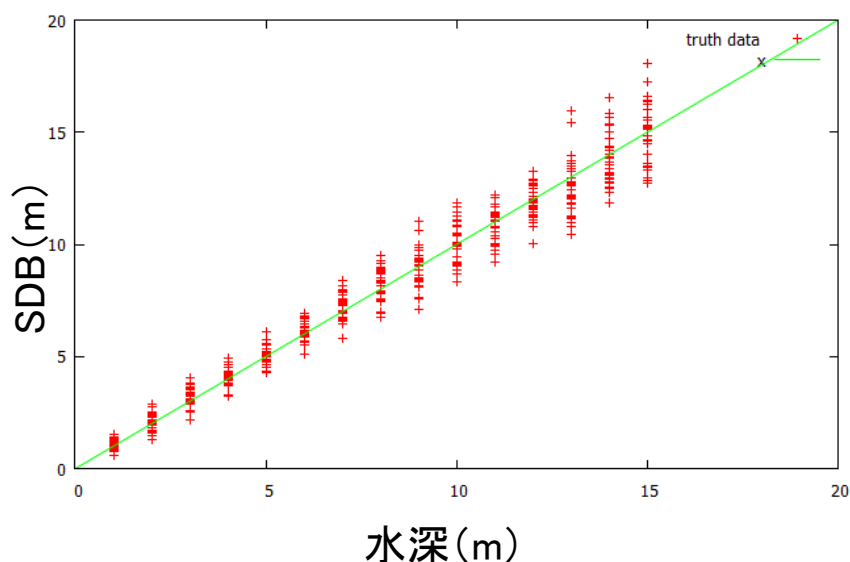


図 10.27 学習用水深とシミュレーション SDB の散布図の例



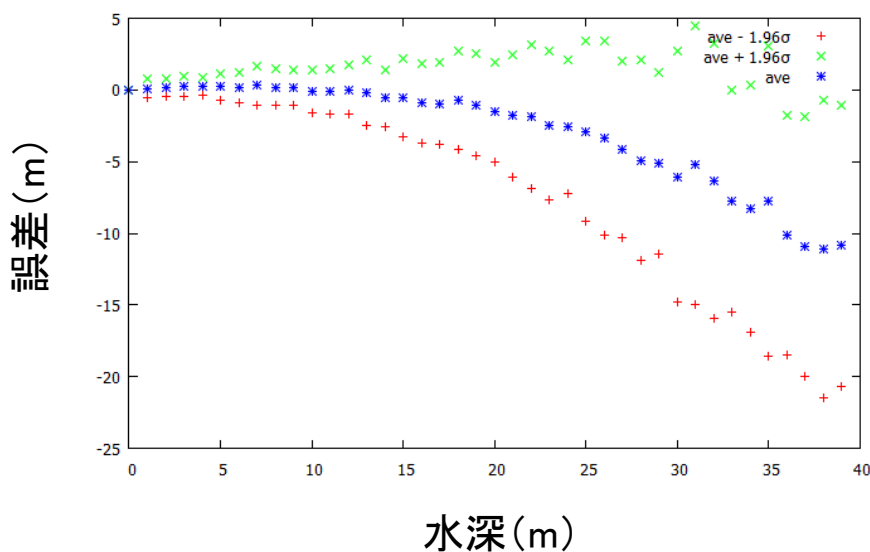


図 10.28 シミュレーション SDB の誤差グラフの例

#### 10.2.4 シミュレーション結果

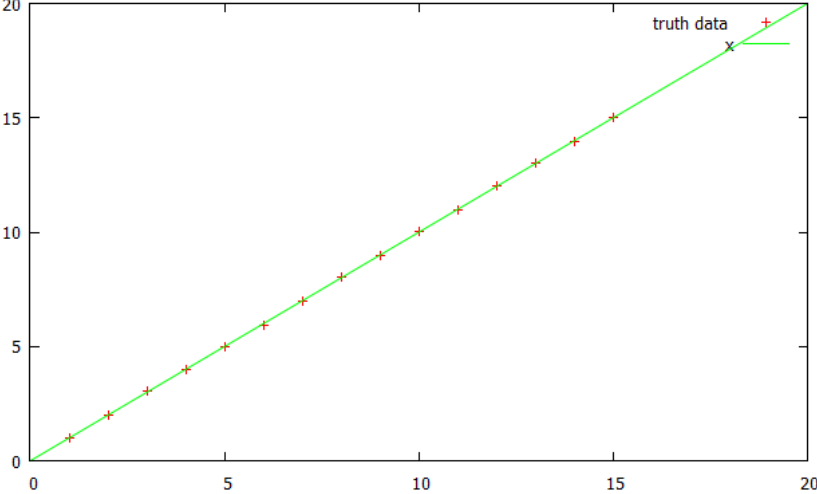
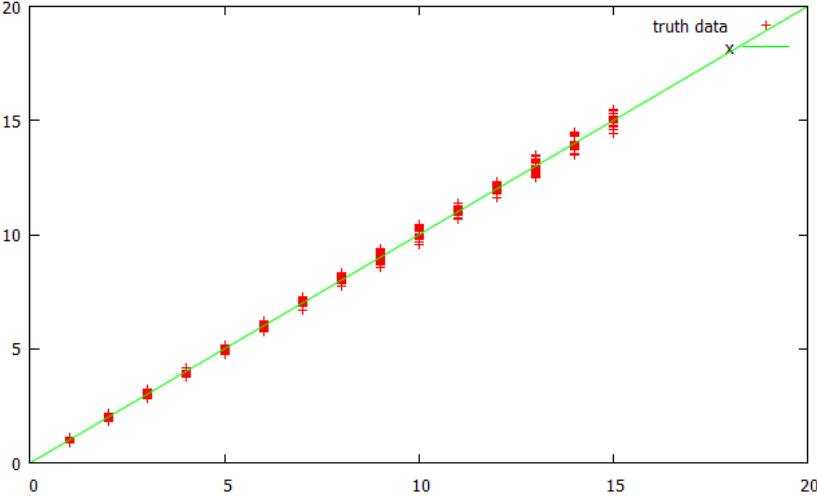
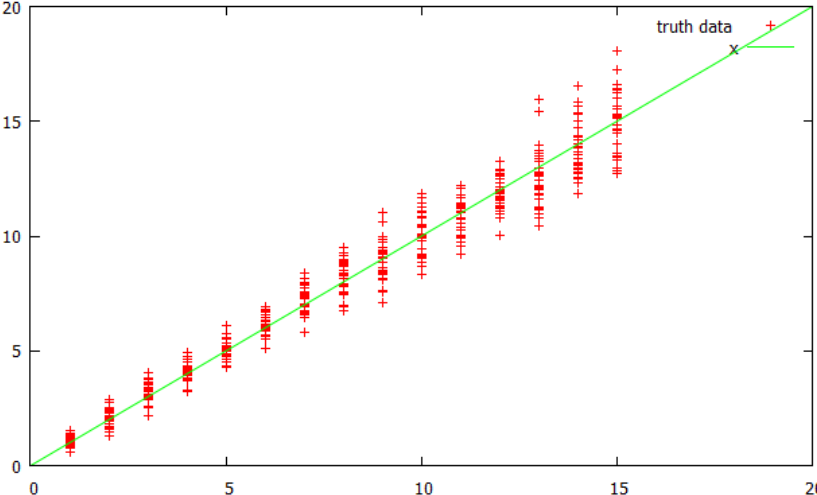
シミュレーションの結果を整理するため、各解析結果にコード名をつけた。解析コード名は「RrsB +底質のコード+C+クロロフィル濃度のコード+N+ノイズのコード」となっている。ここで、各コードの表す意味を表 10.1 に整理した。なお、底質については、砂とサンゴのように複数の場合、シミュレーションごとにランダムに発生させているため、データ数としてはほぼ同じ数だけ発生する。結果が多いため、ここでは代表的な結果について SDB と学習データの散布図を表 10.2 に、誤差グラフを表 10.3 にまとめた。

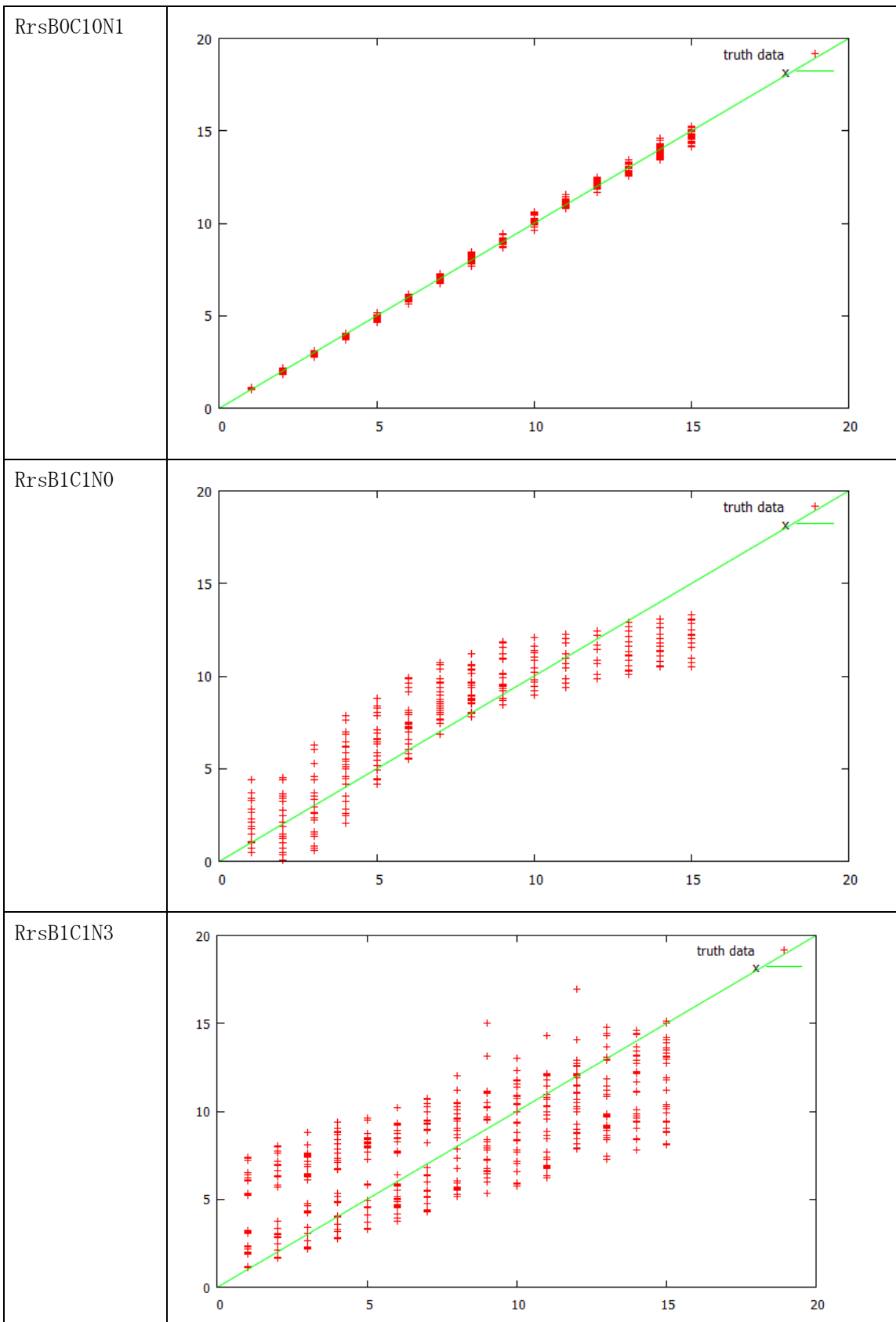
シミュレーションではクロロフィル量が  $0.1\text{mg/m}^3$  で底質が砂である条件の良い場合においても水深 20m を超えるあたりから誤差平均が負の値に大きくなる傾向にあった。誤差の 95%信頼区間の幅はセンサノイズの増大とともに水深に比例して大きくなった。底質の種類を増やした場合は誤差を増大させるが、その影響は複雑であり、誤差の大きさは必ずしも水深に比例しなかった。

表 10.1 解析コードの説明

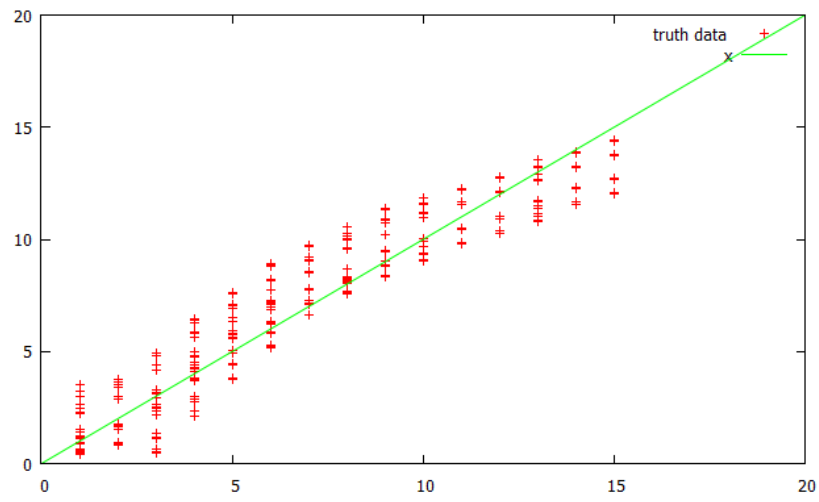
コードの種類	説明
底質のコード	0: 砂地、1: 砂とサンゴ、2: 砂と海草
クロロフィル濃度のコード	クロロフィル濃度 = コード $\times 0.1$ ( $\text{mg/m}^3$ )
ノイズのコード	ノイズの標準偏差 = コード $\times 0.0001$ (反射率)

表 10.2 SDB と学習データの散布図

解析コード	SDB と学習データの散布図
RrsB0C1N0	
RrsB0C1N1	
RrsB0C1N5	



RrsB2C1N0



RrsB2C1N3

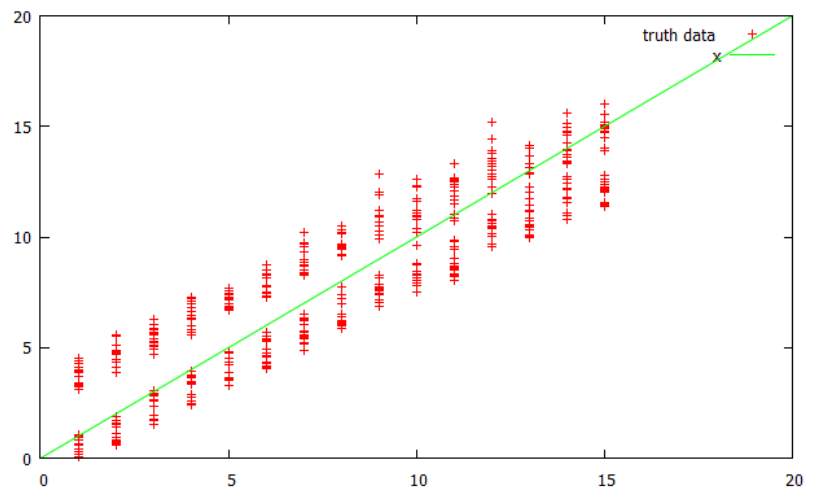
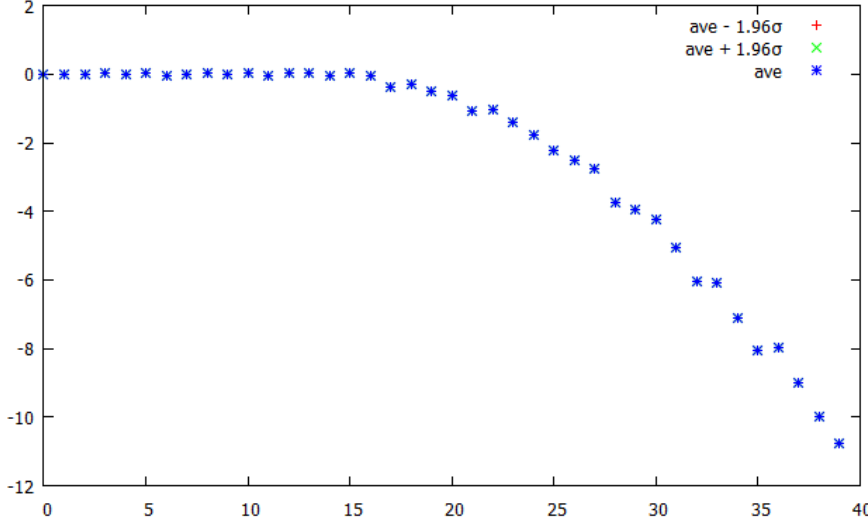
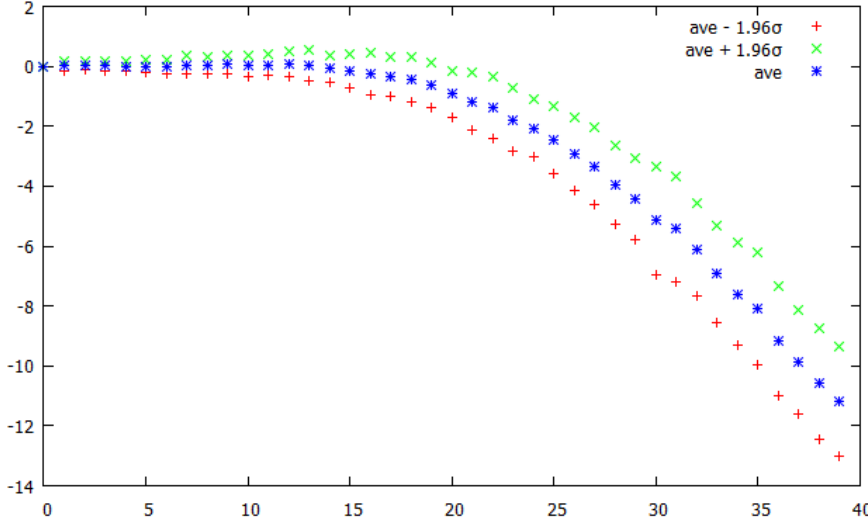
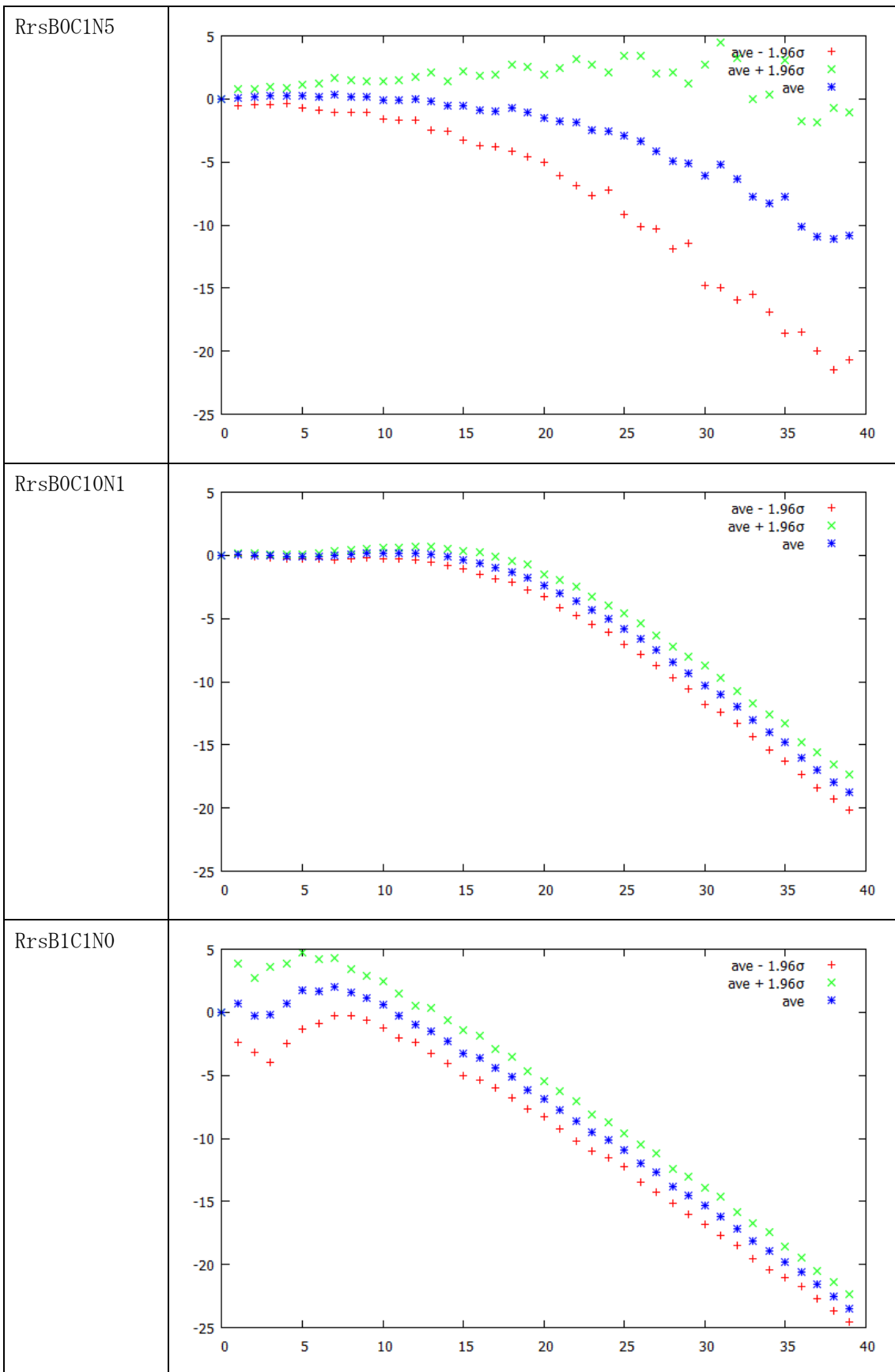
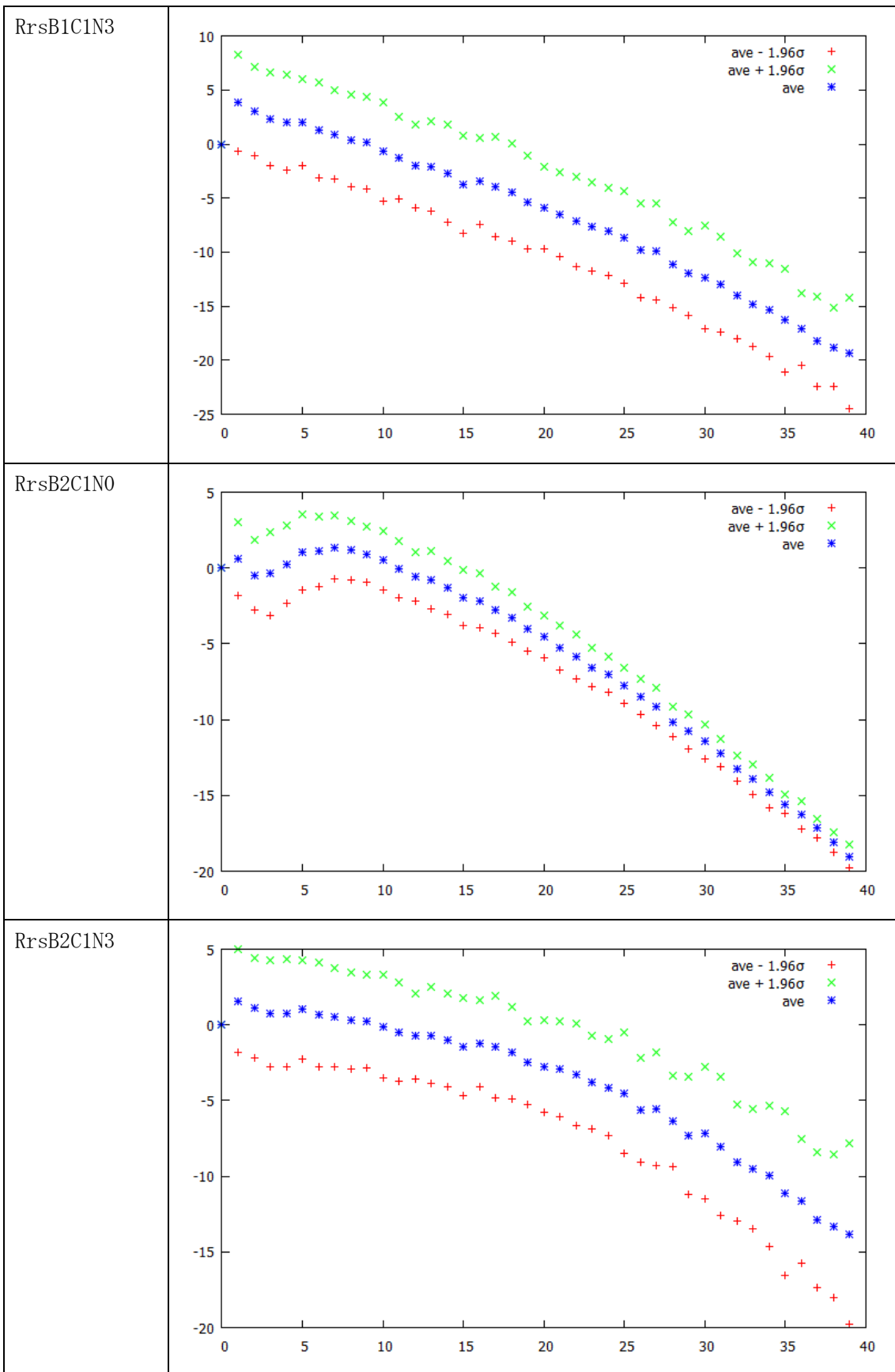


表 10.3 誤差グラフ

解析コード	SDB と学習データの散布図
RrsB0C1N0	 <p>The plot for RrsB0C1N0 shows a series of data points starting at (0, 0) and decreasing to approximately (38, -11.5). The points are marked with blue asterisks (*). The legend indicates three series: 'ave - 1.96σ' (red plus signs), 'ave + 1.96σ' (green crosses), and 'ave' (blue asterisks). Only the 'ave' series is visible in this plot.</p>
RrsB0C1N1	 <p>The plot for RrsB0C1N1 shows a series of data points starting at (0, 0) and decreasing to approximately (38, -13.5). The points are marked with red plus signs (+), green crosses (x), and blue asterisks (*). The legend indicates three series: 'ave - 1.96σ' (red plus signs), 'ave + 1.96σ' (green crosses), and 'ave' (blue asterisks). All three series are visible and follow a similar downward trend.</p>





### 10.3 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、好条件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 11 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。

### 10.4 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11章 様々な海域における SDB の精度検証

本章では、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結果を示す。

### 11.1 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 11.1 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 11.2、11.3 に示す。

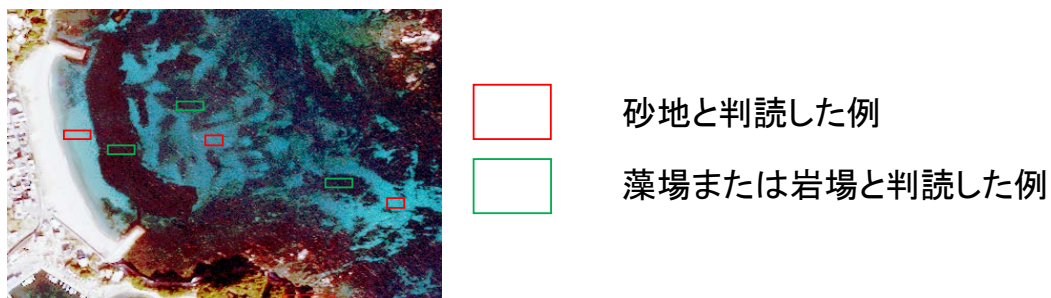


図 11.1 底質の目視判読の例

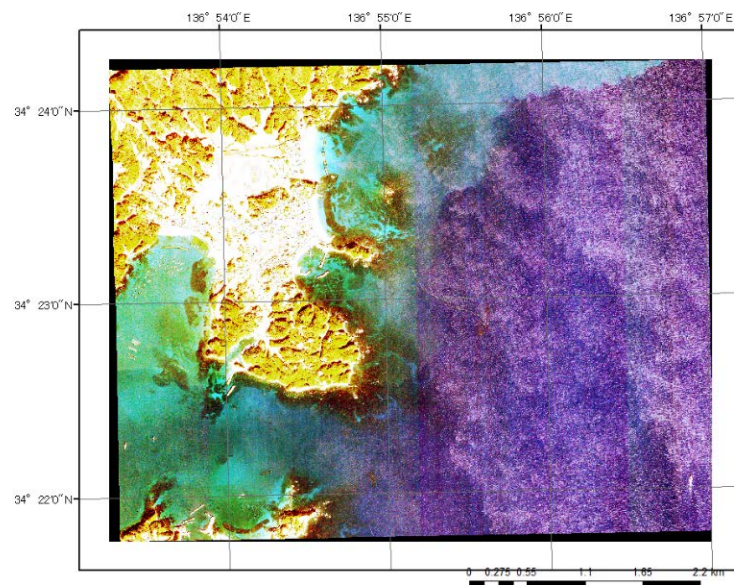


図 11.2 相差漁港周辺の衛星画像（コントラストを強調）

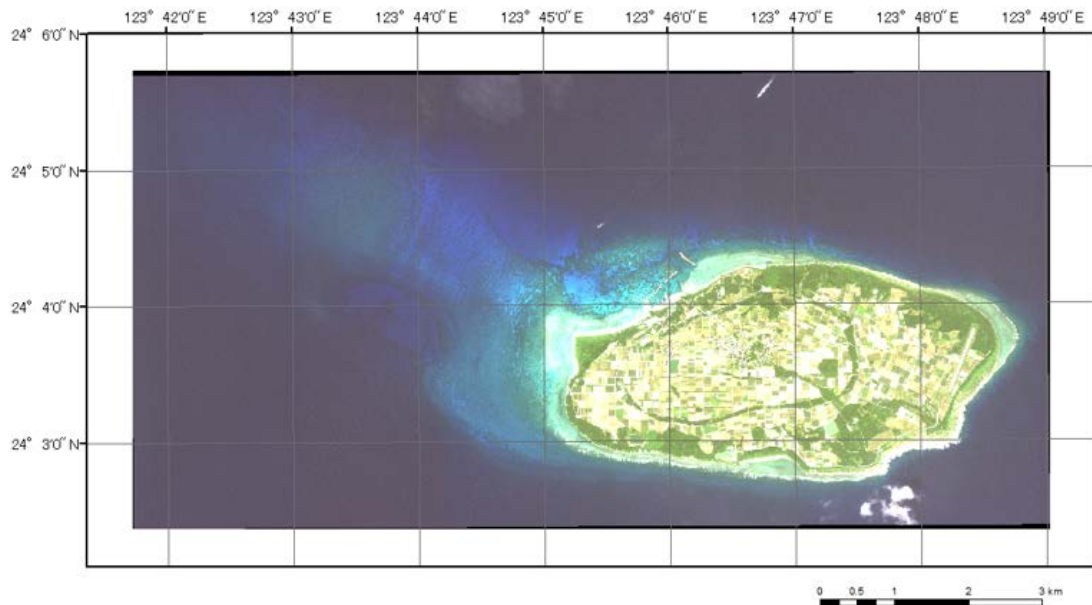


図 11.3 波照間の画像（コントラストを強調）

#### 11.1.1 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11.4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11.5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に実際より深く推定している可能性がある。

図11.6、11.7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11.8、11.9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。

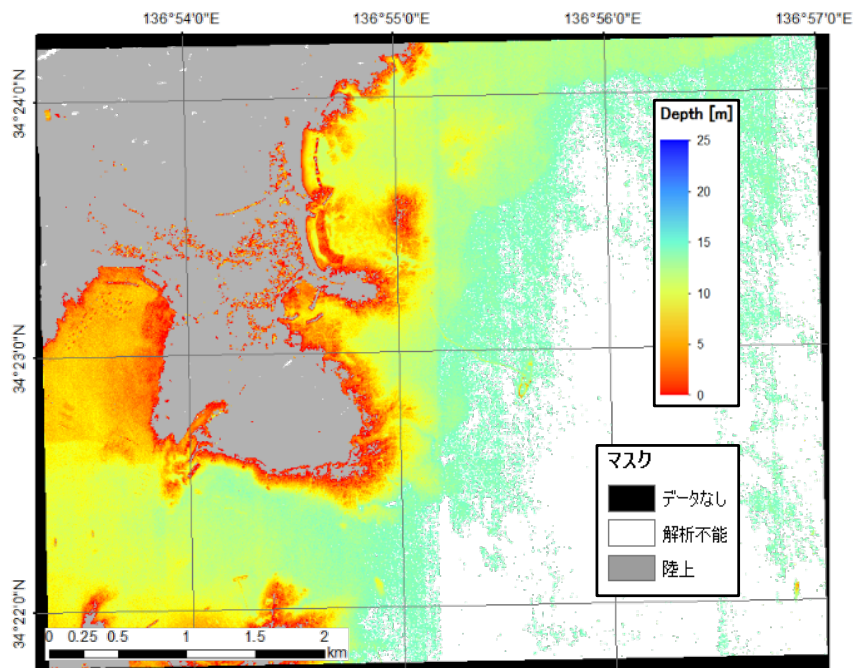


図 11.4 相差漁港周辺の SDB (学習データの底質がランダム)

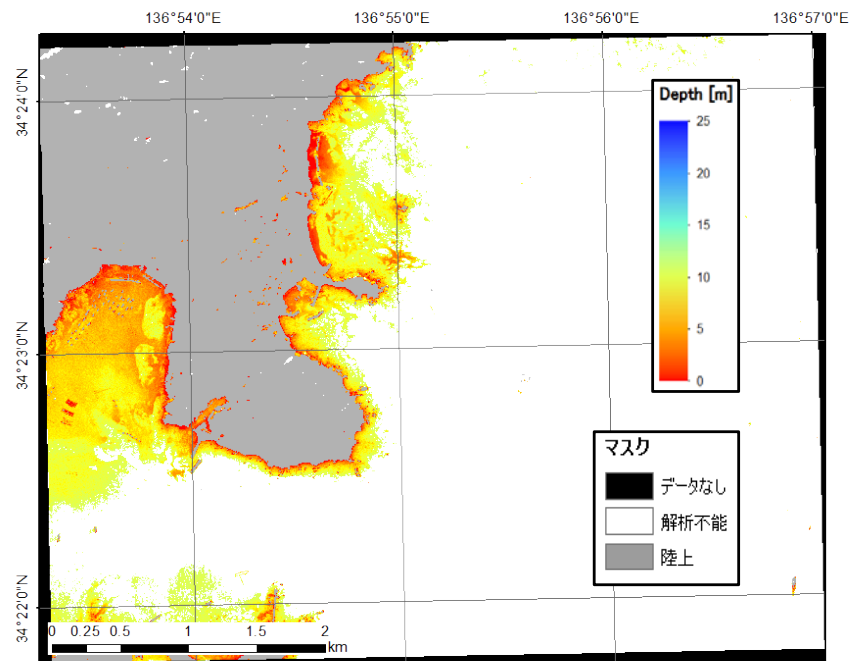


図 11.5 相差漁港周辺の SDB (学習データの底質が砂)

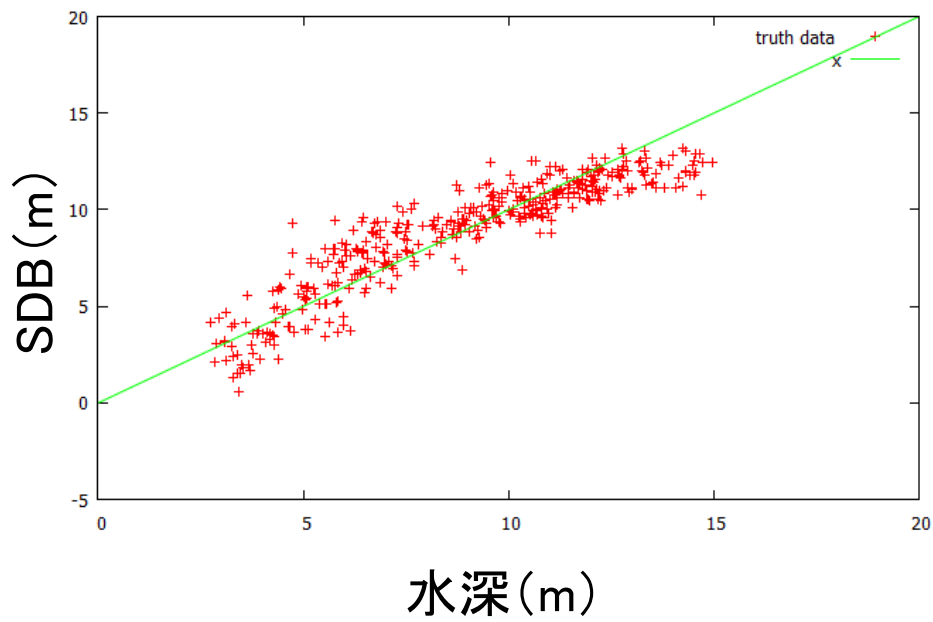


図 11.6 相差漁港周辺の SDB と学習用水深データの散布図  
(学習データの底質がランダム)

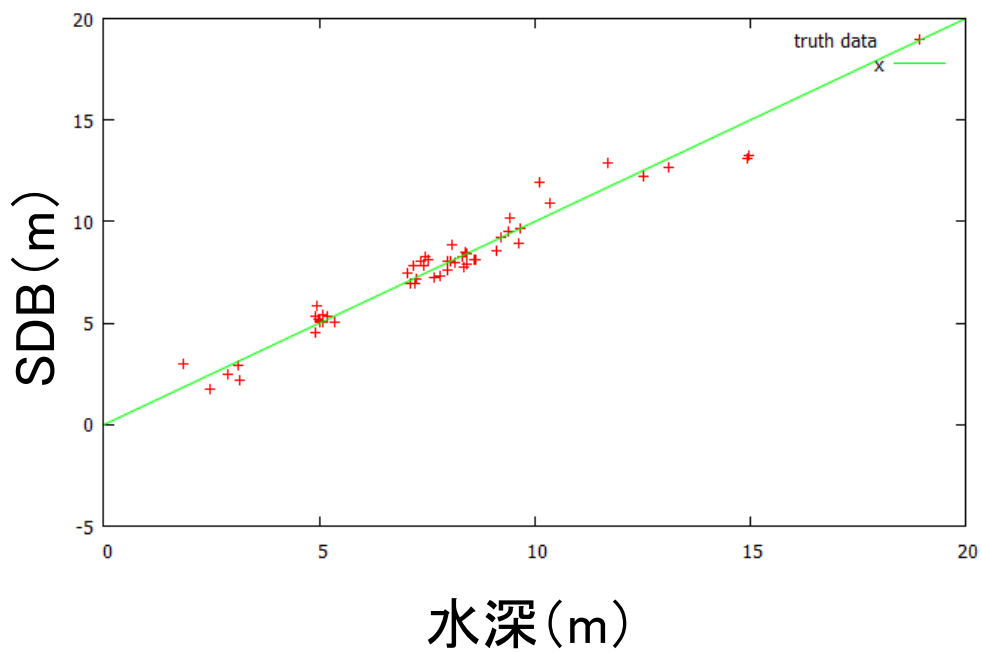


図 11.7 相差漁港周辺の SDB と学習用水深データの散布図  
(学習データの底質が砂)

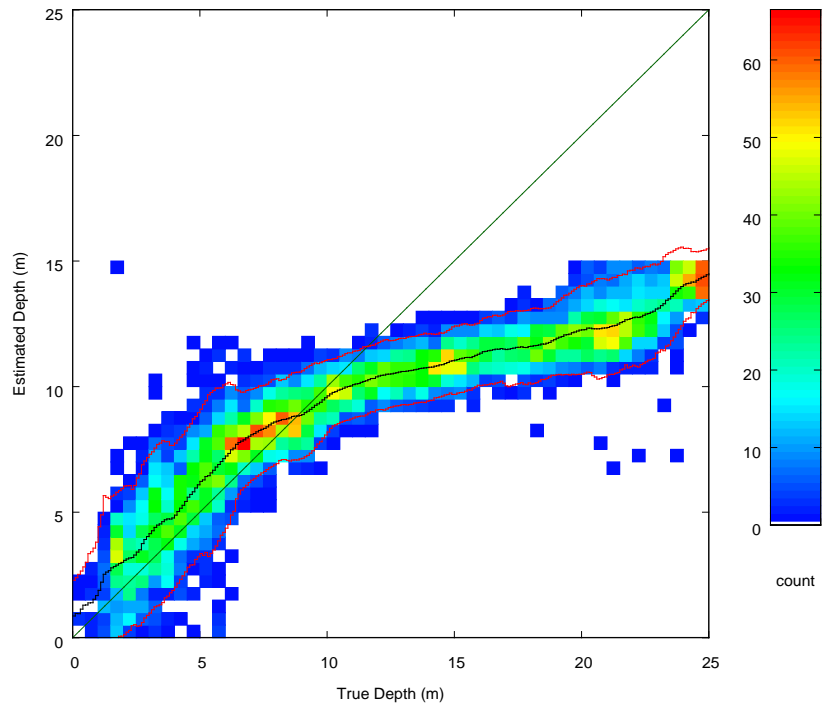


図 11.8 相差漁港周辺の SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図  
(学習データの底質がランダム)

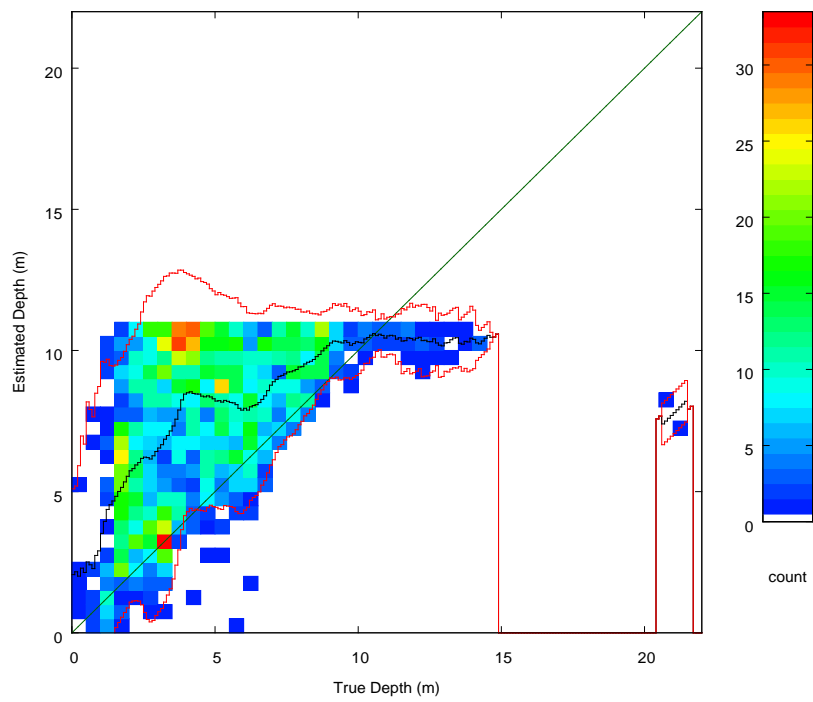


図 11.9 相差漁港周辺の SDB と評価用水深データのヒストグラム散布図  
(学習データの底質が砂)

### 11.1.2 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 11.10 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 11.11 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 11.12、11.13 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 11.14、11.15 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。

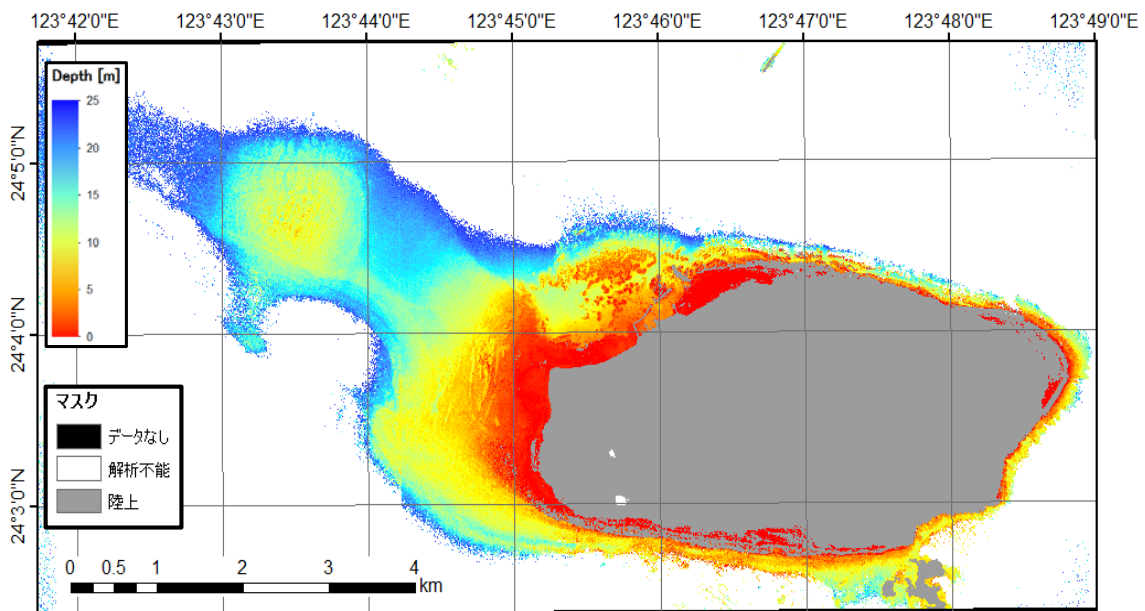


図 11.10 波照間の SDB  
(学習データの底質がランダム)

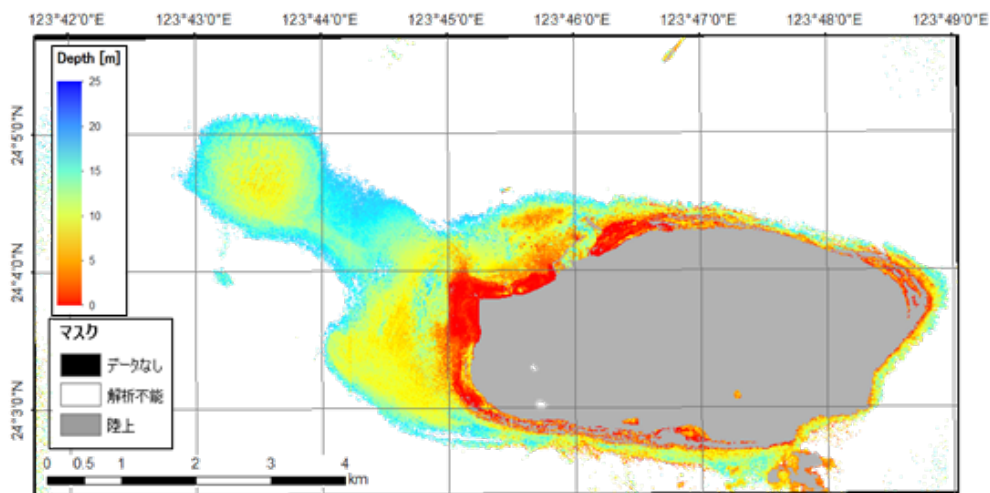


図 11.11 波照間のSDB  
(学習データの底質が砂)

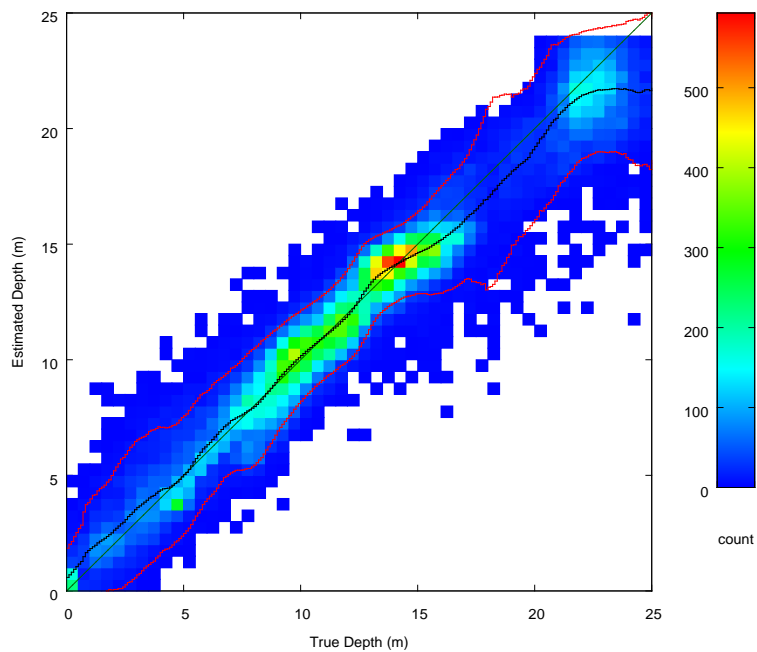


図 11.12 SDB と学習用水深データのヒストグラム散布図  
(学習データの底質がランダム)

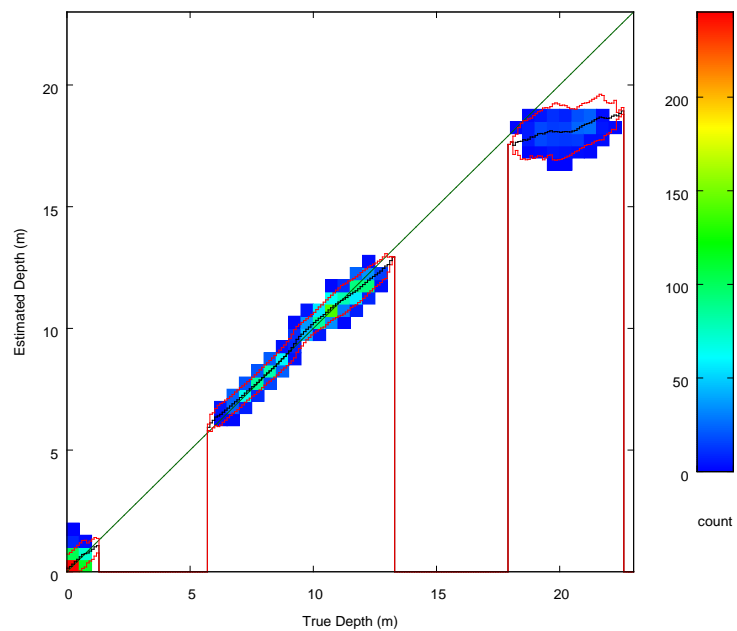


図 11.13 SDB と学習用水深データのヒストグラム散布図  
(学習データの底質が砂)

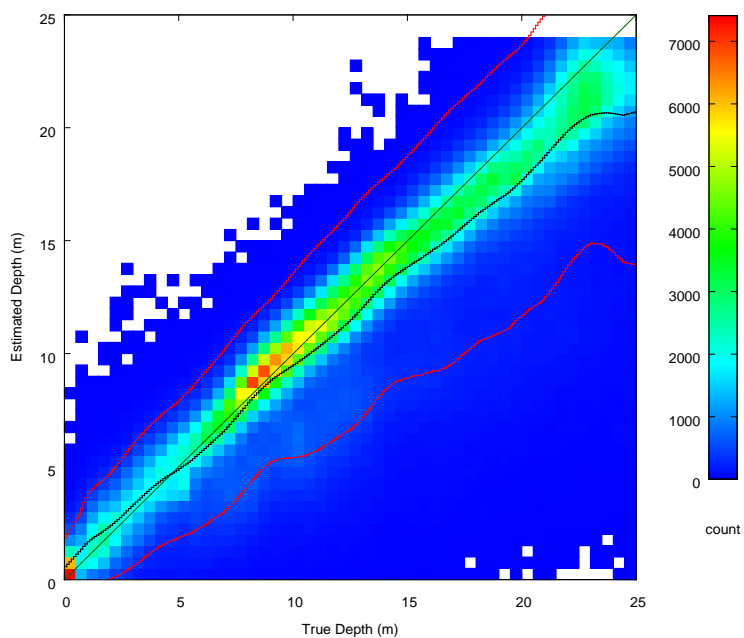


図 11.14 SDB と評価用水深データのヒストグラム図  
(学習データの底質がランダム)



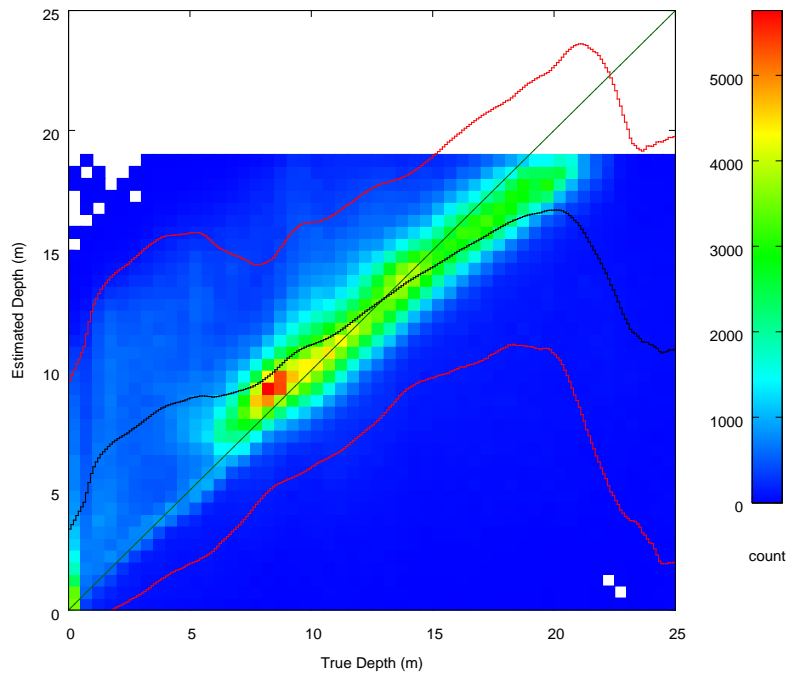


図 11.15 SDB と評価用水深データのヒストグラム図  
(学習データの底質が砂)

## 11.2 透明度の影響調査

図 11.16 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、(1) 透明度の低いエリアのデータのみ使用した場合、(2) 透明度の高いエリアのデータのみ使用した場合、(3) 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。

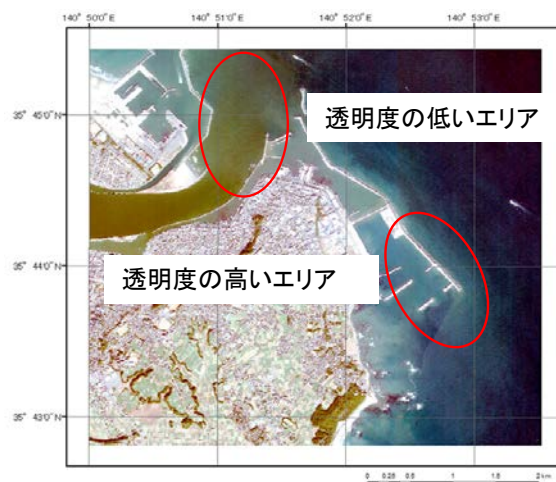


図 11.16 銚子沖の衛星画像

図に (1) - (3) 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。

(1) - (3) 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 11.20 - 11.22 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 11.23 - 11.25 にそれぞれ示す。

水深 6m 以下の誤差に着目した場合、(1) と (3) で似たようなデータ分布をしており、(2) 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あ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。

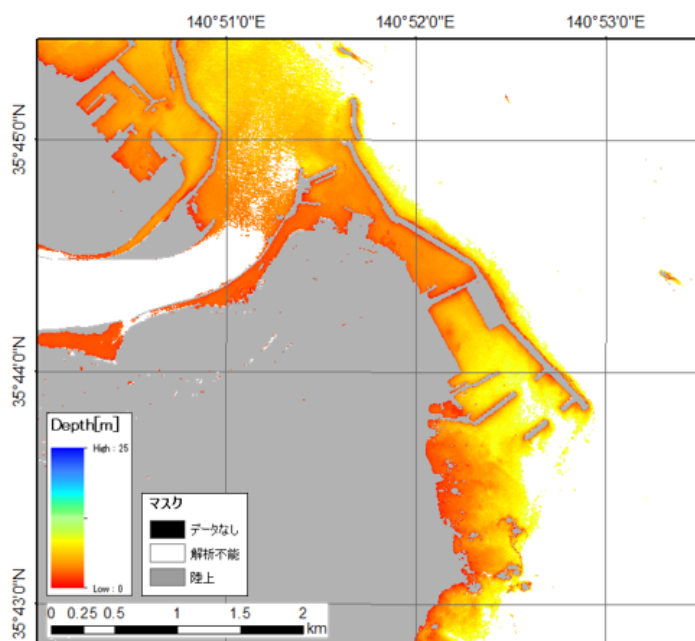


図 11.17 (1) 透明度の低いエリアのデータのみ使用した場合の SDB

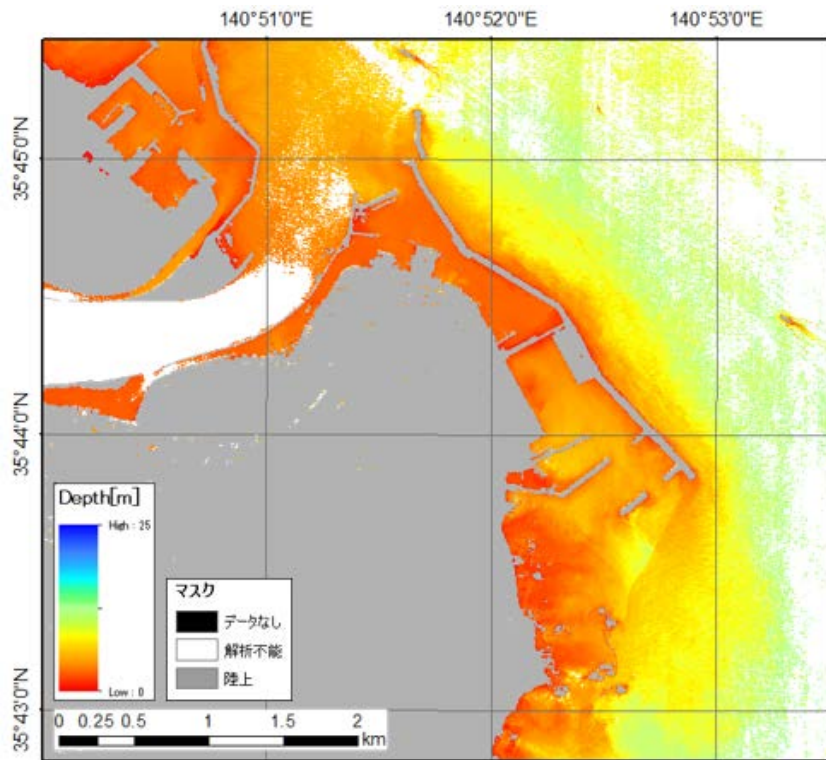


図 11.18 (2) 透明度の高いエリアのデータのみ使用した場合の SDB

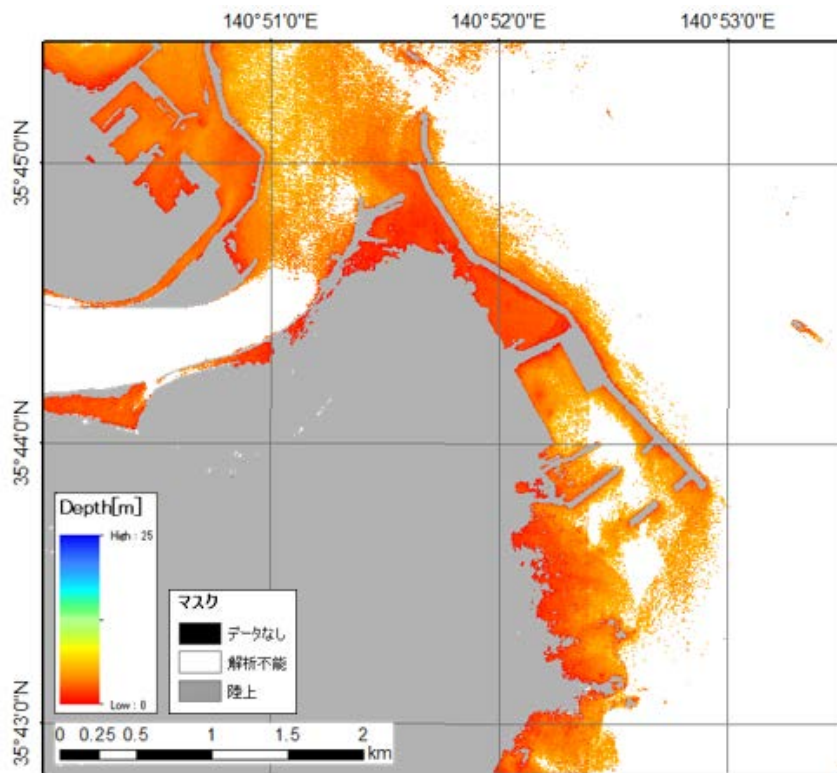


図 11.19 (3) 両方のエリアのデータを使用した場合の SDB

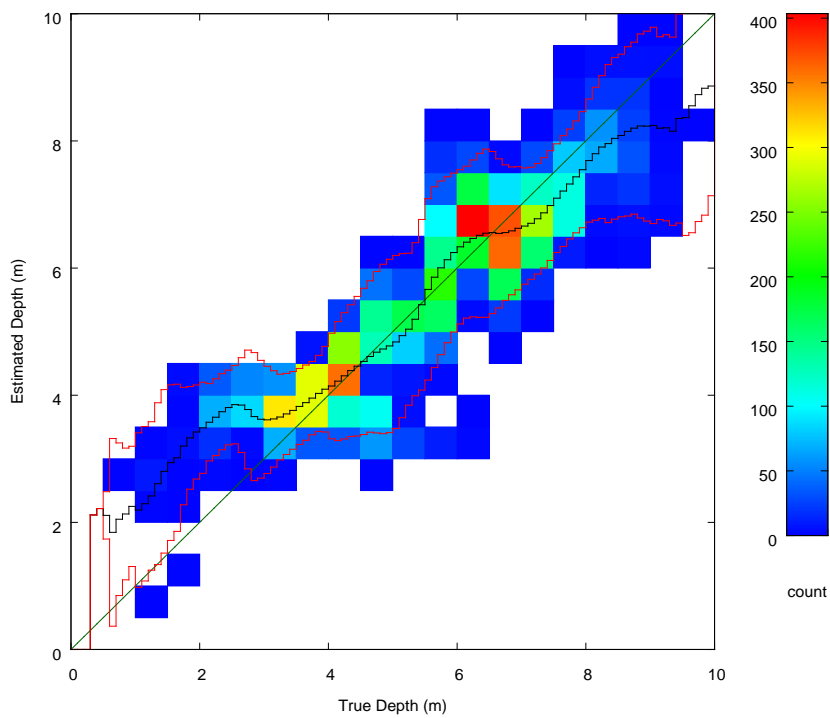


図 11.20 (1) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

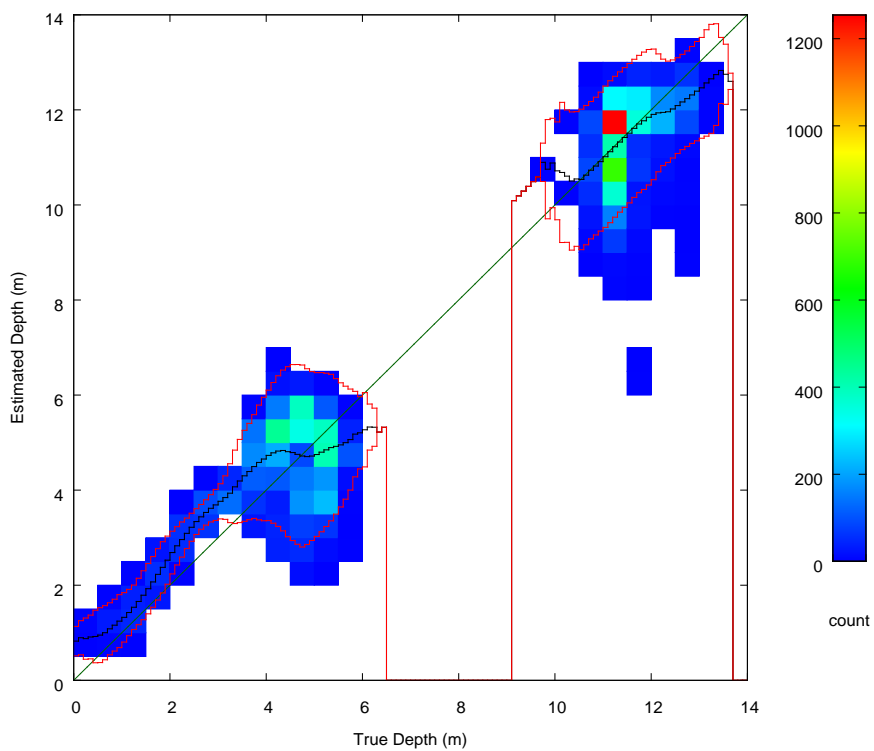


図 11.21 (2) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

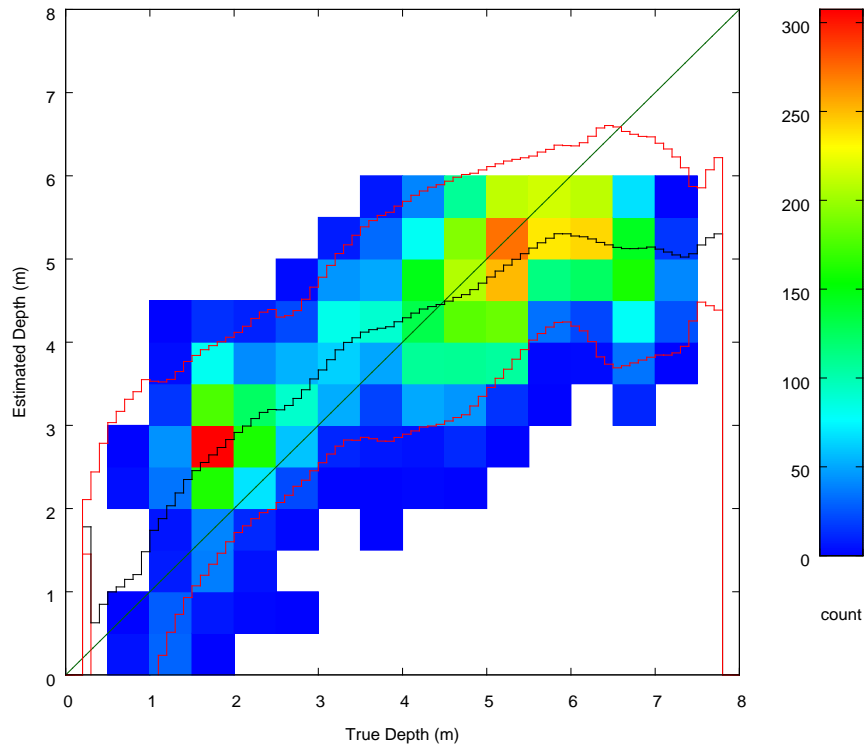


図 11.22 (3) の SDB と水路測量データの散布図 (学習データ)

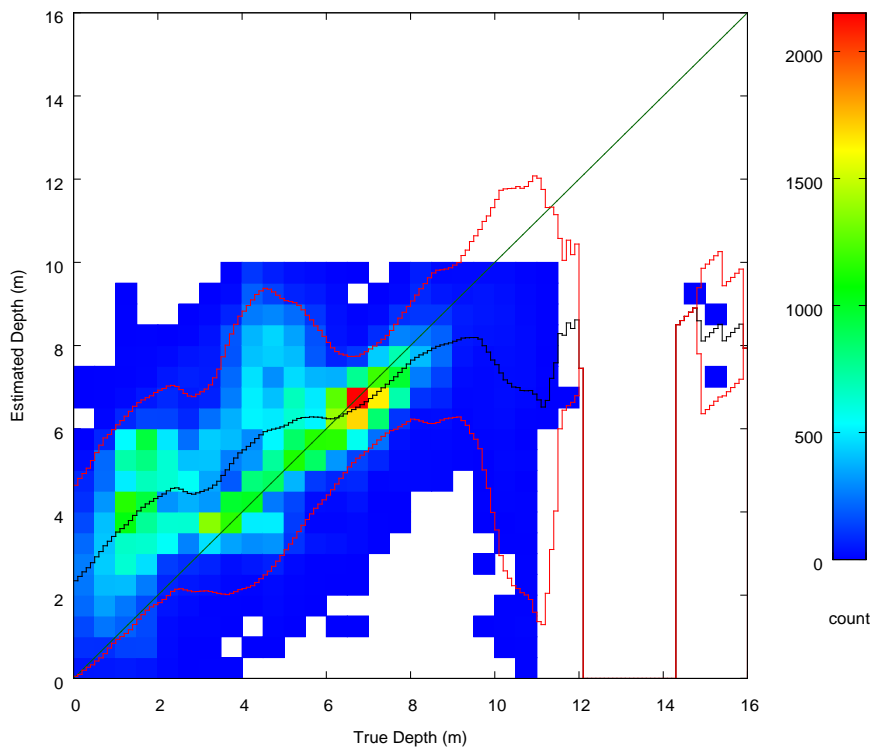


図 11.23 (1) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

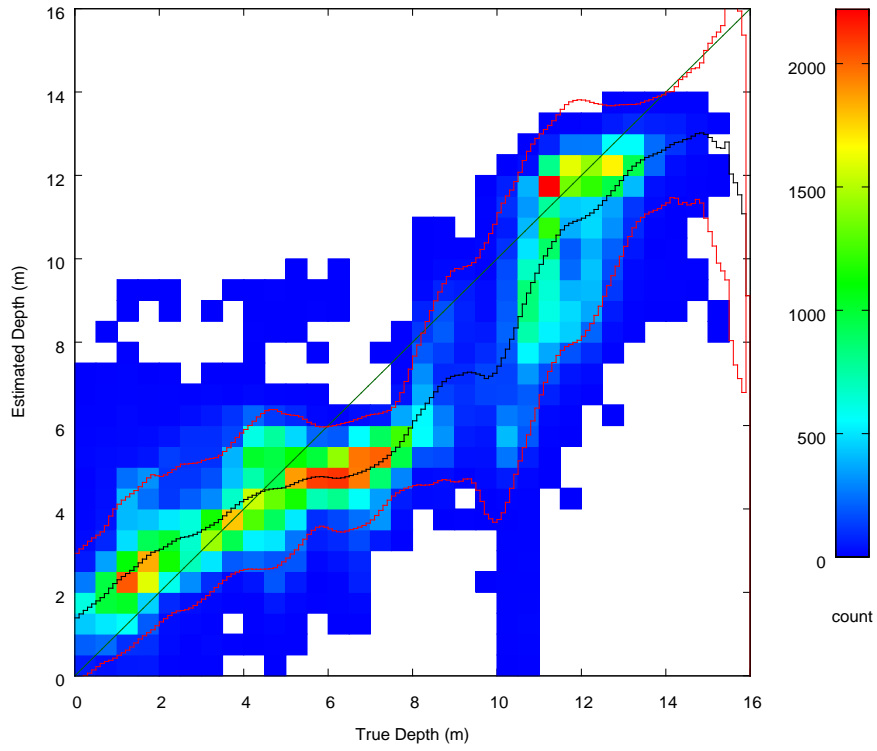


図 11.24 (2) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

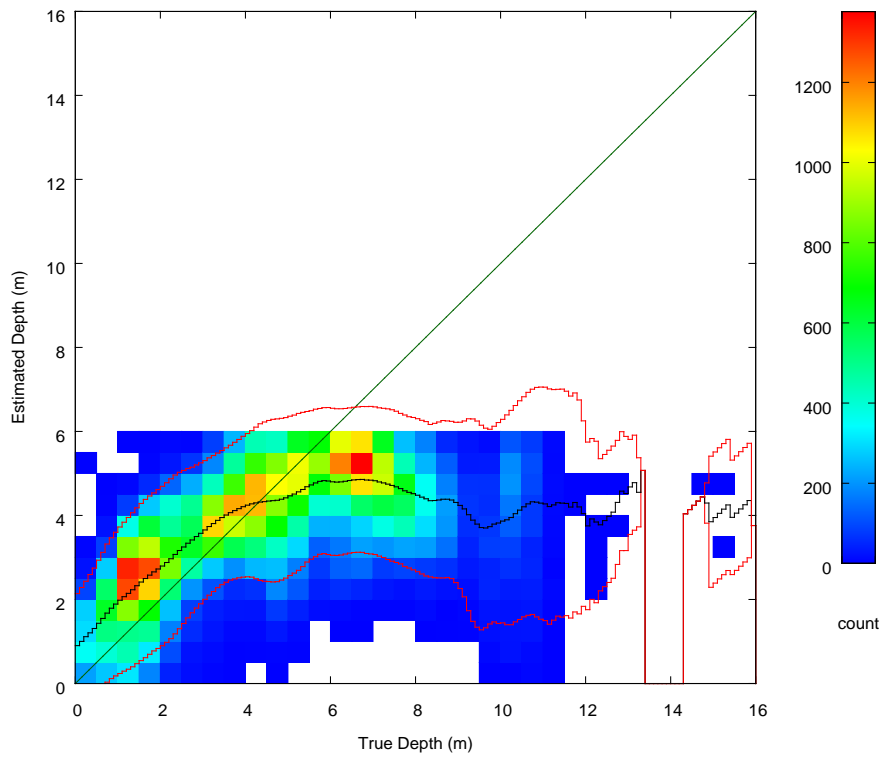


図 11.25 (3) の SDB と水路測量データの散布図 (評価データ)

### 11.3 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 11.26 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。

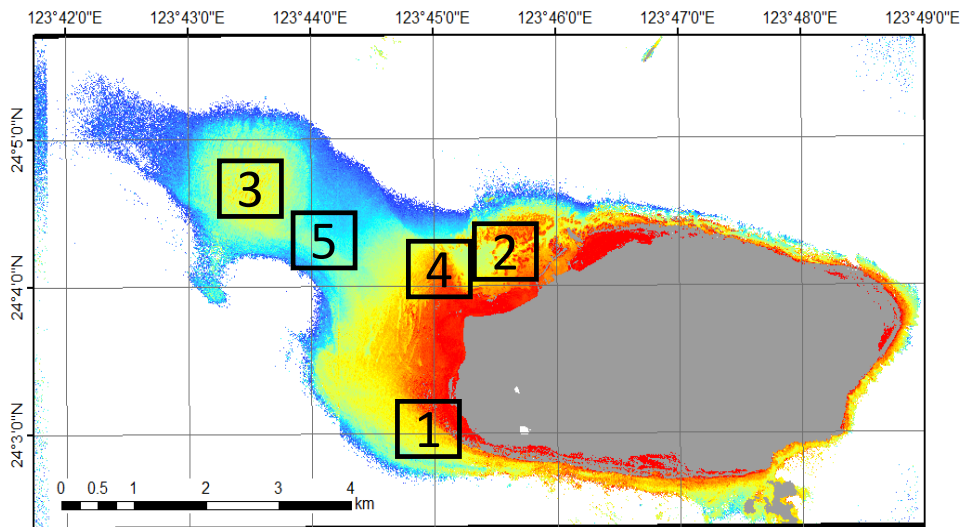

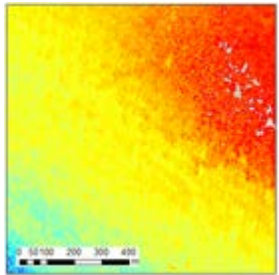
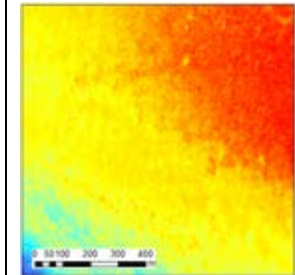
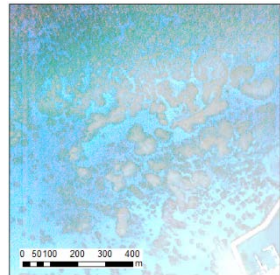
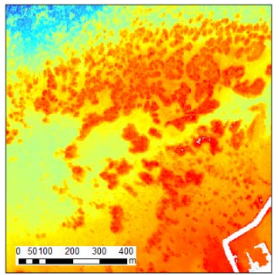
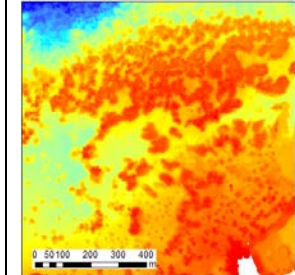
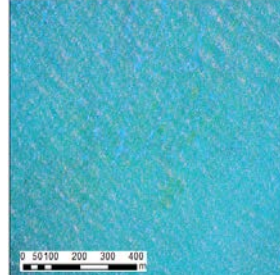
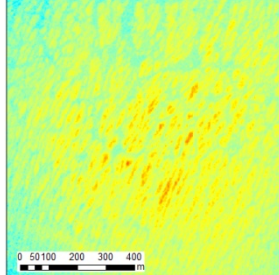
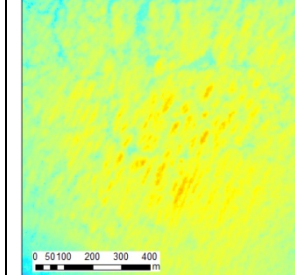
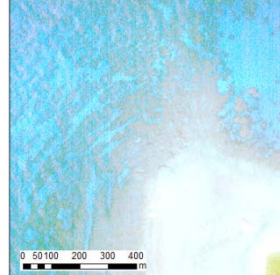
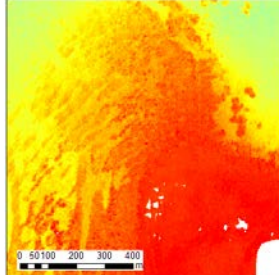
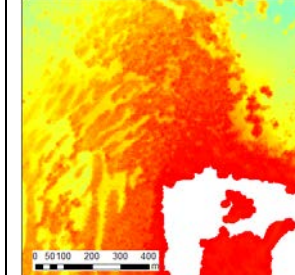
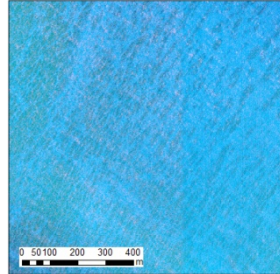
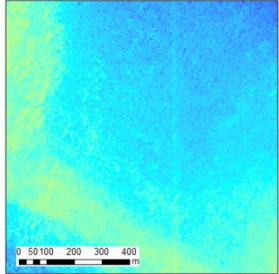
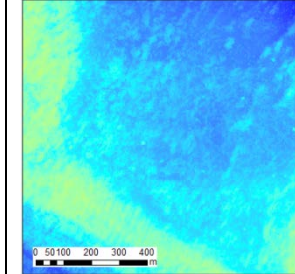


図 11.26 波照間の SDB において目視判読した場所

表 11.1 に図 11.26 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 11.1 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 11.1 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 11.1 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 11.1 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。

本事業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 11.1 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 11.1 図 11.26 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			



## 11.4 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11.27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。

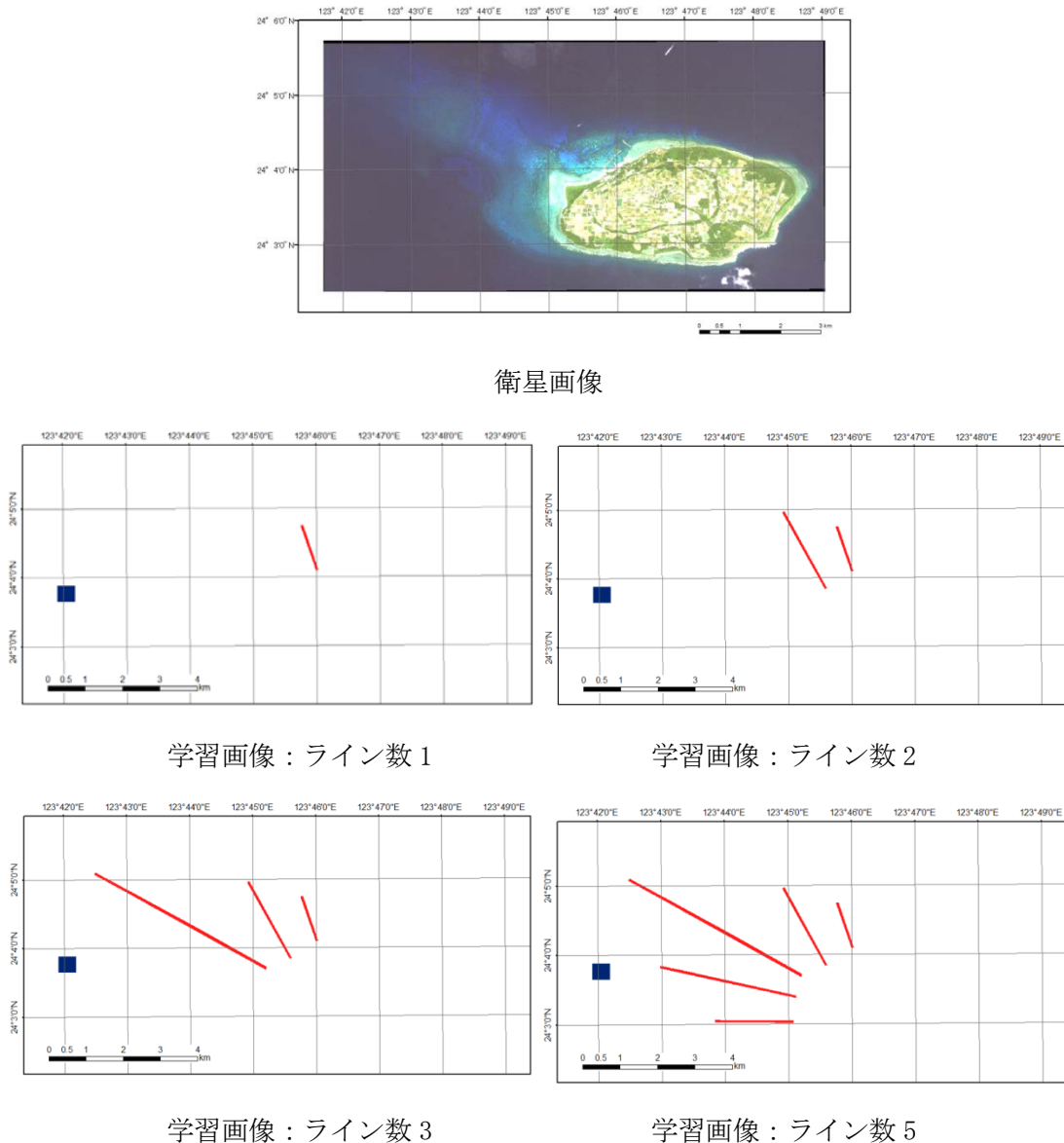


図 11.27 波照間の衛星画像と学習画像

学習画像に対し作成したSDBと評価データの散布図を図11.28 - 11.31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、平均値は実際の値よりも小さくなる。

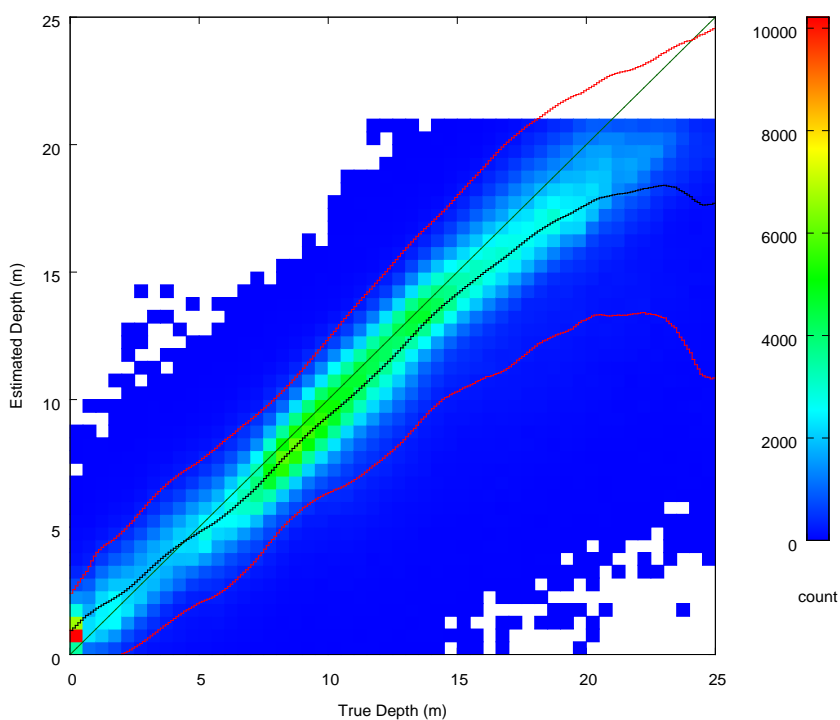


図 11.28 SDB と評価データの散布図 (ライン数 1)

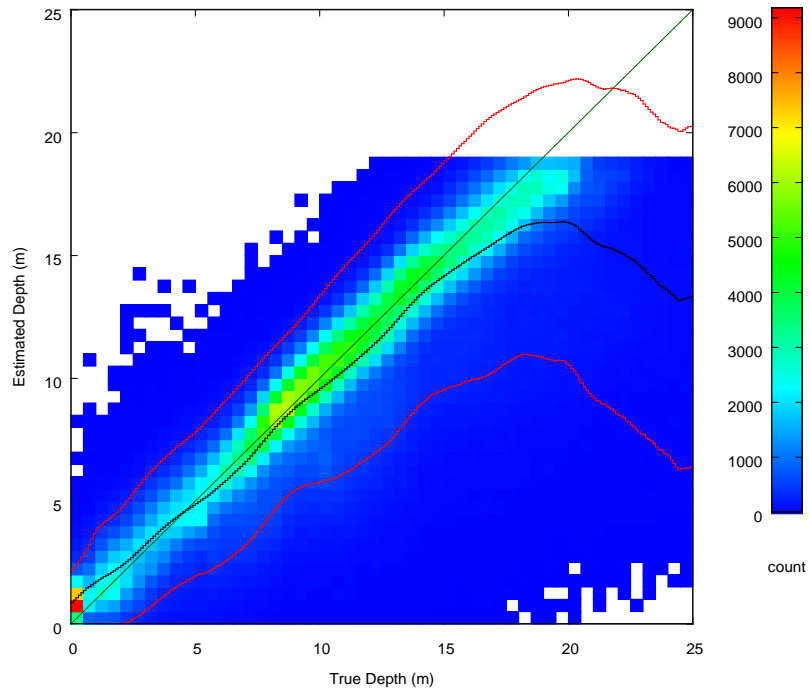


図 11.29 SDB と評価データの散布図 (ライン数 2)

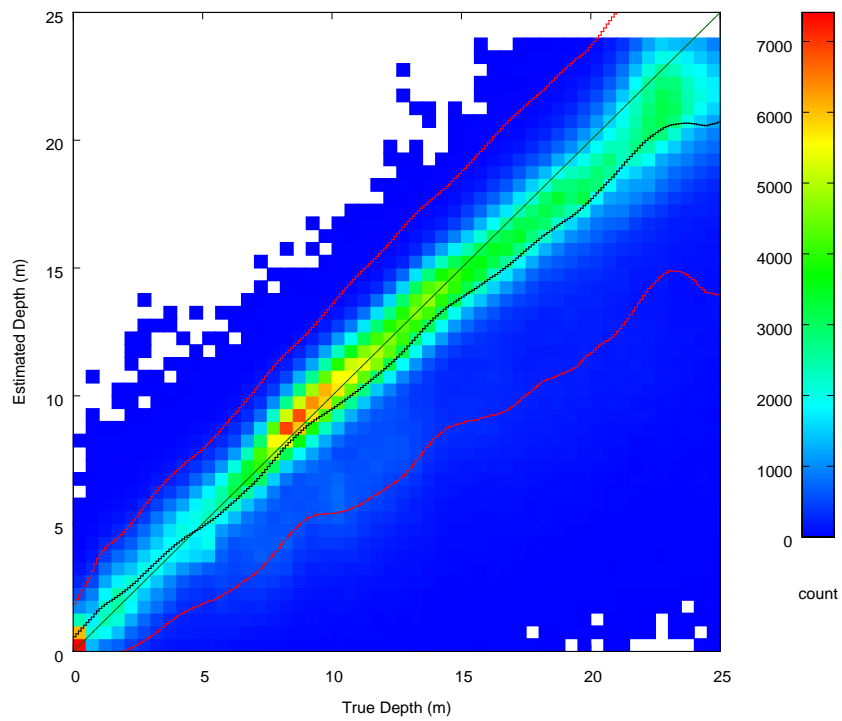


図 11.30 SDB と評価データの散布図 (ライン数 3)

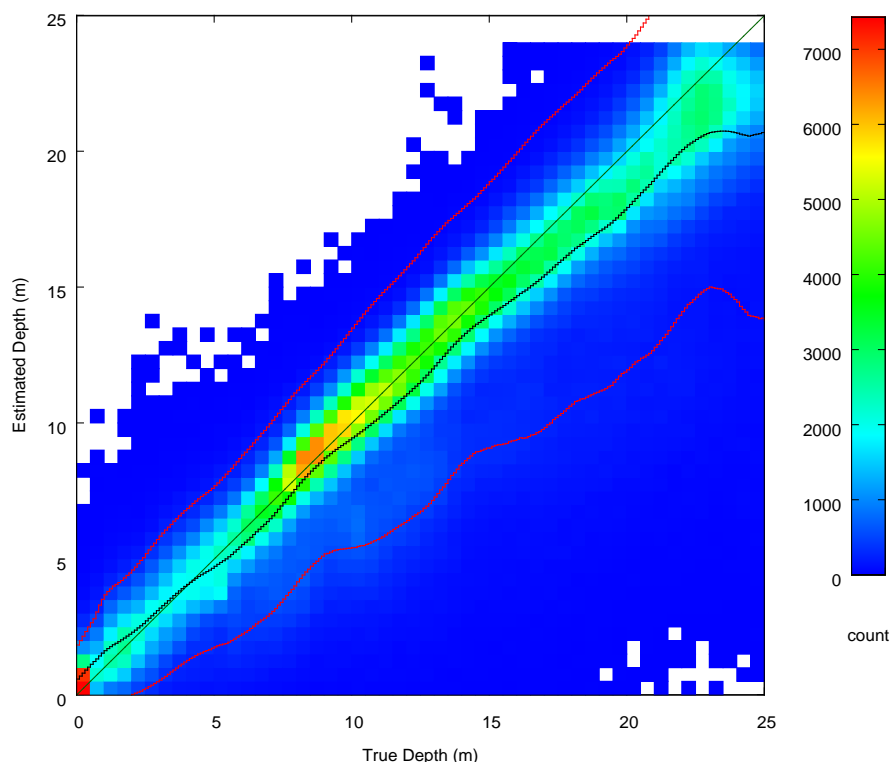


図 11.31 SDB と評価データの散布図 (ライン数 5)

## 11.5 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ためには必要であり、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12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 を作成した結果を示す。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。

### 12.1 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 12.1 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 12.1 は石西礁湖のモザイク処理済画像である。本事業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 12.1 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 <sup>2</sup>
p47n002	2015	103001001C0E5F00	石西礁湖	2012/10/2	18.91	Worldview2	157km <sup>2</sup>
p47n003	2015	103001002665D100	石西礁湖	2013/9/28	18.42	Worldview2	157km <sup>2</sup>
p47n004	2014	1030010022421B00	石西礁湖	2013/4/29	22.29	Worldview2	145km <sup>2</sup>
p47n005	2014	103001002746BE00	石西礁湖	2013/9/28	21.16	Worldview2	28km <sup>2</sup>
p39n002	2015	103001001D7B2C00	高知沖	2012/12/31	8.54	Worldview2	75km <sup>2</sup>

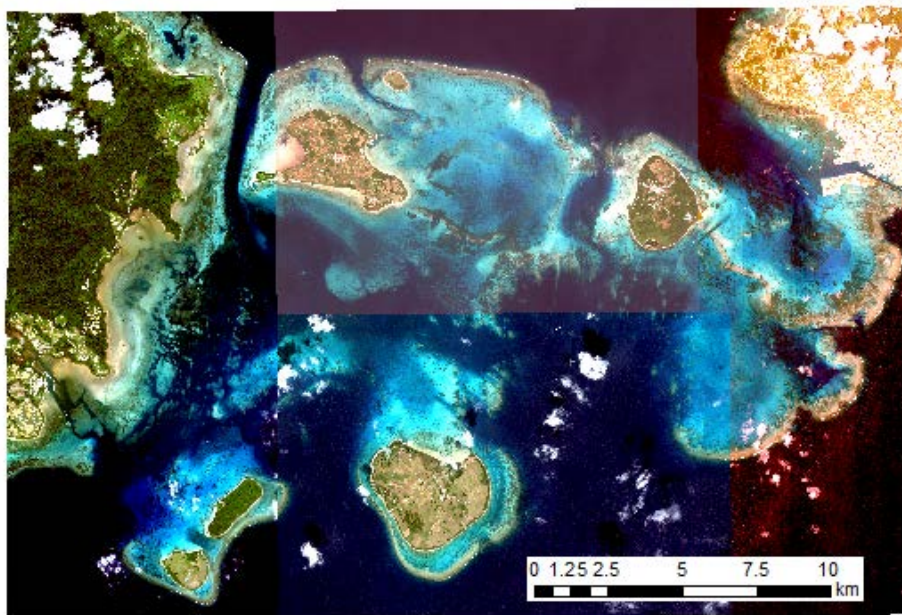


図 12.1 石西礁湖の衛星画像（複数のデータのモザイク）



図 12.2 高知沖の衛星画像

石西礁湖と高知沖の SDB をそれぞれ図 12.3、図 12.4 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 12.5 - 12.9 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。本事業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±5m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い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±5m程度である。

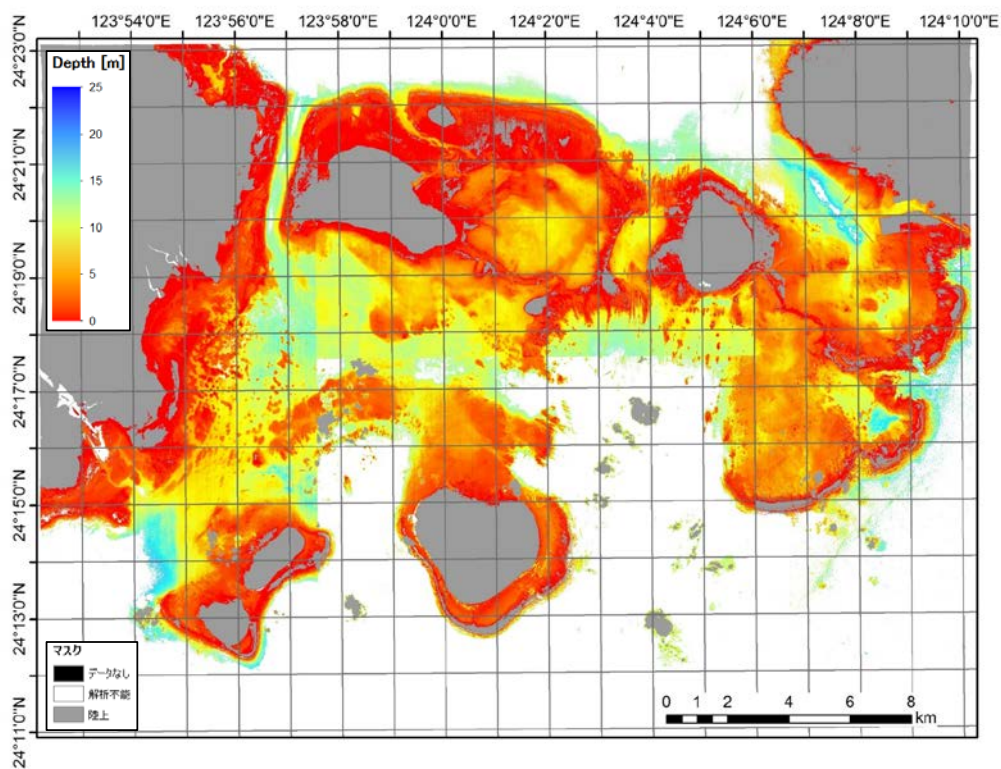


図 12.3 石西礁湖 SDB

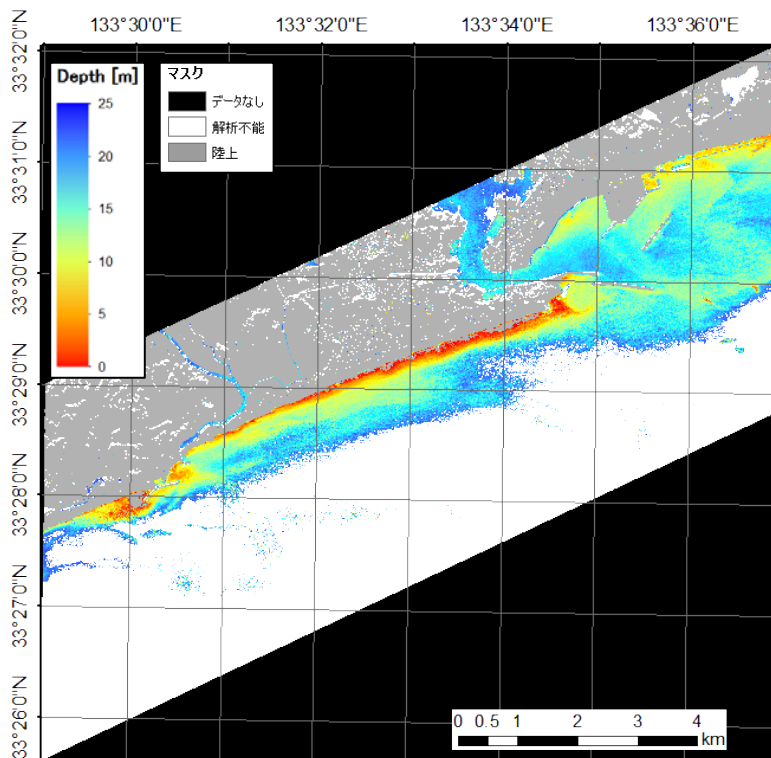


図 12.4 高知沖 SDB

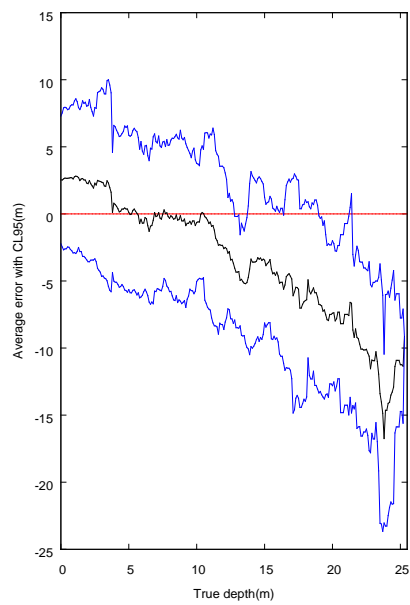


図 12.5 石垣沖の誤差グラフ (p47n001, p47n005)



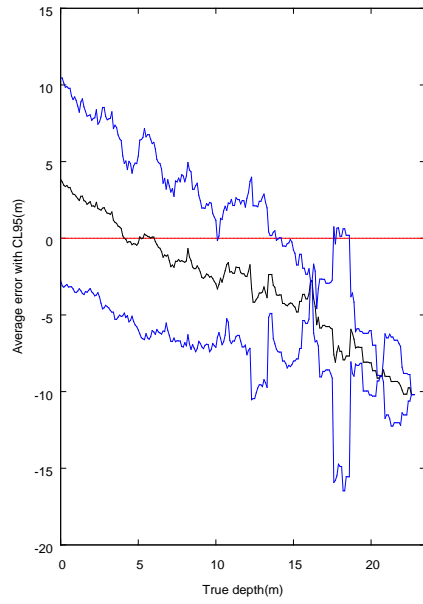


図 12.6 石垣沖の誤差グラフ (p47n002)

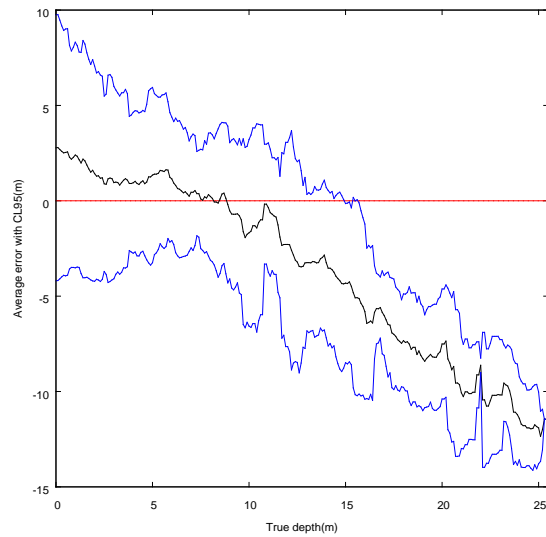


図 12.7 石垣沖の誤差グラフ (p47n003)

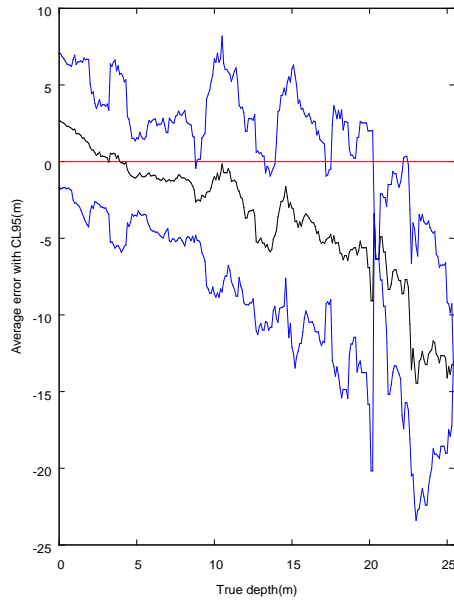


図 12.8 石垣沖の誤差グラフ (p47n004)

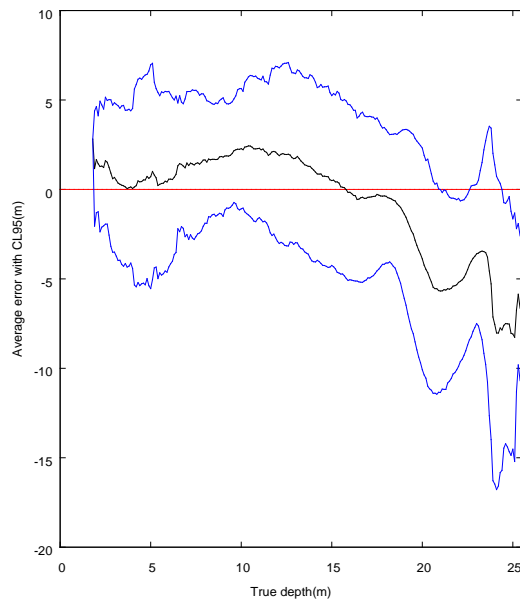


図 12.9 高知沖の誤差グラフ (p39n001、p39n002)

## 12.2 様々な海域の衛星画像の解析

ここでは、これまで本事業で解析していない本州の多様な海域で検証するため、表 12.2 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 12.3 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 12.2 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 <sup>2</sup>
p14n002	2015	103001002B42BA00	鎌倉	2013/12/28	21.99	Worldview2	25km <sup>2</sup>
p15n001	2015	103001000D4B2800	両津湾	2011/9/24	26.3	Worldview2	25km <sup>2</sup>
p22n001	2015	10300100085CED00	浜名港	2011/1/13	19.7	Worldview2	25km <sup>2</sup>
p35n001	2014	103001001308D800	深川湾	2012/4/1	19.2	Worldview2	25km <sup>2</sup>
p38n001	2014	103001002EC88400	佐田岬	2014/3/27	26.69	Worldview2	35km <sup>2</sup>
p38n002	2014	10300100121A3E00	佐田岬	2012/4/9	12.95	Worldview2	35km <sup>2</sup>

表 12.3 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 12.10 - 12.16 に、誤差グラフを図 12.17 - 12.23 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 10m 未満で平均誤差±2 - 4m 程度であった。

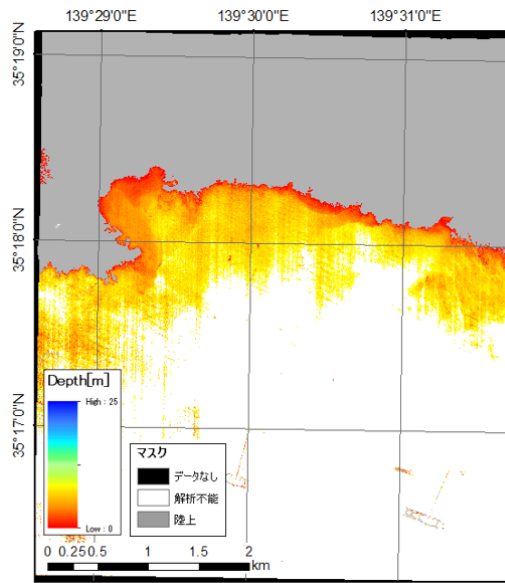


図 12.10 鎌倉沖 SDB (p14n001)

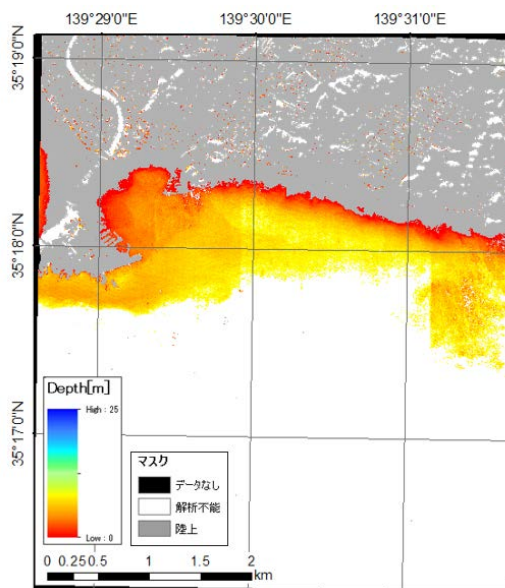


図 12.11 鎌倉沖 SDB (p14n002)

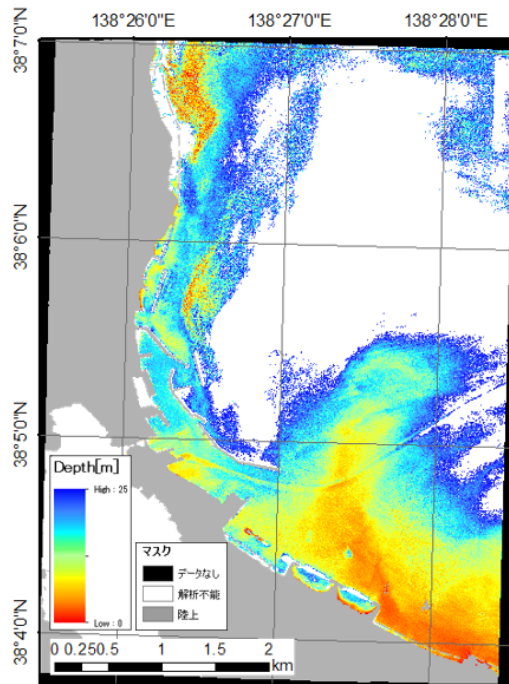


図 12.12 両津湾 SDB (p15n001)

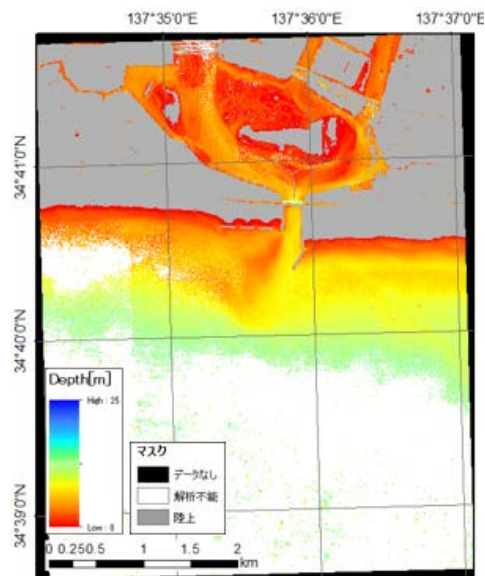


図 12.13 浜名港 SDB (p22n001)

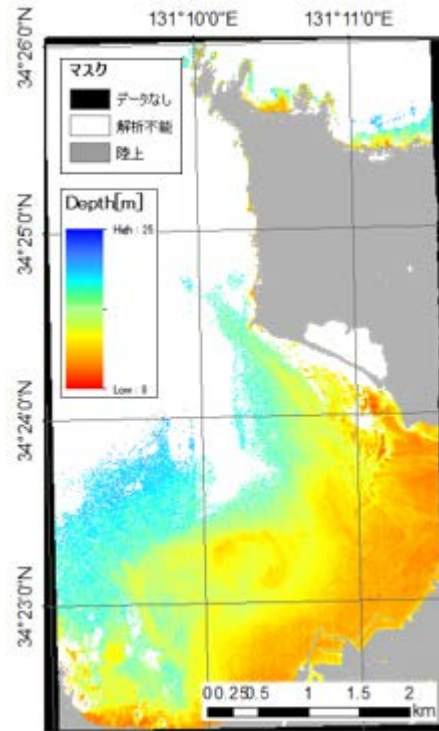


図 12.14 深川湾 SDB (p35n001)

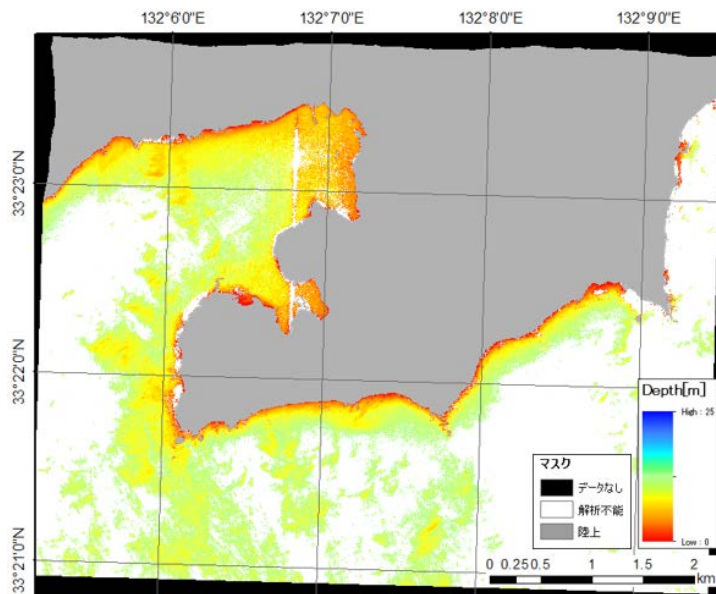


図 12.15 佐田岬 SDB (p38n001)

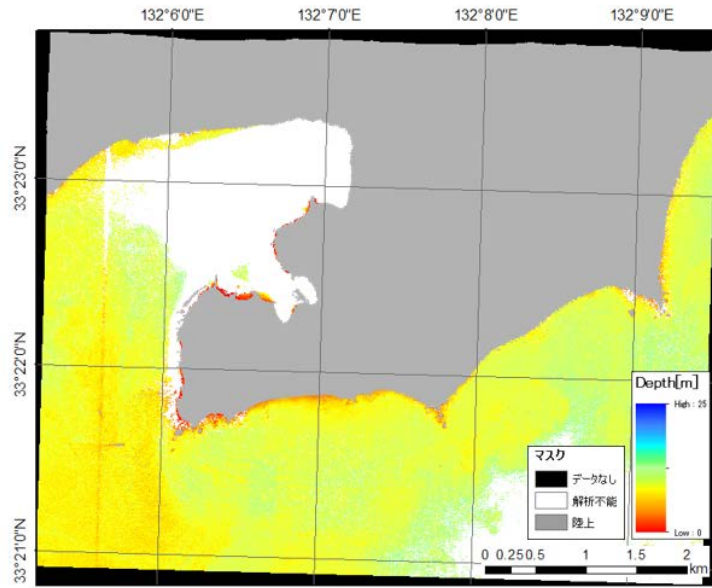


図 12.16 佐田岬 SDB (p38n002)

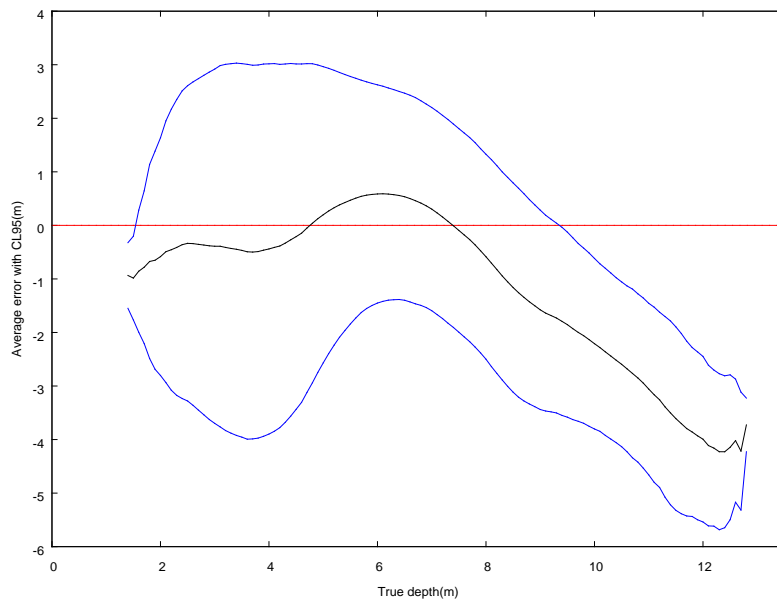


図 12.17 鎌倉沖の誤差グラフ (p14n001)

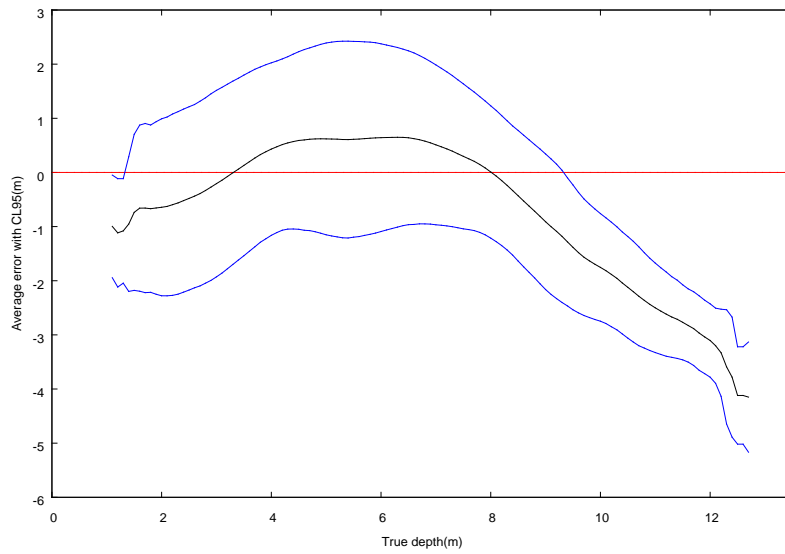


図 12.18 鎌倉沖の誤差グラフ (p14n002)

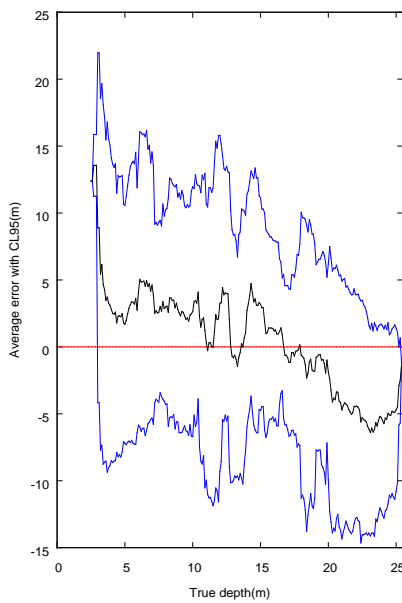


図 12.19 両津湾の誤差グラフ (p15n001)



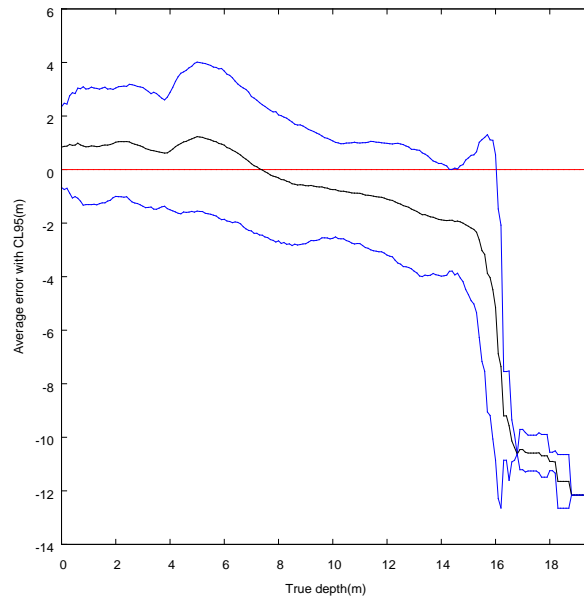


図 12.20 浜名港の誤差グラフ (p22n001)

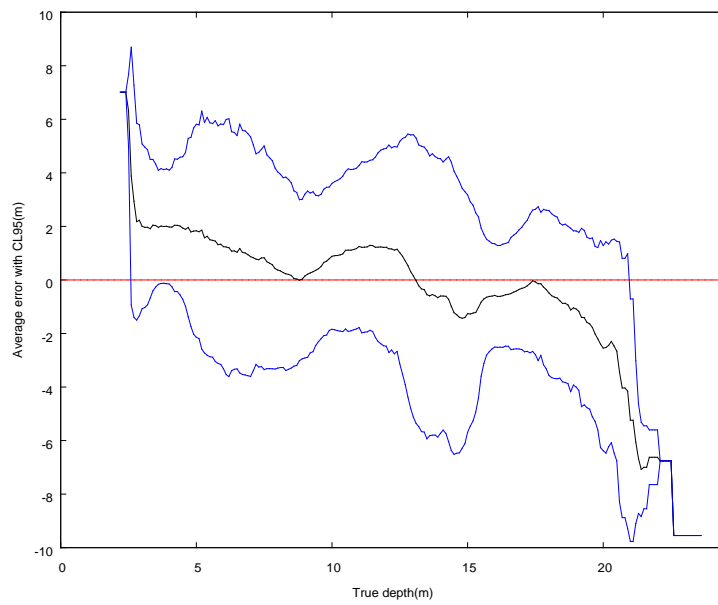


図 12.21 深川湾の誤差グラフ (p35n001)

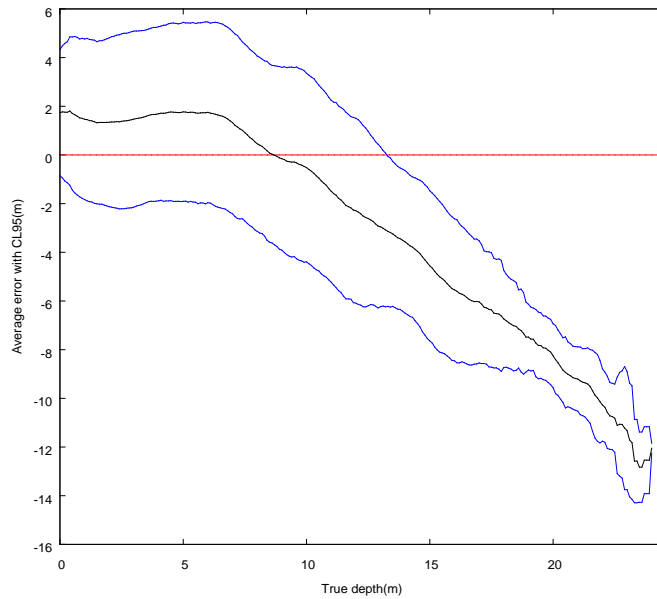


図 12.22 佐田岬の誤差グラフ (p38n001)

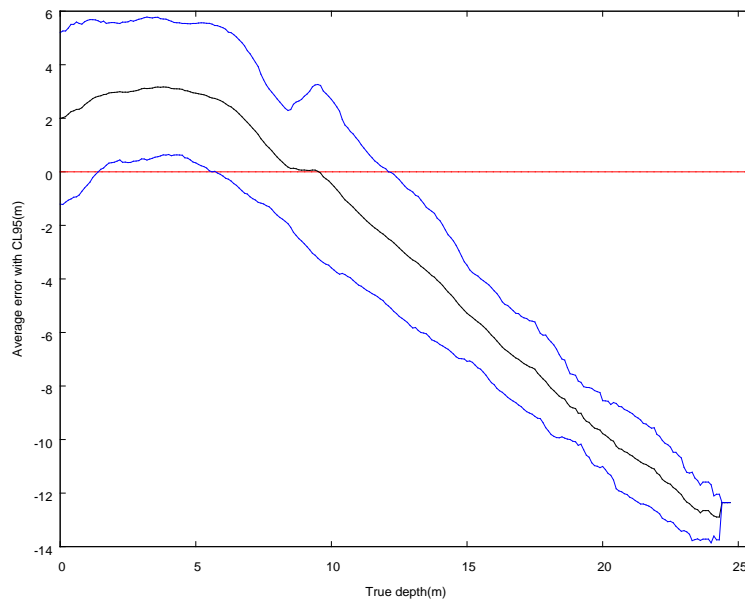


図 12.23 佐田岬の誤差グラフ (p38n002)

### 12.3 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 $\pm 2$ m 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 $\pm 5$ m より大きくなり、平均誤差も大きい場合は 5m に達した。

## 第13章 複数の衛星センサによる SDB の比較

これまで使用してきた WorldView-2 または 3 は非常に高い空間分解能をもち、バンド数も可視・近赤外域に 8 バンドと比較的バンド数の多い、高性能センサの一つである。本章では、WorldView-2 または 3 よりも空間分解能やバンド数の点でやや劣る複数のセンサで SDB を作成した場合にどの程度の精度が得られるか検証した結果を示す。

### 13.1 衛星センサと使用データ

衛星センサとしては、GeoEye-1、SPOT-6、Landsat-8 を選定した。各センサのスペックを表にまとめた。GeoEye-1 は空間分解能が 1.64m と WorldView-2 または 3 とはあまり変わらないが、バンド数が半分である。SPOT-6 は空間分解能が 8m とやや低く、バンド数も GeoEye-1 と同じく WorldView-2 または 3 の半分である。Landsat-8 は表 13.1 の中では空間分解能が 30m と最も低い。

各センサについて波照間島周辺海域のデータを取得して、解析に使用した。解析に使用した衛星画像一覧を表 13.2 に、各画像の外観図を図 13.1 に示す。どの画像も雲は少なく、透明度の高い時に撮影できていると考えられ、水深 20m 付近まで、海底の底質の違いが確認できる。衛星画像の解析、精度検証のための水路測量データは 2015 年 2 月にレーザー測深で取得したデータを用いた。衛星画像はどれもレーザー測深データの測深日より 2 年以内のものであり、この間の水深の変化は大きくないと仮定する。

表 13.1 衛星センサのスペック

衛星センサ	空間分解能/画素サイズ	バンド数 (マルチ)
WorldView-2	1.84 m / 2 m	8 (可視 6)
WorldView-3	1.24 m / 2 m	8 (可視 6)
GeoEye-1	1.64 m / 2 m	4 (可視 3)
SPOT6	8 m / 6 m	4 (可視 3)
Landsat-8	30 m / 30 m	8 (可視 4)

表 13.2 使用衛星データ一覧

センサ	画像 ID	撮影日	オフナディア角 (°)
WorldView-2	p47n010	2013/5/18	23.4
GeoEye-1	p47n013	2014/1/25	23.3
SPOT-6	p47n014	2015/9/12	21.7
Landsat-8	p47n016	2015/11/18	0.0

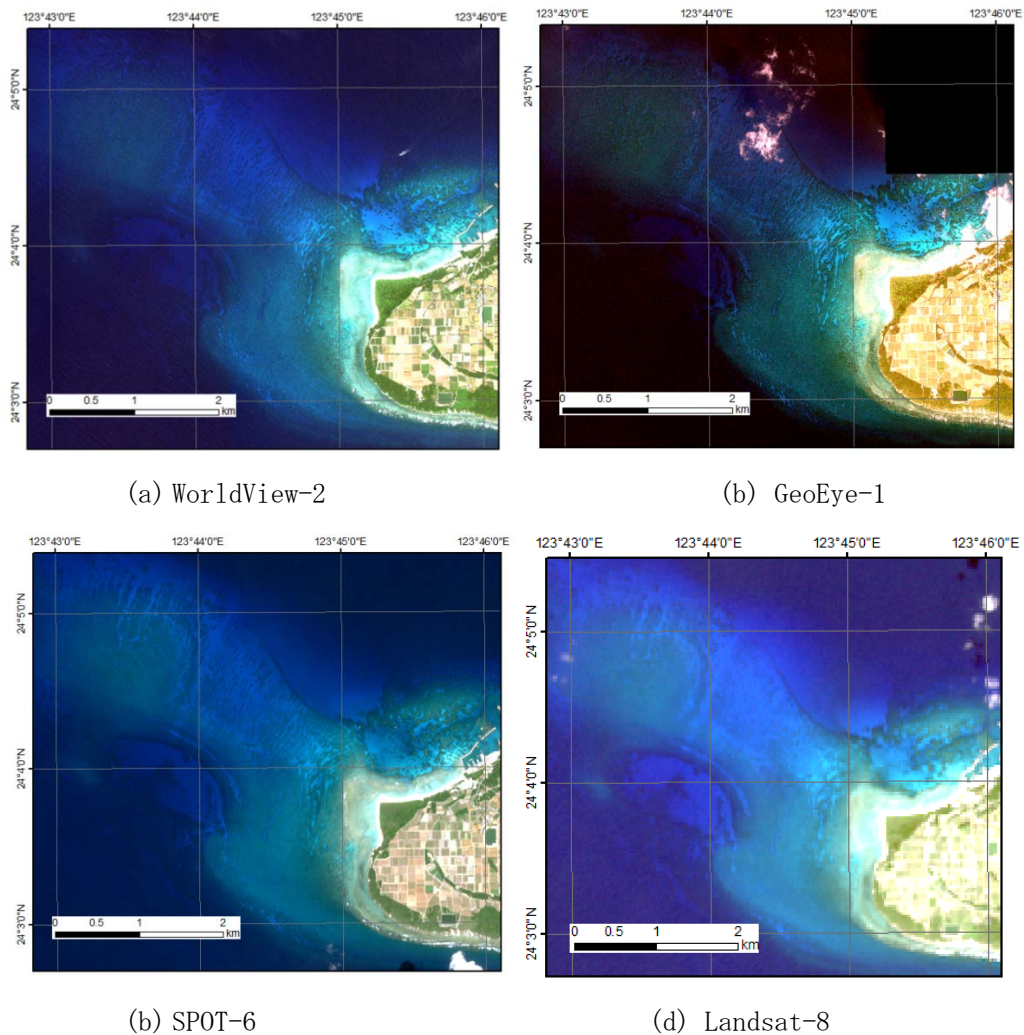


図 13.1 波照間島周辺の衛星画像

### 13.2 センサごとのSDBと精度

図 13.2 に水路測量データの外観を示す。オリジナルの水路測量データはポイントデータの集合であるが、このデータを衛星画像と対応付けるために、衛星画像の画素に合わせて画像化するリサンプル処理を行った。図 13.2 (a) はリサンプルした水深画像であるが、水深をカラー表示し、データの無い場所は白色で示している。衛星画像の各画素に対応した測深データが必ずしもないために、空間的に非連続的であり、目視判読で海底地形を把握するにはやや分かりづらい。そこで、データの無い画素についても周辺画素から補間して表示した画像が図 13.2 (b) である。図 13.2 (b) は目視判読をするには分かりやすいが、実測値ではないため、SDBの解析や精度評価には図 13.2 (a) の画像データを用いる。

図 13.3 に、センサごとに作成したSDBの外観を示す。SDBと水路測量データを比較すると、どのセンサのSDBも水路測量データの海底地形とよく一致していることが分かる。解析

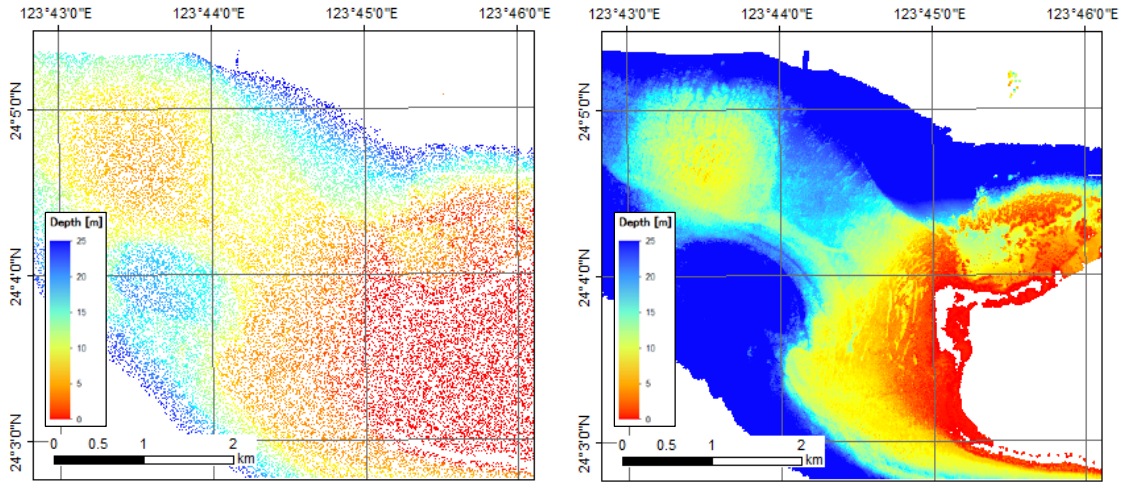
に適さない深い海域のマスクについては WorldView-2 の結果が最もよく、他の SDB では沖合の深い海域を浅く推定している場所が散見される。一つには雲の影響があり、その周辺で間違った推定をしているとも考えられるが、Landsat-8 については雲以外の場所でも誤推定領域が見られる。

図 13.4 に、SDB と水路測量データ（学習用データ）の散布図を示す。ここでは、評価用データとの比較は行っていない。理由としては、画像ごとに雲がある場所など解析に適さない場所が異なり、同じデータで精度評価するのが難しいためである。そこで、ここでは学習用水深データとの比較だけで精度評価を行う。なお、学習用水深データを用いた精度評価については「15.3 学習用水深データによる精度推定」も参照のこと。図 13.4 の散布図をみると、どの結果も水深 0m から 20m 以上の深さまで SDB と水路測量データに高い相関があることが分かる。精度に関する統計量については表 13.3 にまとめたが、どの結果も決定係数  $R^2$  が 0.9 以上と高い。

誤差は SPOT-6 の結果が RMSE で 1.00m と最も小さかった。この場合でも誤差の 95%信頼区間は  $\pm 1.96m$  となり、S-44 の 1a/b の鉛直方向の基準が約 0.5m であることを考えると 3 倍以上の誤差がある。

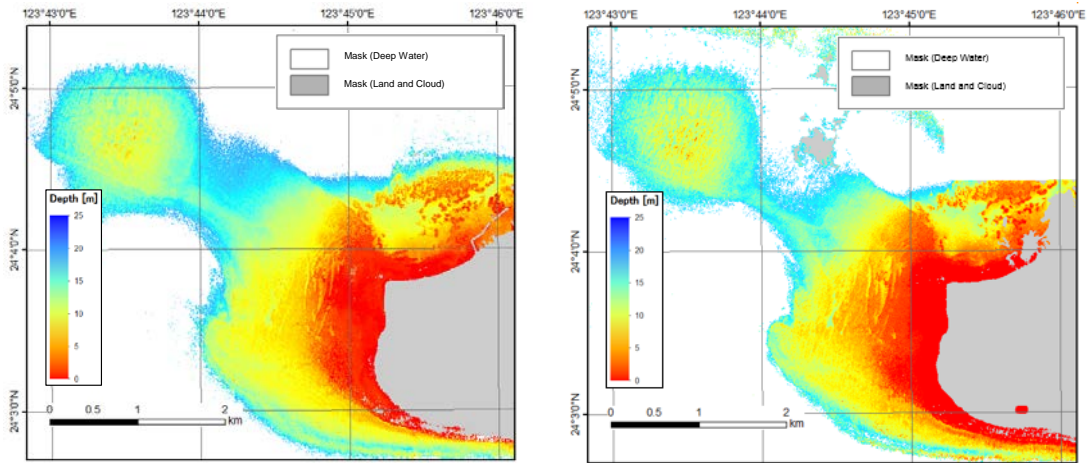
### 13.3 まとめ

複数のスペックの異なるセンサを用いて SDB を作成し、精度について検証を行った。どのセンサでも SDB と水路測量データに高い相関が得られたが、今回の結果からは、空間分解能の高さやバンド数の多さと水深推定精度の相関は見られない。今回比較したセンサの中では空間分解能が 30m ととりわけ低い Landsat-8 でも RMSE 誤差が 1.55m だったのは注目に値する。Landsat-8 は USGS（アメリカ地質調査所）が運用する地球観測衛星で、データは無償提供されている。今後広域の SDB を作成したり、試験的な調査を行う際はまずは無償の Landsat-8 を用いて利用可能性を検討することなどが考えられる。



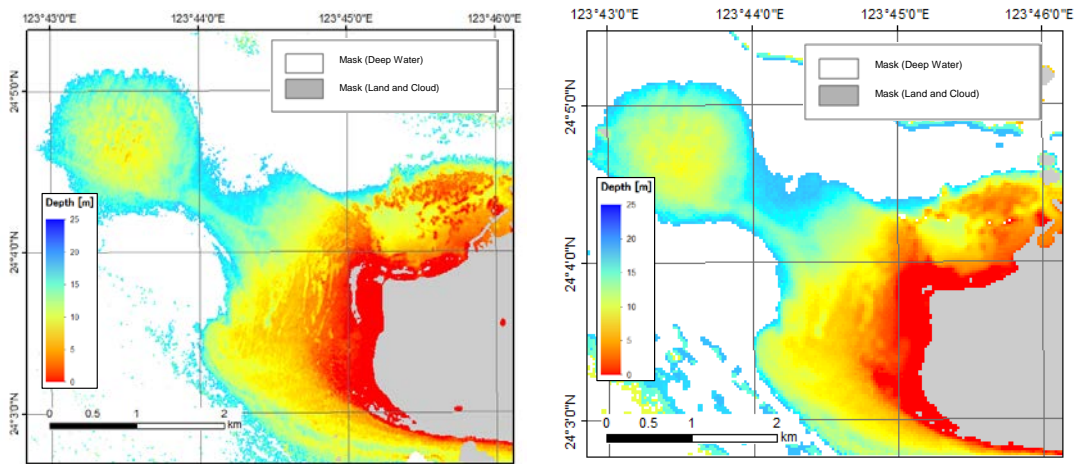
(a) 衛星画像に合わせてリサンプルした画像 (b) 補間処理画像

図 13.2 水路測量データ（レーザー測深）



(a) WorldView-2 の SDB

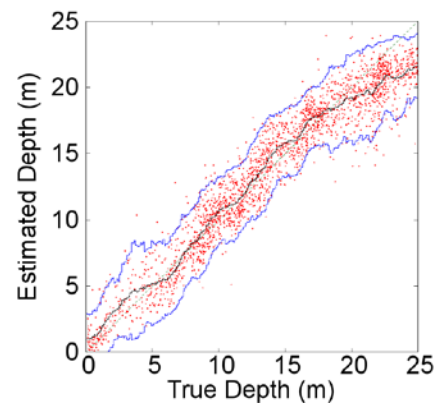
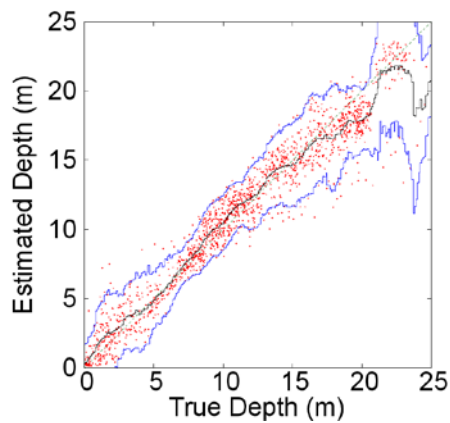
(b) GeoEye-1 の SDB



(c) SPOT-6 の SDB

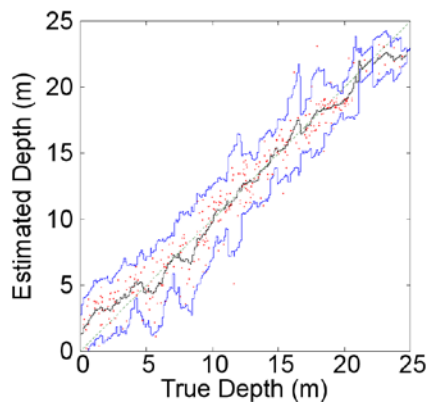
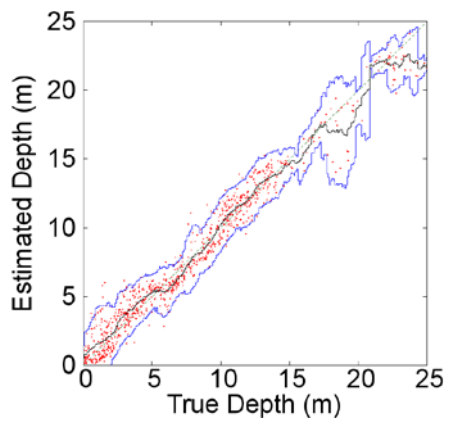
(d) Landsat-8 の SDB

図 13.3 波照間島周辺の様々なセンサによる SDB



(a) WorldView-2 の SDB と水路測量の散布図

(b) GeoEye-1 の SDB と水路測量の散布図



(c) SPOT-6 の SDB と水路測量の散布図

(d) Landsat-8 の SDB と水路測量の散布図

図 13.4 波照間島周辺の様々なセンサによる SDB と水路測量データの散布図

表 13.3 波照間島周辺の様々なセンサによる SDB の精度

センサ	WorldView-2	GeoEye-1	SPOT-6	Landsat-8
データ数	1037	1451	521	206
R2	0.959	0.916	0.998	0.942
平均 (m)	0.00	0.00	0.00	0.00
標準偏差 (m)	1.31	1.85	1.00	1.55
95%信頼区間 (m)	0.00 ± 2.58	-0.00 ± 3.62	0.00 ± 1.96	0.00 ± 3.04
RMSE (m)	1.31	1.85	1.00	1.55
限界水深 (残差) (m)	21.5	24.0	19.6	12.3
限界水深 (モデル) (m)	25	25	23	24



## 第14章 等深線図の作成

SDB の活用方法の一つとして、等深線図の作成がある。本章では、SDB をもとに等深線図を作成する手順と等深線図の例を紹介する。

### 14.1 等深線作成手順の概要

ここでは SDB をもとに等深線図を作成した。例として、図 14.1 に示した波照間島の SDB 画像を使用した等深線図の作成手順を以下に示す。

SDB 画像を使用した等深線図の作成手順には、(1) ラスタ形式の SDB 画像から、直接等深線を作成する手法と (2) SDB 画像のデータを利用して地表面のモデリングを行い、作成した地表面モデルから等深線を描画する手法とがある。入手が容易なオープンソースの GIS、及び地図作成ソフトウェアの一つである、QGIS や Generic Mapping Tools (GMT) では、前述した手順の内、(1) の SDB 画像から直接等深線を作成する手法を用いて等深線を作成している。(2) の海底地形のモデルを作成する手法で等深線を作成しているツールとしては、MicroImages 社の TNTmips が挙げられる。以上 2 種類の手法を用いて作成された等深線を検討することで、本事業において使用する手法を決定した。

最初に、解析ツールが比較的入手しやすい (1) SDB 画像から直接等深線を作成する手法を用いて、等深線図を作成した。例として、ハワイ大学が配布している、オープンソースの地図作成ソフトウェアである GMT を使用して、SDB 画像から直接作成した等深線図を図 14.2 に示す。等深線の作成にあたり、数値の間引きや滑らかさのパラメータ調整などを行ったが、図 14.2 をみると粗く、またノイズが多く混じっている。図 14.2 の作成に使用した GMT に限らず、画像やポイントデータなど、等間隔で並んでいる値から近似線を描くのは困難である。そのため本事業では、前述した解析手法の中から、(2) SDB 画像のデータを利用して地表面のモデリングを行い、作成した地表面モデルから等深線を描画する手法を採択した。SDB 画像から等深線を作成するまでの手順のフローチャートを、下記の図 14.3 に示す。

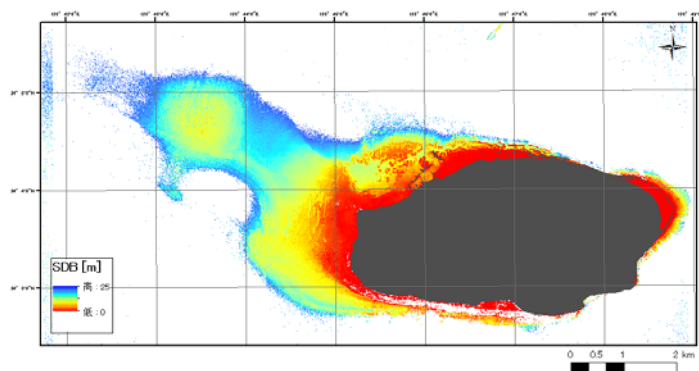


図 14.1 使用した SDB 画像

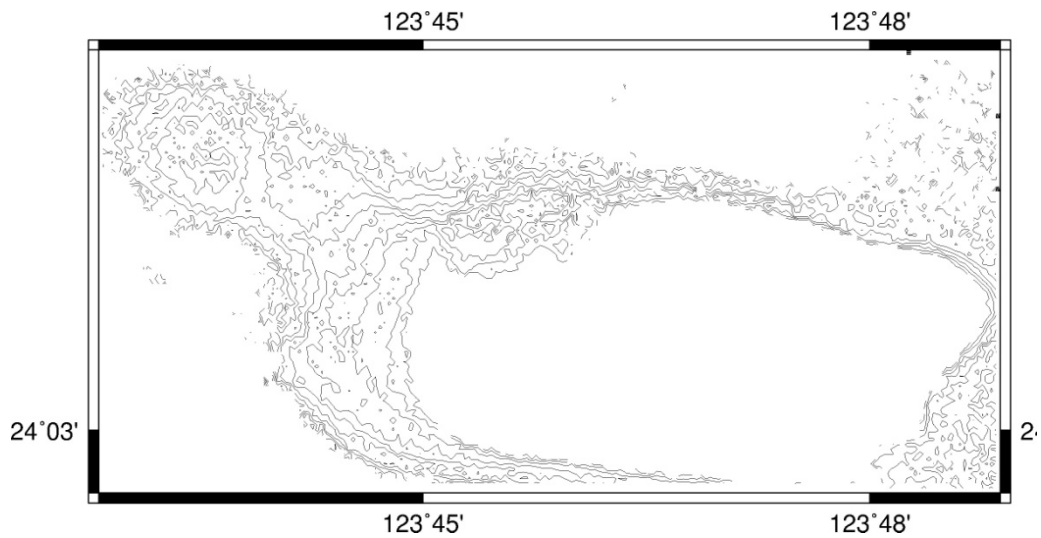


図 14.2 SDB 画像から直接作成した等深線図の例

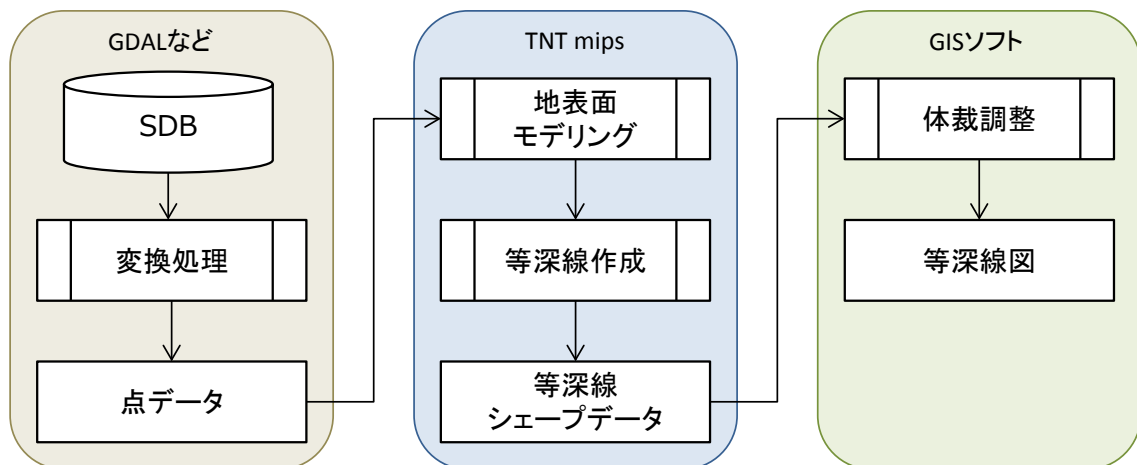


図 14.3 等深線図作成手順

## 14.2 地表面のモデリング

地表面のモデリングを実施する前準備として、セルが集合したデータである、SDB 画像からポイントの集合であるポイントデータへの変換処理を行った。変換処理は、Open Source Geospatial Foundation が配布している、Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) を使用して変換を行った。

SDB 画像作成に使用しているツールでは、水深が深く、SDB を推定するのが困難な海域などへは、陸域と同じ、水深から大きく離れた値を設定している。そのため、出力された SDB 画像の値をそのまま使用して海底地形のモデリングを行うと、図 14.1 中の黒で示した陸域、及び白で示した水深推定の限界以深の海域と、水深を推定できる海域との境界で水深が急変することから、密集した等深線が引かれてしまう。その場合、等深線図からの判読を行うと、実際には分布していない海嶺や舟状海盆等の地形があると誤認する可能性がある。そ

のため、当該地点の除去などの処理をポイントの集合したデータ形式へ変換する前後の過程で実施した。

変換したポイントデータを TNT mips (MicroImages 社、TNTmips Pro 2015) へ読み込み、最小曲率法を用いて地表面のモデリングを行った。最小曲率法は、2次元の3次スプライン関数を使用して、水深を近似する滑らかな面を求める (Randall, 2013)。作成された地表面モデルを図 14.4 に示す。図 14.4 の地表面モデルと図 14.1 に示した元の SDB 画像とを比較すると、大きな差異は見られないことから、地表面モデルは SDB を再現できているといえる。

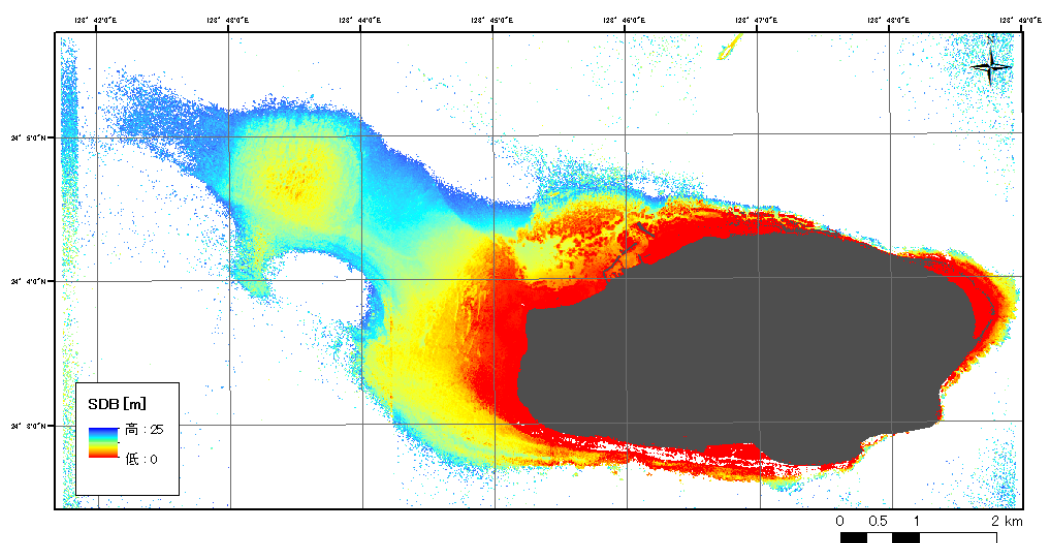


図 14.4 地表面モデル

### 14.3 等深線図の作成

14.2 で作成された地表面モデルをベースとして、0m から 25m の範囲で、2m 間隔の等深線を、重み付き平均で平滑化した。作成された等深線を図 14.5 に示す。

地表面モデリングを経由した等深線は、SDB 画像から直接作成した図 14.2 と比較して、滑らかな線となっていることがわかる。作成した等深線から、水深のラベルや緯度経度の枠などを付与した等深線図を作成するために、他の GIS ソフトで編集が可能な形式で、TNTmips から書き出す。今回は体裁を整える作業には、ArcGIS を使用した。

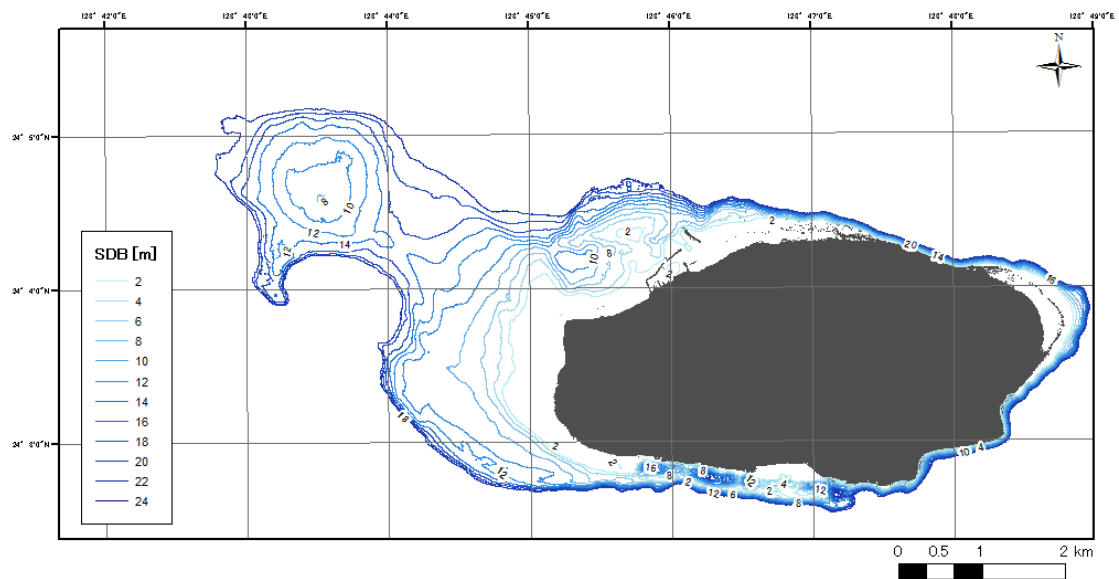


図 14.5 完成した等深線図

#### 14.4 まとめ

開発したツールを使用して作成した SDB 画像から、2 通りの手法で等深線図を描画した。ラスタから直接等深線を作成する、比較的一般的な手法では等深線が粗くなった。他方の、ラスタを点の集合へと分解し、地表面をモデリングしてから等深線を作成する手法では、より滑らかな等深線図を作成することができた。

しかしながら、地表面モデリングの際に使用する TNTmips は有償のソフトウェアであることから、ライセンスがない場合は使用することができない。今後の本事業の展望として、諸外国での研修などが考えられていることから、事業で使用するソフトウェアは、誰でも入手可能なものであることが望ましい。そのため、今後の課題としては、同様の機能を QGIS など、誰でも使用可能なソフトウェアでどのように再現するかの検討が挙げられる。

#### 14.5 参考文献

Randall B. Smith, 2013, Tutorial Surface Modeling with TNTmips®, MicroImages, Inc.

## 第15章 総合考察

本章では、本事業で得られた SDB に関するすべての解析結果に基づいた総合的な考察を行った結果について説明する。

### 15.1 SDB の誤差と適用限界水深

本事業では、合計 21 シーンの WorldView-2,3 の画像を解析し、SDB を作成して精度検証を実施した。精度は水路測量データとの比較で行っているが、海域によるばらつきがあり海域によっては必ずしも SDB と水路測量データの相関は高くない。解析できる限界と考えられる水深（解析限界水深）は、波照間島周辺海域が最大で 24m となった。本事業で使用した 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  $0.1\text{mg/m}^3$ ）は波照間の解析結果と類似していた。

本事業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  $\pm 30 - 40\%$  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、 $15 - 20\%$  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 - 25m 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 - 15m 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てサンゴ礁と砂地を分けて SDB を作成している。

## 15.2 SDB の誤差要因についての分析

本事業で解析した SDB について、決定係数が 0.9 以上と高く水深 20m 以上まで解析できた波照間島周辺海域においても、誤差の 95%信頼区間は約±2.6m であり、S-44 の 1a/1b の基準には届かない。そこで、ここでは具体的にどのような場所に誤差が分布しているか詳細に確認した。

### 15.2.1 誤差分布

ここでは、WorldView-2 画像（画像 ID : p47n010）の SDB を対象として誤差分布について調べる。図のように、SDB と水路測量の結果を比較し、誤差（SDB - 水路測量）分布図を作成した。誤差分布図においては、誤差が-5.0m から 5.0m の範囲で違いを明瞭にするために色付けを行った。これまで、水路測量結果を図に示す場合は、目視判読を行いやすいように、データの無い場所を周りのデータから推定して補間する処理を行っていたが、ここでは正確な分析を行うために補間処理は行わず、データが無い場所については誤差分布図上では白色で示している。

誤差分布は、実際より浅く推定している誤差（赤色）と実際より深く推定している誤差で分布は大きく分かれている。

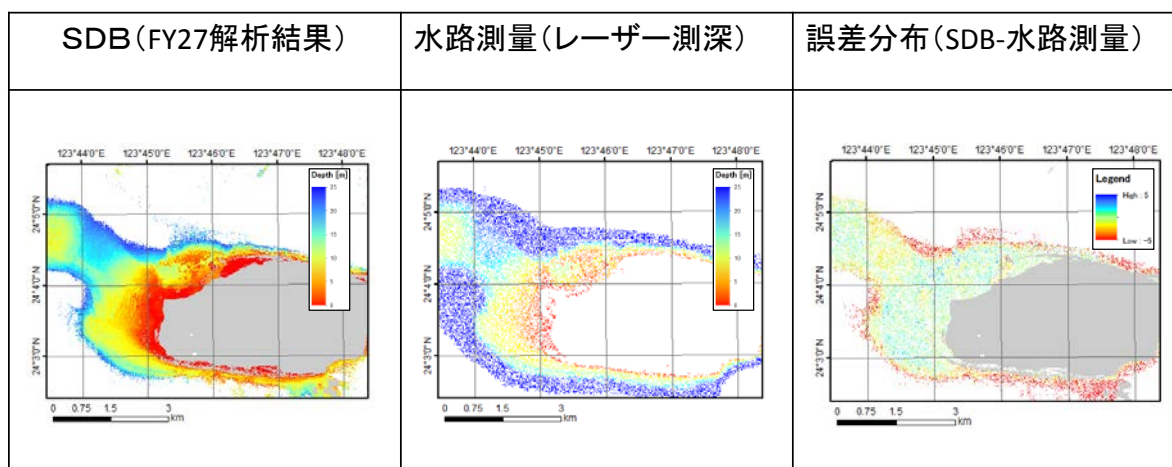


図 15.1 SDB、水路測量、誤差分布

### 15.2.2 輝度の低い画素の誤差

実際より浅く推定している誤差（赤色）は、水深の深い場所や雲の周りなど、輝度の低い場所に分布している。これらは解析に適していない画素をマスクすることで除去できる可能性がある。

図 15.2 は、青バンドについての大气補正前後の衛星画像の値（反射率）と水深の関係についてのイメージである。本事業で実装したマスクでは大气補正後に深い水深の反射率の平均値以下となる画素がマスクされている（大气補正後画像中の黄色の範囲）。しかしながら、マスクされていない画素についても、深い水深の反射率とほとんど変わらない反射率

を持つ場合には基本的には正確な水深推定は難しい。そこで、深い水深の反射率について95%の信頼区間を算出し、その区間の値を画素もマスク対象とする（大気補正後画像中の赤色の範囲）ことを検討する。

図 15.3 に、マスクの改良前後の SDB、誤差分布、SDB と水路測量データの散布図をそれぞれ示した。誤差分布をみて分かるように、実際より浅く推定している誤差（赤色）の分布域が縮小していることが分かる。また、散布図を見ても右下の分布（実際より浅く推定したデータの分布）が明らかに減っており、95%の信頼区間も幅が狭まっており、結果が改善されていることが分かる。

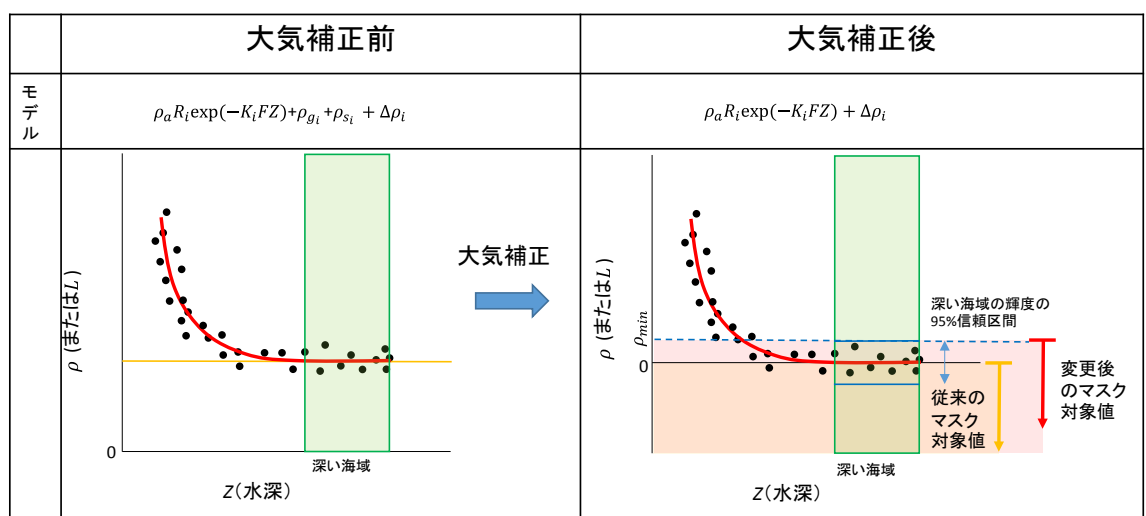


図 15.2 大気補正前後の反射率データ分布とマスク閾値のイメージ

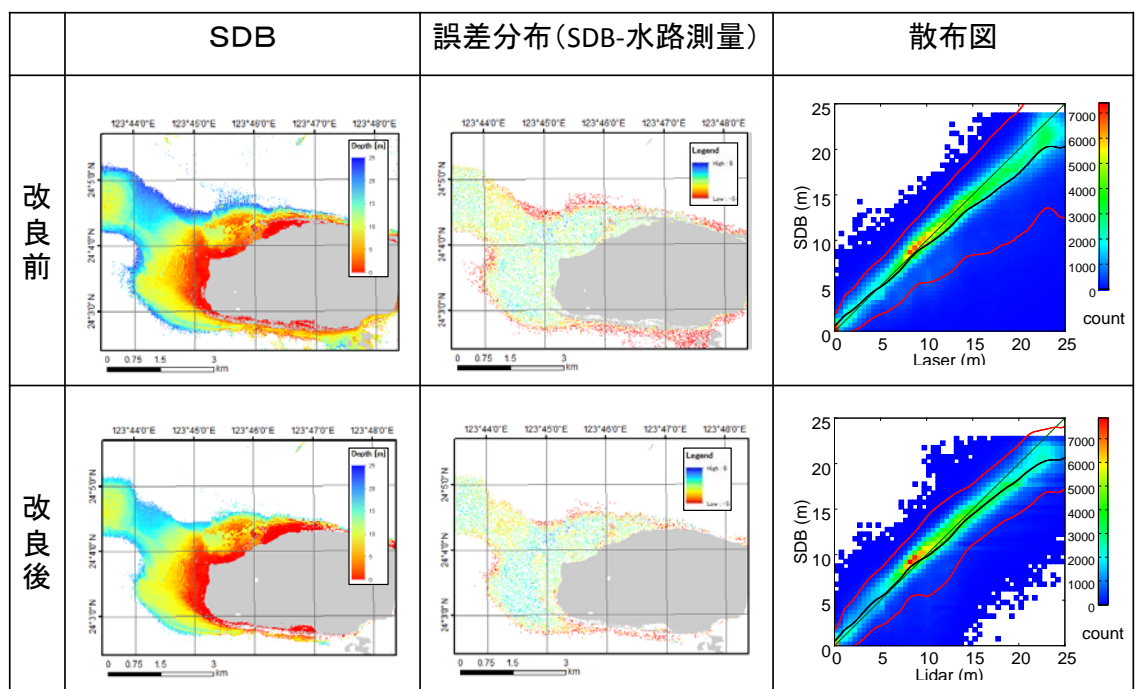


図 15.3 マスク改良前後の SDB、誤差分布、散布図

### 15.2.3 水平方向の位置ずれによる誤差

誤差分布を詳細に分析するために、図 15.4 のように、拡大していくと、実際より深く推定している誤差（青色）の分布はランダムではなく、特定の場所に偏って分布しているように見える。図 15.5 ではさらに、衛星画像、SDB、水路測量、誤差分布の図をそれぞれ並べているが、この図から、岩やサンゴ礁などの輪郭に沿った形で誤差が分布しているようにも見える。図 15.6 は矢印 A - B の SDB および水路測量の水深の断面図であるが、SDB と水路測量のデータ間で水平方向の位置が一致していない可能性も考えられる。

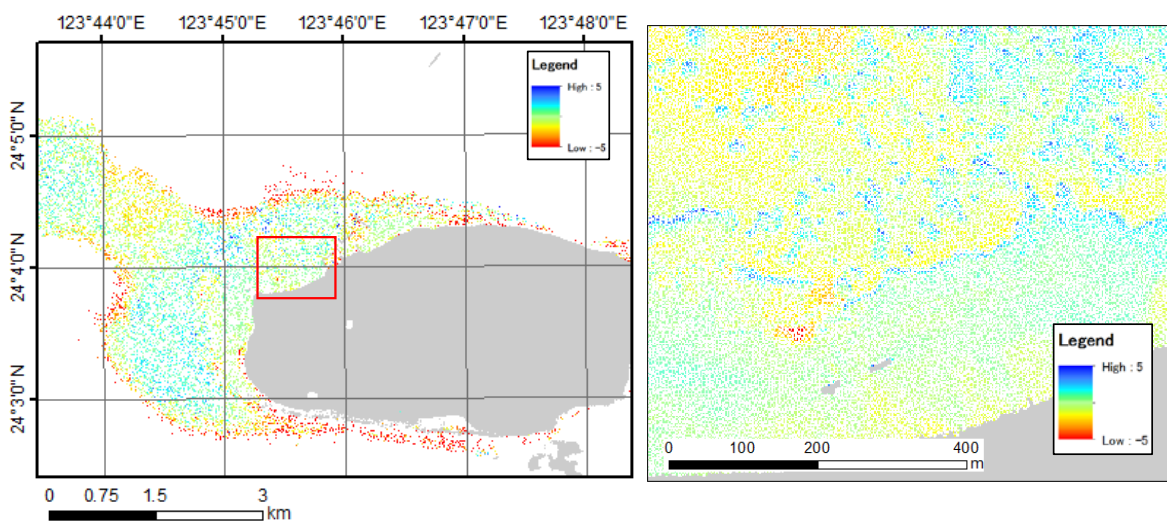


図 15.4 波照間の誤差分布の例

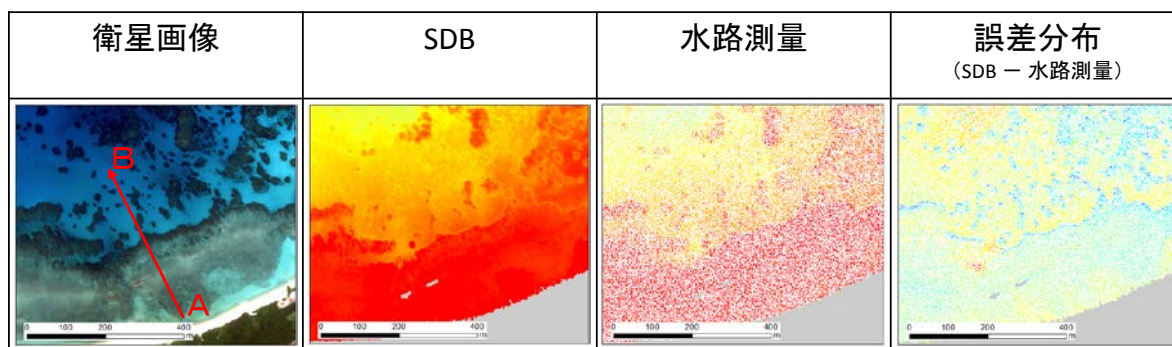


図 15.5 衛星画像、SDB、水路測量、誤差分布の例



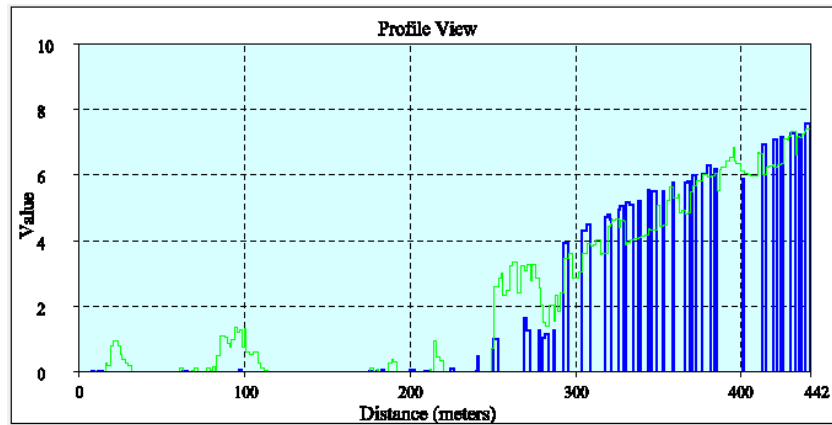


図 15.6 矢印 A-B の水深の断面

図の矢印 A-B に沿った水深をグラフの左から右に表示している。横軸は距離 (m)、縦軸は水深 (m) を表し、緑色が SDB、青色が水路測量の水深である。

図 15.7 の①、②、③の海域について、衛星画像、SDB、誤差分布、水深の断面図を図 15.8 のように並べて比較してみると、同様に水平方向に位置がずれているように見える。



図 15.7 誤差分布の調査域

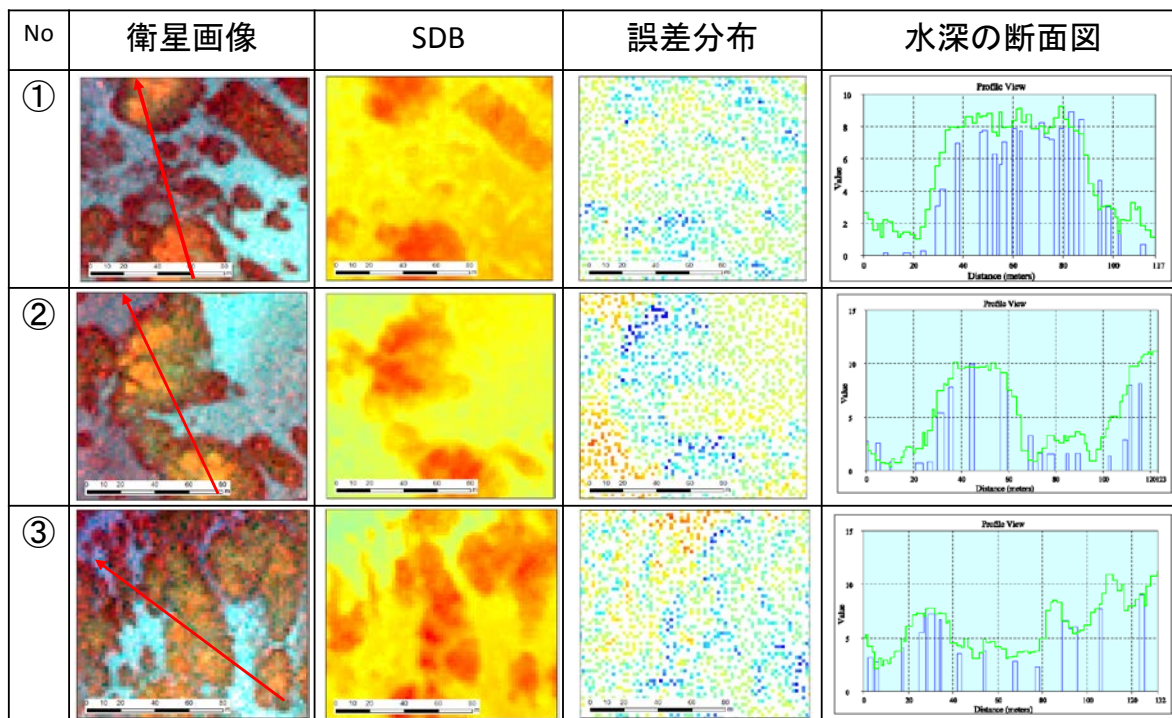


図 15.8 図 15.7 に対応する衛星画像、SDB、誤差分布、水深の断面図

図から推定される SDB の位置ずれの方向を矢印で示すと、図 15.9 のようになる。SDB と水路測量データの水平方向の位置がずれる原因は主に次の 3 つが考えられる。

- (1) 衛星画像自体が持っている誤差
- (2) 水路測量データが持っている誤差
- (3) 衛星データの投影面を水面にしていることにより生じる幾何的な水平位置のずれ

(1)、(2) は基本的には取り除くことのできない誤差であり、(1) は衛星ごとに精度が公表されており、WorldView-2 の場合は 5m CE90%である。(2) は S-44 の基準から 95%の信頼区間の誤差の限度は 20m の水深で 6m である。(1) の基準を S-44 に合わせる場合、誤差が正規分布という仮定で約 5.9m と計算できる。即ち (1) と (2) を合わせた場合の誤差の最大値は 12m となる。

(3) の位置のずれは、図 15.10 より幾何的に計算できる。図 15.10 において太い矢印は太陽光の直達成分の経路を示しているが、衛星の天頂角が  $0^\circ$  より大きい場合は、光が観測対象から水面に移動する間に水平方向の位置が  $\Delta x$  だけ移動する。 $\Delta x$  は、直達光の対象物から水面への入射角  $\varphi_{sat}$ 、水深  $Z$  を用いて次式で表せる。

$$X_{A2} = Z \tan \varphi_{sat} \quad (15.1)$$

また、衛星の天頂角 $\theta_{sat}$ と $\varphi_{sat}$ の関係は、スネルの法則から

$$\sin\varphi/\sin\theta = n_a/n_w \quad (15.2)$$

ここで、 $n_a$ と $n_w$ はそれぞれ空気と水の真空に対する屈折率で、それぞれ、1.000、1.333を用いる。

本事業で扱っている幾何補正済みの衛星画像では、海域の場合、衛星データを海面に投影している。しかしながらここでは海底が対象であるため、衛星方向に $\Delta x$ ほど位置がずれていることになる。通常、衛星天頂角は $30^\circ$ 未満であることがほとんどのため、衛星天頂角が $30^\circ$ の場合で $\Delta x$ は最大となり、水深の約0.4倍である。すなわち、水深が10mの場合で約4mとなる。

ここで扱っている WorldView-2 画像の場合、天頂角は $26.4^\circ$ 、アジマス角は $76.5^\circ$ であり、北北東方向に水深の3.54倍のずれが生じる。しかしながら、図 15.11 を見ると南南東方向に位置ずれは生じていると考えられ、関係性は得られず、主な原因ではないと考えられる。図 15.8 から確認できた結果では、位置ずれは10m未満と考えられ、(1) と (2) の要因を合わせた場合の誤差の最大値である12m未満におさまっている。

(3) の要因について今回は主な原因ではないと考えられたため補正を行っていないが、衛星天頂角が大きい場合には無視できない誤差となる。幾何補正時には通常海底地形が分からないため位置の補正は難しいが、SDB を一度計算した後にその値をもとに補正する方法などが考えられ今後検討すべき課題である。

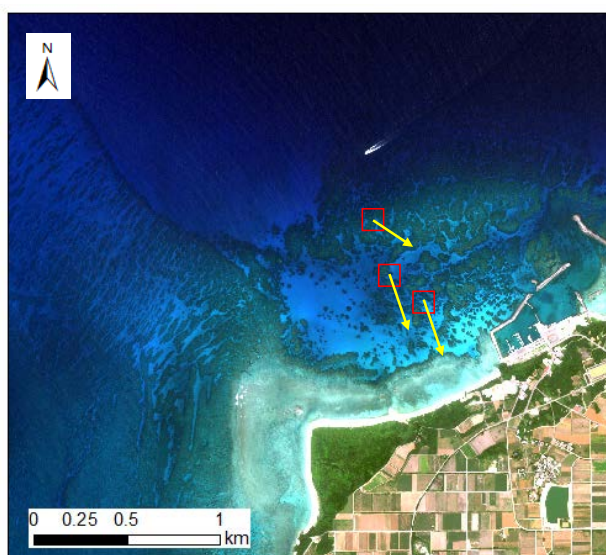


図 15.9 水平誤差の方向

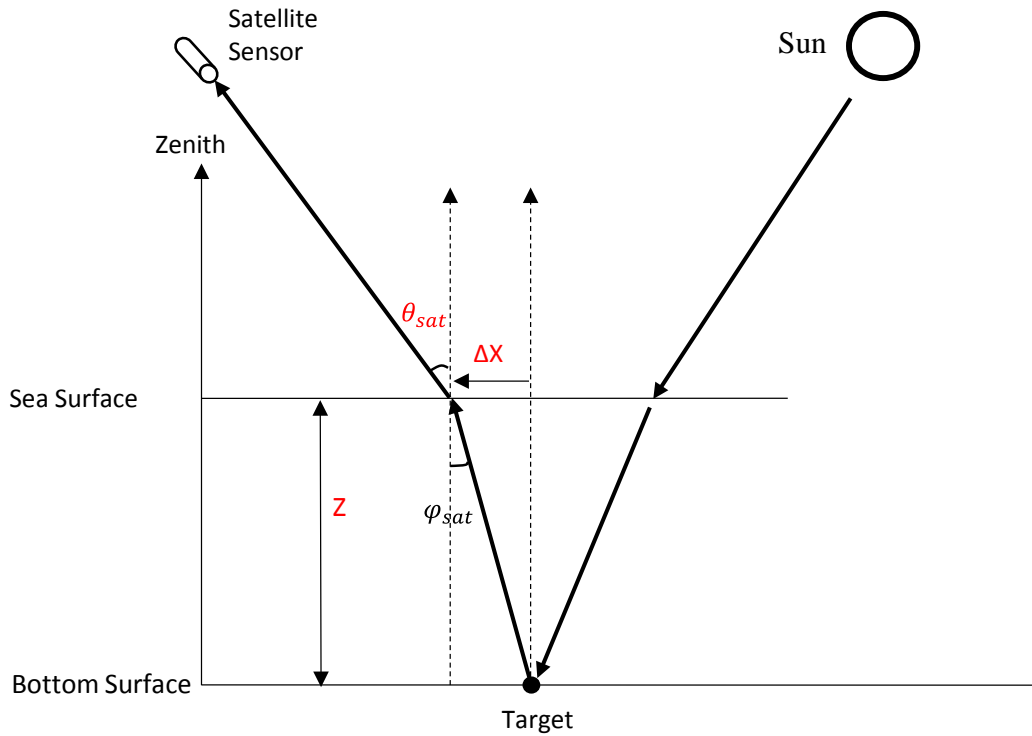


図 15.10 衛星天頂角と水平位置のずれの関係

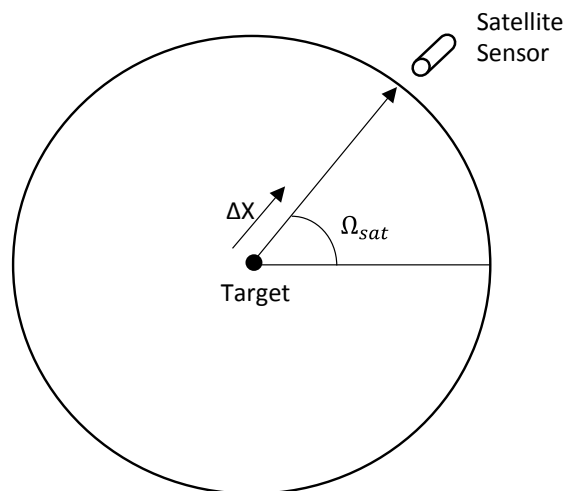


図 15.11 衛星アジマス角と位置ずれの方向  
(対象を真上から見た図)

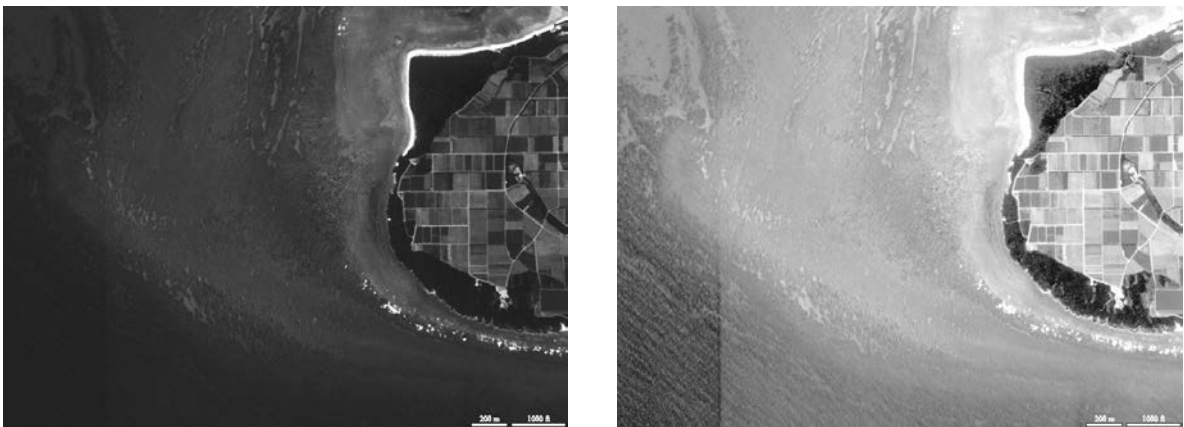
#### 15.2.4 センサの感度ムラの影響

衛星画像には観測センサの CCD（撮像素子）間の感度差に起因する感度ムラが生じることがある（図 15.12）。感度ムラは陸域を対象とする場合にはほとんど認識できないレベルだが、海域の細かい輝度差が分かるレベルでコントラストを強調すると視認することができる（図 15.13）。



図 15.12 感度ムラの例

一定幅毎に、感度の差があるように見える。



(a) 通常の場合

(b) 海域のコントラストを強調した場合

図 15.13 コントラスト調整と感度ムラの確認

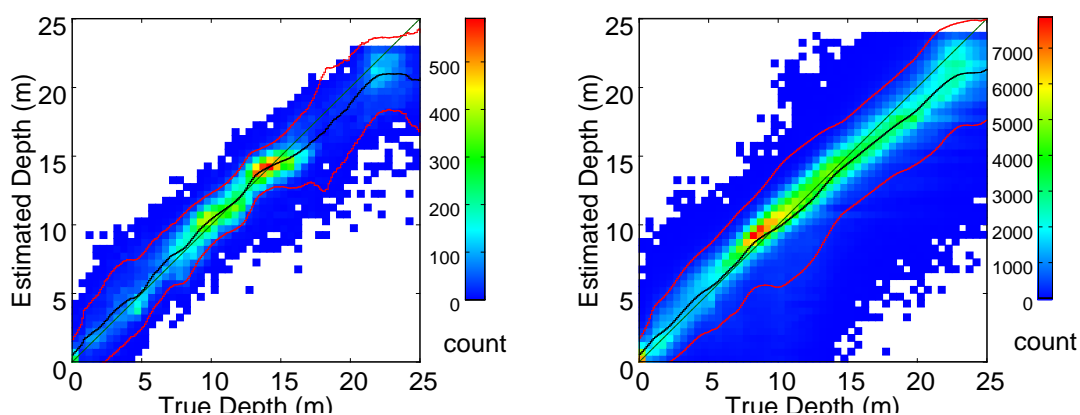
水深の推定は輝度のわずかな違いに基づいて行っているため、この感度ムラが視認できるレベルの場合は無視できない。しかしながら、このムラについての補正は、プロダクト生成の過程で衛星運用機関が実施することが望ましく、幾何補正済みなどの高次の衛星プロダクトに対する補正をユーザー側で実施することは困難である。

### 15.3 学習用水深データによる精度推定

本事業では、水路測量データの一部を学習用に、全部のデータを評価用を使用して精度検証を行った。しかしながら、実用を考えた場合には学習用水深データのみから精度の推定も

行う必要がある。基本的には学習用データ（サンプル）と評価用データ（母集団）について統計的に大きな差異が無ければ、どちらのデータで精度評価してもほぼ同じ精度が得られるはずである。図 15.14 は、波照間の衛星画像（ID：p47n010）の SDB と水路測量データの散布図だが、水路測量データが学習用と評価用とで大きくデータ分布の傾向が変わるわけではないことが分かる。

しかしながら、水深の推定方法によっては学習用水深データのみで特化した形で水深を推定することもできるため、一般的には学習用水深データと単純に比較するだけでは精度の検証方法として不十分と考えられる。そこで、信頼性の高い精度を得るために、交差検証という方法が用いられる。ここでは、K-分割交差検証について検討してみる。



(a) SDB と学習用水深データの散布図

(b) SDB と評価用水深データの散布図

図 15.14 波照間の衛星画像（ID：p47n010）の SDB と水路測量データの散布図

K-分割交差検証では、全学習データを K 個に分割し、そのうち K-1 個を学習に、1 個を評価データとして、K 回検証を行う。そうして得られた K 回の結果の平均を一つの推定値として得る。波照間のデータについて、K を 10 として交差検証を行った結果を表 15.1 にまとめた。ここでは、全水深帯の誤差の平均値と RMSE について算出したが、それぞれ平均値 ± 標準偏差の値を示した。誤差平均も RMSE も 10 回の交差検証値の標準偏差は 0.08m で、水深を 0.1m 刻みで算出していること考えるとばらつきはほとんどないといえる。学習データ全部を学習と評価に用いた場合も誤差平均と RMSE はそれぞれ 0.00m、1.31m で同じ値だった。すなわち、本事業で実施した方法を用いる場合には交差検証をしなくても学習に用いたすべてのデータと比較することでほぼ同程度の精度が得られているといえる。

表 15.1 交差検証結果

交差検証結果	
回数	10
誤差平均	0.00 ± 0.08m
RMSE	1.31 ± 0.08 m

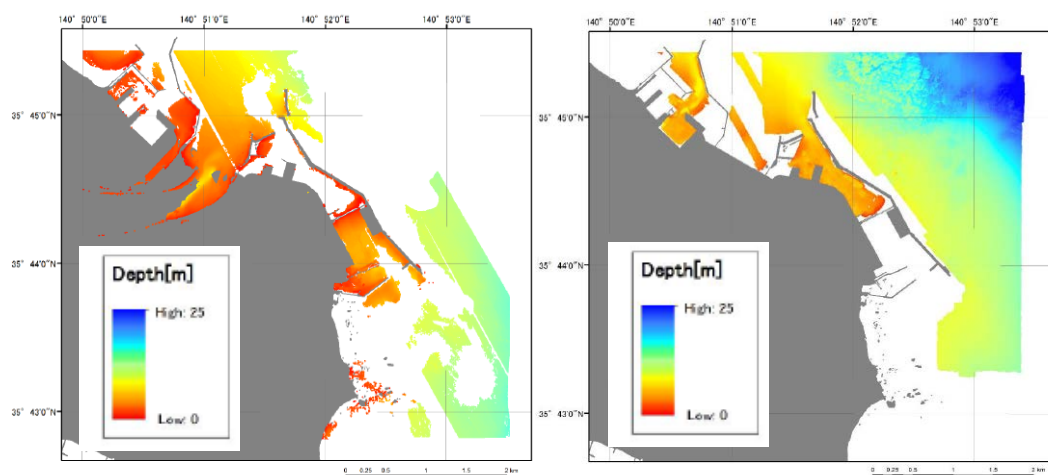
## 15.4 使用した水路測量データに関する考察

本事業では、水路測量データを水深値の正解データとして扱ってきた。しかしながら、水路測量データも誤差を含んでおり、その精度は計測方法によって若干異なる可能性がある。ここでは、同じ海域で複数の水路測量データがある海域について水路測量データ間の比較を行った。また、SDBの精度検証についても複数の水路測量データで検証した。

図 15.15 は、銚子沖の水路測量データで、(a) と (b) はそれぞれレーザー測深、マルチビームソナー測深による水深分布を示している。水深 0 - 15m において重複領域があり、それらのデータについて作成した散布図を図 15.16 に、マルチビームソナー測深を基準とした場合の精度に関する統計量を表 15.2 に示した。決定係数は 0.977 で、非常に相関が高く、全水深の RMSE も 0.25m と誤差も小さい。全水深の 95%CL は、 $-0.18 \pm 0.49\text{m}$  であり、誤差が最大で  $-0.67\text{m}$  となることから S-44 の 1a/b の基準より若干大きくなる。また、水深ごとの 95%CL の最大値は  $-0.14 \pm 1.25\text{m}$  となった。このことから、S-44 の 1a/b の基準を満たす水路測量データ間の比較であっても、その差分の大きさは S-44 の 1a/b の基準を上回る事が分かる。また、水深によっては、その差は 2 倍以上大きくなった。水路測量データ間の差分を算出する場合は、各水路測量データの誤差が合わさることや水平方向の位置ずれによる誤差の発生により上記のような結果となったと考えられるが、これは SDB と水路測量データの比較についても同様のことが言える。

図 15.17 と図 15.18 は、それぞれ波照間のレーザー測深と沿岸海の基本図の水深分布を表している。データ重複領域の散布図を図 15.19 に、沿岸の海の基本図を基準とした場合の精度に関する統計量を表 15.3 に示した。決定係数は、0.767 でやや低く、全水深の RMSE も 2.63m と誤差も大きい。全水深の 95%CL は、 $1.61 \pm 5.16\text{m}$  と S-44 の 1a/b の基準の 10 倍以上にもなった。レーザー測深と沿岸海の基本図は目視判読で比較する場合には海底地形がよく一致しているように見えるが、統計量では誤差が大きくなったため、詳細にみていくと水平方向の位置ずれや時間的な水深変化などの影響が大きいと考えられる。

図 15.20 は竹富島周辺の衛星画像で、図 15.21 は沿岸の海の基本図を学習用水深データとして用いた場合の SDB である。この海域では、沿岸の海の基本図とシングルビーム測深データがあったため、それぞれを学習用水深データとした場合の SDB と学習用水深データの散布図をそれぞれ図 15.22 (a)、図 15.22 (b) のように作成した。沿岸の海の基本図と比較した場合には、シングルビーム測深と比較した場合より明らかにデータの差分が大きいことが分かる。本事業では石西礁湖において沿岸の海の基本図のデータを多く用いてきたが、精度については適切に評価できていない可能性があり、マルチビーム測深やレーザー測深のデータと比較すれば算出される精度は向上する可能性がある。



(a) レーザー測深

(b) マルチビームソナー測深

図 15.15 水路測量データ (銚子)

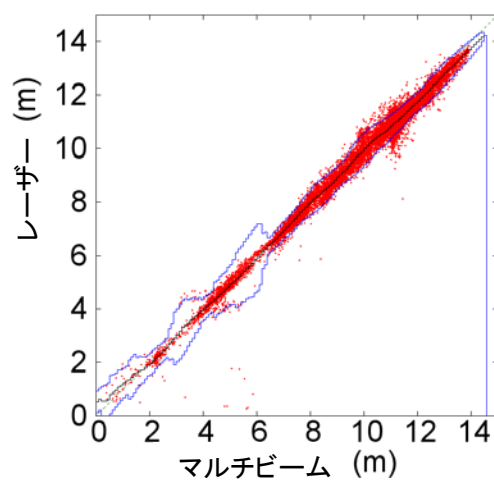


図 15.16 レーザー測深とマルチビーム測深の散布図 (銚子)

表 15.2 マルチビーム測深を基準とした場合のレーザー測深の精度 (銚子)

R2	0.977
RMSE (全水深)	0.25 m
95%CL (全水深)	-0.18±0.49 m
水深ごとの RMSE の最大	0.64 m
水深ごとの 95%CL の最大値	-0.14±1.25 m



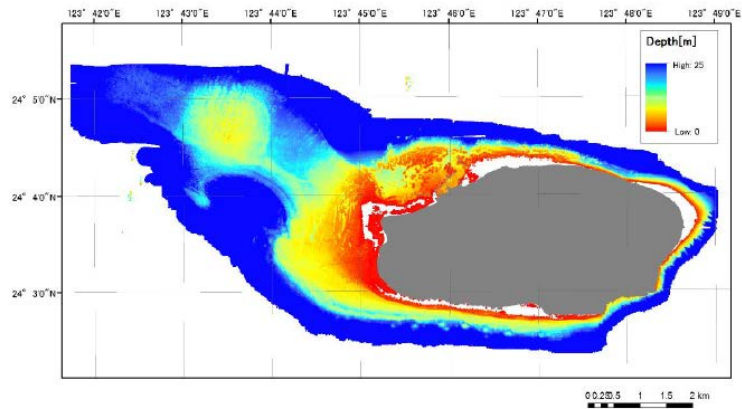


図 15.17 レーザー測深 (波照間)

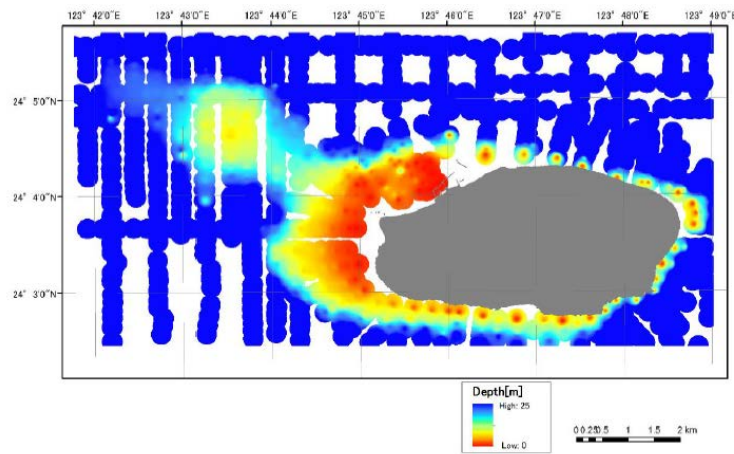


図 15.18 沿岸の海の基本図 (波照間)

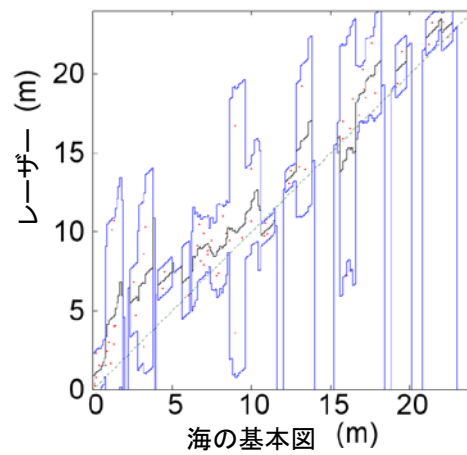


図 15.19 レーザー測深と沿岸の海の基本図の散布図 (波照間)

表 15.3 沿岸の海の基本図を基準とした場合のレーザー測深の精度 (波照間)

R2	0.767
RMSE (全水深)	2.63 m
95%CL (全水深)	1.61±5.16 m
水深ごとの RMSE の最大	4.67 m
水深ごとの 95%CL の最大値	0.95±9.15 m



図 15.20 衛星画像 (竹富島)

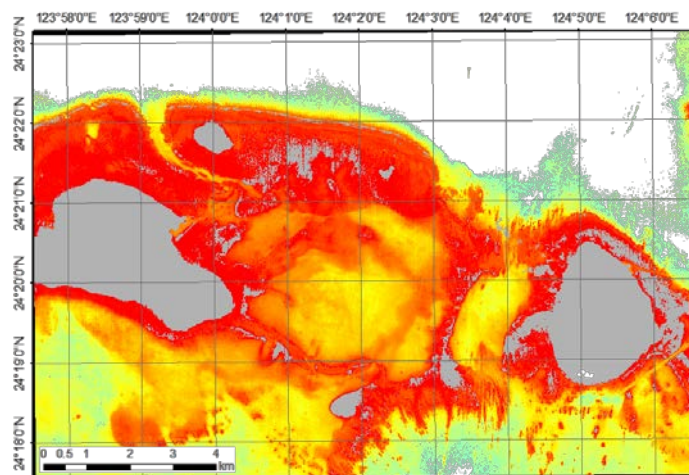
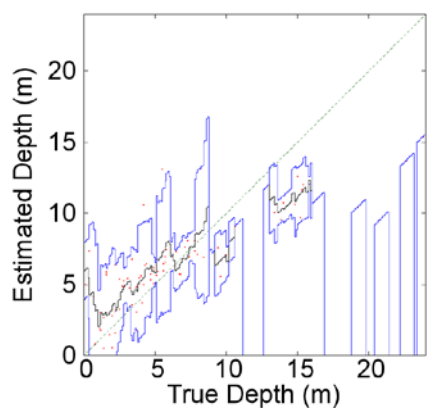
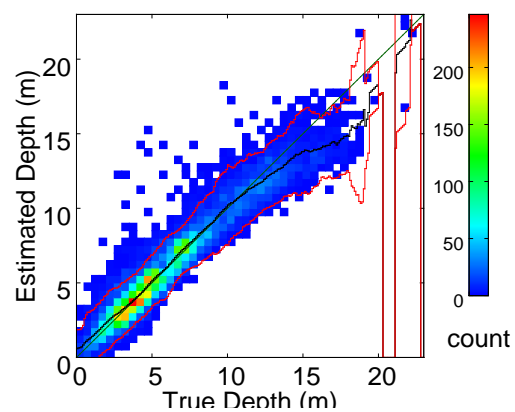


図 15.21 SDB (竹富島)



(a) 沿岸海の基本図



(b) シングルビーム測深

図 15.22 SDB と水路測量データの散布図

## 第16章 まとめと将来の展望

本事業では日本沿岸における SDB 技術の実用化に向けて解析システムの開発を行い、その中で 20 シーン以上の衛星画像を扱い、30 以上の SDB の結果を作成した。日本以外でもこれまでこれほど多くの海域について SDB を作成し、比較調査した結果はなく、貴重な調査結果を得られたといえる。

実用化を考えた場合、精度とコストの二つの面で課題がある。精度については、条件がよい場合でも S-44 の基準には届いていないため、水路測量への利用は難しいと考えられる。しかしながら、目視判読による比較では水路測量と同様に地形を推定できている海域もあり、精度が低くとも大まかな地形を知りたいといった用途であれば利用できる可能性がある。例えば、津波や高潮による浸水域のシミュレーションのための基礎データとしての活用が考えられる。ただ、その場合も精度が安定していることや解析できない領域を表示しないためのマスク処理の改善が要求されるであろう。

コストについては、衛星画像と解析に必要な学習用水深データの取得や画像解析にかかるコストが主なものである。衛星画像は本事業には主に WorldView-2, 3 衛星の画像を用いてきたが、衛星画像としては高解像度な反面、コストが高いというデメリットもある。SDB は、既存の音響測深やレーザー測深技術と比較しコストが低いという点が大きなメリットでもあるので、低価格な衛星画像の活用も考慮すべきである。本事業では一部の海域において複数の衛星画像による解析を行い、精度が大きくは変わらないことを明らかにできた。これは大きな成果の一つであるが、比較するセンサなどを絞ってさらに多くの海域で同様の調査を行う必要がある。学習用水深データについては、現地で船などによる観測によりデータを取得する必要があるため、こちらもコストがかかる。そのため、学習用水深データを減らす方法や学習用水深データを用いない方法があれば実用面ではより有用である。本手法で用いた Lyzenga (1978) の手法は、Lyzenga et al. (2006) によるとより一般性の高いモデルに発展させることができ、他の海域で得られた水深推定式の係数を別の海域に利用できる可能性がある。画像解析については、本事業における専用ソフトウェアの開発により効率化できるようになったものの、SDB についての専門知識をもった技術者による解析の実施が望ましい。

本事業ではシミュレーションを用いた検討も行った。シミュレーション結果では、透明度の高いケース（クロロフィル濃度が  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ）で水深 20m 付近が解析限界水深であることが分かり、これは波照間の結果とほぼ一致しているといえる。複数の底質が水深推定精度に与える影響も、シミュレーションと実際の解析結果で同様の傾向が得られることが分かった。しかしながら、本事業で実施したシミュレーションは、限定された条件下でのシミュレーションであり、多様な条件下で撮影された衛星データをそのまま再現できるものではない。一つには本事業で用いたシミュレータ HydroLight では海面直上での放射輝度や反射率

を扱っており、衛星観測時に考慮しなければならない大気中の影響まではシミュレーションできないためである。大気中の影響をシミュレーションするためには 6S モデルなどの放射伝達モデルがあり、HydroLight などの水中の放射伝達モデルと合わせてシミュレーションをさらに高度に発展させることができれば、各衛星画像に対応した水深推定式の係数を得ることもできるようになるかもしれない。

本事業は、日本国内における SDB の実用化に向けたはじめての本格的な取り組みであるが、多くの有用な成果が得られ、課題なども明らかとなった。今後は、SDB の技術がさらに発展して世界中の浅海域の水深情報を低コストかつ迅速に提供できるようになることで、民間の測量事業や国際協力事業などで広く活用されることを期待したい。