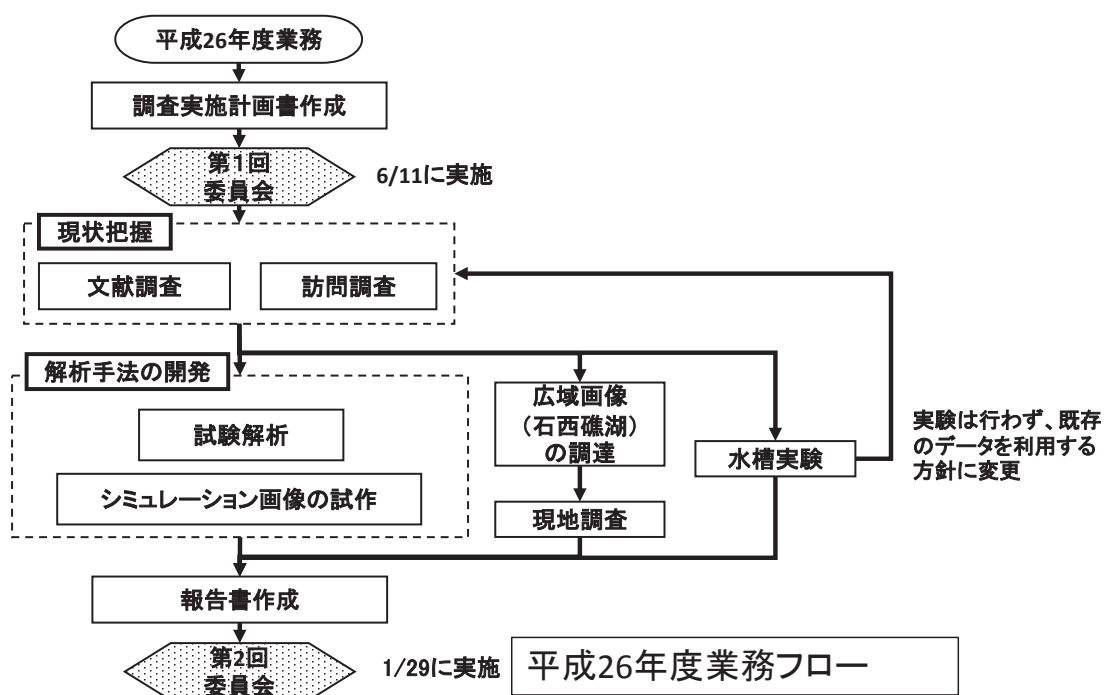


平成26年度衛星画像を用いた浅海水深情報の把握の調査研究実施報告

2015年3月
(一財)日本水路協会

平成26年度業務概要

- 本事業は(一財)日本水路協会が平成26年度から平成28年度の3年間に実施予定の事業で、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が目的。
- 衛星画像解析技術の災害時の水深変化の状況把握や海図のないエリア等への活用を期待。
- 初年度に当たる今年度は国内外での研究等の把握及び海外での衛星画像データの活用について調査及び解析手法の開発を実施。



報告内容

- 文献調査、訪問調査
- 解析手法の開発
- 石西礁湖調査(画像調達および現地調査)
- まとめ
- 27年度調査計画案

2

文献調査、訪問調査

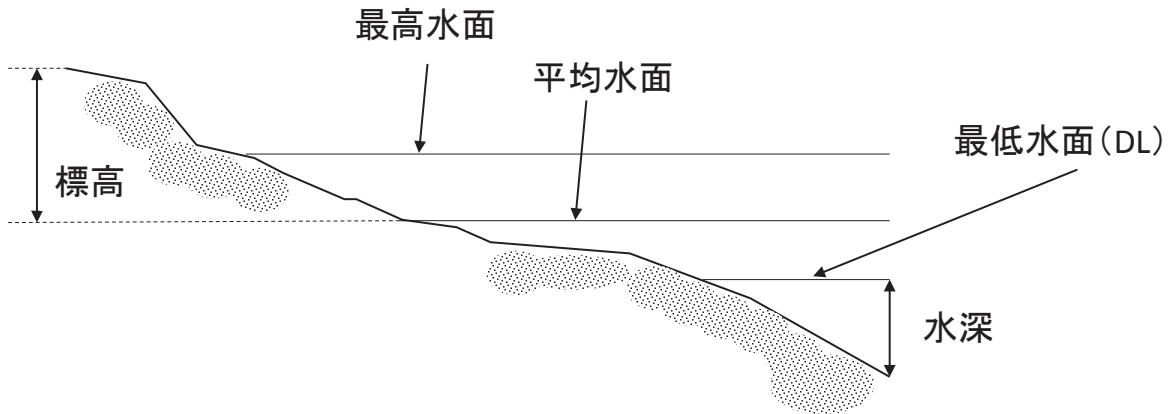
衛星画像から水深情報を取得する技術および海図等への採用方法に関する文献調査および国内外の専門機関への訪問調査を実施。

- 水深情報抽出技術の概要
 - 海図の水深
 - 既存測深技術
 - IHOの測量基準
 - 衛星画像を用いた水深情報抽出技術の概要
- 衛星画像データの取得と補正処理
 - 衛星画像データの特徴
 - 水深情報の取得に有効な衛星画像データ
 - 幾何補正
 - 放射量補正
- SDB作成手法
 - 手法の概要
 - 放射量解析による水深推定
 - Banny and Dawson (1983)の方法
 - Lyzenga(1978)の経験的手法(empirical method)
 - Leeら(1998,1999)のインバージョン法(inversion method)
- 訪問調査報告
- 解析手法についての考察と本研究調査における開発方針

3

海図の水深

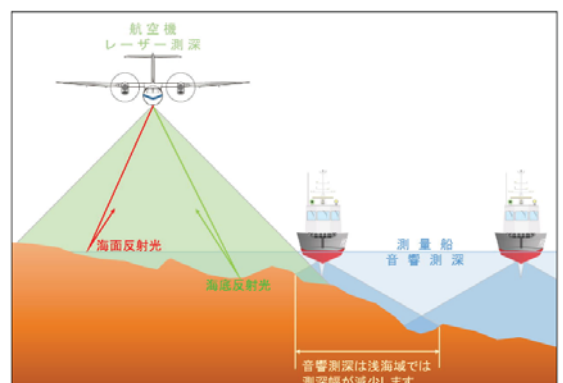
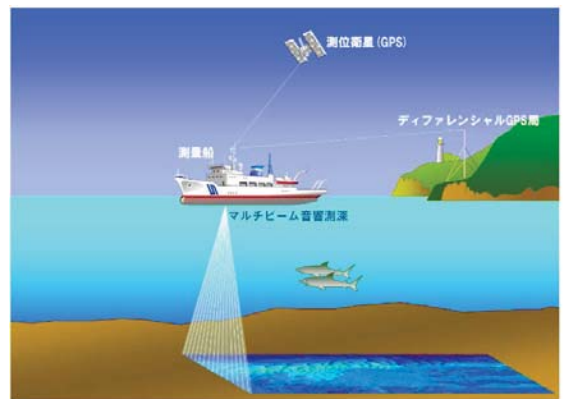
- 本研究調査では衛星画像解析によって求められた水深の海図等への採用を利用用途の一つとしているため、海図における水深について理解しておく必要がある。
- 海図における水深の基準面は最低水面(DL)が用いられる。
- 最低水面を基準面とするのは航行上の安全のため。



4

水路測量における既存の測深技術

- 水路測量
 - 海図の水深は水路業務法に基づいた水路測量により計測。
- 音響測深
 - 発信した超音波が海底から反射して戻ってくるまでの時間の差を利用して水深を求める。
 - 測量船の位置はGPSとディファレンシャルGPS局からのデータで精密に決定。
- 航空レーザー測深
 - 航空機から送信されたレーザーパルスの海面および海底からの反射を検出し、パルス波が往復に要した時間に基づき水深を求める。
 - 航空レーザー測深機の位置と姿勢は、GPSと慣性測定装置の組み合わせにより求める。



IHOの測量基準

- 水路測量の基準は国際水路機関(IHO: International Hydrographic Organization)発行のS-44)で決められているものがあり、海図への測深データの基準として採用されている。

- 1級の基準

- 水平位置の測定の誤差の限度(THU: Total horizontal uncertainty)

$$5 + 0.05 * d \quad (\text{m})$$

- 深さの測定の誤差の限度(TVU: Total vertical uncertainty)

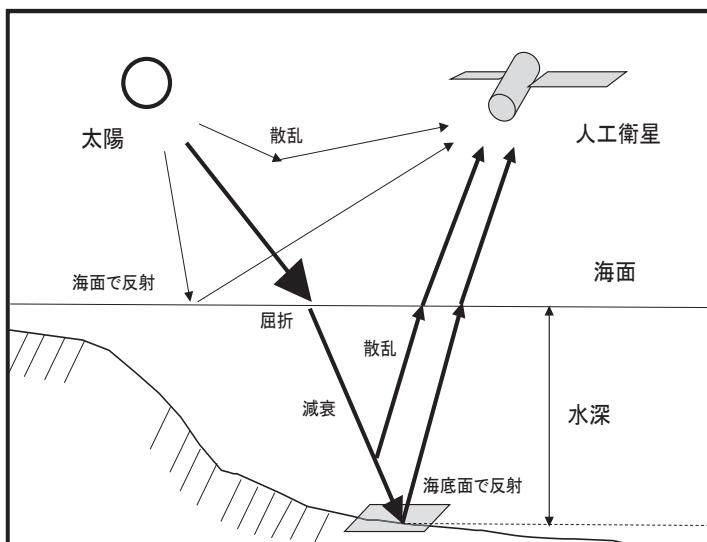
$$\pm \sqrt{0.5^2 + (0.013 * d)^2} \quad (\text{m})$$

* 各精度は95%信頼区間の最大許容誤差を表す。
dは水深でそれぞれ水深の関数となる。

6

衛星画像を用いた水深情報抽出技術の概要

- 衛星データでは光学センサを利用した水深情報の抽出方法がある。
- 光学センサは太陽光の地表からの反射光の強さ(放射輝度)を計測するが、光は水中で減衰するため水深により放射輝度の強さが異なることを利用して水深を推定する。
- IHOでは、衛星画像から作成した水深及び海底地形はSDB (Satellite Derived Bathymetry)と呼ばれており、本調査でもSDBと呼ぶ。また、和名については、衛星画像推定水深と呼ぶことにした。

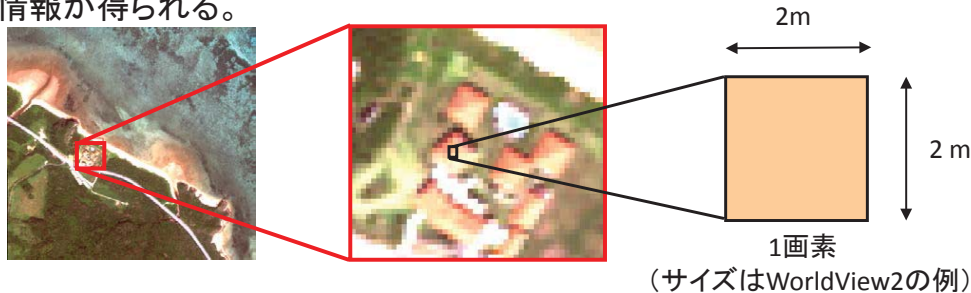


7

衛星画像データの特徴

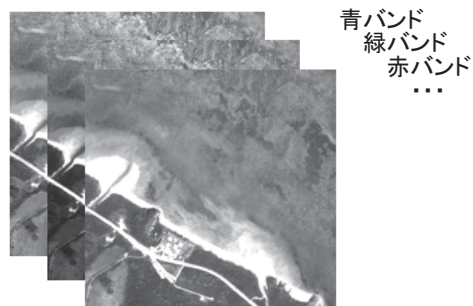
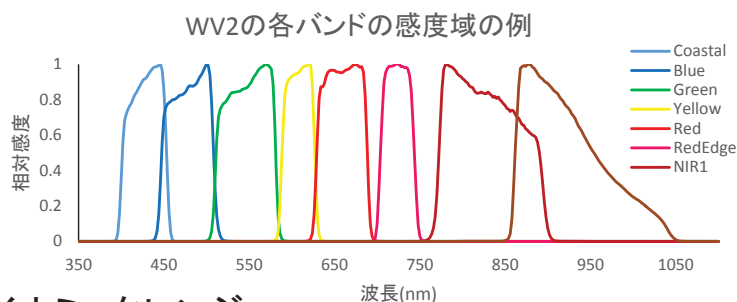
空間分解能

- 衛星画像の各画素の一边が対応する実際の地表での距離。値が小さいほど詳細な情報が得られる。



バンド

- センサが感知する特定の波長帯。水深情報の取得にはマルチバンドセンサを使用。一般にバンド数が多いほど詳細な情報が得られる。



ダイナミックレンジ

- センサの最小検知感度と最大検知感度の差で、量子化ビット数の大きさを表されることが多く、放射量分解能の指標となる。

8

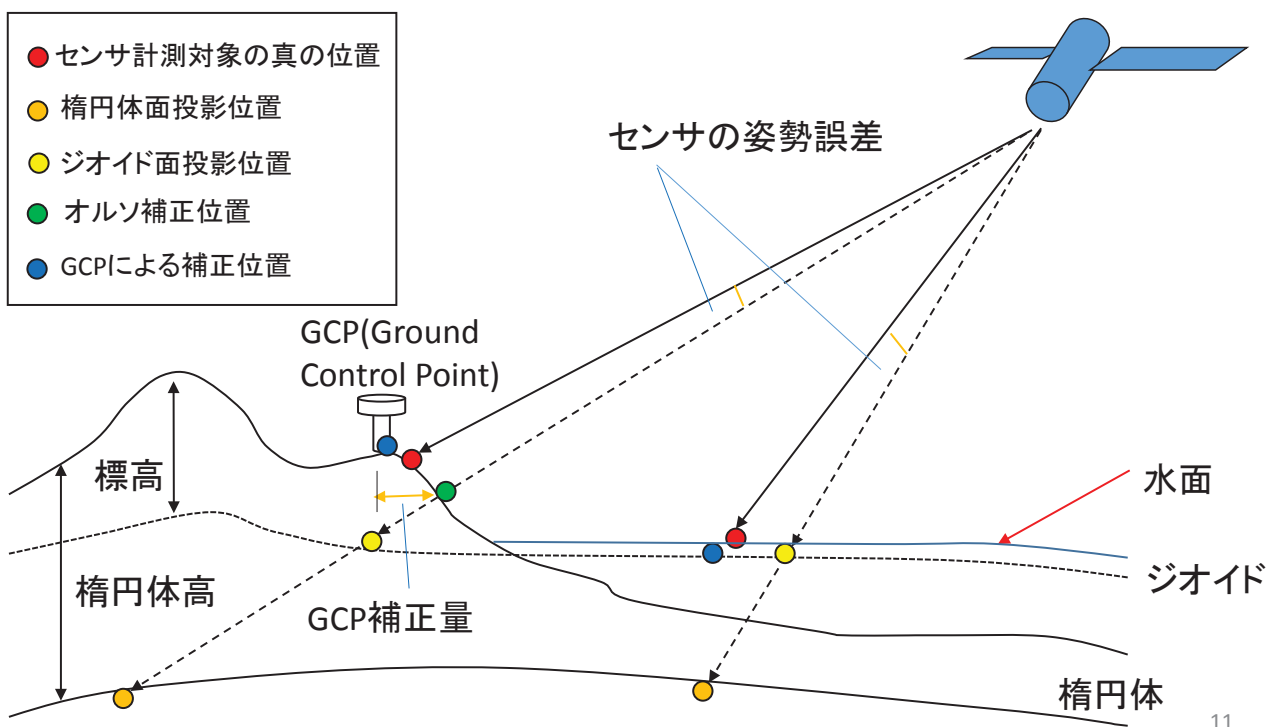
水深情報の取得に有効な衛星画像データの例

	地上分解能(マルチ) /観測幅 /回帰日数	波長帯域(nm)	打ち上げ日
WorldView2 (米)	1.84m 17.7km 3.7日	コースタル:400-450 青:450-510 緑:510-580 黄:585-625 赤:630-625 レッドエッジ:630-690 近赤外1:770-895 近赤外2:860-1040	2009/10/08(WV2)
SPOT-6/7 (仏)	8m 60km 26日	青:450-520 緑:530-590 赤:625-695 近赤外:760-890	2012/09/09(6) 2014/06/30(7)
Pleiades (仏)	2.8m 20km 26日	青:430-550 緑:500-620 赤:590-710 近赤外:740-940	2011/12/17 2012/12/1 (2機体制)
AVNIR-2 (日)	10m 70km 46日	青:420-500 緑:520-600 赤:610-690 近赤外:760-890	2006/1/24 (2011/5/12運用終了)
Landsat-8/ORI (米)	30m 185km 16日	1:433-453 2:450-515 3:525-600 4:630-680 5:845-885 *その他1000以上を含め計8バンド	2013/2/12

9

幾何補正

- 衛星画像データの各画素は撮影時の衛星の軌道や姿勢から算出された位置情報を持つが、この位置情報はデータの取得過程や地球の形状に起因する誤差を含む。
- 幾何補正では、この幾何学的な誤差に対する補正を行う。



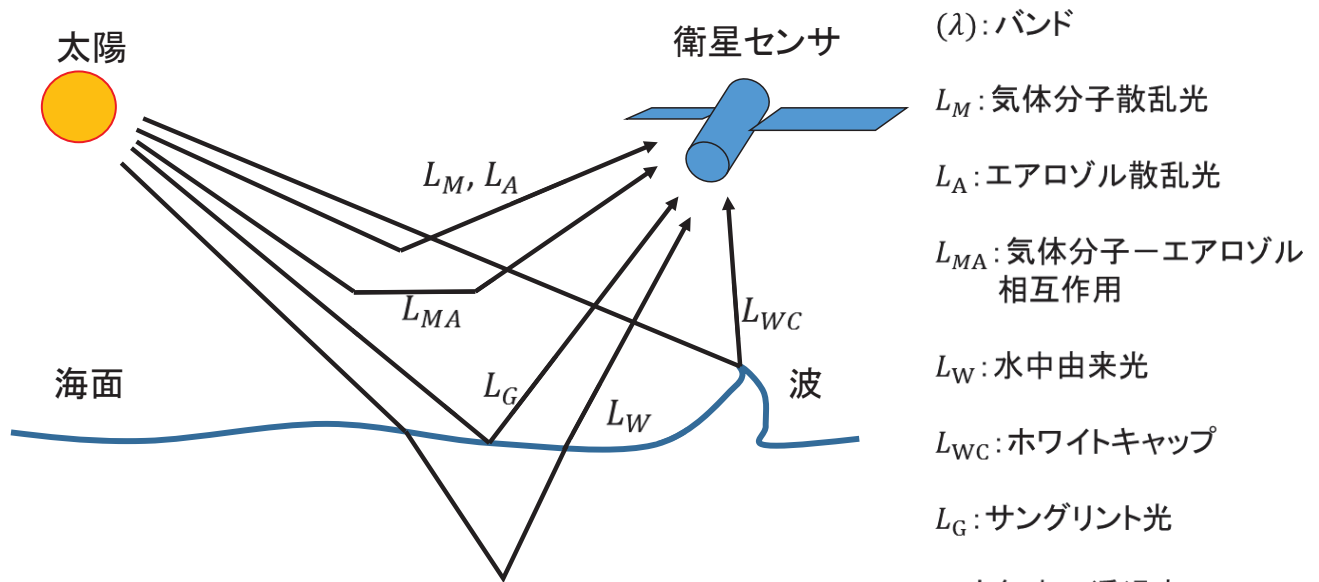
放射量補正

- 概要
 - 光学センサが記録する電磁放射のデータはたとえ地表面の状態がほぼ同じ場所を対象としても、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ばらつきが生じる。放射量補正ではこの放射量のばらつきの影響に対する補正を行う。
- DN値から放射輝度への変換
 - センサでは電磁放射の強さをDigital Number (DN)値で記録。変換式を用いてDN値を物理量である放射輝度に変換可能。
- 放射輝度から反射率への変換
 - 放射輝度を変換式により大気頂上における反射率に変換可能。
- 大気補正
 - 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る影響に対する補正。
- サングリント(Sunglint)補正
 - 海面で反射された太陽光に対する補正。

大気補正

- 大気補正はセンサで観測された放射輝度(または反射率)から水中由来成分 L_W を抽出することが主な目的。
- ホワイトキャップ、サンダリント光は基本的に画像選定時に影響の少ない画像を選ぶことで避ける。

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



13

大気補正

①水深の深い場所の画素データを利用した方法

- 水深の深い場所は海底からの放射がなく、 $L_M(\lambda)$ 、 $L_A(\lambda)$ および $L_{MA}(\lambda)$ 成分のみと仮定し、その値を画像全体から差し引くシンプルな方法。

②同期観測データを利用した方法

- 海面の反射率が既知の点で大気補正值を求める方法。

③放射伝達アルゴリズムを用いた解析的手法

- エアロゾルモデルなどを仮定し、放射伝達アルゴリズムに基づいて放射伝達モデルの各パラメータを推定し、大気補正を行う。

• 本研究調査で用いた方法

- 本研究調査では古くから広く用いられており、フランス海軍水路部のSDB作成手法にも取り入れられている①を採用。

13

サングリント補正

- サングリントの影響が小さい場合には近赤外バンドを利用した補正がある。
 - $L'_i = L_i - \gamma_{ij}(L_j - \bar{L}_j)$
 - L_i は補正対象バンド*i*の放射輝度、 L'_i は補正済放射輝度、 j は近赤外バンド、 γ は補正係数、 \bar{L}_j は海域の平均放射輝度



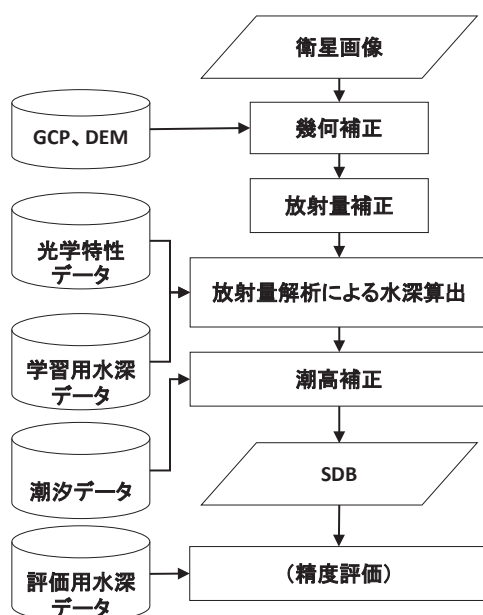
補正前

補正後

サングリント補正の例 (Kay et al. 2009)

14

SDB作成手法



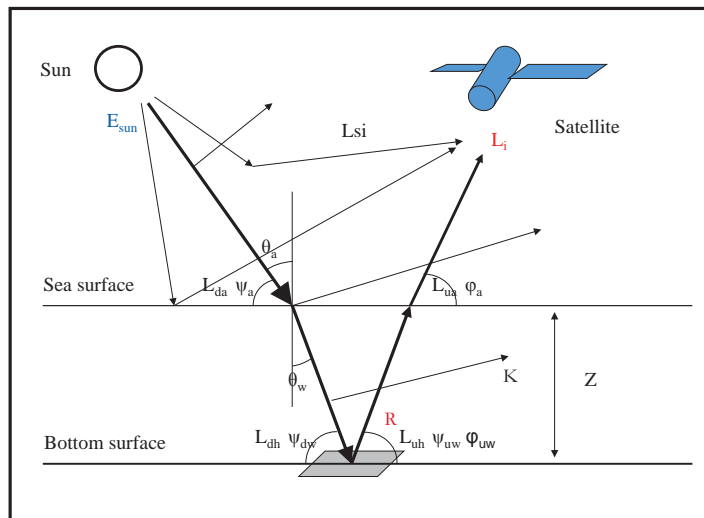
- 幾何補正
 - 衛星画像の幾何的な歪みを除去し、水平方向の位置精度を向上。
- 放射量補正
 - 放射輝度、反射率への変換、大気補正およびサングリント補正。
- 放射量解析
 - 放射伝達モデルに基づいて放射量を解析し、水深を算出。
- 潮高補正
 - 衛星観測時の潮位と最低水面との差に対する補正。

SDB作成フロー

15

沿岸域の放射伝達モデル

- 衛星センサで観測されたデータから水深情報を抽出するには水中での光の吸収、散乱特性、海底面反射率も考慮する必要がある。



$$L_i = A_i \cdot R_i \cdot \exp(-K_i \cdot g \cdot Z) + L_s \text{ (W/m}^2\text{/sr)}$$

(Lyzenga 1978)

L: 衛星で観測される放射輝度, i: センサのバンド, R: 海底面反射率

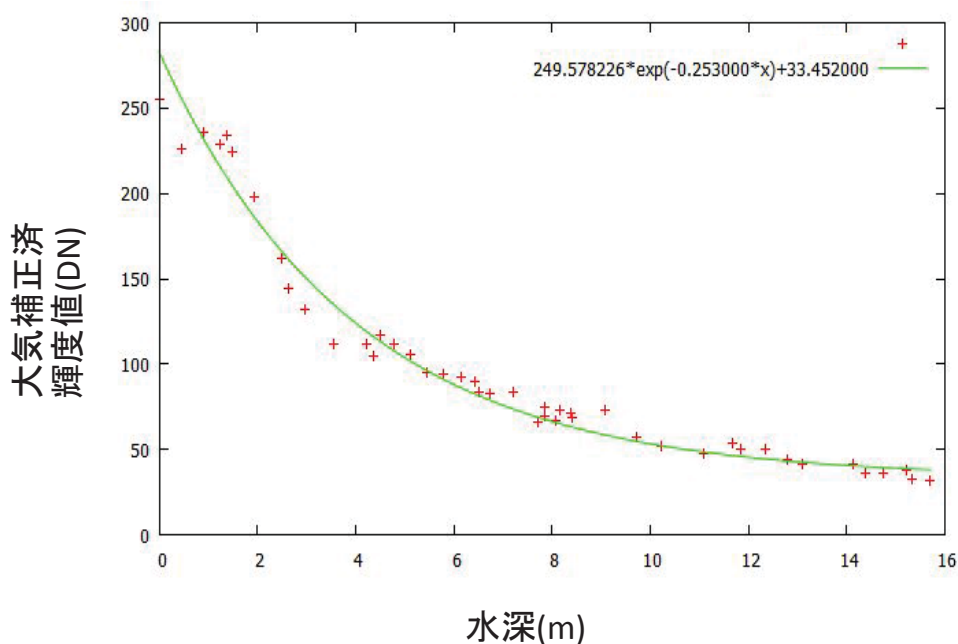
A: 海面直下における下向き放射輝度と大気中の光の減衰率を含む係数

K: 拡散消散係数, g: 幾何係数, Z: 水深

Ls: 大気中の散乱光の放射輝度

16

単バンドにおける水深と輝度値の関係の例

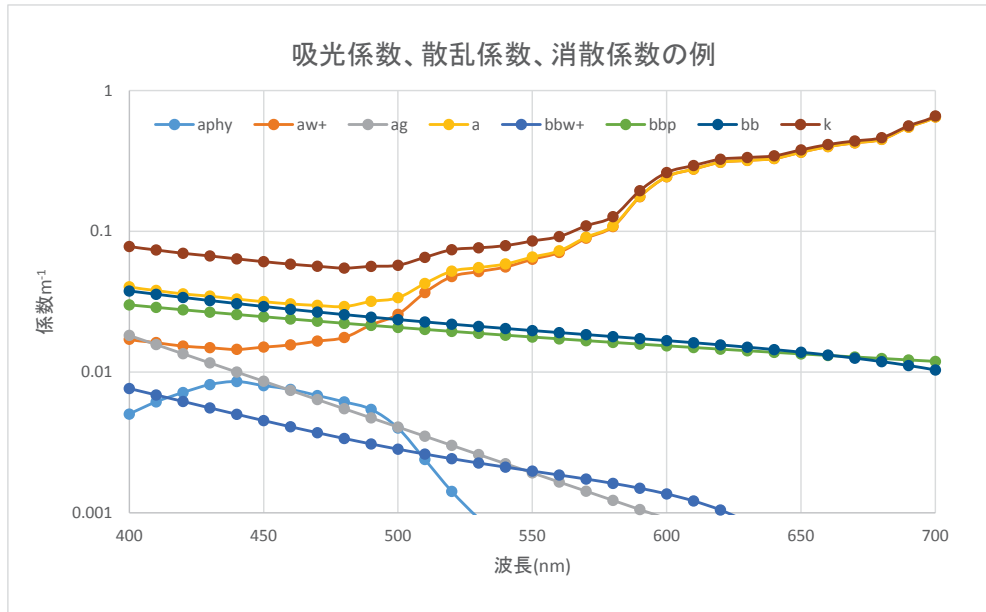


緑バンドにおける放射輝度と水深の関係の例
* 底質は砂地

17

海中における光の吸収、散乱に関する特性

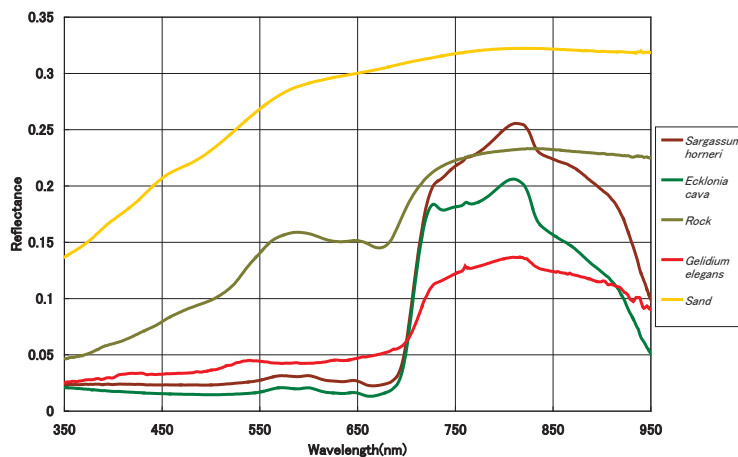
- 水中での光の減衰率を表す消散係数は、吸光係数と散乱係数の和で表される。水や水中の各成分自体の光学特性をIOPs (inherent optical properties) と呼ぶ。
 - 消散係数 $c(\lambda)$ = 吸光係数 $a(\lambda)$ + 散乱係数 $b_b(\lambda)$
 - 吸光係数 $a(\lambda)$ = 海水の吸光係数 $a_w(\lambda)$ + 植物プランクトンの吸光係数 $a_{phy}(\lambda)$ + 溶解有機物の吸光係数 $a_{dom}(\lambda)$ + 懸濁物の吸光係数 $a_{det}(\lambda)$
 - 散乱係数 $b(\lambda)$ = 海水の散乱係数 $b_w(\lambda)$ + 懸濁物の散乱係数 $b_{det}(\lambda)$
- 消散係数は衛星画像データ上での見かけの光学特性 (AOPs: apparent optical properties) である拡散係数と相関がある。



18

海底面反射率

- 砂、岩、藻場、サンゴなど海底面被覆物により異なる海底面分光反射率を持つ。



砂、岩、海藻の分光反射率の例

縦軸は光の反射率 (Reflectance)、横軸は光の波長 (Wavelength) を表している。凡例のSandは砂地、Rockは岩場、Sargassum horneri (アカモク)、Ecklonia cava (カジメ)、Gelidium elegans (マクサ)は海藻の種名である。

19

放射量解析による水深推定

- Banny and Dawson (1983)の方法
 - $Z = \frac{\ln(L_i - L_{si}) - \ln(a_i \rho_i)}{-K_i g}$
 - 1バンドのみ使用。
 - 学習用水深データを用いた回帰式からパラメータを推定。
 - 海底面の反射率、消散係数が一定と仮定。
- Stumpf and Holderied (2003)の手法
 - $Z = m_1 \frac{\ln(nL_i)}{\ln(nL_j)} - m_0$
 - 青と緑の2バンド使用。
 - 学習用水深データを用いた回帰式からパラメータを推定。
 - 海底面の反射率、消散係数が一定と仮定。
- Lyzenga(1978)の経験的手法(empirical method)
 - $Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i X_i + \varepsilon$
 - 可視域の複数バンド使用。
 - 学習用水深データを用いた回帰式からパラメータを推定。
 - 海底面の反射率の多様性に対応。消散係数は一定と仮定。
- Leeら(1998,1999,2001)のインバージョン法(inversion method)
 - $r_{rs}(\lambda) = f(P, G, X, B, Z, \theta_e, \varphi_e)$
 - θ_e, φ_e が既知の場合、5つの未知数を求める問題に帰結。
 - 理論上、最小5つのバンドがあれば水深Zを含む5つ未知数を求めることが可能。
 - 海底面の反射率は数パターン(砂、藻場、サンゴなど)を想定。消散係数の空間的ばらつきにも対応。

20

訪問調査報告

- オーストラリア海軍水路部 (AHO: Australian Hydrographic Office)およびオーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)
 - 水深推定法: inversion法。
 - 藻場やサンゴ礁などの海底をマッピングする目的で研究中。
 - LANDSATデータを用いた自動処理も検討中。
- フランス海軍水路部 (SHOM: Service hydrographique et oceanographique de la marine)
 - 水深推定法: Lyzenga(1978)の経験的手法(empirical method)。
 - 海図への実用化の実績あり(118枚)。
- 山口大学、神野研究室
 - 水深推定法: Lyzenga(1978)およびLyzenga(2006)を発展。
 - 沿岸流解析のための基礎データとして用いるために研究中。

21

フランス海軍水路部(SHOM)の SDB作成業務概要

概要

- SHOMでは、リモートセンシング技術による海図作成について調査を1986年に開始した。1994年には調査を完了し、1995年からは衛星画像を活用した海図の作成を開始している。衛星画像解析の目的は、衛星画像から得られる水深や沿岸の特徴によって、海図を更新、完成させることであり、航海の安全や統合沿岸域管理(ICZM)に役立てることである。

衛星データ

- SPOTおよびPleiades

その他解析に必要なデータ

- 学習用水深データ

対象海域

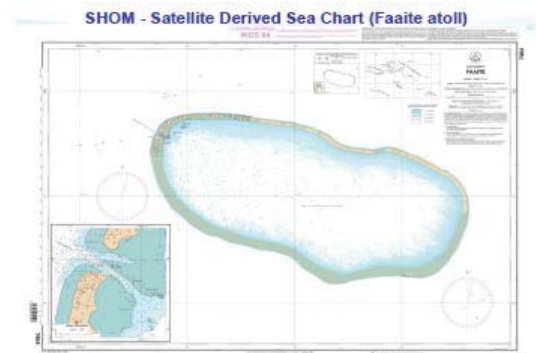
- ポリネシア等の環礁域
- 0-30m程度まで解析(*画像撮影時の条件による)

精度

- 0-5mで水深の30%、5-20mで水深の10%程度の誤差

実績

- 海図118枚への採用



22

解析手法についての考察と本研究 調査における開発方針

本年度の試験解析に採用した主な解析手法

- Lyzenga(1978)の経験的手法(empirical method)
 - フランス海軍水路部で実用。
 - 多様な研究者による実施例もあり。

比較のために実施した解析手法

- Banny and Dawson (1983)の手法
 - 最も基本的な手法。
- Stumpf and Holderied (2003)手法
 - IHO-IOC GEBCO Cook Bookで紹介。

検討したが実施しなかった解析手法

- Leeら(1998,1999,2001)のインバージョン法
 - 航空機搭載のハイパースペクトルセンサデータを対象とした方法であるが、衛星画像で同様のバンド数と高い空間分解能をもつデータがない。また、同手法によるSDBの海図等への実用例はほとんどない。
 - CSIROで衛星画像データへの応用研究をしているが、応用のための追加条件等については公開していない。

23

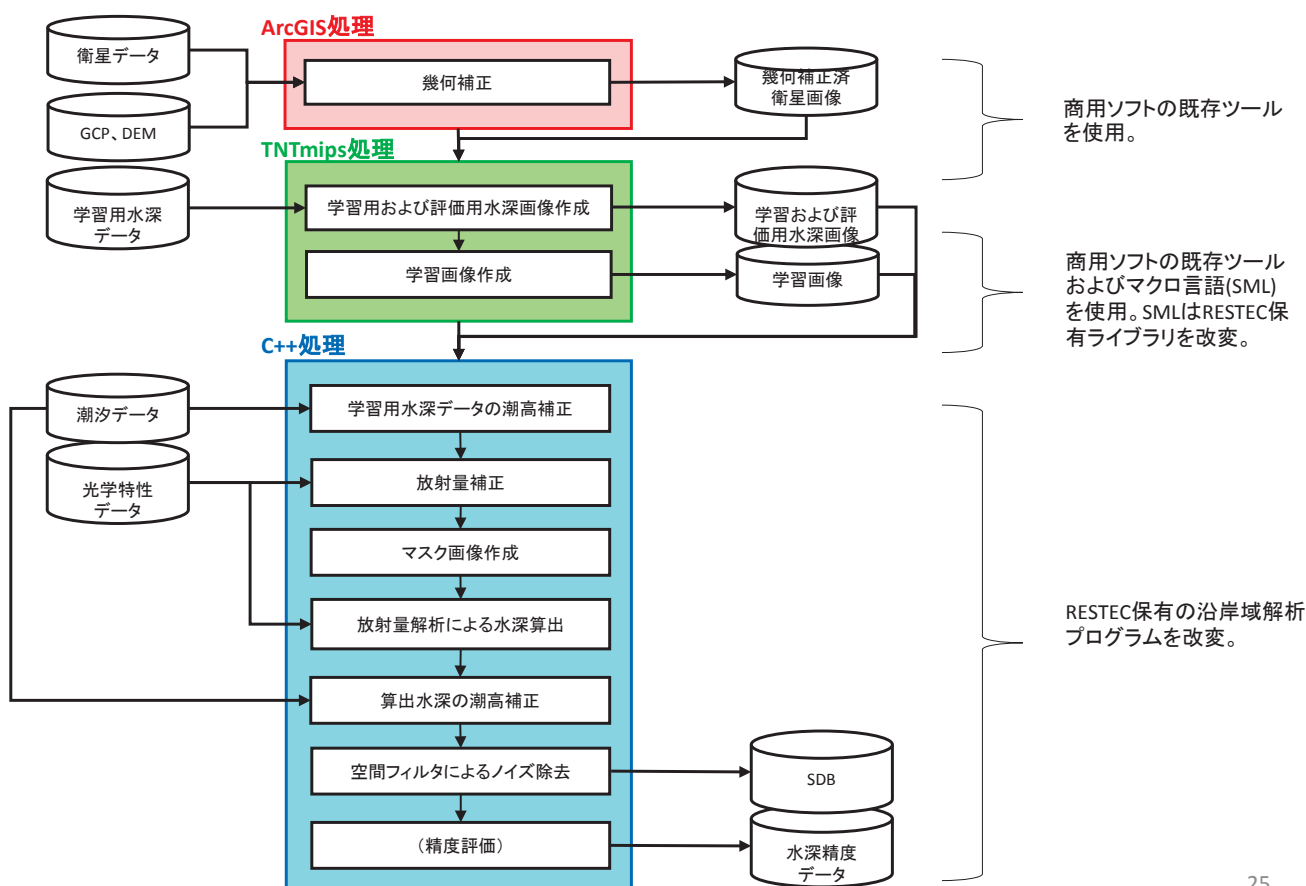
解析手法の開発

文献調査および訪問調査で整理した情報を元に、SDBを作成するための解析システムを構築し、試験解析を実施。シミュレーション解析のためのシミュレーション画像の試作も行った。

- 試験解析
 - 解析システム概要
 - 解析の実施

- 衛星画像シミュレータ
 - シミュレータ概要
 - 数値シミュレーション
 - シミュレーション画像
 - シミュレーション画像の試作

解析システム概要



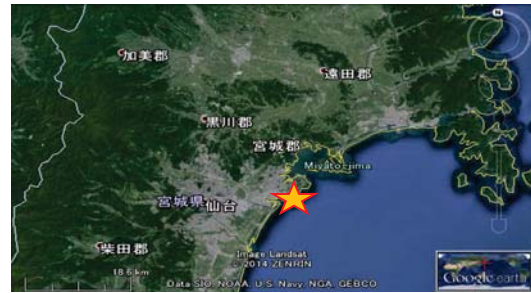
解析の実施

衛星画像の調達・試験解析

- 本調査で検討する解析手法を実行できる環境を構築し、石垣島及び仙台沖の試験海域で解析および精度検証を実施。
- 検証データとして、石垣島は音響測深マルチデータ(海上保安庁)、仙台沖は航空レーザ測量データ(海上保安庁)を用いた。



海域	撮影日時	衛星名
石垣島沖	2013 4/29	Worldview2

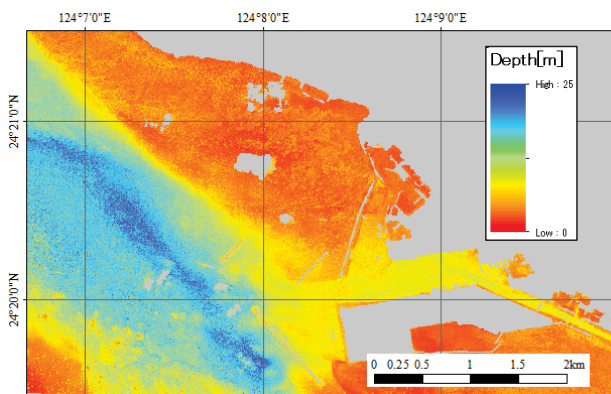


海域	撮影日時	衛星名
仙台沖	2013 1/28	Worldview2

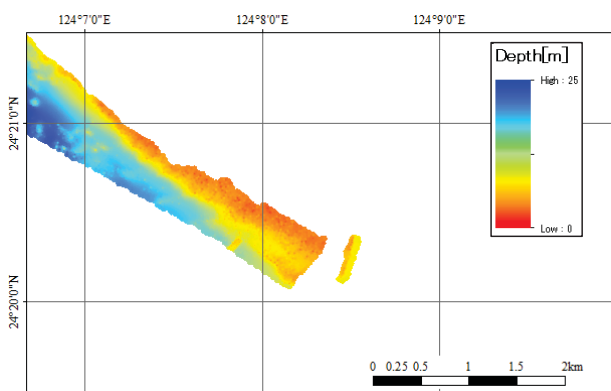


26

石垣島沖解析結果



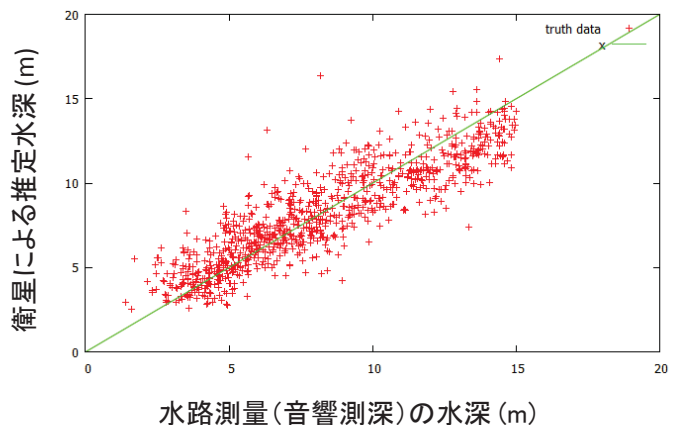
衛星画像解析結果



水路測量(音響測深)

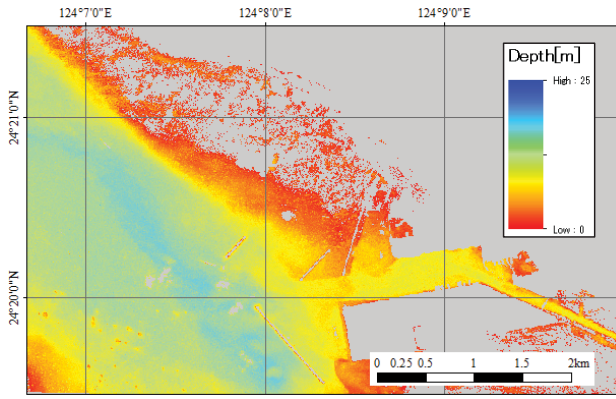
Lyzena(1978)の手法による解析結果

- 使用データ
 - 衛星データ5バンド(コスタル～赤)
 - 学習用水深データ数:941画素
- 解析水深:0-15m
- 水深推定精度
 - 検証データ数:1909画素
 - 誤差の絶対値の平均:1.29m
 - 誤差の絶対値の標準偏差:1.05m
 - 誤差の95%信頼区間の最大値: $\pm 1.34m$

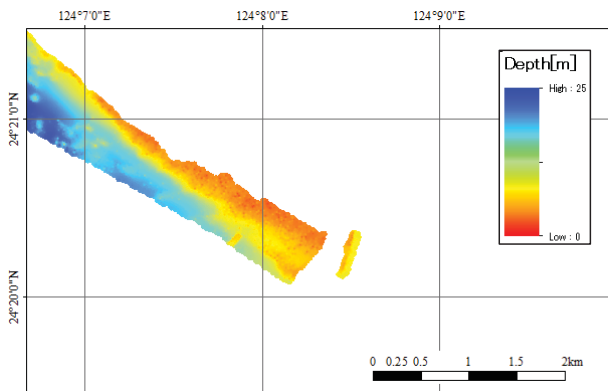


27

石垣島沖解析結果



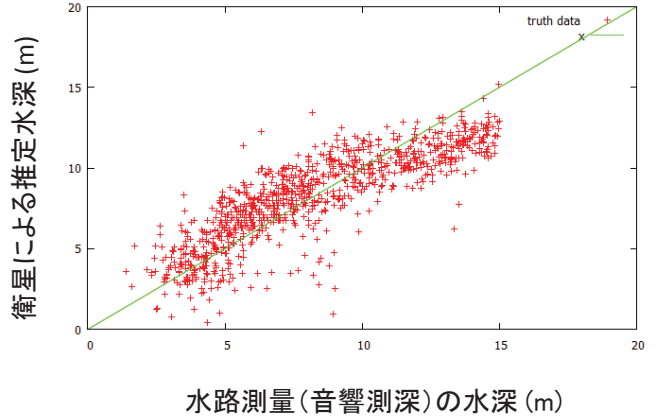
衛星画像解析結果



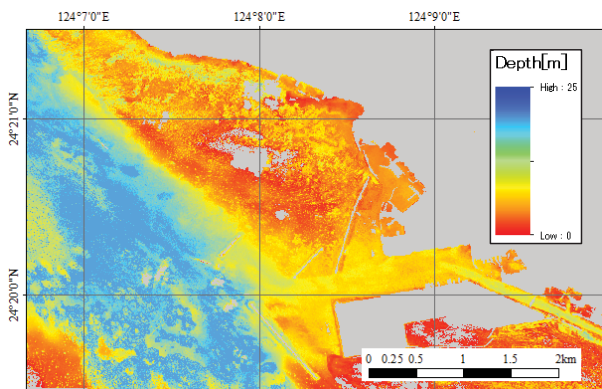
水路測量(音響測深)

• Stumpf and Holderied (2003)の手法による解析結果

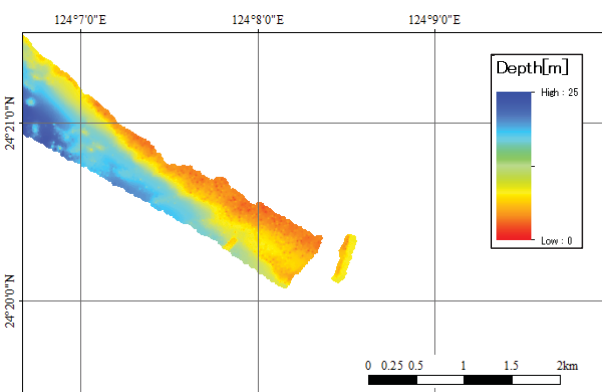
- 使用データ
 - 衛星データ2バンド(青、緑)
 - 学習用水深データ数:941画素
- 解析水深:0-15m
- 水深推定精度
 - 検証データ数: 1919画素
 - 誤差の絶対値の平均:1.45m
 - 誤差の絶対値の標準偏差:1.12m
 - 誤差の95%信頼区間の最大値: ±1.50m



石垣島沖解析結果



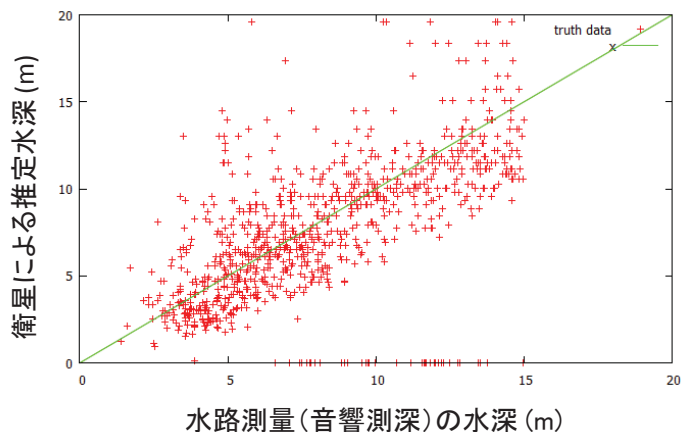
衛星画像解析結果



水路測量(音響測深)

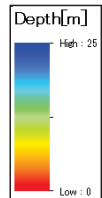
• Banny and Dawson (1983)の手法による解析結果

- 使用データ
 - 衛星データ1バンド(青)
 - 学習用水深データ数:941画素
- 解析水深:0-15m
- 水深推定精度
 - 検証データ数: 1909画素
 - 誤差の絶対値の平均:1.93m
 - 誤差の絶対値の標準偏差:2.03m
 - 誤差の95%信頼区間の最大値: ±2.02m

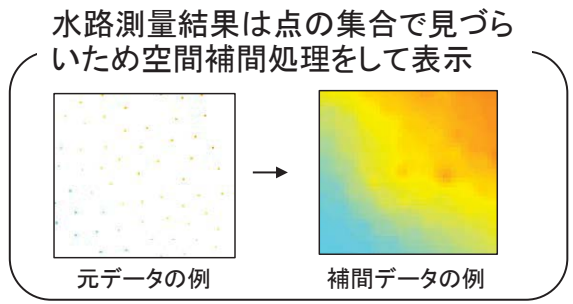


解析画像の判読(石垣島沖)

- 水深5-10mではどの方法でも水路測量結果と比較的同じような水深分布をしている(例1)。
- Stumpf and Holderied の方法は、比較的水深を浅く算出しており、Banny and Dawson の方法では、海底がサンゴなどの場所を、砂地などと比較して水深を深く算出する傾向がある。(例2)

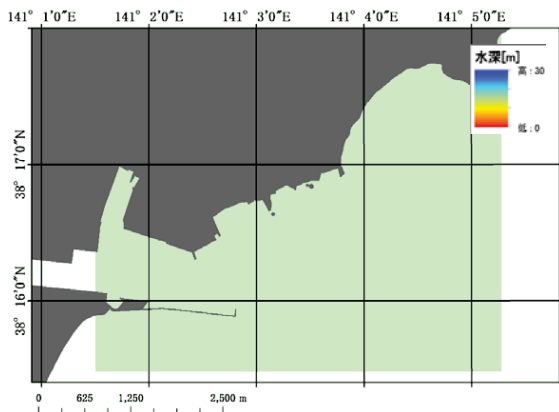


水深凡例

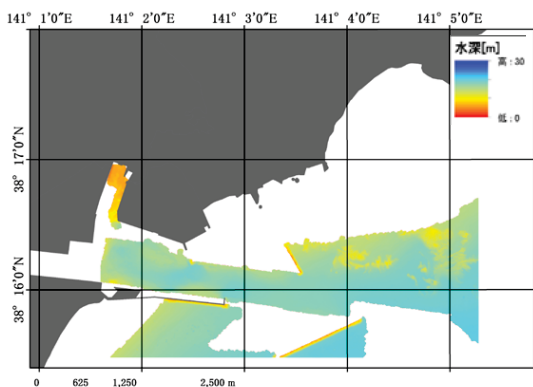


	衛星画像	水路測量 (音響)	Lyzenga	Stumpf and Holderied	Banny and Dawson
誤差			±1.34m	±1.50m	±2.02m
例1					
例2					

仙台沖解析結果



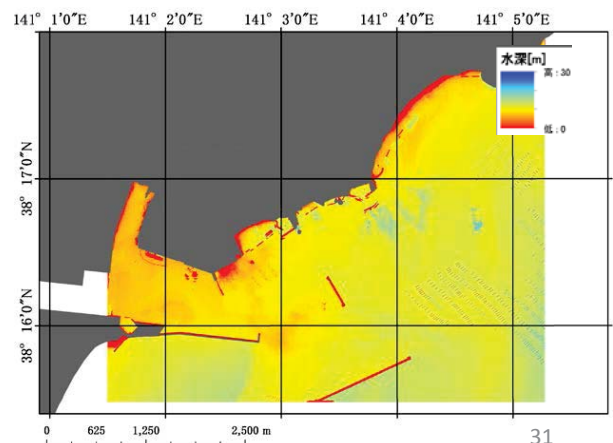
衛星画像解析結果(Lyzenga手法)



水路測量(航空レーザ測深)

解析結果

- 水深15m未満の海域のデータのばらつきが十分ではなく、最小二乗法で適切なパラメータを求めることができなかった。
- 既存のデータからパラメータ推定することで相対的な水深の分布は出せるが、精度評価はできない。



解析結果についての考察

- 石垣島沖では構築した解析システムによりSDBを作成できた。
- 水深0-15mでの水深推定誤差は最も良いLyzengaの方法の結果で±1.34mであった。IHOの基準は水深の関数なので今回の結果と直接比較はできないが、15mまでの許容誤差は0.50-0.54mであるので、いずれにしても同基準を満たしていない。
- 仙台沖については、今回は解析結果が得られなかったが、追加の学習用水深データが得られればSDBを作成できる可能性がある。

32

シミュレーション概要

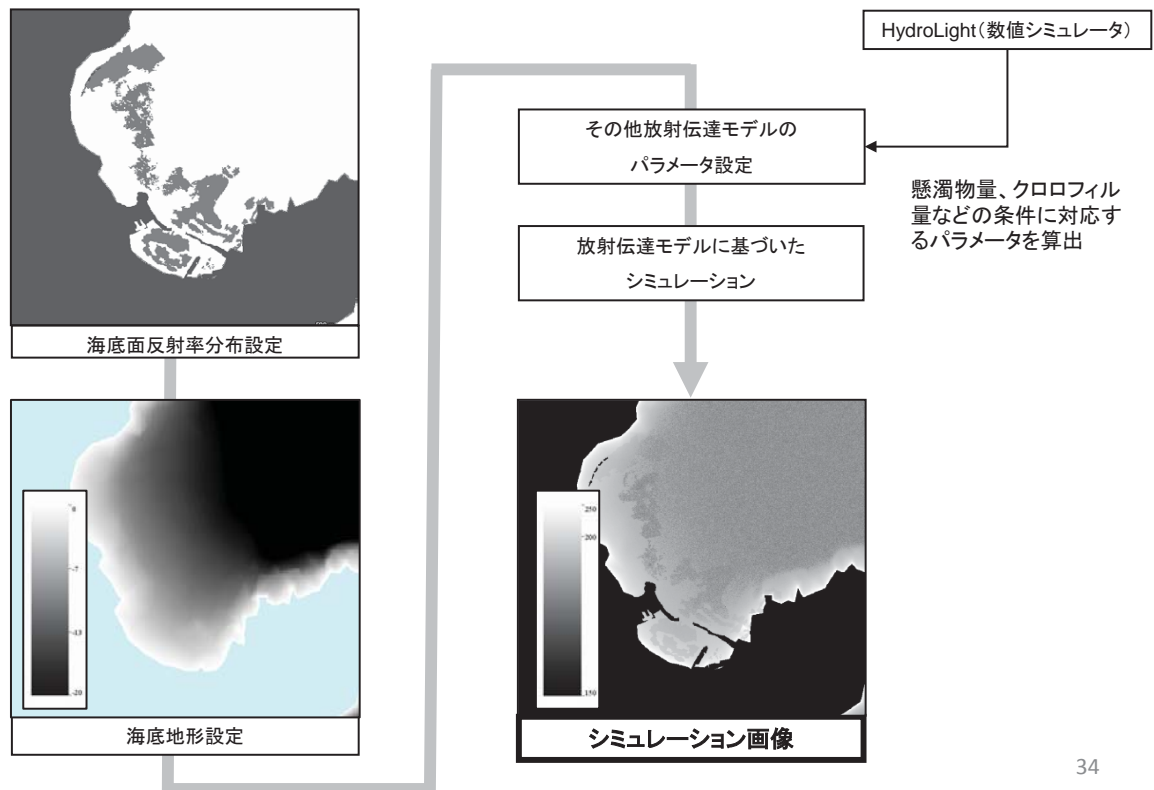
シミュレーションでは、実際の画像データを用いた解析では調査が難しい課題について、モデルを用いて理論上の解を導く。

具体的には、放射伝達モデルのシミュレータを用いて、透明度などの環境条件が水深推定に与える影響について調査できるようにする。

- 数値シミュレータ
 - シミュレーションにはベースとなる物理モデルが重要だが、世界的に信頼性の高い数値シミュレーションモデルとしてHydroLight (Sequoia社)があり、同モデルを用いることでより信頼性の高いシミュレーションができる可能性がある。
- 数値シミュレーション
 - 波や透明度などの環境条件が衛星センサの観測値に与える影響を調べる。HydroLightを主に用いる。
- シミュレーション画像
 - 画像シミュレータにより、沿岸域における衛星画像のシミュレーション画像作成する。画像シミュレータにもHydroLightを補助的に利用する。作成したシミュレーション画像は、透明度や地形が画像解析によって得られる水深の精度に与える影響の調査に利用できる。

33

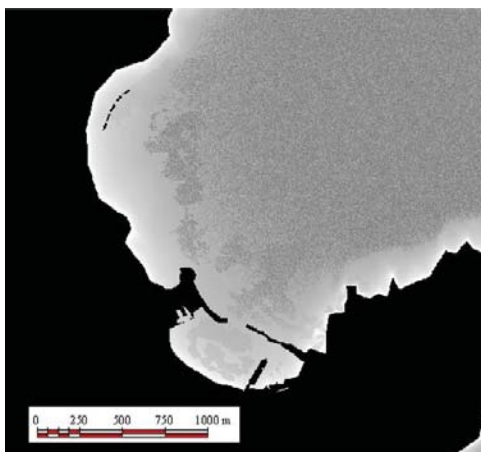
シミュレーション画像生成フロー



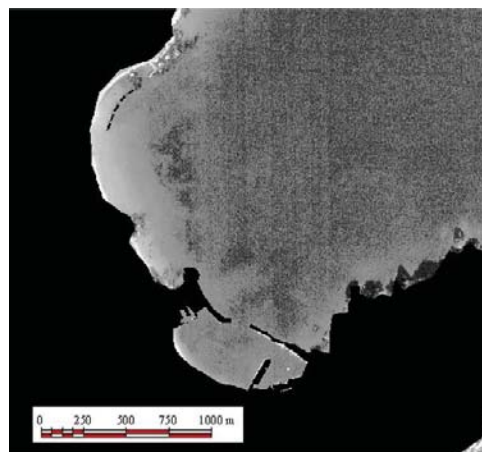
34

シミュレーション画像の試作

- シミュレーション衛星画像の試作
 - 岩手県船越湾で2003-2004年に計測したデータをもとに入力データを作成。
 - 実際の衛星画像と比較しても、地形や透明度(消散係数)と輝度(輝度)の関係について類似している。



シミュレーション画像(青バンド)

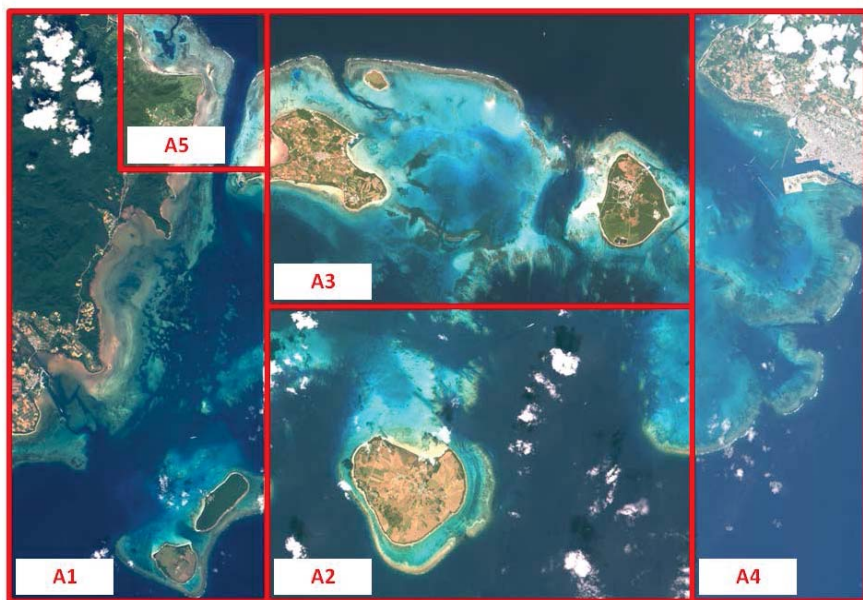


IKONOS衛星画像(青バンド)

35

石西礁湖調査（衛星画像データの調達および現地調査）

- 購入した衛星画像



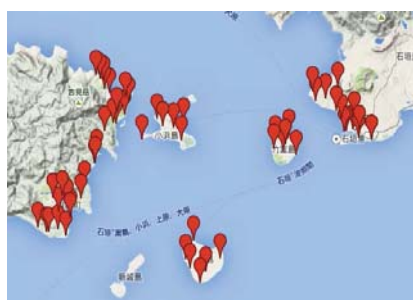
36

現地調査

- GPSで特徴点の位置情報(GCP: Ground Control Point)を取得(7/24-30)。GCPは幾何精度の検証に利用。
- 計測位置はソフトウェア(PathFinderOffice、TRIMBLE社)を用いて、ディファレンシャル補正を実施。
- 同ソフトにより計算される各計測点の水平精度は0.1~0.2m。



計測に使用したGPS
(Geo7X, Trimble社)



調査地点の分布

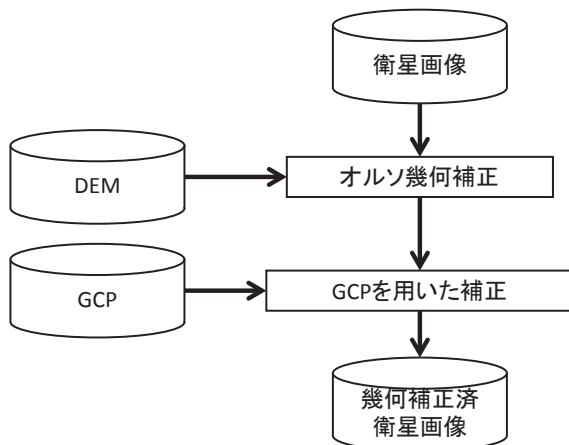


GCP計測地点と衛星画像上の対応点の例

37

幾何補正の実施と水平位置精度

- 国土地理院の数値標高モデル(DEM)と、石西礁湖周辺で取得したGCPを用いて幾何補正を行った。
- オルソ補正後とGCPを用いた補正後でほとんど水平位置精度に差はなく、どちらの場合もIHOの基準を満たした。



- オルソ補正後の誤差
 - 平均: 2.27 m
 - 標準偏差: 1.27 m
 - 95%信頼区間の最大値: 2.93 m
- GCPを用いた補正後の誤差
 - 平均: 2.18 m
 - 標準偏差: 1.73 m
 - 95%信頼区間の最大値: 3.09 m

38

まとめ

- 本年度の調査研究で、衛星画像から水深情報を抽出するための先端研究および実用技術の概略を把握することができた。また、いくつかの実用技術については実際に解析を実施できる環境を整え、二つの海域で試験解析も行った。
- 文献調査や訪問調査および試験解析の結果から、基本的にはフランス海軍水路部が採用しているものと同様のLyzenga(1978)の方法を採用し、次年度以降はこの方法を用いて多様な海域での実証実験やシミュレーションの実施を行うことが有効と考えられる。
- Lyzengaの手法に関する最新の研究手法(Lyzenga et al. (2006)、Kanno et al. (2013 accepted))を取り入れることで効率化や精度向上等の改良も行える可能性がある。

39