

WorldView-2衛星画像を用いた サンゴ礁汎用水深推定式構築の試み

DEVELOPMENT OF GENERALIZED FORMULA FOR CORAL REEF
BATHYMETRY USING WORLDVIEW-2 IMAGERY

神野有生¹・鯉淵幸生²・磯部雅彦³・寺田一美⁴・
関根雅彦⁵・胡忠⁶

Ariyo KANNO, Yukio KOIBUCHI, Masahiko Isobe, Kazumi TERADA,
Masahiko SEKINE and Zhong HU

¹正会員 博(環) 山口大学助教 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8583 柏市柏の葉5-1-5 E662)

³フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 (〒277-8583 柏市柏の葉5-1-5 E662)

⁴正会員 博(環) 東海大学助教 工学部土木工学科 (〒259-1292 平塚市北金目4-1-1)

⁵正会員 工博 山口大学教授 大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁶非会員 理修 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

Multispectral remote sensing methods of water depth using high-resolution satellite imagery can potentially play an important role in coral reef bathymetry. The popular method by Lyzenga et al. predicts water depth by a linear function of variables derived from observed radiance for each band. Up to now, the predictor has been calibrated image to image independently using corresponding in-situ depth measurements. However, a recent study has shown some inter-image compatibility of the predictor.

Based on the result, in this study we tried to build a predictor which can be applied to a wide range of coral reef images. We used four WorldView-2 images of three coral reef areas of different bottom types and water qualities. As a result, we successfully obtained a predictor which has good accuracy over all the images. The generality of the predictor will reduce the amount of the depth measurements necessary for calibration of each image to be predicted.

Key Words : Remote sensing, water depth, coral reef, multispectral

1. はじめに

熱帯から亜熱帯に分布するサンゴ礁では、浅く起伏に富む水深分布(地形)が流れ・波を支配し、特徴的な物質循環・生態系・防災機能を生みだしている。温暖化に伴うサンゴの死滅や、サンゴ礁の二酸化炭素収支などの問題も、サンゴ礁の水深分布と密接に関わっている。従って、サンゴ礁の環境を理解し、適切に管理・利用するためには、水深分布の把握が欠かせない。しかし、浅く起伏に富むサンゴ礁では、船舶の航行に障害が多く、一般的な測深手段である音響測深の効率が悪い。そのため、多くのサンゴ礁水域では、十分な時空間解像度で水深分布のモニタリングが行われていないのが現状である。

そこで、サンゴ礁の水深分布を簡便に計測する手段として、可視・近赤外域の高分解能衛星画像を用いたリモートセンシング手法が研究されてきた¹⁾⁻⁵⁾。可視・近赤外画像を用いた水深リモートセンシング

手法の中で、特に有名なLyzengaの水深推定法^{2), 6)-9)}は、放射伝達理論に基づく次式によって、各画素の水深を推定する。

$$h = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_M X_M \quad (1)$$

ただし、 $h[m]$ は水深、 M は用いる可視バンドの数、 $X_m(m = 1, 2, \dots, M)$ は可視バンド m について観測された放射輝度から算出される変数である。 X_i 自体は水深だけでなく底質・水質に依存してしまうが、複数バンドの X_m を組み合わせた推定式(1)は理論的に、 M が大きいほど、水・底質の光学特性の空間的不均一性に対して頑健となる。

係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M$ は従来、水深実測データを用いて画像ごとに推定されてきた。ところが近年、ある画像で推定された係数が、水・底質の光学特性が異なると考えられる別の水域を撮影した画像にも、良好な精度で適用できた例が示されている⁹⁾。さらに、2009年末には、従来の高分解能衛星画像の倍となる6個の可視バンドをもつWorldView-2衛星画像が登

場した。よって、WorldView-2衛星画像に関しては、サンゴ礁水域に幅広く適用可能な係数を得られる可能性がある。そのような一般性をもつ係数を推定できれば、水深推定対象の画像ごとに多くの水深実測データを準備する必要がなくなり、水深リモートセンシングがより実用的となる。

そこで本研究では事始めに、水・底質の光学特性が異なると考えられる3つのサンゴ礁水域を撮影した4枚のWorldView-2衛星画像を組み合わせ、一般性をもつ係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M$ の推定を試みた。なお、本稿では水深推定式(1)の係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M$ を推定することを、水深推定式の構築とも呼ぶ。

以下、2. でLyzenaの水深推定法 (Lyzena et al.³⁾による説明の実質的な内容)、3. で一般性をもつ係数の推定方法について説明し、4. で得られた結果を議論する。

2. Lyzena の水深推定法

(1) 対数補正分光放射輝度の導出

浅い水域において、衛星センサに入射する可視域の分光放射輝度 L は、主に図-1に示した底面反射・水中散乱・水面反射・大気散乱の4成分から成り、概ね次の放射伝達モデルで表される。

$$L(\lambda) = \{V + (B - V) \exp[-kh]\}T \cdot E + S + A \quad (2)$$

ここで、 λ は波長、 V は無限水深での体積散乱による反射率、 B は底面反射率、 k は実効消散係数、 T は大気・水面の透過率、 E は水面直上での下向き放射照度、 S は水面反射成分、 A は大気散乱成分である。この式では、水深 h を除く全変数が波長 λ に依存するが、 L を除いて依存性の表記を略している。

無限水深における放射輝度 $L_\infty(\lambda) \equiv \lim_{h \rightarrow \infty} L(\lambda)$ と、水の吸収係数(結果として k)の大きい近赤外域の分光放射輝度 $L(\lambda_{NIR})$ に関しては、式(2)の指数関数項を無視できる。 S, A がそれぞれ、光の波長に依存しない要因である、波浪・エアロゾルの状態に依存すると仮定すると、 $V \cdot T \cdot E$ が均一かつ、 S, A のうち片方の変動が卓越する領域では、 $L_\infty(\lambda)$ と $L(\lambda_{NIR})$ に相関関係が生じる。すなわち、適当な係数 α_0, α_1 を用いて、

$$L_\infty(\lambda) = V \cdot T \cdot E + S + A \cong \alpha_0 + \alpha_1 L(\lambda_{NIR}) \quad (3)$$

と表現できる。式(3)を用いれば、式(2)から水深推定に不要な S と A を消去でき、次式が得られる。

$$L(\lambda) = (B - V) \exp[-kh]T \cdot E + \alpha_0 + \alpha_1 L(\lambda_{NIR}) \quad (4)$$

いま、変数 X を

$$X \equiv \log[L(\lambda) - \alpha_0 - \alpha_1 L(\lambda_{NIR})] \quad (5)$$

と定義し、式(4)を代入すると、次式が得られる。

$$X = -kh + \log[(B - V)T \cdot E] \quad (6)$$

右辺第1項より、変数 X は、水深と線形関係にあることがわかる。ただし、右辺第1項は水の、右辺第2項は底質の光学特性に依存するため、線形関係は水・底質の光学特性が均一な画素集合においてのみ

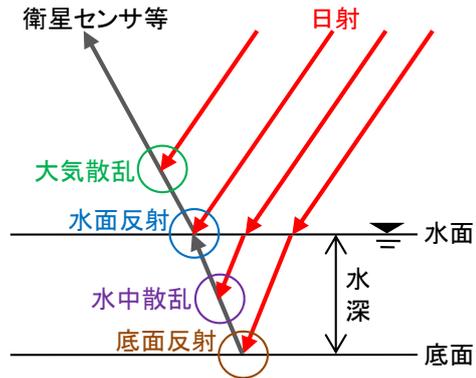


図-1 浅い水域の放射伝達過程に関する模式図

成り立つ。本稿では変数 X に、対数補正分光放射輝度という和名を与える。

(2) 深い領域を用いた対数補正分光放射輝度の評価

従来の可視・近赤外域の高分解能衛星画像は、2, 3個の可視バンドと1個の近赤外バンドを有している。画像内に、 $V \cdot T \cdot E$ が均一かつ十分に深い ($L(\lambda) = L_\infty(\lambda)$ とみなせる) 領域の画素集合を特定すれば、各可視バンドについて式(3)を、 $L_\infty(\lambda)$ を近赤外バンドの放射輝度 $L(\lambda_{NIR})$ で説明する回帰モデルとして、最小二乗法により推定できる。さらに、 α_0, α_1 が水深推定対象の浅い画素集合を含めて均一であると仮定すれば、 α_0, α_1 の推定量を用いて、これらの画素集合に関する式(5)の X を評価できる。

(3) 対数補正分光放射輝度の線形式による水深推定

本稿では、可視バンド m ($m = 1, 2, \dots, M$)に関する X を X_m のように表し、断らない限り他の変量についても同様の添え字を用いる。ベクトル:

$$\mathbf{X} \equiv (1 \quad X_1 \quad \dots \quad X_M) \quad (7)$$

$$\mathbf{k} \equiv (0 \quad k_1 \quad \dots \quad k_M) \quad (8)$$

$$\mathbf{C} \equiv (1 \quad \log[(B_1 - V_1)T_1 \cdot E_1] \quad \dots \quad \log[(B_M - V_M)T_M \cdot E_M]) \quad (9)$$

を定義すれば、合計 M バンドに関する式(6)は、

$$\mathbf{X} = -\mathbf{h}\mathbf{k} + \mathbf{C} \quad (10)$$

とまとめられる。

水深 h は、 $M + 1$ 次元の適当な列ベクトル:

$$\boldsymbol{\beta} \equiv (\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_M)^t \quad (11)$$

を用いて、1. で示した式(1)によって推定する。ここで、 t は転置を表す記号である。式(1)の右辺は X_1, \dots, X_M の線形式であり、 $\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$ とも表現できる。式(1)の h が式(10)を満たす、つまり式(10)という物理的根拠をもつための必要十分条件は、次式である。

$$\begin{cases} \mathbf{k}\boldsymbol{\beta} = -1 \\ \mathbf{C}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (13)$$

水深推定対象の画素集合について、水の光学特性(ベクトル \mathbf{k} の値)や底質の光学特性(ベクトル \mathbf{C} の定義に含まれる B_1, \dots, B_M の値)が均一でなくとも、式(13)が全画素で成り立つような $\boldsymbol{\beta}$ が存在する

場合がある。例えば、各バンドについて $k, V, T \cdot E$ が均一な場合、底質の光学特性の種数が M 以下であることが、その十分条件である。従って、水深推定式(1)を水・底質の光学特性が不均一な画素集合に適用する状況でも、 β を適切に選べば、不均一性に左右されない推定値が得られる可能性がある。この点は、広範な画像に適用できる β の存在が期待できる根拠でもある。

実際には、水・底質の光学特性に関する補助情報がなければ式(13)の成立性を吟味できない。そこで、式(13)の成立を期待しつつ、水深既知画素を準備し、式(1)を最小二乗法であてはめて β を推定する。

(4) 複数の近赤外バンドを利用するための拡張

WorldView-2衛星画像は、近赤外バンドを2個有する。Lyzenaの水深推定法に関する既往文献^{3), 7)-10)}は、このような画像の扱いについて述べていないが、本研究では両方のバンドを活用できるよう、式(3)(4)(5)の $\alpha_1 L(\lambda_{NIR})$ を $\alpha_1 L(\lambda_{NIR1}) + \alpha_2 L(\lambda_{NIR2})$ のように置き換える。ここに、 $L(\lambda_{NIR1}), L(\lambda_{NIR2})$ は各近赤外バンドの輝度値、 α_1, α_2 は深い領域の画素集合を用いて推定される係数である。

3. 水深推定式の構築手順

(1) 対象水域と使用データ

a) 対象水域と多様性

対象水域は、図-2に示す沖縄県石垣市沿岸の玉取南・宮良湾のサンゴ礁、および川平湾の湾奥である。各水域は地理的に、互いに14km以上離れている。また、サンゴ礁の切れ込みに位置し、外洋水の影響が大きい玉取南、宮良川の河口付近に位置する宮良湾、閉鎖性内湾である川平湾では、水質や分布する底質(砂泥・岩盤・サンゴ・藻類など)の色彩・種類にも差異がある。

b) WorldView-2衛星画像

用いたWorldView-2衛星画像は、各水域を撮影した標準画像プロダクトである。これらの画像は、可視域に6バンド、近赤外域に2バンドを有するマルチスペクトル画像であり、本研究では全ての可視バンドを用いるため $M = 6$ となる。衛星センサ自体の空間分解能は直下視で1.84mであるが、標準画像プロダクトでは2m×2mの画素サイズにリサンプリングされている。これらの画像を次頁の図-3に表示する。

WorldView-2標準画像プロダクトは高精度のシステム幾何補正を経ている。各水域の衛星画像を、GISを用いて国土地理院発行の数値地図2500(公称水平位置精度1.75m)と重ね合わせた結果、目立った変位は確認されなかった。

c) 水深既知画素

水深既知画素は、DGPS搭載のボートを用いた音

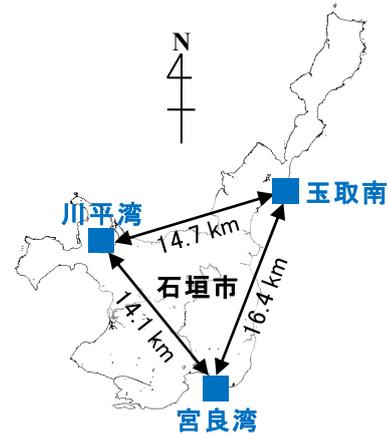


図-2 画像撮影水域の位置

響測深により、以下のように作成した。

玉取南では、ADCPによる測深を行い、4ビームによる測深値の変動係数(標本標準偏差と平均の比)が0.02未満である測深地点を抽出した。WorldView-2衛星画像と測深地点を空間的に重ね合わせたとき、1地点以上の測深地点を含む画素を水深既知画素と定め、4ビームの平均測深値の平均を水深実測値と定義した。

宮良湾と川平湾では、魚群探知機による測深を行った。4個以上の測深値を有し、かつその変動係数が0.02未満であるような測深地点を含む画素を水深既知画素と定め、その測深地点に関する測深値の平均を水深実測値と定義した。

全ての画像について、気象庁の潮汐観測資料に基づいて測深時、画像撮影時の潮位を計算し、水深実測値を画像撮影時の水深に換算した。

(2) 検証方法

a) データセットの作成と品質管理

2. で述べたLyzenaの水深推定法に基づき、 h, X_1, \dots, X_6 を変量とする水深既知画素からなるデータセットを、画像別に作成した。ここで、各画像について、2. (2)で述べた深い領域の画素集合は、水深が深いと判断され、かつ雲・雲の影から十分離れた画素集合として選定し、図-3に緑色で示した正方形領域内の画素集合とした。また、各データセットについて、以下の順に品質管理を施した。

1. 近赤外バンド7, 8に閾値を設定し、いずれかの輝度値が大きい水深既知画素を排除した。これらの画素は白波・雲・干出部を含む可能性が高く、本研究の用途に適さないためである。
2. データセット1, 2(川平湾・宮良湾)の水深既知画素は、水深実測値の大きな画素を含んでいたが、データセット3, 4(玉取南)の水深実測値の最大値が4mに満たないため、水深実測値が4m以上の画素を排除した。
3. 当然ながら、 X_1, \dots, X_6 のいずれかが計算できない水深既知画素は排除した。

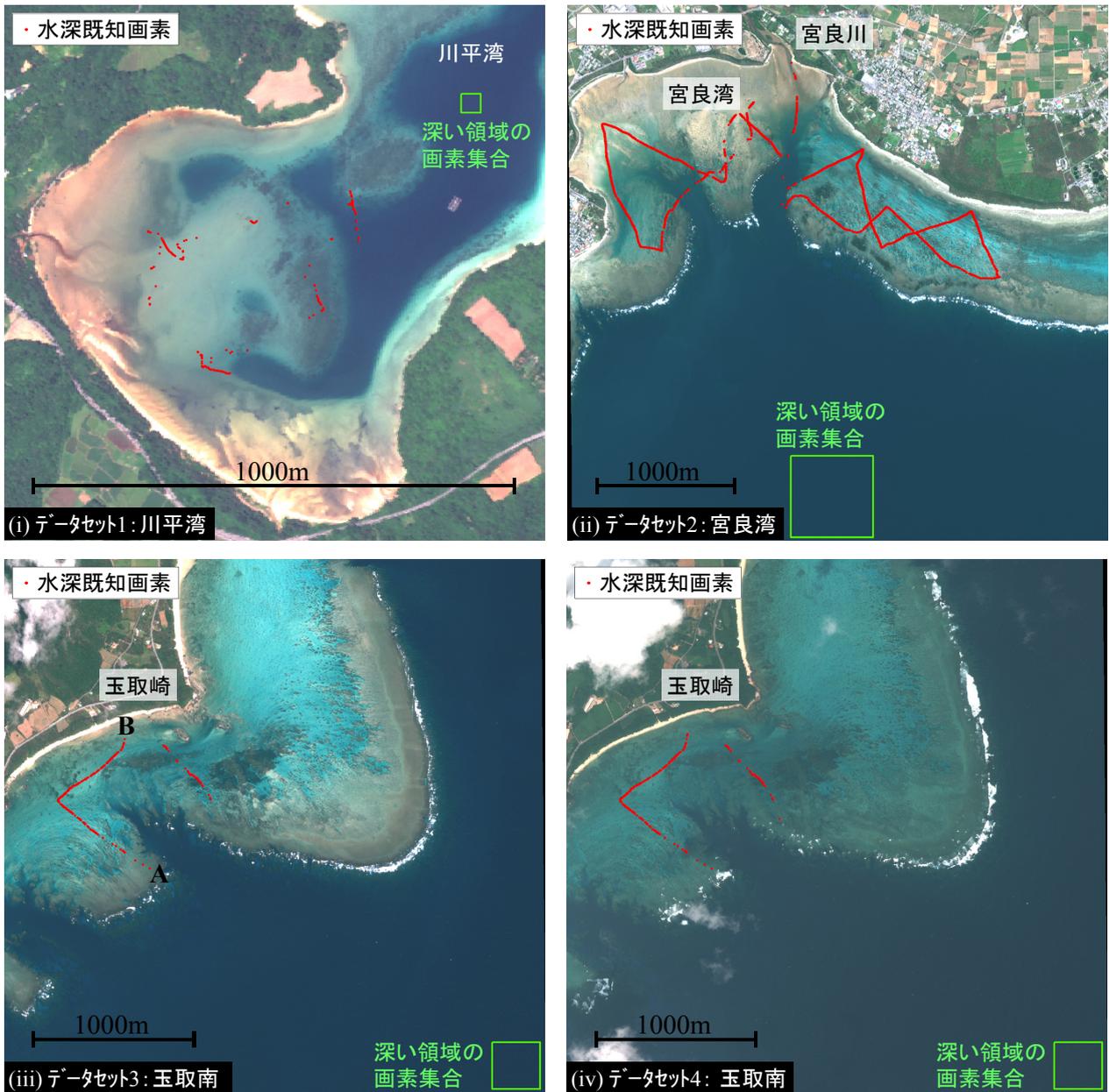


図-3 各データセットに関する WorldView-2 衛星画像（バンド 2, 3, 5 を R,G,B に割り当てたトゥルーカラー表示）と、水深既知画素（赤い点プロット）、深い領域の画素集合（緑の正方形内）の位置. Includes copyrighted material of DigitalGlobe, Inc., All Rights Reserved.

表-1 各データセットの諸元と水深推定式の精度

データ セット 番号	画像 撮影 水域	画像 撮影日	μ	データ数	水深既知画素の水深[m]			水深推定式の精度	
					最小	平均	最大	自由度調整 済み決定係数	残差平方平均 平方根 [m]
1	川平湾	2010/9/16	2.23	206	0.687	1.265	3.986	0.958	0.133
2	宮良湾	2010/9/21	2.18	3858	0.153	1.175	3.973	0.817	0.280
3	玉取南	2010/9/21	2.14	248	0.317	1.684	2.896	0.859	0.179
4	玉取南	2010/3/24	2.13	252	1.056	2.508	3.738	0.847	0.194
結合	———	———	—	4564	0.153	1.768	3.986	0.898	0.249

以上の処理で得られた水深既知画素の諸元を表-1に、空間分布を赤い点プロットで図-3に示す。本研究では水深推定式の構築・精度評価が目的であるため、水深既知画素のみを解析した。他の特定の領域の水深推定は行っていない。

b) 水深推定式の構築と評価

個々のデータセットと、それらを1つにまとめた結合データセットについて、Lyzenaの水深推定法に基づき、水深推定式(1)の係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M$ を最小二乗法で推定した。このとき、各データセットに関

する、水深推定式(1)の精度の指標として、自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 と残差平方平均平方根 $RMSR$ を求めた。どちらも、水深推定式(1)を、 h を目的変数、 X_1, \dots, X_M を説明変数とする線形回帰モデルとみなした統計学的な指標であり、各データセットについて次式で定義される。

$$R_{adj}^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (h_n - \hat{h}_n)^2}{\sum_{n=1}^N (h_n - \bar{h}_n)^2} \cdot \frac{N-1}{N-p-1} \quad (14)$$

$$RMSR \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (h_n - \hat{h}_n)^2 \quad (15)$$

ここに、 N はデータセットに含まれるデータの数(水深既知画素の数)、 $h_n (n=1, \dots, N)$ は n 番目のデータに関する水深実測値、 \hat{h}_n は n 番目のデータに関する水深推定式(1)による水深推定値、 \bar{h}_n は水深実測値の平均、 p は説明変数の数である。

式(14)から $(N-1)/(N-p-1)$ を除けば、データセットに対する水深推定式(1)のあてはまりを表す決定係数となる。決定係数は、 p が大きいほど値が大きくなる。自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は、決定係数に対してこの効果を補正した指標であり、あてはめたデータセットと同じ母集団に属する異なるデータに関する、水深推定式(1)の推定能力を表す。

残差平方平均平方根 $RMSR$ は、データセットに対する水深推定式(1)のあてはまりを表す指標である。 $RMSR$ は、本研究のように、あてはめたデータの数が多いとき、あてはめたデータセットと同じ母集団に属する異なるデータに関する、平均的な推定誤差の目安となる。

c) 結合データセットに関する補足

図-1のように、水中で1次の反射・散乱のみを考慮すると、式(6)の実効消散係数 k は、水中での光の伝搬距離に比例すると考えられる。さらにこの距離は、水中における太陽・衛星天頂角の正割の和 μ に比例する。そこで、結合データセットに関する水深推定式の構築に際しては、データセット間(画像間)の μ の違いによる k への影響を考慮するため、各水深既知画素の X_1, \dots, X_6 を、その画素を含むデータセットの μ で除した。同様の補正は、神野ほか¹⁰⁾も行っている。各データセットに関する μ は、WorldView-2標準画像プロダクトのメタデータから計算できる。これらを表-1に示す。

また、結合データセットに関する水深推定式の構築に際しては、各データセットを平等に扱えるよう、各データセットのデータ数の逆数を重みとした重み付き最小二乗法を用いた。表-1に示した水深既知画素の平均水深、自由度調整済み決定係数、残差平方平均平方根も、各データセットのデータ数の逆数を重みとした重み付きの値である。

4. 水深推定式の一般性の検証

まず、図-4に、結合データセットに含まれる、水

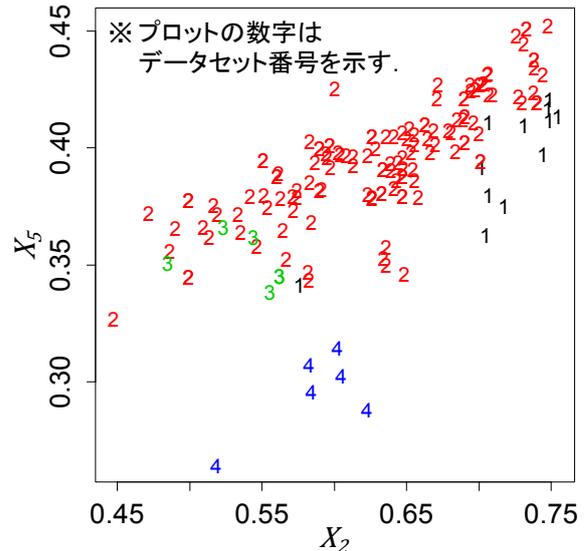


図-4 同じ水深帯(水深1.5m以上1.6m未満)のデータに関する X_2 と X_5 の散布図

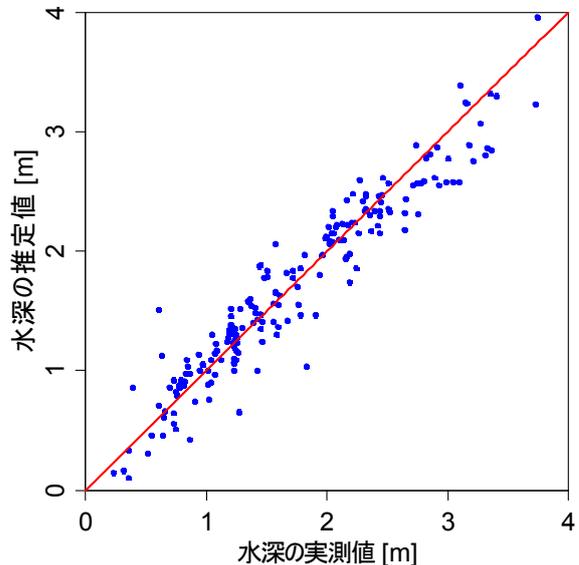


図-5 結合データセットから得られた推定式に関する水深の実測値と推定値(あてはめ値)の散布図

深1.5m以上1.6m未満の水深既知画素について、 X_2 と X_5 の散布図を例示する。この図のように、同じ水深帯でも、各バンドの X_m はデータセット内・データセット間で広くばらついており、水・底質の光学特性の画像内・画像間不均一性が裏付けられた。

次に、表-1に、各データセットを用いて構築された水深推定式(1)に関する、自由度調整済み決定係数と残差平方平均平方根を示す。表-1より、結合データセットは、水・底質の光学特性が画像間で異なるにも関わらず、自由度調整済み決定係数が0.898と、川平湾のデータセットの0.958に次いで大きかった。また図-5に、結合データセットから得た推定式に関する水深の実測値と水深推定式(1)による推定値(あてはめ値)の散布図を例示する。ただし見やすさのため、各データセットから50ずつ単純無作為抽出した計200の水深既知画素についてのみプロットしている。図-5からも、水深推定式のあて

表-2 結合データセットにより推定された水深推定式の、他の個々のデータセットに対する精度

データセット番号	画像撮影水域	実測値と推定値の相関係数の2乗	実測値と推定値の差の2乗平均平方根 [m]
1	川平湾	0.951	0.172
2	宮良湾	0.783	0.341
3	玉取南	0.815	0.222
4	玉取南	0.794	0.230

表-3 結合データセットにより推定された水深推定式の係数

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
3.1175187	-1.9265013	1.6940000	11.3705959	-17.0050720	-4.3860859	-0.4626836

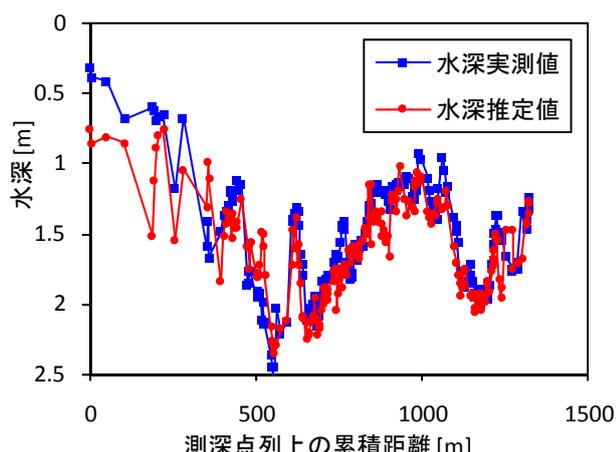


図-6 結合データセットから得た水深推定式による、データセット3の水深推定値と水深実測値の、図-3に示す測深点列A-B上の分布

はまりの良さが確認できる。

表-2には、結合データセットを用いて構築された水深推定式(1)で、他の個々のデータセットの水深を推定した場合の、実測値と推定値の相関係数の2乗、および実測値と推定値の差の2乗平均平方根を示す。表-2より、この水深推定式が、どのデータセットにも比較的良好的にあてはまっていることが確認できる。さらに図-6には、この水深推定式によるデータセット3の水深推定値と水深実測値の、図-3に示す測深点列A-B上の分布を示す。図-6より、水深推定値は実測地形を概ね捉えていることがわかる。

以上より、結合データセットから、多様な底質・水質に適用可能な係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$ が得られたと考えられる。これらの値を表-3に示す。ただし、表-3に示す係数の値は、3.(2)c)で述べたように、 μ で除した X_1, \dots, X_6 を用いて推定した結果であるため、 μ で除した X_1, \dots, X_6 に対して適用すべきである。

5. まとめ

本研究では、Lyzengaの水深推定法に基づき、水・底質の光学特性が異なる3つのサンゴ礁水域を撮影した4枚のWorldView-2衛星画像を組み合わせ、一定の一般性をもつ水深推定式の構築(水深推定式(1)の係数 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_6$ の推定)に成功した。今

後、より多くの画像を用いて、この水深推定式の一般性の有効範囲の検証と、一般性のさらなる拡張を行うことが望まれる。

謝辞：本研究で用いたWorldView-2衛星画像は、株式会社日立ソリューションズより提供された。本研究は科研費（研究活動スタート支援；課題番号：22860044）の成果の一部である。

参考文献

- 1) Stumpf, R.P., Holderied, K., and Sinclair, M.: Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types, *Limnol. Oceanogr.*, Vol.48, pp.547-556, 2003.
- 2) Lyzenga, D.R., Malinas, N.P. and Tanis, F.J.: Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol.44, pp.2251-2259, 2006.
- 3) Hogrefe, K.R., Wright, D.J., and Hochberg, E.J.: Derivation and integration of shallow-water bathymetry: implications for coastal terrain modeling and subsequent analyses, *Mar. Geod.*, Vol.31, pp. 299-317, 2008.
- 4) 神野有生, 鯉淵幸生, 磯部雅彦: 水・大気の均質性仮定を緩和した可視近赤外画像による水深予測アルゴリズム, *水工学論文集*, Vol.54, pp.1117-1122, 2010.
- 5) Kanno, A., Koibuchi, Y., and Isobe, M.: Statistical Combination of Spatial Interpolation and Multispectral Remote Sensing for Shallow Water Bathymetry, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol.8, pp. 64-67, 2011.
- 6) Paredes, J.M. & Spero, R.E.: Water depth mapping from passive remote-sensing data under a generalized ratio assumption, *Appl. Opt.*, Vol.22, pp. 1134-1135, 1983.
- 7) Lyzenga, D.R.: Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data, *Int. J. Remote Sens.*, Vol.6, pp. 115-125, 1985.
- 8) Clark, R.K., Fay, T.H. and Walker, C.L.: Bathymetry calculations with Landsat 4 TM imagery under a generalized ratio assumption, *Appl. Opt.*, Vol.26, pp. 4036-4038, 1987.
- 9) 神野有生, 鯉淵幸生, 磯部雅彦: 可視・近赤外画像による水深予測式の画像間互換性に関する検証, *土木学会論文集B1 (水工学) 特別号・水工学論文集*, Vol.55, pp.S 1153-115, 2011.