

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月16日現在

機関番号：15501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860044

研究課題名（和文） 衛星画像による浅水域の水深推定：観測波長帯の増加を利用した推定式一般化の試み

研究課題名（英文） Estimation of shallow water depth using satellite imagery: generalization of estimation formula with increased number of bands

研究代表者

神野 有生 (KANNO ARIYO)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：30583760

研究成果の概要（和文）：浅い水域の水深情報は、国内外で不足しており、衛星画像を用いて水深マップを作る技術による補完が期待されている。しかし、従来用いられてきた衛星画像では、撮影する波長帯（色）の数が高々4であり、精度に限界があった。一方、2010年から、8波長帯で撮影するWorldView-2衛星画像が利用可能になった。本研究では、多数の画像を解析し、波長帯が倍増したことで、水深マッピングの精度やそのための式の汎用性が向上することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Bathymetry information is lacking domestically and internationally, and water depth mapping technique using satellite imagery is counted on as a complementary bathymetry method. However, the accuracy was not enough because the traditional satellite images used for the purpose were observing in no more than 4 wavelength bands (colors). In 2010, a new imagery called WorldView-2, which observes in 8 bands, became available. In this study, we analyzed a number of WorldView-2 images and found that the doubling of bands enhanced the accuracy of water depth mapping and the generality of the water depth estimation formula.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,210,000 | 363,000 | 1,573,000 |
| 2011年度 | 1,150,000 | 345,000 | 1,495,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,360,000 | 708,000 | 3,068,000 |

研究分野：リモートセンシング・水中光学・水圏環境学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：リモートセンシング・水深・マルチスペクトル画像・回帰分析・サンゴ礁

1. 研究開始当初の背景

沿岸域・湖沼・河川などの、特に浅い水域における水深分布（水面下の地形）は、波・流れとそれに伴う物質循環・生物分布などに支配的影響を及ぼすため、環境管理に欠かせない基盤情報である。しかし浅い水域では、水深分布の空間スケールが小さいこと、座礁の危険、音波の特性などが原因で、一般的な音響測深の効率・安全性が低く、水深情報が不足している。

そこで従来、浅い水域を撮影した、可視近赤外域の高空間分解能衛星画像を用いて、画素ごとの水深を推定するアルゴリズムが、盛んに研究されてきた。原理は、衛星に観測される各バンド（観測波長帯）の放射輝度が、太陽光の水中散乱成分・底面反射成分を含み、水深に依存することである。

中でも有名な Lyzenga のアルゴリズムは、適用実績が多く、光学的根拠にも優れている。その解析手順は、

- (1) 水深推定対象の各画素の各可視バンドについて、大気散乱成分・水面反射成分の和を近赤外バンドの放射輝度で説明する線形回帰モデルを用いて、これらの有害成分を除去し、水深と線形関係にある変数 X を導出する。
- (2) 水深を、各可視バンドの変数 X で説明する線形回帰モデルを推定し、これを用いて各画素の水深を推定する。

の2段階である。理論上、手順(1)の精度は、近赤外バンドの数が多いほど向上し、手順(2)で得られる推定式の精度と一般性（底質・水質の変動に対する頑健性）は、可視バンドの数が多いほど増す。ところが QuickBird 衛星画像などに代表される従来の高空間分解能衛星画像は、近赤外域に1バンドのみ、可視域に高々3バンドを有するに過ぎず、結果として水深推定式の精度や一般性が不十分となっていた。

一方で2010年、従来型の高空間分解能衛星である QuickBird 衛星の後継機として、近赤外域に2バンド、可視域に6バンドと、従来の倍のバンド数をもつ WorldView-2 衛星画像が提供開始された。このような高空間波長分解能衛星画像を用いれば、底質・水質の多様な空間変動に影響されにくい、つまり時空間的に広い範囲に精度よく適用可能な推定式が構築できる可能性がある。その結果、水域・画素ごとに水深などの現地データを準備して推定式を構築する必要性が低下すれば、衛星画像による水深分布推定の実用性の飛躍的な向上が期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では、様々な底質・水質条件をもつ複数の水域を撮影した WorldView-2 衛星画像を対象に、Lyzenga のアルゴリズム等

を適用し、

- 近赤外バンドの複数化に伴う大気散乱成分・水面反射成分の除去精度の向上
 - バンド数の倍増による水深推定式の精度・一般性の改善
- 等を定量的に検証することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 近赤外バンドの複数化による大気散乱成分・水面反射成分の除去精度向上の検証

石垣島沿岸域を撮影した4枚（図-1）およびテニアン島沿岸域を撮影した1枚（図-2）の WorldView-2 衛星画像を対象に、大気散乱成分・水面反射成分の和を近赤外バンドの放射輝度で説明する線形回帰モデルを推定し、その精度を評価した。この解析は、説明変数である近赤外バンドとして、従来型の QuickBird 衛星画像にも存在した1バンドを用いた場合と、WorldView-2 衛星画像で新たに追加された1バンドを加えた全2バンドを用いた場合について行った。



図-1. 石垣島沿岸域の WorldView-2 衛星画像

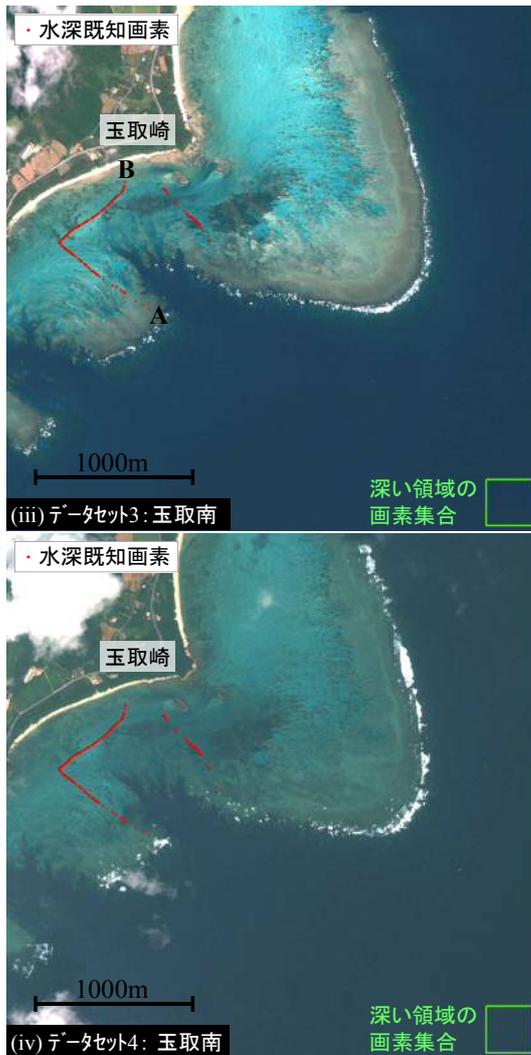


図-1 (続き)

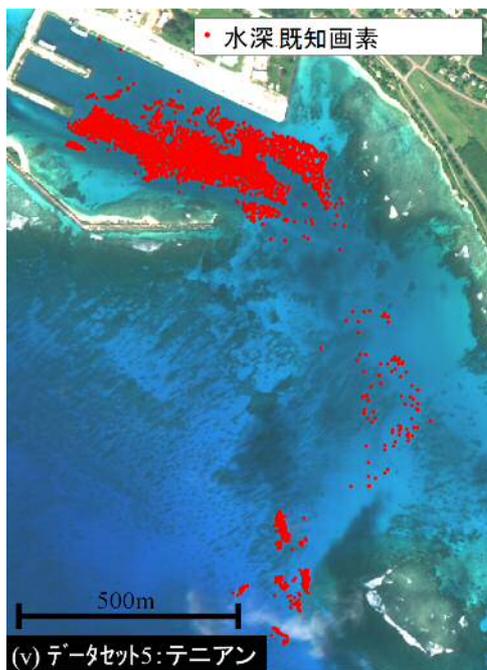


図-2. テニアン島沿岸域の WorldView-2 画像

(2) バンド数の倍増による水深推定式の精度・一般性の改善の検証

石垣島沿岸域の各衛星画像 (4 枚) と対応する水深実測データを重ねて、水深が既知の画素を特定し、水深と各可視バンドの変量 X を変量とする画像別のデータセットを作成した。個々のデータセットと、それらを結合したデータセットについて、水深推定式 (水深を各可視バンドの変量 X で説明する線形回帰モデル) を推定した。

さらに、竹富島、テニアン島、Gili 島 (インドネシア) の沿岸域を撮影した 3 枚のサンゴ礁水域の WorldView-2 衛星画像を加え、計 7 枚の画像を用いて同様の解析を行った。

(3) 有用なバンドとバンドの組の検討

石垣島・テニアン島沿岸域の計 5 枚の衛星画像のデータセットを対象に、トレーニングデータが無作為抽出して赤池情報量規準 (AIC) で最適な可視バンドの組み合わせを選ぶ試行を繰り返した。各データセットについて、トレーニングデータ数を 30, 50, 100, 150, 200 の 5 通りに変え、全 25 ケースにつき 1000 回の試行を行い、1000 回中の各バンドないしバンドの組の使用回数を 1000 で除すことによって、使用率を求めた。

4. 研究成果

(1) 近赤外バンドの複数化による大気・水面散乱成分の除去精度向上の検証

表-1 に、テニアン島沿岸域の画像に関する結果を例示する。いずれの画像・バンドについても、2 つの近赤外バンドを用いた場合に、線形回帰モデルの自由度調整済み決定係数が大きくなった。従って、近赤外バンドの増加が大気・水面散乱成分の除去を高精度化することが立証された。

(2) 一般性をもつ水深推定式構築可能性の検証

はじめに、石垣島沿岸域の 4 枚の画像を用いた解析について、表-2 に示すように、結合データセットは、底質・水質分布の画像間不均一性にも関わらず、自由度調整済み決定係

表-1. テニアン島沿岸域の画像に関する、大気散乱成分・水面反射成分の除去に用いる線形回帰モデルの自由度調整済み決定係数

| 可視バンドの番号 | 1 つの近赤外バンドを使用 | 2 つの近赤外バンドを使用 |
|----------|---------------|---------------|
| 1 | 0.139 | 0.326 |
| 2 | 0.227 | 0.304 |
| 3 | 0.323 | 0.406 |
| 4 | 0.262 | 0.587 |
| 5 | 0.266 | 0.320 |
| 6 | 0.266 | 0.601 |

数が最大で、残差平方平均も他のデータセットと大差がなかった。よって、結合データセットから、石垣島沿岸域の多様な底質・水質に適用可能な一般性をもつ水深推定式が得られたと考えられる。さらに、表-3 に示すように、この水深推定式は、個々のデータセットに対しても良好な精度を示した。この水深推定式の精度の視覚的な理解を助けるため、水深の推定値と実測値の散布図を図-3 に、測深点列上の分布を図-4 に例示する。

次に、他の沿岸域の画像をも含めた計7枚の画像を用いた解析について、結合データセットは自由度調整済み決定係数が0.931と7画像中2番目に大きく、平均水深5.073mに対して残差平方平均平方根は1.179mと、比較的優れた精度が得られた。従って、WorldView-2衛星画像を用いた場合の水深推定式は、1つの地域に限らず、広い範囲のサンゴ礁水域に対して一般性を持ち得ることが明らかになった。

また、図-5に例示するように、全8バンドを使用した場合に比べ、QuickBird衛星画像相当の4バンドのみを用いた場合には、全データセットで自由度調整済み決定係数が低下したことから、バンド数の倍増によって精度・一般性がともに改善することが示された。ただし用いるバンド数による精度の違いは、図-5からも明らかなように、データセットによって大きく異なった。

表-2. 石垣島沿岸域の4データセットとそれらを結合したデータセットに関する、水深推定式の精度評価結果

| データセット | 自由度調整済み決定係数 | 残差平方平均平方根 [m] |
|--------|-------------|---------------|
| 1 | 0.958 | 0.133 |
| 2 | 0.817 | 0.280 |
| 3 | 0.859 | 0.179 |
| 4 | 0.847 | 0.194 |
| 結合 | 0.898 | 0.249 |

表-3. 石垣島沿岸域の結合データセットにより推定された水深推定式の、個々のデータセットに関する精度評価結果

| データセット番号 | 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 | 0.951 | 0.172 |
| 2 | 0.783 | 0.341 |
| 3 | 0.815 | 0.222 |
| 4 | 0.794 | 0.230 |

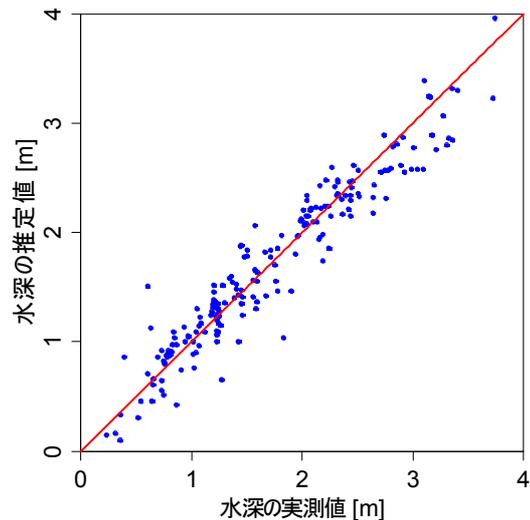


図-3. 石垣島沿岸域の結合データセットから得た水深推定式に関する水深の実測値と水深推定式による推定値（あてはめ値）の散布図。無作為抽出した一部のみ表示。

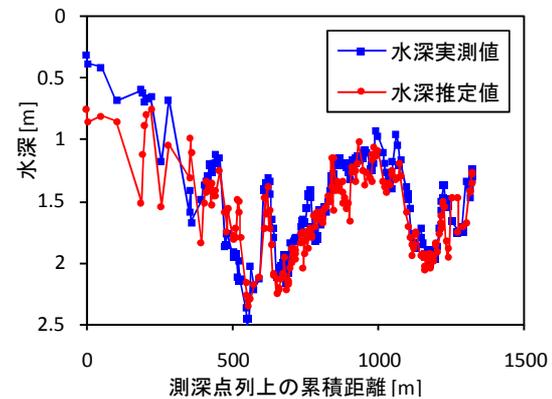


図-4. 石垣島沿岸域の結合データセットから得た水深推定式による、データセット3の水深推定値と水深実測値の、図-1に示す測深点列A-B上の分布

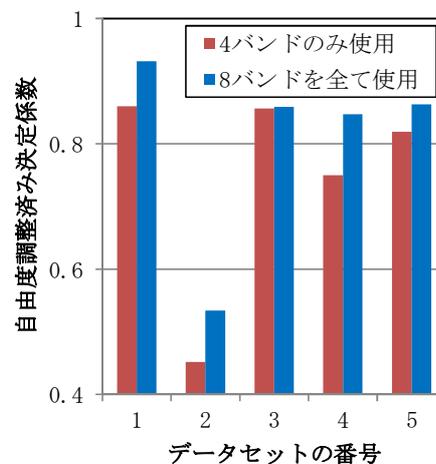


図-5. 使用するバンド数による水深推定式の自由度調整済み決定係数の変化

(3) 有用なバンドとバンドの組の検討

表-4 に、全 25 ケースに関する各バンドの使用率の平均と標準偏差を示す。この表より、全てのバンドの使用率が 0.5 を超えていることがわかる。この結果等から、いずれのバンドも有用であり、中でも特に Band 3 (緑) が際立って有用であることが示された。

表-4. 全 25 ケースに関する各バンドの使用率の平均と標準偏差

| 可視バンドの番号 | 使用率の平均 | 使用率の標準偏差 |
|----------|--------|----------|
| 1 | 0.598 | 0.243 |
| 2 | 0.688 | 0.256 |
| 3 | 0.744 | 0.257 |
| 4 | 0.654 | 0.306 |
| 5 | 0.671 | 0.26 |
| 6 | 0.579 | 0.232 |

以上の結果より、WorldView-2 衛星画像においてはバンド数の倍増により、大気・水面散乱成分の除去精度が向上し、また水深推定式の精度・一般性が改善していること、さらにこのような高空間波長分解能衛星画像を用いれば、広い範囲のサンゴ礁水域で適用可能な一般性を持つ水深推定式が構築できることが明らかになった。

現時点までの研究で、バンド数の倍増による水深推定式の精度や一般性の向上については、多角的な解析を通じて十分な実例を蓄積することが出来た。一方、一般性をもつ水深推定式を実用に供するためには、一般性の程度・条件について、より詳細に解明することが望ましい。今後は、分光放射計を用いた水面直上・直下での上向き分光放射照度の測定に基づき、近赤外バンドを用いた水面反射成分除去の光学的根拠、および Lyzenga の水深推定式における複数バンドの使用によって、水質・底質影響の変動が除去されるメカニズムを検証することで、水深推定式の一般性の範囲を演繹的に検討する予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Ariyo Kanno, Yukio Koibuchi, and Masahiko Isobe, Shallow Water Bathymetry from Multispectral Satellite Images: Extensions of Lyzenga's Method for Improving Accuracy, Coastal Engineering Journal, 査読有、巻・頁未定 (印刷中; 掲載確定済)

- ② 神野有生、衛星画像によるサンゴ礁の水深推定 - バンド数倍増に伴う精度向上の検証 -, 土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、第 67 巻、2011、pp. 1341-1345、URL:

https://www.jstage.jst.go.jp/article/kaigan/67/2/67_2_I_1341/_article

- ③ 神野有生、鯉淵幸生、磯部雅彦、寺田一美、関根雅彦、胡忠、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、土木学会論文集 B3(海洋開発)、査読有、第 67 巻、2011、pp. 744-749、URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejoe/67/2/67_2_I_744/_article/-char/ja/

[学会発表] (計 1 件)

- ① Ariyo Kanno, Which Bands of Multispectral Satellite Imagery Are Useful in Remote Sensing of Water Depth?, International Symposium on Remote Sensing 2011, 2011/11/4, 麗水 (韓国)

[その他]

新聞報道:

宇部日報 2011 年 6 月 30 日の 1 面に掲載
オンライン版記事の URL:

<http://ubenippo.co.jp/2011/06/post-2049.html>

研究テーマを紹介したホームページの URL:
<http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~kanno/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神野 有生 (KANNO ARIYO)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号: 30583760