

<解説>

マルチスペクトル衛星画像を用いた浅い水域の水深分布推定

神野 有生*

Water Depth Mapping of Shallow Water using Multispectral Imagery

Ariyo KANNO*

*Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611, Japan

1. はじめに

人工衛星から地表面の状態を観測する「衛星リモートセンシング」は、陸・川・湖沼・海を問わず、広く用いられている技術である。陸と海の接点である沿岸域を例にとっても、水温・クロロフィルa様色素・底質・水深・波高など、様々な観測対象がある。本稿では、水深の衛星リモートセンシングの中でも、著者の専門である、マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定について、簡潔に紹介する。

2. 水深分布の重要性と計測方法

浅い水域における水深分布，つまり水底の起伏は，水上・水中における人間の移動・作業はもちろん，波と流れ，それに伴う懸濁粒子（例：プランクトン・デトリタス・土砂）・溶存物質（例：栄養塩類）・熱の輸送，さらには各種生物の活動に支配的な影響を与える。したがって，水深分布は，防災・漁業・環境管理などに関わる多くの人間活動にとって重要な基盤情報である。

水深分布を測るための，現在もっとも一般的な方法は，船舶に備え付けた音響機器を用いる方法，いわゆる音響測深である。音響機器は水底に向けて音波を発振し，その反射波を観測する。音響機器と水底の間の音波の往復時間と，音響機器の位置・姿勢，および音速の情報を用いて，反射位置における水深が計算される。古くから用いられてきたシングルビーム音響測深では，航跡に沿った1次元の水深分布が得られるに過ぎず，2次元の分布を得るには網羅的な航走が必要である。一方，近年導入が進んでいるマルチナロービーム音響測深では，1本の航跡に沿って，水深の数倍の幅をもつ領域の水深分布が得られる。

しかし，特に浅い領域では，いくつかの要因によって，音響測深が困難または非効率になる。第1に，座礁の危険から，船舶の航行が制限される。特にサンゴ礁，とりわけ国内のサンゴ礁のほとんどを占める裾礁型のサンゴ礁では，大潮の満潮時など，特定の潮時でなければ礁池の中に進入すること自体が難しい場所も多い。第2に，音響機器によって測定できる水深には下限がある。第3に，マルチナロービーム音響測深で，航跡沿いに計測できる領域の幅は，水深に比例して小さくなる。

このような浅い領域では，代替手段として，衛星・航空機，または沿岸の基地から，光や電波を利用して，様々な原理で水深分布を計測・推定する方法が開発されてきた¹⁾。潤沢な予算があれば，航空機からレーザーを使って水深を測るLIDAR (LIght Detection And Ranging)が有効である。一方，透明度くらいの深さまでの水深分布を低コストで得たい状況では，マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定が候補となりうる。

3. マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定

飛行機の窓から海岸付近を眺めると，海岸線の直近は明るく見え，沖に向けて，徐々に暗くなるのがよくある。これは，海岸線から沖に向けて，水深が大きくなるためである。逆にいえば，浅い水域を上空から見れば，水深の見当がつく。ただし，浅い水域でも，底面に海藻・海草・サンゴなどがある場所は暗く見えるので，明暗だけでなく色合いも考慮して判断しなければならない。マルチスペクトル衛星画像を

* 山口大学大学院理工学研究科 助教 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

用いた水深分布推定の原理は、およそこのようなものである。

この原理をもう少し光学的に説明しよう。水中に入射した太陽由来の可視光は、水中における吸収・散乱に加え、底面における吸収・反射を受けながら伝搬する。その結果、水中から大気中に射出される可視光の放射輝度**，結果として衛星が観測する可視光の放射輝度が、水深に依存する。具体的には、図 1 に模式的に示すように、衛星が観測する可視光の放射輝度は、主に太陽光に由来する次の 4 成分の和である。

- 大気散乱成分：大気中の分子・エアロゾルによる体積散乱成分
- 水面反射成分：水面における鏡面反射成分
- 水中散乱成分：水中の分子・懸濁粒子による体積散乱成分（水深に依存）
- 底面反射成分：底面における反射成分（水深に依存）

他の条件を固定すれば、水深が大きいほど、水中散乱成分は大きく、底面反射成分は小さい。水深が十分小さい場合、水中散乱成分よりも底面反射成分の方が大きいので、水深が大きくなるほど、衛星が観測する可視光の放射輝度は小さくなる（上空から暗く見える）。ただし実際には、底面の反射率が場所により異なる。砂礫質の底面は反射率が大きい、岩盤や海藻・海草・サンゴなどは反射率が小さい。そのため、同じ水深でも、底面が砂礫質の画素の方が、岩盤の画素よりも大きな放射輝度が観測される（上空から明るく見える）。そこで、単一の波長帯（バンド）の色で水深を判断せず、複数の波長帯（バンド）の放射輝度が記録されたマルチスペクトル衛星画像を使う必要が生じる。簡単に言えば、明るさだけでなく色合いも考えて水深を判定するために、白黒写真ではなくカラー写真を使うわけである。

実際には、各画素について、目視で水深を判定するわけではない。何らかの式を使って、複数の波長帯の放射輝度から水深を推定する。この水深推定式は、通常、光の伝搬（放射伝達）過程に関する物理モデルを解析対象の画像に合わせてキャリブレーションしたものか、もしくは完全な統計モデルである。著者は、放射伝達や回帰分析の理論に基づき、様々な水深推定式を提案してきた^{1)・5)}が、ここでは省略する。

マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定は、原理的に、水中散乱成分・底面反射成分が水深に応答する、浅い水深帯にしか適用できない。また、ある精度で推定可能な水深帯は、大気・水面・水・底質の光学特性によって変化してしまう。おおまかには、大気・水が清澄で、水面の波が小さく、水底の反射率が大きいほど、より深くまで推定可能になる（最大 25 m 程度）。一方で、この方法には次のような利点もある。

- 一般に頒布されている地球観測衛星のアーカイブ画像を利用することで、コストを抑えることができる。例えば、Landsat 8 の画像は現在、United States Geological Survey から無償で配布されている。
- 衛星センサの選択により、様々な空間スケールで格子状の水深分布が得られる。例えば、Landsat 8 の場合、1 シーンあたり、およそ 185×180 km の範囲の水深分布が 30 m 格子で得られる。WorldView-2 の場合、範囲はより狭いが、2 m 格子の水深分布が得られる。

よって、マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定は、条件は選ぶが、状況によっては便利な方法である。特に裾礁型のサンゴ礁は、上述の通り測量船の進入が難しく、水が清澄で、内部（礁池）の波が小さいため、マルチスペクトル衛星画像を用いた水深分布推定に適している。

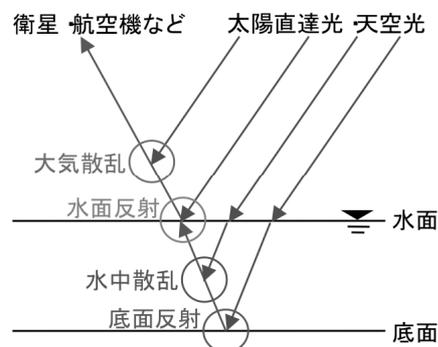


図 1. 衛星・航空機などが観測する可視光の放射輝度成分に関する模式図

** 単位時間・単位面積・単位立体角あたりの放射エネルギー量 [W/m²/sr]；イメージとしては、明るさをエネルギーの単位で測ったもの。リモートセンシングで重要な物理量であるが、画素の輝度値や放射照度などと混同されやすい。

4. 水深分布の推定例

図2に、石垣市沿岸のサンゴ礁における水深分布の推定例を示す。用いた水深推定式は、放射伝達モデルから導いたセミパラメトリック回帰モデル²⁾である。用いた衛星画像は QuickBird マルチスペクトル画像であり、2.4 m 格子の水深分布が得られている。この推定結果は、海岸線付近やサンゴ礁のエッジ（礁嶺）で水深が小さい様子を捉えている。クチ（サンゴ礁の切れ目）と礁嶺の外側は、本画像では波が大きいため、水深推定の対象外とした。

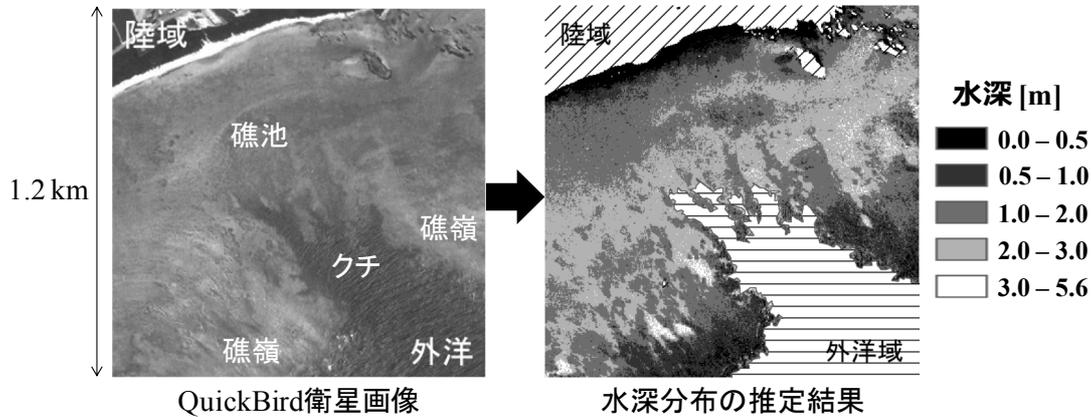


図2. マルチスペクトル衛星画像による水深分布の推定例

(This figure includes copyrighted materials from DigitalGlobe, Inc. All Rights Reserved)

5. 推定した水深分布の活用例

冒頭に述べたように、水深分布は浅い水域の基盤情報であるから、様々な用途が考えられる。ここでは、沿岸域の数値流動モデルへの入力としての利用を試みた例⁶⁾を紹介する。

流体力学方程式に基づく数値流動モデルは、沿岸域における流速・水温・塩分場、さらには低次生態系の動態を把握・予測するための有力なツールとして、盛んに利用されている。しかし、特に数 km 四方以内の小領域を細かく解析する場合、数値流動モデルへの入力として必要な水深分布が、十分な空間密度で手に入らないことが多い。マルチスペクトル衛星画像を用いれば、衛星画像と同じ空間解像度（画素と同じ空間密度）をもつ格子状の水深分布が得られるが、それを数値流動モデルに活用した例はほとんどない。

そこで本例では、瀬戸内海に面した山口湾を例に、衛星画像を用いて推定した水深分布に基づいて数値流動モデルを構築し、その再現性を調べた。はじめに、WorldView-2 衛星画像（空間解像度 2 m）と、一部の画素における現地測深データを用いて、水深推定式（本例では3層パーセプトロン）を構築した。精度検証として、水深推定式の構築（3層パーセプトロンの訓練）に用いていない別の一部の画素について、推定値を現地での音響測深値と比較したところ、両者は良好に一致した（図3；相関係数 0.991）。次に、この水深推定式を各画素に適用し、2 m 格子の水深データを得た。その後、計算負荷を考慮してこれを 40 m 格子に再編し（図4）、山口湾の準3次元数値流動モデルに入力した。再現性を検証するため、2011年9月に関する流速・水温・塩分の再現計算を行い、図4のSta.Iにおける流速・水温の計算値を、ADCP・自記式水質計による実測値と比較した。結果として、図5に示すように、計算値と実測値は良好に一致した。よって、衛星リモートセンシングで得た水深データが、数値流動モデルに有用であることが確認された。この流動モデルは、山口湾の流動特性の解明やアサリの浮遊幼生の輸送シミュレーションに活用された⁶⁾が、省略する。

6. おわりに

本稿では、マルチスペクトル衛星画像を用いた水深のリモートセンシングについて紹介した。これはリモートセンシングの中でも、特に条件を選ぶものであり、長い研究史¹⁾にも関わらず、あまり知られていない。流域圏の研究においても、水面下の地形情報が必要になる場面は少なくないであろう。本稿が多少なりとも、読者の方々のご参考になれば幸いである。

(原稿受理 2013年7月31日)

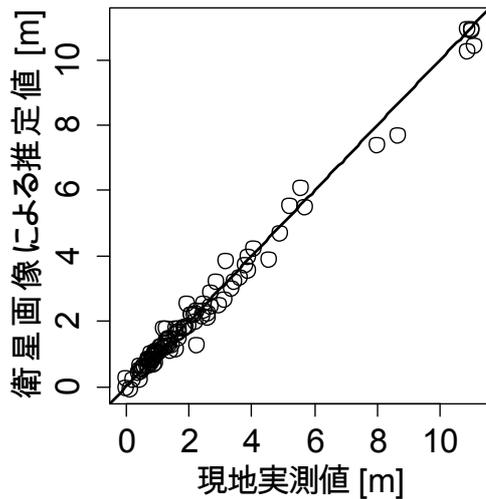


図3. 衛星画像による水深推定精度

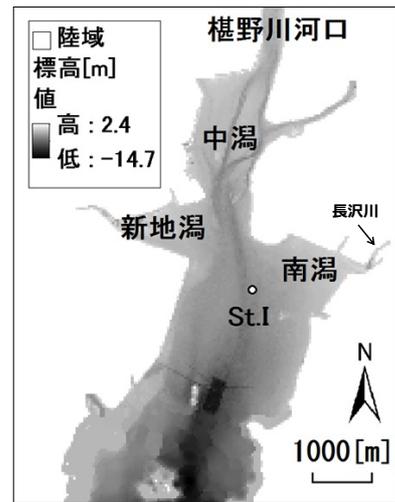


図4. 山口湾の40m解像度水深分布

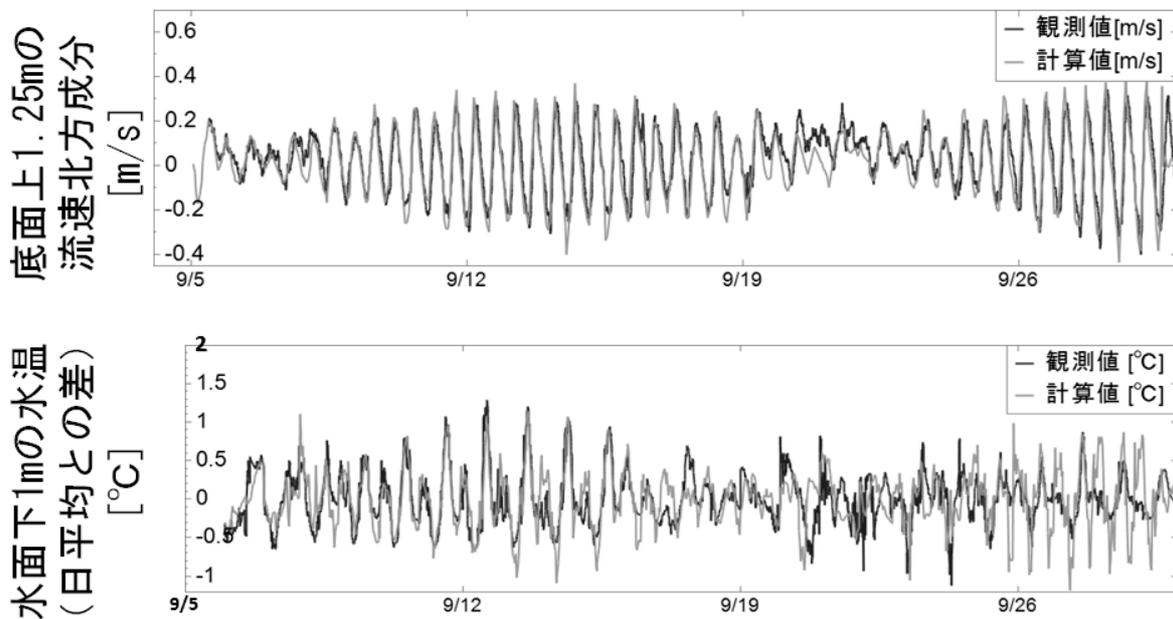


図5. St.Iの流速・水溫に関する数値流動モデルの再現性

参考・引用文献

- 1) 神野有生(2010) : 可視近赤外面像による浅水域の水深分布推定法, 東京大学大学院新領域創成科学研究科社会文化環境学専攻博士論文
- 2) 神野有生, 鯉淵幸生, 竹内渉, 磯部雅彦(2009): 光学理論モデルのセミパラメトリック表現に基づく浅水域の汎用水深分布予測法, 日本リモートセンシング学会誌, 第29巻, pp.459-470.
- 3) Kanno, A., Y. Koibuchi, and M. Isobe(2011): Statistical Combination of Spatial Interpolation and Multispectral Remote Sensing for Shallow Water Bathymetry, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 8, pp.64-67.
- 4) Kanno, A. and Y. Tanaka(2012): Modified Lyzenga's Method for Estimating Generalized Coefficients of Satellite-based Predictor of Shallow Water Depth, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 8, pp.715-719.
- 5) Kanno, A., Y. Koibuchi, and M. Isobe(2012): Shallow Water Bathymetry from Multispectral Satellite Images: Extensions of Lyzenga's Method for Improving Accuracy, Coastal Engineering Journal, 53, pp.431-450.
- 6) 信田紗希, 神野有生, 山本浩一, 田中陽二, 関根雅彦(2012): 山口湾における3次元流動モデルの構築と浮遊幼生の輸送特性に関する数値実験, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, pp.III.297-III.305.