

# 論文内容の要旨

論文題目	可視近赤外画像による浅水域の水深分布推定法 (Shallow Water Depth Estimation Methods with Visible and Near Infrared Imagery)
氏名	神野 有生

## 1 はじめに

沿岸域・湖沼・河川などの水深分布は、流動・物質循環・生物分布を含む水環境に支配的影響を及ぼす。そのため水深分布は、水域の利用や管理に欠かせない基盤情報である。

水深分布の最も一般的な計測法は、船舶による音響測深である。ところが浅い水域では、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、時空間的に十分な密度の音響測深を行うことが難しい。そこで浅い水域を対象に、衛星・航空機が観測した可視近赤外画像を用いる水深分布の予測<sup>1</sup>法が、数多く開発されてきた。これらは、観測される放射輝度が、図 1に示すように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を利用した方法である。中でも情報として、単一のマルチスペクトル画像<sup>2</sup>と、いくつかの水深既知画素のみを要する方法は、多くの実務場面で実行可能であると考えられる。例えば、船舶の航行が容易でないサンゴ礁の水深マッピング、空間的に粗い音響測深データの高密度化などの応用が期待される。

しかし従来法は、精度が水深の他に底質・水質・波浪・大気の空間的不均一性によって顕著に劣化し、実用に供した例が少ない。そこで本研究では、従来法の中では物理的根拠と頑健性に優れたLyzengaの予測法<sup>3</sup>を改良し、より高精度な方法を開発することを目指す。

## 2 Lyzengaの予測法と問題点

Lyzenga の予測法は、水中の光の伝搬を支配する放射伝達方程式の近似解析解である、次式の放射伝達モデルに依拠している。

$$R = R_{\infty} + (T_s r_b - R_{\infty}) e^{-kh}$$

ここに、 $R$ は水面直上における、水中から大気中に射出される光に関するリモートセンシング反射率、 $R_{\infty}$ はその無限水深における値、 $T_s$ は水面の透過に関する係数、 $r_b$ は底面反射率、 $k$ は実効消散係数、 $h$ は水深である。このような物理的根拠をもつ一方で、予測自体は水深を各可視バンドの対数補正放射輝度<sup>4</sup>で説明する線形回帰モデルに基づき、誤差を考慮している点で頑健である。

しかし、次の問題点が、Lyzenga の予測法の適用場面・精度を制限していると考えられる。

- A. 放射伝達モデルの成立性が、基礎的に検証されていない。
- B. 水・大気の光学特性に関する強い空間的均一性を仮定する。
- C. 底質の種数が用いる可視バンドの数を超えないことを仮定する。
- D. 回帰係数の最小二乗推定量が、最良線形不偏推定量にはならない。

そこで本研究では、放射伝達シミュレーションによって問題点 A を解決した後、Lyzenga の予測法をもとに問題点 B,C,D を改善した、新しい予測法を提案する。

### 3 放射伝達モデルの検証

様々な光学条件、すなわち水面に注ぐ放射輝度の方向分布（入射光が平行光の場合、水面入射角）、水面の双方向性散乱分布関数、単一散乱アルベド、光学的深さ（水深と光束消散係数の積）、及び底面反射率について、モンテカルロ法によって放射伝達方程式の直接解を計算し、放射伝達モデルの成立性を検証した。水面の双方向性散乱分布関数は、風速に依存する波数スペクトルモデルに基づく光子追跡シミュレーションによって構築した。

その結果、放射伝達モデルは一般によく成立するが、内部反射成分<sup>5</sup>を無視しているため、内部反射成分が大きい条件下で、つまり光学的深さが小さく底面反射率が高い条件下で、成立性が低下する（具体的には、図 2 に例示するように、実効消散係数 $k$ が、 $k$ と独立であると仮定される光学的深さや底面反射率に強く依存する）ことが明らかになった。

この問題に対し本研究では、内部反射成分を考慮して成立性を改善した放射伝達モデルなども開発したが、一方で代数的な考察により、Lyzenga の予測法自体は内部反射成分の影響を直接には受けないことを示した。そこで4の予測法の開発では、従来の放射伝達モデルに依拠した。

### 4 水深分布予測法の開発

Lyzenga の予測法の問題点 B,C,D を改善した複数の予測法を開発した。いずれも、1枚のマルチスペクトル画像と水深既知画素のみを要し、放射伝達モデルに依拠する点で、Lyzenga の予測法の長所を継承している。

水・大気の光学特性に関する強い空間的均一性を仮定するという問題点 B に対しては、光学特性の空間変動を新たな変数で説明することにより、仮定を緩和した予測法を導いた。テイラー近似の利用により、回帰モデルは簡便さを継承した線形モデルとして提案された。

底質の種数が可視バンドの数以下である必要があるという問題点 C に対しては、許容される底質の種数を任意に設定できる 2 つの予測法を導出した。1 つは、指数・対数関数の非線形性を利用した非線形回帰モデルに基づく予測法である。もう 1 つは、底質指標<sup>6</sup>の様々なテクスチャ特徴量

が、底質の分類に有用であるという実験結果に依拠する。この予測法は、これらの特徴量を仮想バンドとして説明変数候補に含めた線形回帰モデルに基づく。さらに、底質を有限の種数に分類しない立場から、放射伝達モデルの底質依存項を底質指標のノンパラメトリック関数で表現した、セミパラメトリック回帰モデルに基づく予測法をも導出した。

回帰係数の最小二乗推定量が、分散が最小の線形不偏推定量にならないという問題点 D に関しては、原因として、回帰モデルの誤差項が空間的従属性をもつ現象に着目した。対策の例として、Lyzenga の線形回帰モデルにノンパラメトリックな空間トレンド項を追加したセミパラメトリック回帰モデルに基づく予測法、及び、誤差項の空間的従属性をバリオグラムとしてモデル化する Kriging with External Drift を応用した予測法を提案した。

## 5 実水域への適用

開発した予測法と Lyzenga の予測法をいくつかの実水域に適用し、次の手順で予測精度の交差検証を行った。①予め現地で測深した画素集合を、無作為に2分割する。②前者を水深既知画素とみなして、各予測法で後者の水深を予測する。③測深値と予測値の差を予測誤差と定義し、その統計量(RMS; Root Mean Square など)を評価する。④試行①～③を反復する。

図 3に、各予測法をあるサンゴ礁のQuickBird画像に適用した際の、予測のRMSの 500 回の試行に関する平均を例示する。空間的従属性を考慮しない予測法の平均RMSは、水深既知画素の増加とともに減少し、予測法に依存する値に漸近する傾向を見せた。一方、空間的従属性を考慮した2つの予測法に関しては、少なくとも水深既知画素が220個に達するまで、平均RMSの顕著な減少が続いた。これは、水深既知画素の増加とともに、予測量のうち放射輝度依存項が小さく、空間位置依存項が大きくなり、予測が空間補間に近づくためである(空間補間の精度は水深既知画素の空間密度が水深の変動スケールに達するまで向上する)。

図 3からわかるように、予測精度やその水深既知画素の数への依存性は予測法により異なるが、水深既知画素が十分にあるとき、開発した各予測法はLyzengaの予測法と比べて高精度となった。また、Lyzengaの予測法自体も、物理的根拠のない線形回帰モデルに基づく予測法と比べれば高精度であったことから、物理的根拠の重要性が確認された。予測法の絶対・相対的な精度が状況に依存することから、実務における予測法の選択手段としては、交差検証などを提案した。

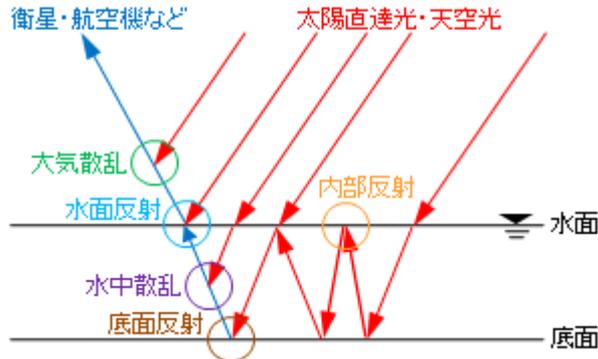


図 1. 浅水域を撮影した可視近赤外画像に含まれる主な放射輝度成分の模式図

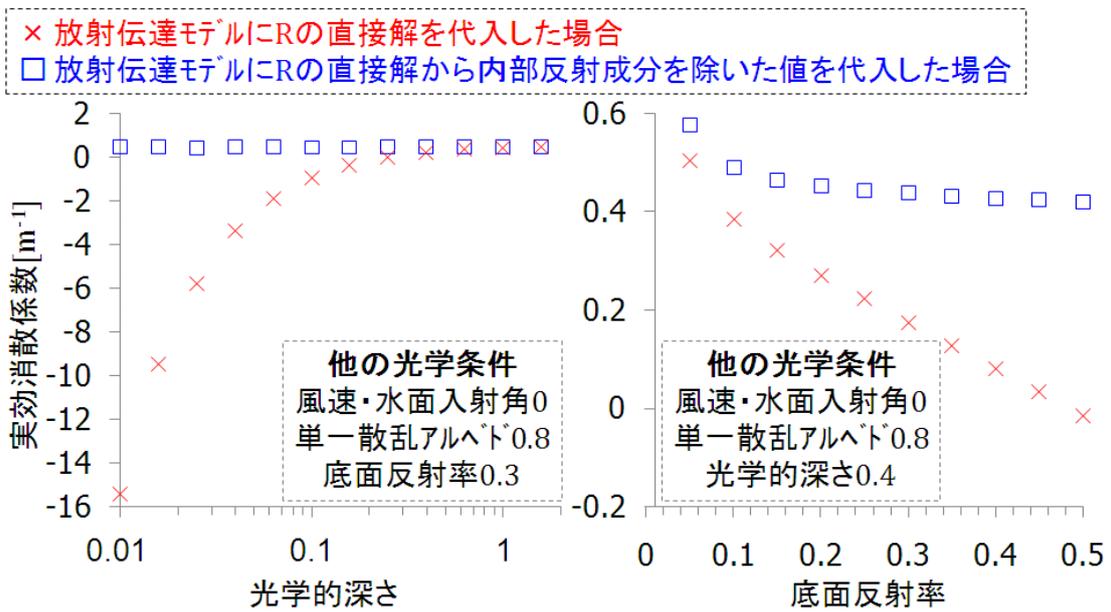


図 2. 実効消散係数の、光学的深さ・底面反射率に対する依存性

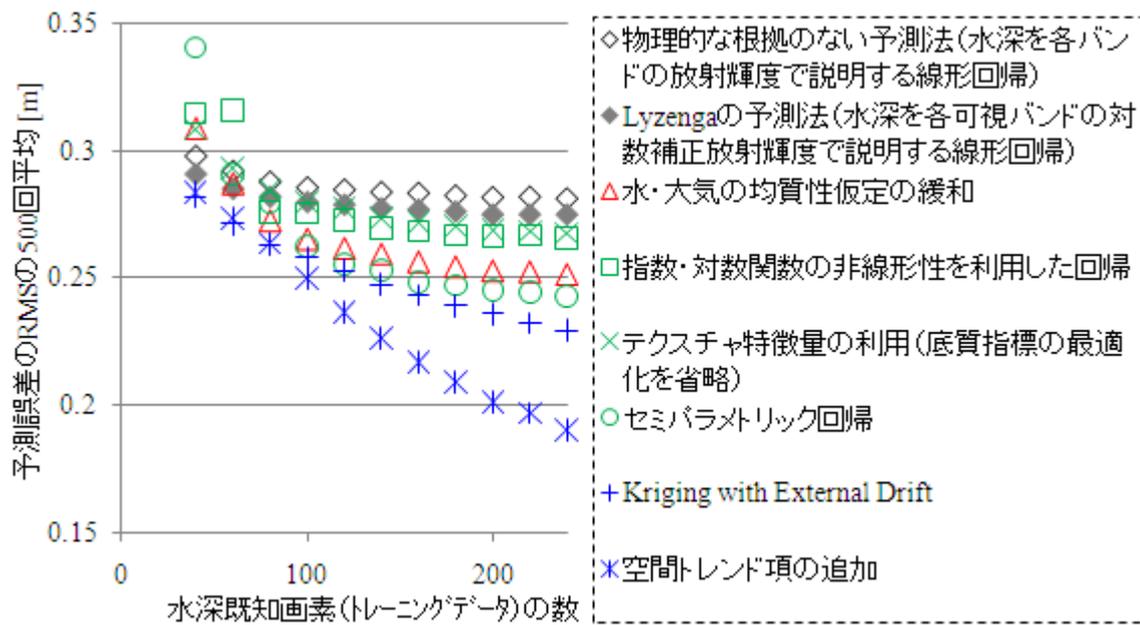


図 3. 各予測法による 500 回の予測に関する予測誤差の RMS の平均

- 1 統計学の用語. 時間軸を連想させるため, 題目では日常的な用語「推定」を用いた.
- 2 様々な空間解像度の衛星画像が, 一般向けに配布・販売されている.
- 3 D. R. Lyzenga, et al.: Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 44, pp. 2251-2259, 2006.
- 4 可視バンドの放射輝度, 近赤外バンド, 及び深水域の画素集合から計算される変量.
- 5 図 1 に示した, 水面における内部反射を経た放射輝度成分.
- 6 2 バンドの対数補正放射輝度を用いて計算される, 水深に依存しない変量.