

SFFM を用いた藻場分布と海底地形のリモートセンシング

Optical Model for Sea Grass Mapping and Water Depth Estimation in Shallow Water

森 信人¹・二宮順一²・有田 守³・出口一郎⁴・芳田利春⁵・矢持 進⁶

Nobuhito MORI, Junichi NINOMIYA, Mamoru ARITA, Ichiro DEGUCHI
Toshiharu YOSHIDA and Susumu YAMOCHI

An accurate information on sea grass distribution is an essential prerequisite for managing sea grass resources in a coastal area. In this study, the four-flux model for the estimation of sea grass mapping is developed based on an inversion of reflectance estimation at sea bottom. This method considers parallel and radiative light transfers in the water and has capability for sea grass distribution and water depth estimation, together. The validity of the method was verified by the field surveys for sea grass meadows, bottom bathymetry and aerial photograph. The estimated sea grass coverage from the image shows nice agreement with the observed data.

1. 序 論

近年、藻場や海中林に対するモニタリングの重要性は増しており、空間・時間的に変化する藻場の分布状況を広範囲にモニタリングするための手法が幾つか提案されている。一般的に、海底面に分布する藻場のリモートセンシングは、衛星や航空機に搭載された散乱計やマルチスペクトルセンサーを用いてパッシブに計測される場合が多い（例えば、Purkis ら, 2002 ; Paringit ら, 2003）。これらの計測結果を元に藻場分布等を推定する手法として、現地データとの回帰関係式を用いた経験的手法（佐川ら, 2005）、統計分類的な手法に基づく画像分類法による手法（中山ら, 2003）、さらに観測対象の形状特性の光学的特性をモデル化した手法（Paringit ら, 2003, 2004）が提案されている。現地の情報を元に経験式を用いて分布を推定する場合、個々の地点に特化した解析方法となり、水深、水中懸濁物やクロロフィル等の光学的に影響を与える諸量に時空間変動があると解析が困難になる。これは経験的關係に基づくリモートセンシング全般に言える事柄であり、観測量と物理量の力学的関係が希薄な場合に見られる。同様に、画像分類法を用いた場合、場所や時期が異なれば新たな教師データが必要となるため、地形の影響が大きい浅場には適用が難しい。このため、光学理論に基づき観測データから逆推定する方法が最も理想的である。

著者らは、Kubelka-Munk が提案した水中の平行光束と散乱光束の放射伝達をモデル化した Four-Flux Model を極浅海域の藻場マッピングに応用した Shallow-water Four-Flux Model（以下、SFFM と略記）を提案している（二宮ら, 2006 ; 森ら, 2006）。これは光学理論に基づく手法の一種で、主観的データを極力用いない藻場分布推定アルゴリズムである。SFFM では、水深の異なる海水中を透過・散乱・吸収する光の挙動を考慮して海底面の反射率を推定する。このような手法で問題となるのは、未知量が各波長帯の反射率および水深と情報量より過剰となる点であり、このため何らかの束縛条件を与えて物性値を決定する必要がある。

本研究では、現地観測データをもとに水深を既知量として反射率推定とその分析を行い、SFFM における束縛条件について検討を行い、SFFM を用いたリモートセンシング方法の妥当性について検討する。

2. SFFM の概略

一般にカメラやセンサーによる観測では、太陽光が海底面で反射しつつ海水中を往復した光束が計測される。この観測光は、空気中の分子に衝突した拡散光、海面からの反射光、海底面での反射光、海水中の溶存・懸濁物質に衝突した拡散光の線形和で構成される。このような観測機器に到達する光の経路は図-1 のように考えられる。本研究では、観測画像として航空機画像を用いることを想定し、撮影高度が低く空気中の分子に衝突した拡散光の寄与は微小であると仮定して大気中の散乱を無視する。一方海水中での光の挙動については、海水中での光の透過・拡散現象では、水分子、塩素イオン、クロロフィルや SS などの溶存・懸濁物質による吸収、散乱が影響するために、放射伝達方程式の一般解を直接求める

1 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科
2 大阪市立大学大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 大阪大学助教 大学院工学研究科
4 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科
5 正会員 工博 特定非営利活動法人アマモ種子バンク
6 正会員 農博 大阪大学教授 大学院工学研究科

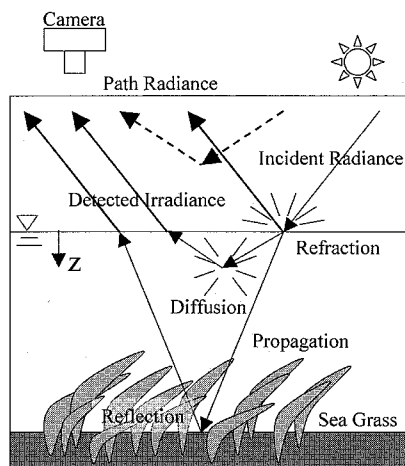


図-1 太陽光の伝播経路概念図

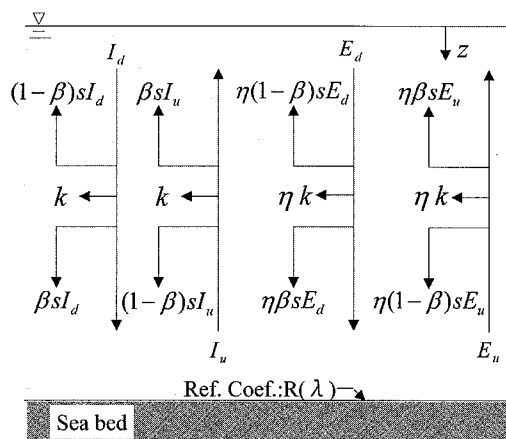


図-2 Four-Flux Model の放射伝達過程

ことは非常に困難である。そこで、本研究では Kubelka-Munk の理論に基づく Four-Flux Model (杉森ら, 1985; 以下, FFM) を用いて水中の光の伝達過程をモデル化する。FFM は高次の散乱光を拡散放射と見なす拡散放射理論の一つであり、モデルの考え方として光の放射伝達過程を図-2 のように見なす。FFM の基礎式は入射方向と同じ向きの平行光束を $I_d(z)$ 、拡散光束を $E_d(z)$ 、反対方向の平行光束を $I_u(z)$ 、拡散光束を $E_u(z)$ とし、水面を原点に下向き正に z 軸をとると以下のように表される。

$$\frac{dI_d}{dz} = -(k+s)I_d \quad (1)$$

$$\frac{dI_u}{dz} = (k+s)I_u \quad (2)$$

$$\frac{dE_d}{dz} = \beta s I_d + (1-\beta) s I_u$$

$$- \{ \eta (1-\beta) s + k \} E_d + \eta (1-\beta) s E_u \quad (3)$$

$$\frac{dE_u}{dz} = -\beta s I_u - (1-\beta) s I_d$$

$$+ \{ \eta (1-\beta) s + k \} E_u + \eta (1-\beta) s E_d \quad (4)$$

ここで、 k は吸収係数、 s は散乱係数、 β は前方散乱率、 η は平行光と拡散光の透過長比を表している。本研究では、吸収係数 k 、散乱係数 s は、Jerlov の分類 (Jerlov, 1951, 1964) を、前方散乱率 β 、平行光と拡散光の透過長比 η は Morrison の結果 (Morrison, 1945) を用いる。

式 (1) ~ (4) の境界条件は、太陽光分光強度から放射強度 I の平行光束と、放射照度 E の拡散光束が海水面に入射するとして、海表面および底面における光の入射条件と反射条件を次のように設定する。

$$I_d(0) = (1-r)(1-d)I + r(1-d)I_u(0) \quad (5)$$

$$E_d(0) = (1-r)dI + rdI_u(0)$$

$$+ rE_u(0) + (1-r)E \quad (6)$$

$$I_u(h) = R(1-D)I_d(h) \quad (7)$$

$$E_u(h) = RD I_d(h) + RE_d(h) \quad (8)$$

ここで、 r は海面反射率、 d は海面散乱率、 h は水深、 R は海底面反射率、 D は海底面散乱率である。一方、カメラで観測される光の強度 L は、海面での反射成分と海水中からの透過成分の和として次のように表すことができる。

$$L = r(I+E) + (1-r)\{I_u(0) + E_u(0)\} \quad (9)$$

海底面反射率を 0 から 1 まで、また水深変化させて観測光強度と一致するように I_d 、 I_u 、 E_d 、 E_u の鉛直分布を推定することにより、各波長毎に水深および底面反射率と観測光強度の関係が得られる。ここでは有限差分法により数値的に解を求めるが、解は 1 個関数となり、ある観測光強度に対して無数の水深と底面反射率の組み合わせが存在する。このため、束縛条件により水深・底面反射率・観測光強度を一義的に決定する必要がある。著者らは、波長毎の底面反射率が等しいと仮定し、赤、青波長域における海底面反射率はほぼ等しいとの経験則を用いて水深および底面反射率を推定している (二宮ら, 2006)。しかし、藻場に対する底面反射率は、葉面積、密度、キャノピー高さに依存するため、実際はある程度のばらつきを持つことが予想され、詳細な精度の検証を行う必要がある。そこで以下では、観測地形データを利用し、水深を既知量とした反射率推定を行い、得られた結果を分析し、藻場の底面反射率の分布特性について考察する。

3. 現地観測結果

SFFM の精度検証のために、兵庫県赤穂市唐船海岸において藻場を含む海底面の分類調査および海底地形の

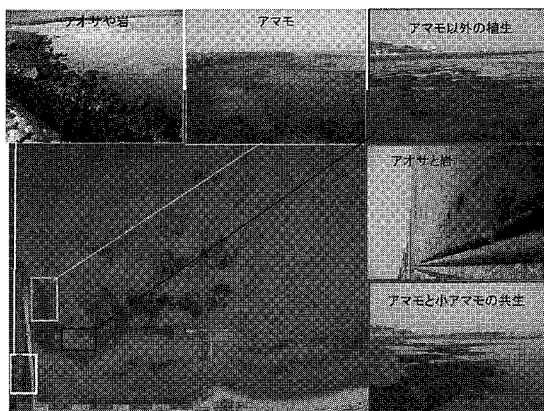


図-3 対象地点（赤穂海岸）の藻場・海草分布（破線内が観測・計算対象領域）

測定（現地撮影）と航空撮影を行った。以下ではこれらの調査について概説する。

(1) 現地調査

図-3に示すのは、対象地点の藻場・海草の分布である。写真の範囲は縦横約600 m×400 mであり、図の下側が岸側である。ここは砂地で主にアマモが群生しており、一部コアマモ、アオサが見られる。以下では、主に最も広範囲に群落を形成していたアマモ場を観測対象とする。

海底地形については図-3の破線内の領域（約300 m×200 m）においてGPSにより詳細な海底地形を計測した（図-4：5月16日観測）。地形の計測は、2006年4月から2006年12月まで計9回行い、これとあわせて底質粒径調査も行った。底質の中央粒径はアマモ分布域が0.22～0.57 mm、非分布域が0.17～0.54 mmと有意な差はなく、シルト含有率はアマモ分布域、非分布域ともに既往の研究で指摘されている条件（19%以下）を満たしていた。また年間を通して地形はほとんど変化しておらず、水深変化は大きくて約20 cm、特にアマモ分布域では10 cm未満であった。

(2) 画像の撮影条件

航空機撮影は通常の光学カメラを用いて5月21日8時18分に行い、撮影高度920 m、天候は晴れであった。フィルタなしの光学カメラによる撮影であるため、画像のスペクトル特性を正確に把握できないが、カメラの仕様に従って赤を600 nm、緑を540 nm、青を430 nmと代表させて計算を行った。以下では3色それぞれの波長をBand-R, G, Bと表記する。また、撮影高度が低いいため幾何補正および放射強度補正も行っていない。

図-5に示すのは、繁茂期（2006年5月）と衰退期（2006年2月）における撮影画像である。図からわかるように、1年周期でアマモ群落は繁茂と衰退を繰り返し

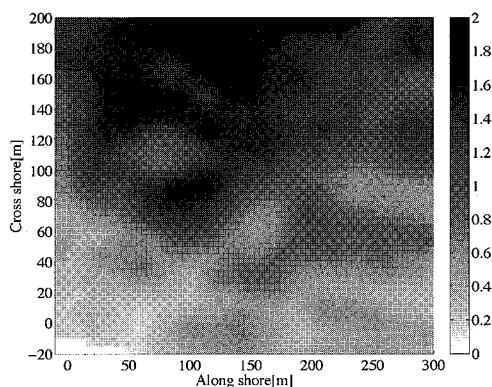
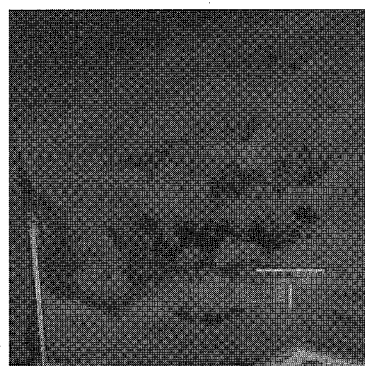
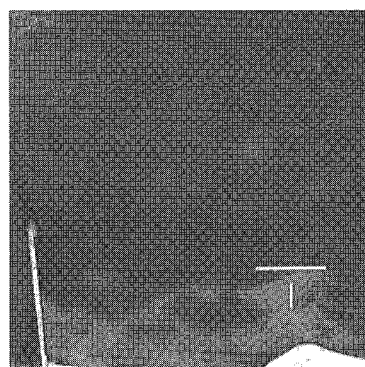


図-4 GPS計測された海底地形（5月16日観測、濃淡図の単位 [m]）



(a) 繁茂期



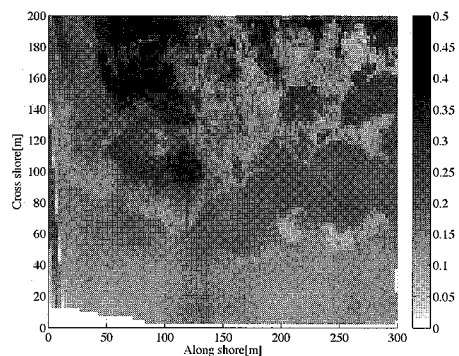
(b) 衰退期

図-5 藻場分布の季節変化

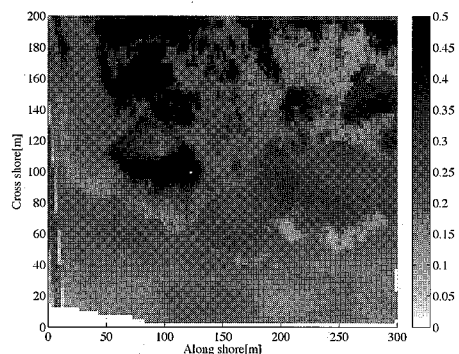
ており、繁茂期には大きな群落を形成し、その変化は撮影画像から容易に認識できる。

4. 結果と考察

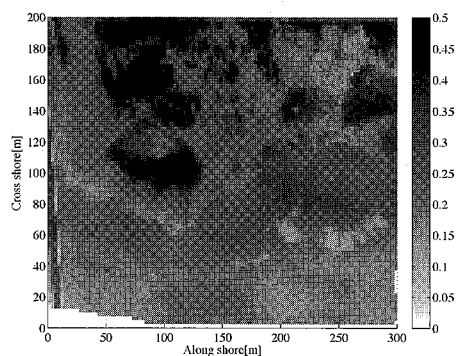
図-6に示すのは、図-4と同じ範囲を対象に、水深を既知量として航空機撮影画像（図-5(a)）よりSFFMで求



(a) Band B



(b) Band G

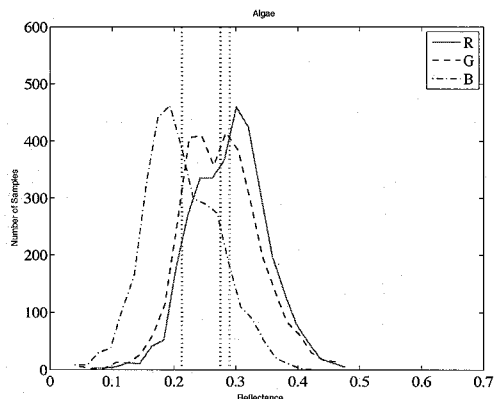


(c) Band R

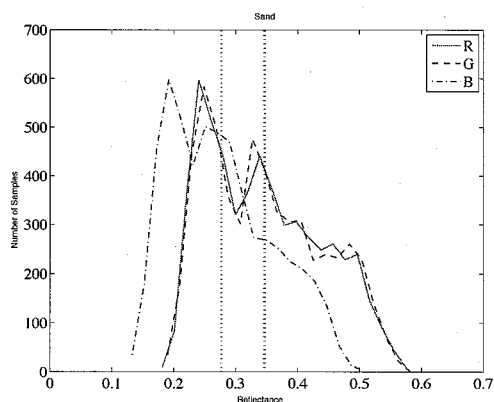
図-6 観測地形データを元にSFFMにより推定したBand毎の反射率の分布

めた海底面における反射率の分布である。水質はJerlovの分類の6と仮定した。全ての波長で砂地の反射率が全体的に高く、アマモ場は低い。また、Band-R(代表波長600nm)とBand-B(代表波長430nm)と比較すると、全体的にBand-Bの反射率が低く、これは水中で拡散・吸収される割合の差によるものである。

ついで底面の物性による反射率の違いを定量的に分類するため、現地観測データに基づいてアマモ場と砂地に



(a) 藻場



(b) 砂地

図-7 藻場および砂地における推定された輝度の分布

表-1 推定された反射率の統計値(カッコ内は標準偏差)

	Algae	Sand
Band R	0.290(0.06)	0.346(0.09)
Band G	0.275(0.06)	0.347(0.09)
Band B	0.214(0.06)	0.276(0.08)

ついて3つの波長帯毎にサンプリングを行い、反射率の頻度分布を求めた。図-7はその結果であり、実線がアマモ、点線が砂地、各色は波長帯の違いを示している。図より、底面反射率としてみた場合、砂地と比べてアマモの反射率は低く、特にBand-GとBand-R(代表波長540nmと600nm)の差が大きい。SFFMでは、この情報を利用し、波長帯毎の反射率分布の差を利用することにより、底面の物性判定を可能とする。表-1に示すのは、藻場および砂地を対象として水深を既知としてSFFMにより推定された反射率の平均値と標準偏差である。図-7の結果同様に、全般的に砂地の反射率は大きく、アマモ藻場の反射率は低い。アマモ場のBand-R, G, Bの平均反射率は0.290, 0.275, 0.214と中空にお

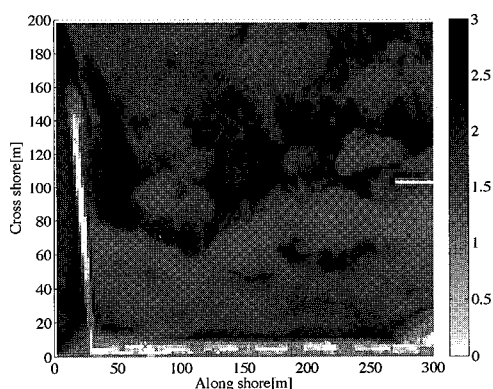


図-8 改良された SFFM により推定された水深の分布

ける分光反射計による測定結果に近い値を示している。しかし、水中における光の減衰を考えるとやや大きな値であるとも言える。上記の結果を活用し、各波長帯の反射率をもとに教師付き分類を行うことにより、波長帯毎の水深・反射率曲線から水深推定と底面情報の分類が同時に可能となることが推察できる。ここで一般的なリモートセンシングにおける教師付き分類と異なり、輝度値という相対情報を SFFM により反射率という物性値に変換してから分類を行う点について留意されたい。

上記の結果を利用し、水深も未知量として図-5(a)の撮影画像を SFFM を用いて再解析した。この時、波長帯毎に得られる水深・反射率曲線について最小距離法による教師付き分類を行った。図-8 はその結果である。図-4 と若干解析範囲が異なることに留意しつつ比較すると、図-8 の沿岸方向 100 m、岸沖方向 100 m の地点に位置する局所的な隆起やその前面に位置する窪み等が推定されている。一方で、全体的に SFFM により推定された水深は 1 m 程度深いこと、汀線付近が不自然に深く推定されていることが相違点として挙げられる。この理由としては、1) 水中消散・拡散係数を決める水質情報の与え方、2) 一般的なカメラを使用することによる代表波長の曖昧さ、3) 汀線付近についての漸近的な取り扱いなどが考えられる。

5. 結 論

本研究では、Four-Flux Model を浅海域に応用した浅海藻場分布推定法 (SFFM) を開発した。観測データから SFFM で必要な束縛条件である波長毎の底面反射率分布を調べた。さらに水深推定結果についても現地観測結果と比較を行い、その妥当性について検証した。

本研究で得られた結論は以下のようにまとめられる。

- SFFM に反射率についての教師付き分類法を適用した結果、局所的な隆起や窪みなどの地形を定性的に推

定可能であることを示した。

- SFFM による定量的な海底地形の推定には幾つかの課題が残ることがわかった。

今回は一般的なカメラを用いて撮影を行ったが、原理的にはマルチスペクトルカメラを用いて、狭帯な波長帯毎のデータを使用することによる精度の向上、また撮影バンド幅の数を増やすことによる海草・藻場についての多種類の分類が期待できる。特に、植物は近赤外領域で特徴的な分光反射スペクトルを持つことから、マルチスペクトルカメラの果たす役割は大きい。また、水質の推定に一般的な海面のクロロフィル推定法を用いることにより、水中植生・水深・水質分類の統合的な海洋リモートセンシング法への展開も考えられる。

参 考 文 献

- 佐川龍之・三上温子・小松輝久・高橋雅宏・小阪尚子・小迫昭徳・宮崎早苗 (2005) リモートセンシングによる藻場分布域の推定, 月刊海洋, Vol. 37, No. 7, pp. 494-498.
- 杉森康宏・坂本 亘 (1985) 海洋環境光学, 東海大学出版会, pp. 117-124.
- 高木幹雄・下田陽久 (1991) 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp. 1597-1615.
- 中山哲殿・時吉 学・佐伯信哉・黒萩慎吾 (2003) 高解像度衛星画像, 音響機器を用いた藻場分布推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1086-1090.
- 二宮順一・森 信人・矢持 進 (2006) 高解像度画像を用いた光学理論による藻場分布推定法の開発, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1426-1430.
- 森 信人・二宮順一・矢持 進 (2006) 反射率を考慮した 4 流束モデルを用いた藻場リモートセンシング法の開発, 可視化情報学会全国講演会, pp. 175-178.
- Paringit, E. C.・灘岡和夫・M. D. Fortes・波利井佐紀・J. J. Strachan・田村仁・三井 順・中山哲殿 (2003) 藻場キャノピー光学モデルと高解像度衛星画像による海藻藻場のマッピングと現地検証, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1386-1390.
- Paringit, E. C.・灘岡和夫・中山哲殿 (2004) Ikonos 衛星画像への生物物理学的分光反射モデルの適用による大型水生植物と水深分布の同時推定, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1401-1404.
- Fukshansky, L.・N. Fukshansky-Kazarinova and A. M. V. Remisowsky (1991) Estimation of optical parameters in a living tissue by solving the inverse problem of the multilayer radiative transfer, *Applied Optics*, Vol. 30, No. 22, pp. 3145-3153.
- Hulburt E. O. (1945) Optics of distilled and natural water, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 35, pp. 698-705.
- Jerlov, N. G. (1951) Optical studies of ocean water, *Rept. Swedish Deep-Sea Exped.*, 3, pp. 1-59.
- Jerlov, N. G. (1964) Optical classification of ocean water, *Physical Aspects of Light in the Sea*, Univ. Hawaii Press, Honolulu, Hawaii, pp. 45-49.
- Purkis, S. J.・A. M. Kenter, E. K. Oikonomou and I. S. Robinson (2002) High-resolution ground verification, cluster analysis and optical model of reef substrate coverage on Landsat TM imagery (Red Sea, Egypt), *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 8, pp. 1677-1698.