

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 大型水性植物と水深分布の同時推定

Enrico C. Paringit*・灘岡和夫**・中山哲厳***

海草藻場を対象としてその双方向反射特性や水質等の影響を放射伝達過程に理論的に組み込む形で開発された藻場キャノピーモデル(Paringit ら, 2003)をベースとして, さらに, いくつかの典型的な海藻の形状特性情報をモデル化するとともに分光反射特性情報を組み込むことにより, 海草だけでなく海藻も含めた藻場の分類, 被覆率, キャノピー層厚, 水深の同時推定が可能なアルゴリズムを開発した. そして, 興津海岸を対象に行った現地調査と, それと同期して撮影された Ikonos 画像に対して本モデルを適用して得られた結果を比較することにより, 本モデルの妥当性と既存モデルに対する優位性が示された.

1. はじめに

海草・海藻藻場に代表される大型水性植物群落は, 沿岸浅海生態系において基盤的な重要性を持つが, 近年, その劣化が深刻になってきている. 今後, 沿岸浅海生態系の適切な保全策を検討して行くうえで, この水性植物群落の状態を多面的な観点からモニタリングすることが不可欠となる. それには, 衛星ないしは航空機リモートセンシングが高い応用可能性を持っているが, 従来の回帰関係式に基づく半経験的な手法ではどうしても一般性・汎用性に欠けるという難点があった. これに対して, Paringit ら(2003)は, 海草藻場を対象とした藻場キャノピー光学モデルを開発し, それを逆解析アルゴリズムと組み合わせて藻場リモセン画像解析アルゴリズムを構築している.

本研究では, 海草だけでなく海藻藻場をもモニタリング対象に含めるべく, この藻場キャノピーモデルをさらに一般化し, 藻場の分類, 被覆率, キャノピー層厚, 水深の同時推定が可能なアルゴリズムを開発した. そして, その妥当性の検証のために, 房総半島の外房に位置する興津海岸において現地調査を行い, 同時に撮影された Ikonos 画像の解析結果と比較することにより, 本モデルによって, 海草・海藻藻場マッピングを合理的に行えることを示した. さらに, 既存モデルによる結果と比較することによって, 本モデルが, より良好な結果を与えることを実証した.

2. 藻場マッピング手法開発と現地検証

(1) 藻場キャノピー光学モデルの一般化

衛星や航空機リモートセンシングによって沿岸域の海底被覆状態をマッピングする試みは数多く行われている

が, 海底面が方向依存性を有しない何らかの分光反射率をもった単純な面であるとして扱われているものがほとんどである. しかし, サンゴ礁や藻場などは, 水深の数割にもなる有限の層厚を持ったキャノピーであり, しかも分光反射特性がかなり明瞭な方向依存性を有する. この方向依存性は, 具体的には, 太陽光入射角と観測角の両方への依存性からなり, いわゆる双方向性反射率分布関数(BRDF: bidirectional reflectance distribution function)によって表現することができる. この BRDF の具体的な形は, 対象とするキャノピー層の特性によって決まるが, Paringit ら(2003), Paringit・Nadaoka(2003)(以下, 前報)は, 海草藻場を対象として, その幾何学的特徴をモデル化することにより, 対応する光学的な BRDF 特性を定式化し, さらに水質等の影響を放射伝達過程に理論的に組み込む形で藻場キャノピー光学モデルを開発している. そして, それを逆解析アルゴリズムと組み合わせることにより, 藻場リモセン画像解析アルゴリズムを構築し, 石垣島吹通川河口前面の海草藻場を対象として高解像度衛星画像(Ikonos 画像)の解析を行い, その妥当性を現地データによって検証している(Paringit ら, 2003).

この藻場キャノピー光学モデルを, 海草だけでなく海藻をも対象とし得るように一般化するには, さらに, いくつかの典型的な海藻の形状特性をモデル化し, それぞれの分光反射特性情報を組み込めばよい. 本研究では, このような考え方によって, 海草だけでなく海藻も含めた藻場の分類, 被覆率, キャノピー層厚, 水深の同時推定が可能なアルゴリズムを開発した.

(2) 海藻藻場光学モデル開発と逆解析アルゴリズム

まず, 海藻の形状特性のモデル化について述べる. 海藻体は, 茎や付着根からのびる葉状体からなるが, 葉状体の分枝形態には, 叉状(dichotomous), 対生(opposite), 互生(alternate)そして輪生(whorled)の4つのタイプがある. ここでは, 詳細は省くが, それぞれについてその形状特性をモデル化した.

藻場キャノピー層厚 h_0 での全葉面積密度 $F(h_0)$ は, 株

* 博(工) 日本学術振興会外国人特別研究員 東京工業大学准客員研究員
** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
*** 工 修 (独)水産総合研究センター水産工学研究所海洋水理研究室長

密度 ρ と株あたりの葉面幅分布関数 $w(h)$ の積を藻場層厚全体で積分した形で、次式で表すことができる。

$$F(h_0) = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{h_0} w(z) dz \quad \dots\dots\dots (1)$$

海藻の種類によって、各葉身は特徴的な傾斜角の分布を有するが、ここでは、次式で表される傾斜分布関数 $G(\theta', \chi)$ (Dickinson ら, 1990) によってその効果をモデル化している。

$$G(\theta', \chi) = 0.5 - (1 - 2 \cos \theta') (0.489 \chi + 0.11 \chi^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 χ は海藻の種類によって異なる葉面傾斜指数で、 θ' は水中での入射角 θ'_s もしくは反射角 θ'_v を表している。ここで、角度変数にプライムをつけて表記しているのは、屈折率 n_w によって水中の値に変換した値であることを示している。なお、海草藻場を対象とした前報でのモデルでは、流れによって海草が全体的に傾斜する効果を表現できるようになっているが、海藻の場合には、流れによる傾斜に関する情報がきわめて限られているため、ここでは、その効果を表現するためのモデル化は行っていない。

以上の藻場キャノピーに関する形状や密度に関するモデル化と、葉面の分光反射率 $\omega_{in}(b)$ および分光透過率 $\tau_{in}(b)$ (b は波長バンド) の情報により、タイプ i の種類の海藻藻場の BRDF 特性は、藻場キャノピー上端での正規化した分光反射率 $R_i(b)$ の形で、次式によって表現することができる。

$$R_i(b) = \frac{4G(\theta'_s, \chi)G(\theta'_v, \chi)}{3\pi^2} [1 - \exp(-bF(h_0))] \times \left\{ \begin{aligned} &[(\pi - \vartheta) \cos \vartheta + \sin \vartheta] \omega_{in}(b) \\ &+ (\sin \vartheta + \cos \vartheta) \tau_{in}(b) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ϑ は、入射角 (θ'_s, ϕ_s) と反射角 (θ'_v, ϕ_v) の間の散乱角で、次式で表せる。

$$\cos \vartheta = \cos \theta'_v \cos \theta'_s + \sin \theta'_v \sin \theta'_s \cos(\phi_s - \phi_v) \quad \dots\dots\dots (4)$$

つぎに水柱の効果のモデル化について述べる。水表面からキャノピー層上端までの任意の深さ Z でのバンド b の反射率 $R_0-(b)$ は、水柱部 ($0 < Z < H$, H はキャノピー層上端の深さ) に関する放射伝達モデルの 2 流束近似解により、以下のように表せる。

$$R_Z(b) = R_\infty(b) \exp[-(a_T(b) + b_b(b))(H - Z)] + \left[\sum_{i=1}^n f_i R_i(b) - R_\infty(b) \right] \cdot \exp[1 - (a_T(b) + b_b(b))(H - Z)] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $R_\infty(b)$ は当該藻場からはずれた十分水深が大きい地点における反射率である。また、上式では、異なる種類の海藻・海草や砂地などの n 個の海底被覆要素 ($i = 1, \dots, n$) が、対象とする画素内に f_i の面積的な寄与率(被

覆率) で存在していることを想定しており、いわゆる spectral mixture モデルを組込んだ形となっている。

上式中の a_T は、水中での全吸光係数であるが、次式で評価できる。

$$a_T(b) = a_w(b) + a_{SS}(b) + a_{Chl} + a_{CDOM} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 W , SS , Chl および $CDOM$ の添字は、それぞれ水, SS , chlorophyll-a そして $CDOM$ (colored dissolved organic matter) による吸光係数を意味している。式(5)中の光の散乱係数 $b_b(b)$ は、植物プランクトンや底質粒子等の後方散乱粒子の効果を表している。

水面直上での反射率 $R_{0+}(b)$ は、水面直下での反射率 $R_{0-}(b)$ から以下の式により算定できる。

$$R_{0+}(b) = \frac{[1 - r_F(\theta_s, \theta_v)] R_{0-}(b)}{n_w^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $r_F(\theta_s, \theta_v)$ は、いわゆる大気-海水境界での無偏光放射エネルギーに関する Fresnel 反射の効果を表している (Mobley, 1994)。

われわれが最終的に求めようとする情報は、各海底被覆要素の被覆率 ($f_i: 1 \dots n$)、藻場キャノピー層厚、そして水深からキャノピー層厚を引いた深さ H' である (ここでプライムをつけているのは推定値の意味)。これらの情報を上記の式(1)-(7)で示したモデルに基づいて衛星画像から推定するための計算手法として、ここでは、spectral unmixing 技法 (Paringit・Nadaoka, 2004) と非線形最適化アルゴリズム NILSSTOC (non-negative iterative least squares solution with sum-to-one constraint) によって逆推定アルゴリズムを構成した。

(3) 現地調査

図-1 に示す千葉県外房の興津海岸 (N 35°08', E 140°15') において、Ikonos 画像の撮影日 (2003 年 12 月 21 日) と同期する形で現地調査を行った。この海岸には、アラメ (*Eisenia bicyclis*)、カジメ (*Ecklonia cava*)、ジュロモク (*Myagropsis myagroides*)、オオバノコギリモク (*Sargassum giganteifolium*) の他にアマモ (*Zostera marina*) も存在している。図-1 中の 11 地点で海底被覆状態の計測や分光反射計測を行うとともに、水中濁度・クロロフィル・CDOM 等の計測を行った。また、この現地調査に先立って、同海域での水深測量を GPS 付音響測深器によって行い、3210 地点での水深データを得ている。

分光反射率計測は、Hyperpro (Satlantic 社, 14 バンド) と a dual-channel S 2000 (Ocean Optics Inc.) を用いて行い、 $R_{0+}(\lambda)$, $R_{0-}(\lambda)$, $R_Z(\lambda)$ に関する情報を得た ($R_Z(\lambda)$ は i 番目の海底被覆要素の深さ Z での分光反射率)。また、多目的水質計 (アレック(株)) を用いて、濁度や chlorophyll-a の鉛直分布情報を得た。さらに、表層近くと底層近くにおいて採水し、吸光係数データを得るとと

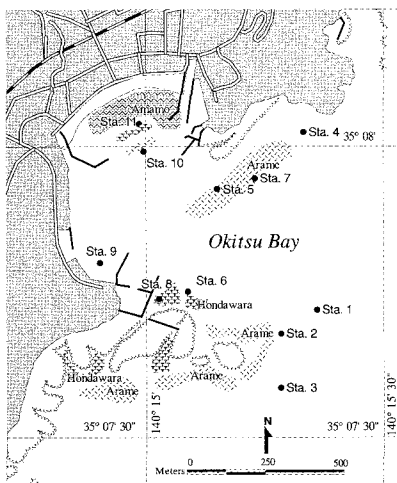


図-1 興津海岸における調査地点

もに、SSなどの分光反射・吸収に関わる物質の濃度に関する検定データを得た。具体的には、採水したサンプル水をフィルター分離することにより、分光計測によって a_T だけでなく a_{SS} 、 a_{chl} および a_{CDOM} の値を求めた。水の分光吸収係数 a_w はPope・Fry (1997)によって算定した。

(4) 衛星データの取得と前処理

Ikonos衛星画像は、2004年12月21日午前10:00に取得された。GeoTIFFフォーマットで提供された画像データを衛星センサーでの上向き照度 $L_u(b)$ ($Win^{-1}\mu m^{-1}sr^{-1}$)に変換した。大気補正には、SPECTRL2モデル (Bird・Riordan, 1986)を用い、これにより大気のおゾンや水蒸気の効果、および光学的深さの効果を補正している。この大気補正によって水面直上照度 $L_{u,0+}(b)$ が得られる。つぎに、太陽光スペクトルモデルにより、水表面での太陽直達光強度 $E_{d,0+}(b)$ と拡散光強度 $E_{sky,0+}(b)$ を算出した。これらの前処理によって、

水面直上での反射率 $R_{0+}(b)$ は次式で求められる。

$$R_{0+}(b) = \frac{L_{u,0+}(b)}{E_{d,0+}(b) + E_{sky,0+}(b)} \dots\dots\dots (8)$$

3. 結果と考察

図-2は、興津海岸でのさまざまな海底被覆要素に関する分光反射特性測定値をまとめて示したものである。これから、580 nmあたりを中心とする可視域の中程の波長域でピークを示す形になっており、ピークの現れ方の度合いも海草・海藻の種類によって異なっていることがわかる。

図-3は、本モデルをIkonos画像に適用することによって推定されたa) 海草・海藻の被覆率、b) 海底被覆分類、c) 藻場キャノピー層厚、d) 水深の分布を示したものである。海底被覆分類の結果によると、アラメが23%で最も卓越しており、ついでアマモが14%となった。オオバノコギリモクはパッチ状に岩場に存在する形で現れている。異なる種類の海藻がともに10%以上の被覆率で同一画素に現れているケースも見られたが、その

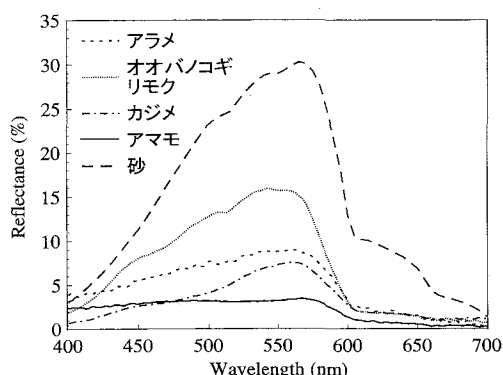


図-2 興津海岸でのさまざまな海底被覆要素に関する分光反射特性測定値

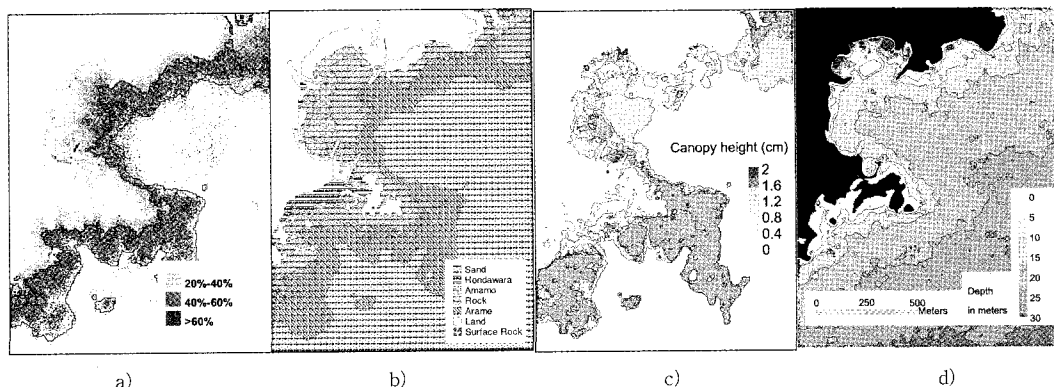


図-3 本モデルによる a) 海草・海藻の被覆率、b) 海底被覆分類、c) 藻場キャノピー層厚、d) 水深の推定結果

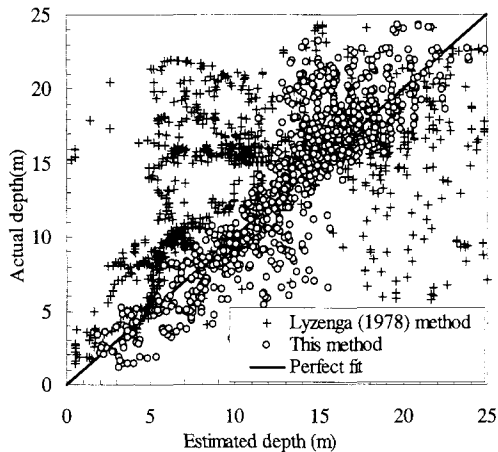


図-4 本モデルおよび既存モデルによる水深の推定値と実測値の比較

場合は画素ごとの分類という形では表しづらくなっている。

これらの分類結果を、先に述べた 11 地点でのビデオ撮影による海底被覆状態の調査結果と比較したところ、全体的な推定精度（一致度）は 89% であった。比較のため、通常の教師付き分類法による海底被覆分類を行ったところ、一致度は 52% にとどまり、さらに式（5）に基づいて水深補正をした場合でも一致度は 62% であった。

つぎに水深マッピングの結果について詳しく見てみる。図-4 は、本モデルおよび既存モデル（Lyzenga, 1978）による水深推定結果を実測値と比較したものである。これによると、本モデルによる推定値は水深が大きい領域でやや過小評価の傾向があるが全体の一致度は良好で、相関係数は $R_2=0.82$ である。これに対して既存モデルでは $R_2=0.59$ にとどまっており、とくに中間水深帯での推定精度がきわめて悪くなっている。また、藻場領域での推定精度が悪くなることが確認されている。これらのことから、水深マッピング精度における本モデルの優位性が明らかである。

4. おわりに

本研究では、海草藻場を対象としてその双方向反射特性や水質等の影響を放射伝達過程に理論的に組み込む形で開発された藻場キャノピーモデル（Paringit ら, 2003）をベースとして、さらに、いくつかの典型的な海藻の形状特性情報をモデル化するとともに分光反射特性情報を組み込むことにより、海草だけでなく海藻も含めた藻場の分類、被覆率、キャノピー層厚、水深の同時推定が可能なアルゴリズムを開発した。そして、興津海岸を対象

に行った現地調査と、それと同期して撮影された Ikonos 画像に対して本モデルを適用して得られた結果を比較することにより、本モデルの妥当性と既存モデルに対する優位性を示すことができた。

今後はさらにモデルの一般化・汎用化を図るとともに、全国のさまざまな藻場海域に適用対象を広げていき、藻場の劣化の現状をモニタリングするとともに、関連する環境情報とリンクさせることにより、藻場の健全性や劣化の現状の把握と周辺環境との因果関係の解明を目指していく予定である。

謝辞：本研究は、水産庁「衛星画像解析による藻場等の分布把握のための技術開発調査事業」に関連して実施したものである。また、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (1)（一般）（研究代表者：灘岡，課題番号：14205071）および同 A (1)（海外学術調査）（研究代表者：灘岡，課題番号：15254002）によって行ったものであることを付記する。

参考文献

- Paringit, Enrico C.・灘岡和夫・Miguel D. Fortes・波井井佐紀, Jacqueline J. Strachan・田村 仁・三井 順・中山哲蔵 (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草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.
- Bird, R. E., and Riordan, C. J. (1986): Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Climate and Applied Meteorology*, 25(1), pp. 87-97.
- Dickinson, R. E., Pinty, B. and Verstraete, M. M. (1990): Relating surface albedos in GCM to remotely sensed data. *Agriculture and Forestry Meteorology* 52, pp. 109-131.
- Lyzenga, D. R. (1978): Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, Vol. 17, pp. 379-383.
- Mobley, C. (1994): *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*, Academic Press, San Diego, California, p 157.
- Paringit, E. C. and K. Nadaoka (2003): Multiangular and hyperspectral reflectance modeling of seagrass Beds for Remote Sensing Studies, *Proc. of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Sympo.*, pp. 21-25, Toulouse, France, 2003.
- Paringit, E. C. and K. Nadaoka (2004): Deriving relationships between reef sedimentation and inland erosion characteristics based on field observation data, hydrologic modeling and remote sensing analysis, *Proc. Asia-Pacific Coasts (APAC) 2003*, Japan, pp. 286-287, 2004.
- Pope, R. M. and E. S. Fry (1997): Absorption spectrum "380-700 nm of pure water. II. Integrating cavity measurements," *Applied Optics*, Vol. 36, pp. 8710-723.