

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

Enrico C. Paringit*・灘岡 和 夫**・Miguel D. Fortes***
波利井佐紀****・Jacqueline J. Strachan*****・田 村 仁*****
三 井 順*****・中山 哲 厳*****

海草藻場を, 特有の形態構造を有する有限層厚の散乱媒体としてモデル化し, その双方向反射特性や水中の SS・クロロフィル等の影響を放射伝達過程に理論的に組み込む形で海草藻場キャノピー光学モデルを開発した。モデル中には, 藻場の平面的な被度や葉面積密度指数 LAI, キャノピー層厚, 海草傾斜角等がモデル変数として組み込まれている。開発した光学モデルにさらに逆解析アルゴリズムを組み合わせてことによって海草藻場マッピングモデルを構成し, 石垣島・吹通川河口前面の海草群落を対象に撮影された Ikonos 衛星画像を解析した。同時に行われた現地観測データとの比較によって, 本モデルによって, 海草藻場マッピングを合理的に行えることを示した。

1. はじめに

近年, 磯焼け現象に代表されるよう藻場の劣化が各地で報告されている。藻場の適切な保全策を検討して行くには, 藻場の時空間的な消長と周辺環境との関係のダイナミクスをまず明らかにしていく必要があるが, そのためには, 藻場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。衛星ないしは航空機リモートセンシングは潜水調査に比べて広域的な藻場情報を周辺環境の状態も含めてモニタリングできる可能性があることから, その実用化に向けて, 基礎となる合理的な藻場情報抽出アルゴリズムの開発が求められている。従来の方法は, 現地データとの回帰関係式や何らかの統計分類的な手法に基づく empirical なものがほとんどであるが, その場合には対象海域や時期が異なるごとに truth データが必要となる上, SS やクロロフィル等の変動が重なるような場合の対処が難しくなる。本研究では, 当研究室で開発してきているサンゴ・キャノピー光学モデルをベースとして新たに海草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た。そして, 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 (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た。

2. 藻場マッピング手法開発と現地検証

(1) 海草藻場キャノピー光学モデルの開発

他の植生と同様に, 海草は特有の光学特性を有することから, リモートセンシングによるマルチバンド画像データ上で, 藻場に関する何らかの分光情報を抽出することが可能なはずである (Armstrong, 1993; Kirkman, 1996)。しかし, これらの画像上の情報は, 海草葉面のアルベド ω_s や海底面のアルベド ω_b を単純に反映したものにはならない, というのも, 海草藻場がある特有の構造を持った有限の層厚の散乱媒体であるからである。したがって, 海草藻場マッピング手法の開発に際しては, このような基本的なポイントを反映した形の海草藻場光学キャノピーモデルを基本モデルとして開発した上で, さらに水中濁度や大気等の周辺の光学的影響要因も適切に取り込んだ形のモデル構成とする必要がある (図-1)。海草藻場キャノピーの構造と方向特性に関しては, 陸上植生に関する形態計量的射影幾何学原理 (Gao, 1993; Antunes, 2001) を一般的な亜熱帯域の海草群落 (McComb・Shepherd, 1989) に適する形で修正して適用

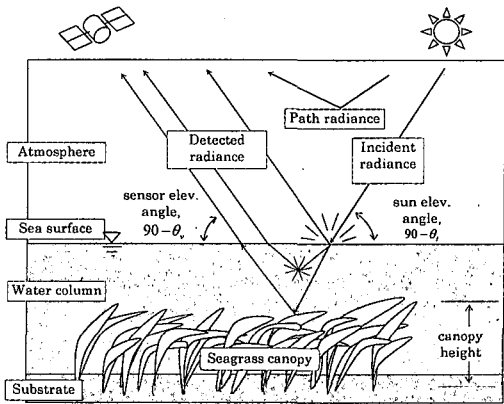


図-1 海草藻場キャノピー光学モデルの概念図

・	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
・	Ph.D.	フィリピン大学教授 海洋研究所
・	博(理)	東京工業大学助手 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
・		フィリピン大学 Research Associate 海洋研究所
・	学生会員 修(工)	東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻博士課程
・		東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程
・	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

して記述した。

キャノピー上端での分光反射率 $R_c(\lambda)$ は、次のように、海草からの分光反射の寄与分（添え字 s ）と海底からの分光反射の寄与分（添え字 b ）の線形和で表されるものと考えることができる。ただし、ここではそれぞれ方向依存性を取り込んだ形で表現し、 ϕ : 方位角差、 θ_i : 入射角、 θ_v : 見込み角を用いて表している。(Antunes ら, 2001; Gao, 1993) 各分光反射成分は、海草の方向依存型分光反射率関数 R_s と、砂もしくは泥質からなる海底面の反射率 R_b 、それぞれの被覆率、 f_s および f_b により表している。

$$R_c(\lambda, \phi, \theta_i, \theta_v) = R_s(\lambda, h_0, \phi, \theta_s, \theta_v) f_s(\phi, \theta_i, \theta_v) + R_b(\lambda) f_b(\phi, \theta_i, \theta_v) \quad (1)$$

海草の分光反射率 R_s は、次式で表される体積散乱の評価式によって表現することができる。

$$R_s(h_0, \phi, \theta_s, \theta_v) = \frac{2\omega_s[1 - \exp(-bL)](\cos \vartheta + \sin \vartheta)}{3\pi} + \omega_b \quad (2)$$

ここで、 ϑ は散乱位相角であり、 ϕ や θ_i 、 θ_v がゼロでないような 3 次元的な状況では、次式で与えられる。

$$\cos \vartheta = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \phi \quad (3)$$

また、海草基部の傾き角 ϕ_0 と観測角パラメータ (θ_i , θ_v) の関係を表す Ross (1981) の G 関数を使って $b = G_i \sec \theta_i + G_v \sec \theta_v$ で表される b は、海草の傾斜の効果を表現するパラメータである。

藻場キャノピー層厚 h_0 での全葉面積密度は、株密度 ρ と株あたりの葉面積分布関数 $w(h)$ 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。

$$L(h_0) = \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{h_0} w(z) dz \quad (4)$$

海草の各葉身は、基部の座標 (x_0, y_0) を基点として、葉の長さと幅を、それぞれ、最大長さ $l_{\max}$ と最大幅 $w_{\max}$ で無次元表示することで表示する。

葉面の相対的な向きも反射率に影響を与える。ウミシヨウブのような直立する形の葉身を持つ海草藻場キャノピーの場合には、葉面の相対的な向きは、葉身の曲がりや流れの方向によって基本的に決定される。葉身の曲がりには海底からの立ち上がりの部分とそれに続く降下部分の 2 つの部分に分けて考えることができるが、ここでは、海底からの立ち上がりの部分は、立ち上がり基点で傾き角 $\phi_0 = \arctan(-b_0)$ を持つ形での 2 次曲線 $y = acx^2 + b_0x$ で表され、降下部分は、楕円形の一部として表されるものとしてモデル化している (図-2)。葉身の傾きは、先に述べた G 関数に取り込まれる形になる。

このようにして得られた海草藻場キャノピー光学モデルに、さらに水中での chlorophyll-*a* や濁度の効果を取り込むために、半経験的な非等方放射伝達モデル (Lee ら,

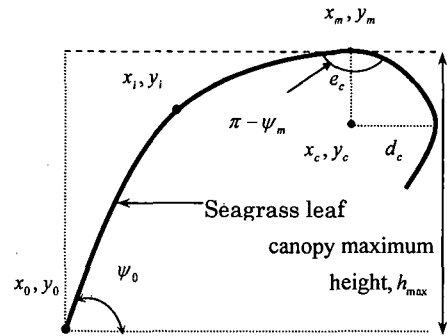


図-2 海草の葉身単体についての幾何モデル

1998) を組み合わせた。(大気補正後の) リモートセンシング・センサー輝度 L_{rs} と、水中でのゼロ水深反射率 R_{0-} を比較可能な形に統一して表すために、前者を水面での下向き太陽照度 E_{0+}^1 でわることによって水面位置での反射率として、

$$R_{0+} = L_{rs}/E_{0+}^1 \quad (5)$$

で表す。一方、後者は、大気-水境界での divergence factors (Lee ら) を用いて、次式で表すことができる。

$$R_{0+} = \frac{0.518R_{0-}}{1 - 1.562R_{0-}} \quad (6)$$

以上に基づいて海草藻場の被覆率と葉面積密度を逆推定するアルゴリズムとして、Lasdon ら (1978) による非線形最適化アルゴリズムを用いた。これは、評価関数

$$M = \sum_{i=1}^m \frac{(R_{0+,i} - R_{0+,i}^1)^2}{R_{0+,i}^1} + \sum_{j=1}^n [(P_j - P_{j,b})^2 w_j]^{0.5} \quad (7)$$

with $w_j = 0$ if $P_{j,\min} \leq P_j \leq P_{j,\max}$, otherwise $w_j = w$.

を最小化するものである。ここで、 m と n は、バンド数と未知パラメータの数であり、 $P_{j,b}$ は、対応するパラメータの境界値を表している。上式の右辺第 2 項は、求めようとするパラメータが、あらかじめ指定した値の範囲 ($P_{j,\min}$, $P_{j,\max}$) をはずれた場合に対応するための付加的なペナルティ関数である。

藻場調査で通常対象とされるのは、葉面積密度 LAI よりもバイオマス量であるので、藻場キャノピー中のバイオマス量の鉛直分布 $b(h)$ を単純に、 $b(h) = \rho_s L(h)$ として見積もった。ここに ρ_s は海草の湿潤重量密度 (g/m^3) である。

(2) 現地調査ならびに使用した衛星画像

石垣島吹通川河口 (図-3, 24°20'20"N, 124°13'40"E) 前面のウミシヨウブ (*Enhalus acoroides*) を主要構成種とする海草藻場を対象として、2002 年 8 月に撮影された Ikonos 画像の解析を上記のアルゴリズムによって行った。

この吹通川河口背後域にはマングローブ帯があり、河口部での干潟、その前面の海草帯、さらにその沖側にサ

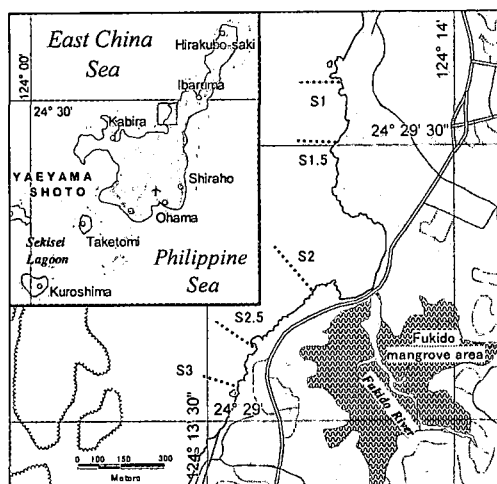


図-3 調査対象エリア

ンゴ礁と、このエリアは、マングローブ-干潟-藻場-サンゴ礁がコンパクトな形で連成するユニークな生態系となっている。また、この海域のサンゴ礁は、石垣島東側のサンゴ礁域と比べて波当たりが相対的に弱いことなどから明確なリーフエッジが形成されておらず、平面的に複雑なリーフエッジ地形となっている。

解析結果の検証のために現地調査を同時期に行った。具体的には、図-3に示すように、5つの transect line (主要3測線とそれらの間に位置する2測線)に沿って海草の被覆率等の基本情報を潜水調査によって取得するとともに海草の分光反射特性を計測した。さらに音響測深ならびに水中の濁度・クロロフィル等の計測を行った。

Transect lineに沿ったサンプリングスポットの選定・位置決めは、典型的・代表的な密度の海草藻場のスポットを選ぶようにした。海草藻場の被覆率の計測は、0.5×0.5 mのコドラートを transect line 上において行った。全体的な被覆率の計測は、SeagrassNet protocol (Short ら, 2002)に従って、水中カメラを用いて行った。各 transect line 上での50のコドラート内において20×20 cmのコドラートを置き、そこから得られた海草サンプルについて、室内で湿潤・乾燥重量を計測する形で海底面上および海底面下の海草のバイオマス量データを得た。

さまざまな種類の海草サンプルを採取し、海草葉面の詳細な光学的な計測を行った。光学計測には、Ocean Optics Inc.の分光計測器 S 2000を用いた。この装置の計測波長範囲は385-1016 nmで、波長分解能は0.87 nmである。現地の水中での分光計測は、5つの transect line 上での地点をいくつか選んで行った。得られた分光データは、潮位変動の影響を補正した。水中の濁度等の時空間変動の影響を把握するため、水温、塩分、濁度等の計

測を対象海域内のいくつかの地点で、メモリータイプセンサーをブイ係留する形で行った。Ikonos 衛星画像(パンクロ:1 m 分解能, マルチスペクトル:4 m 分解能)を同一軌道上の引き続く3方向から撮影した。撮影日は、2002年8月15日および8月23日である。画像データの前処理として、幾何補正ならびに、現地での日射データ他の補足的な気象データを用いた大気補正を行った。

3. 結果と考察

対象海域の藻場には7種の海草が見られた。図-4(a)に、それぞれの種の葉面単体からの分光反射特性を調べた結果を示す。(いくつかのサンプル葉面には生物付着が見られた。)これから、分光反射特性上、これらは互いに分離可能であることがわかる。異なる種間での分光反射率の違いの程度は、緑領域に相当する550 nmと690 nmを超える波長帯域で目立つ形になっている。図-4(b)は、得られた分光反射特性に基づいて上記のキャノピーモデルを順方向に計算することにより、いくつかの被覆率に対する水表面での分光反射率分布を算出した例を示したもののだが、特に500-575 nmの波長帯域で互いの差が顕著になっており、本光学モデルによって藻場マッピングが十分可能であることがわかる。

海草藻場に関する現地データを検討したところ、海草被度と株数密度、バイオマス量のあいだには弱い相関があることが確認された。藻場の株数密度やバイオマス量、葉面サイズ分布から得られるアロメトリックな関係式に関して既往の文献を参照し、藻場キャノピーの簡単なパラメトリゼーションを行った。

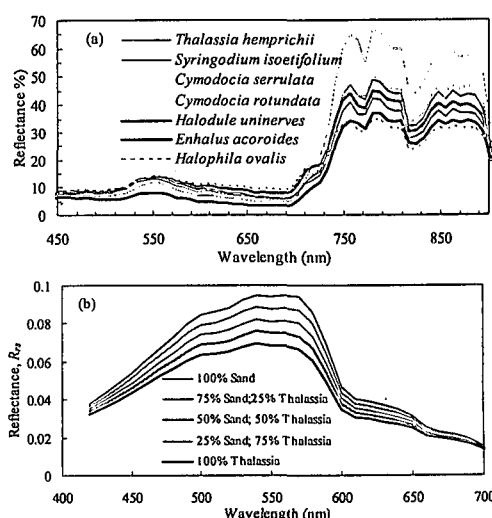


図-4 (a) 対象海域で採取した7種の海草の海草の分光反射特性; (b) 本光学モデルによって算出した海草と砂面のいくつかの被覆割合での分光反射率

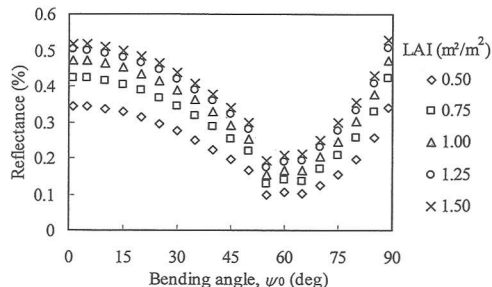


図-5 海草の傾き角 ψ_0 と反射率の関係 ($\theta_b=35^\circ$, $\theta_s=25^\circ$ and $\phi=0^\circ$)

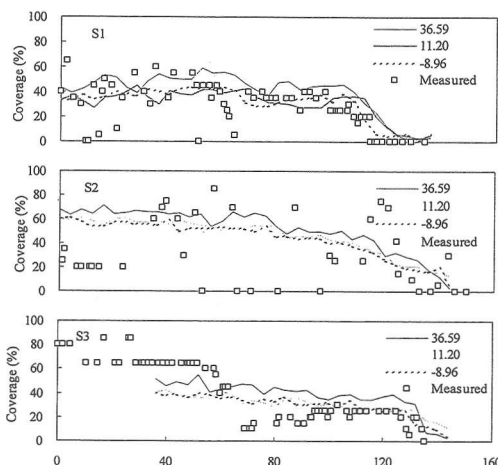


図-6 3つの測線上での被覆率に関する推定値と現地データの比較

図-5は、本モデルを用いて、海草傾斜角 ψ_0 へのキャノピー反射率の依存性を、いくつかの LAI のケースに対して計算した結果を示したものである。これから、海草傾斜角 ψ_0 への強い依存性の存在がわかる。特に、 55° 付近で反射率が大きく落ち込んでいるが、これは海草藻場葉身の全体的な方向がこの角度で見込み角にほぼ平行になるためである。

Transect line 上の水深は最大で 2 m 程度である。一般的に、この吹通川河口前面海域の海草藻場における分光反射分布のモデル予測結果は、実際の計測値と比べて、もっとも差が大きくなった最短波長域でも 15% 以内の誤差にとどまった。このような良好な一致は、Ikonos 画像データとの比較においても確認され、4つのバンドデータのそれぞれに対して、相関値 R^2 が、0.67, 0.74, 0.81, 0.94 となった。なお、モデル予測結果は、海草の光学的な特性値や海底面反射率等よりも、海草葉面の向きにより鋭敏であった。

図-6は、主要3測線上での海草藻場の被覆率について、

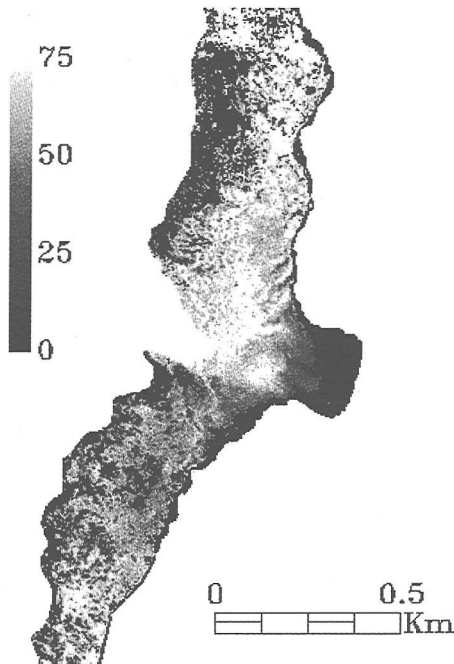


図-7 対象海域での海草被覆率の逆推定画像

て、本光学モデルを3つの異なる角度（真東から時計回りの角度として $\phi=37^\circ$, 11° , -9° ）で撮影された Ikonos 画像データに適用し、その逆推定値として計算された値を、現地データと比較した結果を示したものである。これから、逆推定値と現地データ間におおむね良好な一致が見られることがわかる。

しかし、詳細に見ると、本光学モデルは撮影角度の効果をも反映させたものとなっているものの、逆推定結果では、3方向での撮影角度による画像データからの推定値に互いに差が現れており、 ϕ の増大によって、被覆率が大きめに推定される結果になっている。この逆推定値の誤差の原因として、現地観測上の問題として quadrat サイズ (0.5×0.5 m) と画像ピクセルサイズ (4×4 m) の不一致の問題や位置出し精度の問題が考えられる。また、藻場キャノピー内のさまざまな有機物の存在や、ウミシヨウプが低潮時に頂部が干出している部分が変色している効果などが考えられる。

さらに、海草藻場光学モデルによる今回の逆推定では海底面を砂と仮定して計算を行っているが、場所によっては泥質の海底面も存在することから、底質の違いの効果をもさらに検討する必要がある。

図-7は、本モデルによって対象海域の海草藻場の逆推定を行った結果を示したものである。

なお、chlorophyll-*a* や濁度の値には、水深方向に顕著な差があることが観測値からわかっている。具体的には、

chlorophyll-*a* の平均値が、表層で 0.57 mg/m^3 、底層で 1.37 mg/m^3 、また、濁度の平均値が、表層で 2.17 mg/m^3 、底層で 55.43 mg/m^3 であった。今回開発した海草藻場キャノピーモデルでは、水中の光学的効果については、鉛直方向に一樣と仮定してモデル化しているの、今後の精度向上に向けて、chlorophyll-*a* や濁度の非一樣分布の効果を取り込む形でモデルを拡張する必要がある。

4. おわりに

本研究では、海草藻場キャノピーモデルを新たに開発し、高解像度リモートセンシング画像データに対してモデルを適用することにより、海草藻場の特性量を推定できる可能性を示した。今回のモデル推定では、海草藻場による海底被覆率と葉面積密度のみを推定対象としたが、モデル構成上、さらに、藻場キャノピー層厚や海草傾斜角、水中濁度などを推定対象とすることが原理的に可能である。今後、空間分解能だけでなく波長分解能も高解像度化していくと、このようなより多くのパラメータを十分な精度で推定することが具体的に可能になってくる。その意味で、本モデルは、今後の衛星リモートセンシングの一層の高度化に十分対応できるモデルとなっている。なお、航空機リモートセンシングではハイパースペクトル・センサーの利用が進んできているが、著者らはすでに CASI ハイパースペクトル・センサーによる航空機リモートセンシングを同じ海域に対して実施している。その解析結果については別途発表する予定である。

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) によって行ったものであることを付記する。

参考文献

- Antunes, M. A. H., E. A. Walter-Shea and M. A. Mesarch (2001): Test of an extended mathematical approach to calculate maize leaf area index and leaf angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 108, No. 1, pp. 45-53.
- Armstrong, R. A. (1993): Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 3, pp. 621-627.
- Gao, W. (1993): A simple bidirectional-reflectance model applied to a tallgrass canopy. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 45, No. 2, pp. 209-224.
- Kirkman, H. (1996): Baseline and Monitoring Methods for Seagrass Meadows, *Journal of Environmental Management*. Vol. 47, No. 2, pp. 191-201.
- Lasdon, L. S., A. D. Waren, A. Jain and M. Ratner (1978): Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 4, No. 1, pp. 34-49.
- Lee, Z. P., K. L. Carder, C. D. Mobley, R. G. Steward and J. S. Patch (1998): Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semi-analytical model. *Applied Optics (OP)*, Vol. 37, No. 27, pp. 6329-6338.
- McComb, A. J., and Shepherd, Eds. (1989): *Biology of Seagrasses: A Treatise on the Biology of Seagrasses with Special Reference to the Australian region*. Elsevier, Amsterdam, pp. 74-111.
- Ross, J. (1981): *The radiation regime and architecture of plant stands*, Dr. W. Junk Publishers, Delft, The Netherlands.
- Short, F. T., L. J. McKenzie, R. G. Coles and K. P. Vidler (2002): *SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat*. QDPI, QFS, Cairns.
- Short, F. T. and R. G. Coles, eds. (2001): *Global Seagrass Research Methods*. Elsevier Sciences B. V., Amsterdam.