

# 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

二宮順一<sup>1</sup>・森 信人<sup>2</sup>・矢持 進<sup>3</sup>

海底面に分布する藻場のリモートセンシングを行うには、海水中の光の挙動を解析する必要がある。一般に海水中を透過・散乱する光を解析することは困難であるため、Four-Flux Model を応用して海底面反射率を推定するアルゴリズムを開発した。推定した海底面反射率によって底面の物性を推定する。和歌山県田辺湾に分布するコアマモを対象として現地調査、航空機画像撮影を行い、現地調査、画像から目視によるトレース、教師付き画像分類、本アルゴリズムの四通りの手法を用いて分布推定を行った。推定結果を比較することによって本アルゴリズムの妥当性を示した。

## 1. はじめに

沿岸域での生産者の役割は食物連鎖、沿岸域環境において重要であり、藻場は沿岸域において数少ない生産者としての役割を果たしている。しかしながら周知のとおり近年、埋め立てや磯焼けによって藻場の劣化が問題となっている。その対策として、藻場の造成が進められているが、海草や海藻の生活史そのものは明らかになっていない点が多い。それゆえ、劣化の原因が未解明である場合や、適切な造成が行われていない可能性がある。このため、広範囲に分布する藻場の定期的なモニタリングを行っていくことは、藻場の生活環境を解明するためにも重要である。さらに、藻場の保全策の一つとして順応的管理についての研究が進められており、藻場分布の時間的・空間的変化を常にモニタリングし、その結果から順次対応策を講じる必要性が生じている。

以上のように、藻場のモニタリング調査の重要性は増しているものの、実際のモニタリングは膨大な時間と費用がかかる潜水調査によって行われている。ところが潜水調査では、日変化する藻場の分布状況を広範囲にモニタリングしていく労力は甚大である。それゆえ、リモートセンシングは広範な藻場情報を比較的短時間でモニタリングできる可能性があるため、近年藻場情報センシングのためのアルゴリズム実用化に向けて開発が行われている（例えば Paringit ら, 2003）。例えば、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）や、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をモデル化した手法（Paringit ら, 2003, 2004）が報告されている。現地データとの回帰関係式を用いた場合、個々の条件やサイトに特化した解析方法であるため、SS やクロロフィルといった水質の変動があると解析が難しくなる。一方、

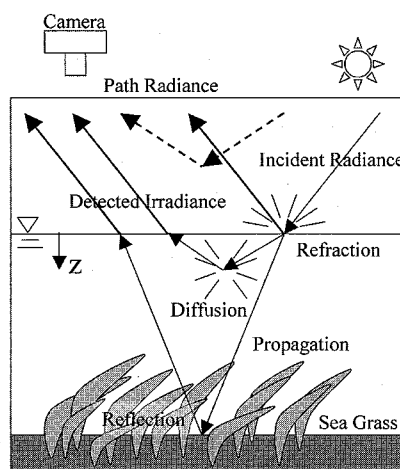


図-1 太陽光の光路概念図

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画像ごとに必要となるため、地形の影響が大きい浅場には適用が難しい。さらに、観測対象固有の特性をモデル化した場合、観測対象ごとにモデル化が必要となる。これまで報告されているリモートセンシングを用いた藻場分布推定手法では、様々な環境で撮影された画像に対する汎用性がないこと、解析を行うためにはモデル化のために観測対象の物理的な情報が必要になることが問題点として挙げられる。

そこで本研究では、光学理論に基づき極力現地データによらない藻場分布推定アルゴリズムを構築し、一般的な画像分類方法と相互比較を行い、光学理論を用いたりリモートセンシング方法の妥当性を検討する。

## 2. 画像処理による手法

本研究では、現地調査、画像から目視によるトレース、正規化ユークリッド距離を用いた教師付き画像分類、光学理論を用いた画像分類の四通りの手法を用いてコアマモの分布推定を行った。以下にそれぞれの手法の概略を示す。

1 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻  
2 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院講師工学研究科都市系専攻  
3 正会員 農博 大阪市立大学大学院教授工学研究科都市系専攻

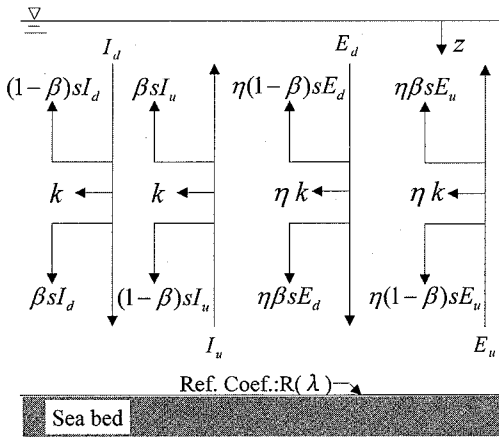


図-2 Four-Flux Model における放射伝達過程

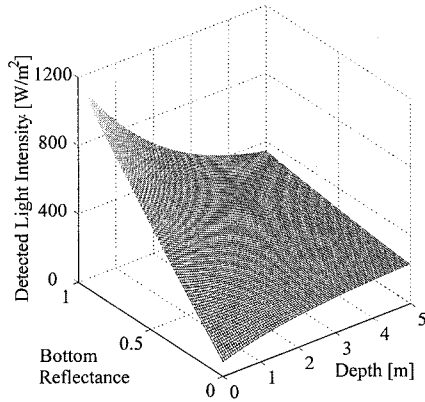


図-3 Four-Flux Model から得た観測光強度と水深および底面反射率の関係 (波長430m)

## (1) Four-Flux Model を用いた画像分類法について

太陽光が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。ここで、観測機器で計測される光は、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、海面からの反射光、空気中の分子に衝突した拡散光の線形和で構成されたと考える。本研究では、航空機画像を用いたため撮影高度が低く、空気中の分子に衝突した拡散光の要素はごく微小であるとしてこれを無視した。また、海水中での光の挙動を解析する必要があるが、海水中での光の透過・拡散現象には、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ことは非常に困難である。そこで、Kubelka-Munk の理論から得られる Four-Flux Model (杉森ら, 1985; 以下, FFM) を用いた。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、光の放射伝達過程は図-2 のように考えられる。基礎式は入

射方向と同じ向きの平行光束を  $I_d$ 、拡散光束を  $E_d$ 、反対方向の平行光束を  $I_u$ 、拡散光束を  $E_u$  として、水面を原点に下向きに  $z$  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、 $\beta$  は前方散乱率、 $\eta$  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 の結果 (Jerlov, 1951, 1964) を、前方散乱率  $\beta$ 、平行光と拡散光の透過長比  $\eta$  は Morrison の結果 (Morrison, 1945) を用いる。

式(1)～(4)の境界条件は、地表面における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、次のように光の入射条件と反射条件を設定する。

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

$$E_d(0) = (1-r)dI + rdI_u(0) + rE_u(0) + (1-r)E \quad (6)$$

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

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

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。この条件のもとで式(1)～(4)を解き、 $I_d$ 、 $I_u$ 、 $E_d$ 、 $E_u$  を求める。一方、カメラで観測できる光の強度  $L$  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、水深を 0 m から水底まで変化させて観測光強度を計算することにより、各波長毎に図-3 のような水深および底面反射率と観測光強度の関係が得られる。画像中の輝度値と FFM から求められた観測光強度を対応させることによって、観測された各波長のデータから波長毎の底面反射率と水深の関係が得られることになる。本来、海底面反射率は波長ごとに異なった値になるが、赤、青波長域における海底面反射率はほぼ等しい値を持つため (Paringit ら, 2003)、それらが等しいと仮定することで水深を推定する。ついで、推定された水深情報より各波長の反射率を求める。最後に波長毎の反射率から底面の分類を行う。推定方法のフローは図-4 のようにまとめられる。

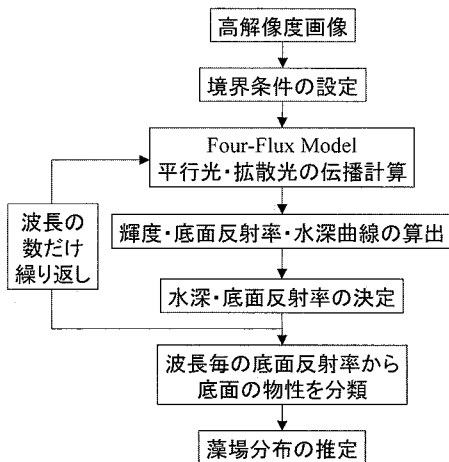


図-4 計算フロー

## (2) 正規化ユークリッド距離を用いた教師付き画像分類法について

FFMを用いた画像分類と比較するため、一般的な画像分類方法の中で最短距離法（正規化ユークリッド距離を用いた教師付き画像分類法）を用いた画像分類を行った。統計学的な理論に基づいた画像分類では、最尤法がよく用いられている。しかし、最尤法による画素単位の分類では判定のあいまいさを含んでいることが多い。そこで、本研究では、隣接画素との相互関係情報を用いることによってあいまいさを低減しうる弛緩法（高木ら，1991）を用いた。弛緩法では、まず初期ラベル確率  $P_i^{(0)}(\lambda_k)$  を次式のように定義する。

$$P_i^{(0)}(\lambda_k) = \frac{1/d_i(\lambda_k)}{\sum_{q=1}^{N_c} \{1/d_i(\lambda_q)\}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $d_i(\lambda_k)$  は分類クラス  $\lambda_k (k=1, 2, \dots, N_c)$  における正規化ユークリッド距離、 $N_c$  は分類クラス数である。

次に、画素  $a_i$  に注目し、その近傍の画素  $a_j$  を参照してラベル確率を更新することにより分類精度を向上させる。 $t$  回目の更新で得られる  $a_i$  のラベル、 $\lambda_k$  に対するラベル確率を  $P_i^{(t)}(\lambda_k)$  とすると、 $a_i$  のラベル確率は、次のようになる。

$$P_i^{(t)}(\lambda_k) = \frac{P_i^{(t-1)}(\lambda_k) \{1 + Q_i^{(0)}(\lambda_k)\}}{\sum_{c=1}^{N_c} P_i^{(t-1)}(\lambda_c) \{1 + Q_i^{(t-1)}(\lambda_c)\}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_i^{(t-1)}(\lambda_k) = \sum_j w_{ij} \sum_{l=1}^{N_c} R_{ij}(\lambda_k, \lambda_l) P_j^{(t-1)}(\lambda_l) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $w_{ij}$  は  $a_j$  に対する重み係数を表している。クラス、 $\lambda$  の画像上の空間的分布に方向依存性はないと仮定すると、8近傍を  $a_j$  とし、すべての  $a_j$  について同じ重みを使用する。 $Q_i^{(t-1)}(\lambda_k)$  は、 $a_i$  の近傍の画素  $a_j$  全てから判断される  $a_i$  が、 $\lambda_k$  を持つことに対する局所的無矛

表-1 航空機撮影に用いたカメラの概要

|      |                      |               |
|------|----------------------|---------------|
| 撮影高度 | 300 m                | 450 m         |
| 撮影範囲 | 377 m × 276 m        | 565 m × 414 m |
| カメラ  | PENTAX 645           |               |
| レンズ  | SMC PENTAX FA645(広角) |               |
| 焦点距離 | 45 mm                |               |
| 画角   | 76 度                 |               |

盾度を表し、 $Q_i(\lambda_k)$  を求めるために必要な  $R_{ij}(\lambda_k, \lambda_l)$  は適合係数であり、 $a_i$  のラベル  $\lambda_k$  と  $a_j$  のラベル  $\lambda_l$  との適合度を意味し、クラス間の隣接関係情報を表したものである。 $R_{ij}(\lambda_k, \lambda_l)$  は修正相互情報量として次のように定義される。

$$R_{ij}(\lambda_k, \lambda_l) = \begin{cases} \frac{1}{1-P(\lambda_k)} \left( 1 - \frac{P(\lambda_k)P(\lambda_l)}{P(\lambda_k, \lambda_l)} \right), & P(\lambda_k, \lambda_l) > P(\lambda_k)P(\lambda_l) \\ \frac{P(\lambda_k, \lambda_l)}{P(\lambda_k)P(\lambda_l)} - 1, & P(\lambda_k, \lambda_l) \leq P(\lambda_k)P(\lambda_l) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (13)$$

## 3. 利用データの概要

### (1) 画像の撮影条件

上記の推定法の検証のため、和歌山県田辺市にある田辺湾を対象に航空機撮影を行いデジタル画像を得た。撮影は2月17日13時15分頃、6月28日14時30分頃の2回行った。表-1に撮影に用いたカメラの概要を示す。解像度は、高度300mから撮影した画像では7cm、高度450mから撮影した画像では10cmである。フィルタを用いていないため撮影画像のスペクトル特性を正確に把握できていないが、赤を600nm、緑を540nm、青を430nmと代表させて計算を行った。また、撮影高度が低いため幾何補正は行わず、放射強度補正も行っていない。

### (2) 現地調査

現地調査は、2005年7月6日に和歌山県水産試験場によって田辺湾で行われた（図-5）。田辺湾は紀伊半島西岸中央部に位置する東西約4km、南北約4kmの小規模な湾である。湾内に生息する動物相は多様なことが知られており、湾東部の海岸には自然海岸も多く残されている。海草にはウミヒルモ (*Halophila ovalis*)、アマモ (*Zosteramarina*)、コアマモ (*Zostera japonica*) が観察されている。本研究では、水深0~2mに生息するコアマモ場を主な観測対象とし、目による調査に加えて葉条長等をサンプリング調査により計測している。

## 4. 結果と考察

FFMを用いる過程では、水深の推定を第一段階で行

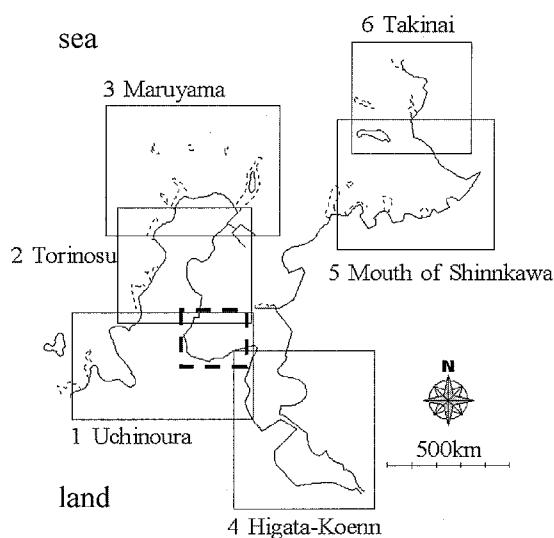


図-5 田辺湾における藻場生息域と本研究での現地観測地点(上出, 2006) (藻場生息域: 点線, 解析地点: 破線)

うためその結果を図-6に示す。点線、破線はそれぞれ現地観測によって得られた2m、5mの等水深線を表している。なお、5mより深い部分はFFMでは水深推定が不可能であった。画像撮影時には、潮位が87cmであったため水深推定結果は現地観測結果とほぼ一致しているといえる。

図-7には藻場分布の周辺形状を比較した結果を示す。図-7(a)に航空写真に現地観測の結果と航空写真から藻場を目視でトレースした結果を重ねた画像を示す。現地観測の結果と目視でトレースした結果を比較すると、藻場分布の周辺形状は一致しているものの現地観測結果は一回り大きく、面積に大きな違いがある。これは、現地観測と画像撮影時期のずれや現地観測に用いたGPSの精度、現地観測結果を地図にプロットする正確性、画像では確認できない密度のコアマモ場の存在など様々な要因が考えられる。そこで本研究では、航空写真から目視でトレースした結果を真値として、以下に示すように画像処理から得られた結果と比較した。図-7(b)に光学理論に基づく手法による分類結果を示す。黒で示される箇所が藻場と判定された場所を示し、破線が目視によるトレースの結果を示している。先に述べたように、水深推定時に5mより深いと判定された箇所は底面反射率が推定不可であったため、分類を行っていない。画像分類法では画像右側に伸びていた誤分類と上の方に伸びていた誤分類は縮小しており、分類精度は向上したといえる。また、岩礁部分と砂部分もうまく判別できている。

図-7(c)に画像分類法による分類結果に目視によるトレースを重ね合わせた画像を示す。図-7(b)と同様に黒

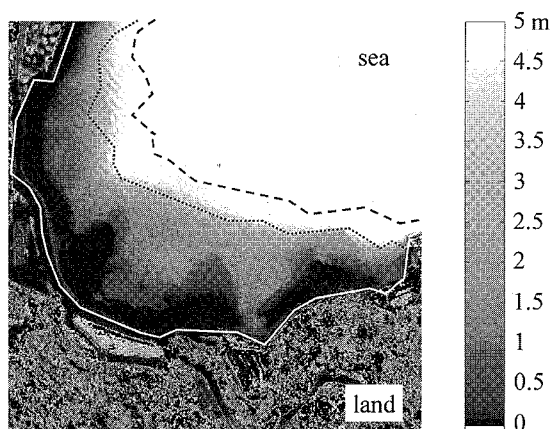


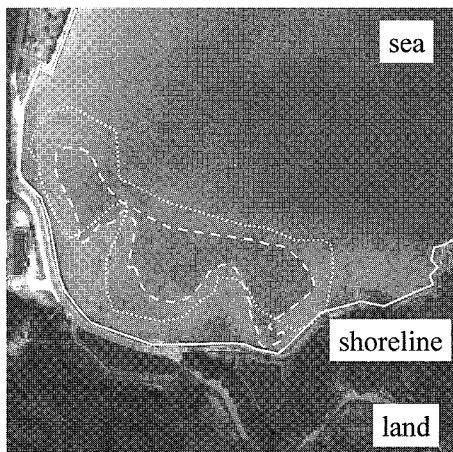
図-6 FFMによる水深推定結果と現地観測結果 (点線: 2m, 破線: 5m)

で示された箇所が藻場と判定された場所を、破線が目視によるトレースの結果を示している。目視によるトレースに比べ、上方および右方に実際は藻場ではない箇所が藻場と広く分類されていることがわかる。これは、藻場の教師データと藻場に最も近い特徴ベクトルを持つクラスの教師データとの違いが大きく、藻場と判定される特徴ベクトルの領域が大きくなったためだと考えられる。他の日時や地点を対象に分類を行った検討したが画像分類法による分類精度は低く、多くは図-7(c)のように藻場面積を過大に分類する。一方、画像分類法ではサングリッターを含む画像では藻場面積は逆に狭く分類された。しかし、サングリッターを含む画像は他の分類項目に対する判定も正確ではなく、画像撮影時に分類しやすい画像を撮影することも重要であるといえる。

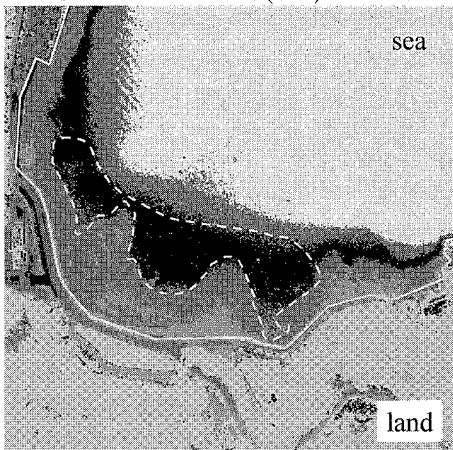
## 5. 結 論

本研究では、コアマモを対象にFour-Flux Modelを応用した藻場分布推定法を開発した。本手法では第一段階で水深の推定が行われ、第二段階目で波長毎の底面反射率が推定される。最後に波長毎の底面反射率より底面の物性が推定される。一般的に用いられる画像分類法と比較した結果、本研究によって得られた知見は次のようにまとめられる。

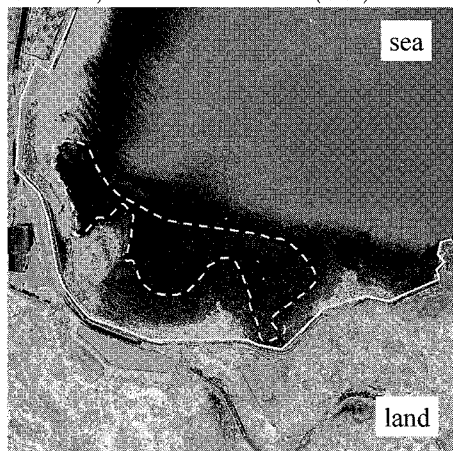
- ・画像分類法を用いた分類結果より、岩場と藻場など統計的な手法に基づく画像分類法では異なったクラスにおける教師データに差が見られない場合、その分類結果には誤分類が多く含まれ、弛緩法による分類精度向上を行ったとしてもその効果が期待できないことがわかった。
- ・画像分類法を用いた分類結果より、陸上の土地被覆に多くの種類が見られる場合、海域の特徴ベクトルと類似した被覆の出現が避けられなくなるため、その分類



(a) 航空写真に現地観測の結果(点線)と航空写真から藻場を目視でトレースした結果(破線)を重ねた画像



(b) FFMを用いた光学理論に基づく手法による分類結果(濃い黒:藻場)に目視によるトレース(破線)を重ねた画像



(c) 画像分類法による分類結果(濃い黒:藻場)に目視によるトレース(破線)を重ねた画像

図-7 現地調査結果と各推定手法による結果

精度は低下することがわかった。

- ・ Four-Flux Model を用いた水深推定結果は、現地観測結果と良好な傾向の一致が見られた。しかし、ある程度水深が深くなると画像輝度値に差が見られなくなるため、水深の推定は困難となることがわかった。
- ・ Four-Flux Model を用いた分類結果は、一般的に用いられる画像分類法を用いた分類結果に比べ誤分類を大きく減らすことができた。

本研究では、現地データをできるだけ用いない新しい藻場分布推定アルゴリズムを開発した。その結果、画像分類法に比べ誤分類を減らすことができ、水深推定では現地調査結果と傾向が一致した。今後の課題として、水深推定に至る推定原理の明確化がある。

謝辞：本研究を行うにあたって、和歌山県水産試験場上出貴士氏より有益な現地調査結果を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 上出貴士(2006)：和歌山県田辺湾におけるコアマモ群落の分布と季節的消長，横浜国際ワークショップ，東京湾アマモ場再生会議，2p.
- 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.
- Paringit, E.C.・灘岡和夫・Fortes, M.D.・波利井佐紀・Strachan, J.J.・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.
- 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.