

# 多バンド・リモートセンシングに基づくサンゴ礁マッピングへの 逆解析手法の応用

Enrico Paringit\*・灘 岡 和 夫\*\*

合理的なサンゴ礁マッピング手法の開発を目的として、従来の単純な海底反射率概念に基づかない新たな手法を提案した。具体的には、Linear Spectral Mixture 法と新たに開発したサンゴキャノピーに対する光学的二層モデルに、逆解析法を組み合わせた手法を開発した。航空写真と LANDSAT TM 画像を解析対象として、サンゴ類と他の海底被覆要素の識別、サンゴのスペクトルパラメータの推定、水深マッピング、といった内容のサンゴ礁マッピングを試み、現地調査の結果と比較した。

## 1. はじめに

サンゴ礁環境モニタリングに関して、広域かつ反復モニタリングが可能で、センサー技術進歩が著しいリモートセンシング技術への期待は極めて高い。サンゴ礁は、不均一な基質の上に多種多様な底生生物が分布しており、複雑な海底構造を有していることから、画像上の各ピクセルにはこれらの要素が複雑に混ざり合った形で反映されることになる。その度合いは画像スケールにもよるが、一般には最近の高解像度のセンサーでさえ個々の要素を分離検出することは困難である。このような複合現象は、単位ピクセルを構成する個々の底面被覆要素の反射スペクトル (endmember) の一次結合として評価する何らかの spectral mixture モデルによって評価できる可能性があるが、サンゴに限ってもそのキャノピー厚さや密度などさまざまな属性量に支配されているので、そのことを明示的に反映させた画像解析法の開発が必要となる。

本研究では、Linear Spectral Mixture 法と新たに開発したサンゴキャノピーに対する光学的二層モデルに、逆解析法を組み合わせた手法開発に基づいて、航空写真と LANDSAT TM 画像を解析対象として、a) サンゴ類と他の海底被覆要素 (底質) の識別、b) サンゴのスペクトルパラメータの推定、c) 水深マッピング、といった内容のサンゴ礁マッピングを試みた。

## 2. 解析対象および解析方法

### (1) 解析対象ならびに現地調査領域とリモセン画像

ここで解析対象としたのは、沖縄・石垣島東南岸 (24°21'N, 124°15'E) に位置する典型的な裾礁 (fringing reef) である白保リーフ海域である。現地調査は 2001 年の 4 月と 7 月ならびに 2002 年の 2 月と 4 月に同海域で行った。現地調査では、対象海域におけるさまざまな海底被覆要素を抽出しその位置情報とともに記録した。対象とした

海底被覆要素は、種類と分布密度が異なるいくつかの海草、岩質海底面、典型的なサンゴ種 (主としてイシサンゴ類)、大型藻類、そして砂地である。これらの種類の海底被覆要素に関して、様々な海底被覆状態、透明度そして水深でのサンプルを抽出した。サンゴに関しては、種と成長形態が異なる様々なサンゴを抽出し、その位置を記録した。さらに抽出した個々の海底被覆要素に関して、その分光反射特性 (spectral signature) を GPS 情報とともに計測した。これらの基礎的な分光反射特性データは、後述の mixture モデルとサンゴ層反射モデルに対する endmember スペクトル入力データとして用いることになる。さらに、サンゴ層光学モデルに基づく逆推定ルーチンの主要な入力データを得るために、2つの典型的なサンゴ群落を対象に詳細な計測を行った。画像解析には、LANDSAT-TM 画像と航空写真を画像データとして使用した。

### (2) 海底被覆状態マッピングのための線形 mixture モデル

先述の spectral mixture モデルは、主として陸域のモニタリングを対象として開発されたものであるが、サンゴ礁海域のような対象に適用するには水深や濁度などさまざまな付加的な光学的要素を組み込む必要がある。さらに、個々の海底被覆要素についてもサンゴのキャノピー層厚・密度などの要素を考慮する必要がある。本研究は、個々の海底被覆要素の分光反射率 (endmember) 測定結果を基本情報とし、サンゴキャノピーに関して Linear Spectral Mixture 法 (LSMM) と当研究室で開発した光学的二層モデルに基づいて、多次元関数極小化法等を用いた逆解析法を組み合わせることで、海底被覆状態を詳細にマッピングするための手法を開発した。

以下にまず、LMSS によるサンゴ礁海域海底被覆分類について述べる。

対象波長帯域を  $n$  個のバンドに分割したとき、海底被覆要素  $i$  のスペクトル情報 (endmember 情報) を  $R_i = (R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{in})^T$  と記すことにする。ここでの問題設定は、各画像ピクセルに関して、あらかじめ設定した  $c$  個

\* M.Sc. 東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士課程  
\*\* 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

の数の被覆要素によってカバーされている割合をそれぞれ算出することである。いまこの  $c$  個の数の被覆要素によるピクセル内の被覆割合を示すベクトルを  $f=(f_1, f_2, \dots, f_c)^T$  によって表すことにすると、LSMM では、下記の関係式によって、対象とするピクセルのスペクトル情報  $R_0=(R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0n})$  が表現される (Settle and Drake, 1993)。

$$\left. \begin{aligned} f_1 R_{11} + f_2 R_{21} + \dots + f_c R_{c1} &= R_{01} \\ f_1 R_{12} + f_2 R_{22} + \dots + f_c R_{c2} &= R_{02} \\ &\vdots \\ f_1 R_{1n} + f_2 R_{2n} + \dots + f_c R_{cn} &= R_{0n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sum_{i=1}^c f_i = 1$  および  $0 \leq f_i \leq 1$  である。マトリックス表記では

$$Rf = R_0: j^T f = 1, \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 $j$  は  $c \times 1$  のサイズの単位ベクトルで、 $j=(1, 1, \dots, 1)^T$  である。式 (1) あるいは (2) を上記の制約条件式のもとに最小二乗法で解くと、

$$\hat{f} = \alpha Uj + (U - \alpha UJU)R^T N^{-1} R_0 \dots\dots\dots (3)$$

を得る。ここで、 $\hat{f}$  は  $f$  の推定値を意味しており、 $J = jj^T$ 、 $U$  は  $U^{-1} = R^T N^{-1} R$  で定義される  $c \times c$  のサイズのマトリックス、 $\alpha = (j^T Uj)^{-1}$  である。また、 $N$  は、画像データの統計処理から得られる分散共分散ノイズ・マトリックスである。実際の各画像ピクセルは、 $c$  個の海底被覆要素によって 100%カバーされるとは限らないので、推定値  $\hat{f}$  にはさらに付加的な制約条件を課す必要がある。ここでは、 $\hat{f}$  がある所定の範囲 ( $k_{\min}, k_{\max}$ ) に入る、という条件を設定する。そうすると、 $\hat{f}_0 = UR^T N^{-1}$  を初期推定値とすると、

$$\left. \begin{aligned} \hat{f} &= \hat{f}_0 & k_{\min} \leq j^T \hat{f}_0 \leq k_{\max} \\ &= k_{\min} \alpha Uj + (I - \alpha UJ) \hat{f}_0 & k_{\min} \geq j^T \hat{f}_0 \\ &= k_{\max} \alpha Uj + (I - \alpha UJ) \hat{f}_0 & k_{\max} \leq j^T \hat{f}_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

さらに、ここでは、分類精度を上げるために、contextual 分類法 (画素ごとの分類の他に、対象画素の周りの状況を考慮し、分類に反映させる手法) を適用する。まず、解析対象リーフ海域を、礁池や礁舗、礁嶺、礁斜面といったリーフ海域の地形的・生態学的な特徴によっていくつかのセグメントに分割する。このゾーニング・スキームは海底被覆分類のための有用な判定基準を与えるものとなる (Mumby ら, 1998)。というのも、琉球列島ではサンゴ礁生態系における生物調査が広範に行われてきており、上記のようなゾーニングに対応して底棲生物の分布上の特徴が見られることが知られているからである (Iryu ら, 1995)。例えば、礁嶺では、rubble もしくは pavement によって被覆状態が支配されている。したがって、そこでの画像ピクセル値はこの 2 つの海底被覆要素に分解されるとしてよい ( $c=2$ )。分類精度のチェッ

クは、タウ係数やカッパ統計によって行うことが出来る (Congalton・Green, 1999)。

### (3) 最適化手法によるサンゴキャノピーパラメータの推定

主たる海底被覆要素がサンゴと分類されたピクセル画像に関して、さらに downhill simplex 法を用いた多次元関数の最小化ルーチンにより、以下に示すサンゴ層光学モデルをベースとした逆解析により、サンゴの構造パラメータを推定することを試みた。

$m$  個の波長帯域 (バンド) に関して、あるピクセル位置での水表面直上における光のサンゴキャノピー層からの全反射率  $R_i$  は、周囲の大気からの影響を当面無視するものとする、 $R_i = R_i(\hat{M})(i=1 \dots m)$  と表現することが出来る (Paringit・Nadaoka; 2002a)。ここに、 $\hat{M}$  はつぎの 11 個の互いに独立のモデルパラメータからなるベクトルである。

$$\hat{M} = (\bar{\omega} + \tau, \tau/\bar{\omega}, \bar{\omega}_0, \alpha, \phi_i, h, z, C_{chl}, C_s, n, F, G) \dots\dots\dots (4)$$

各パラメータ記号の意味は表-1 にまとめて示してある。サンゴ層光学モデルの細部については、紙面の都合によりここでは省略するが、モデルのポイントの一つは、従来のように単純な「海底反射率」という概念ではなく、サンゴ礁海域が、サンゴキャノピーという有限の厚さを持った 3 次元的な海底被覆構造を持っており、光学的なモデル化においても、そのことを明示的に扱う必要がある、との基本的な考えのもとにモデル化を行ったものである。図-1 に、モデル構造の概念図と、モデル構成上現

表-1 サンゴキャノピー反射モデルにおけるパラメータ

| Symbol                                       | Description                                     |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Coral optical parameters</b>              |                                                 |
| $\bar{\omega}$                               | single-scattering albedo of coralline component |
| $\tau$                                       | transmittance of coralline component or surface |
| $\bar{\omega}_0$                             | unit albedo of substrate (e.g sand, rock etc.)  |
| <b>Coral structural parameters</b>           |                                                 |
| $\alpha$                                     | slope of the coral layer                        |
| $\phi_i$                                     | aspect of the coral layer                       |
| $h$                                          | height of the canopy layer                      |
| $F$                                          | facet area index for branching corals           |
| $G$                                          | facet inclination index distribution            |
| <b>Geometric and illumination parameters</b> |                                                 |
| $\theta_s$                                   | sun zenith angle                                |
| $\theta_v$                                   | viewing zenith angle                            |
| $\phi$                                       | relative azimuth angle between sun and sensor   |
| $z$                                          | depth of the top of the coral layer             |
| <b>Water quality parameters</b>              |                                                 |
| $C_{chl}$                                    | chlorophyll-a concentration                     |
| $C_s$                                        | sediment concentration                          |
| $n$                                          | index of refraction for seawater                |

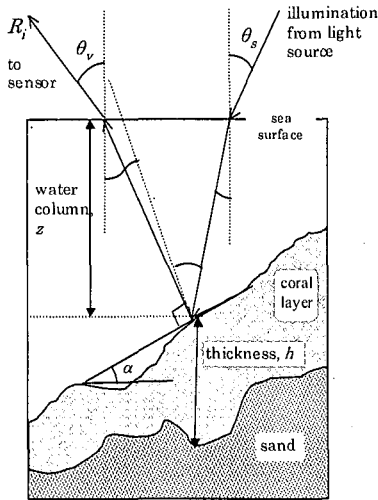


図-1 サンゴ層光学モデルの概念図

れる主要なパラメータを示す。

モデルパラメータには、サンゴの固有の光学特性に関するパラメータ、サンゴの構造的形態に関するパラメータ、そして海水の水質に関するパラメータが含まれる。逆問題では、サンゴによる多方向反射特性に関する測定値  $R'(\lambda, \theta_s, \theta_v, \phi)$  に対して、仮定した幾何学的、光学的パラメータのセットに基づいて計算された反射率との差をある評価関数によって評価する。具体的には、次式で定義された評価関数の値を算定し、それを最小化する。

$$P(\hat{M}) = \sum_{i=1}^m \frac{R_i - \hat{R}_i}{\hat{R}_i} + \sum_{j=1}^9 [(x_j - x_{j,b})^2 w_j]^{0.5} \quad \dots (5)$$

$$\text{and } w_j = 0 \text{ if } x_{j,\min} \leq x_j \leq x_{j,\max} \quad \dots (6)$$

ここに、 $x_{j,b}$  は当該のパラメータの境界値を表している。式(5)の右辺第2項はパラメータ推定値があらかじめ設定した範囲( $x_{j,\min}, x_{j,\max}$ )を超えた場合に課すペナルティ関数で、重みとしては  $w_j = 1/R'$  とした。この多次元評価関数の最小化アルゴリズムには、関数値のみの評価だけが必要になり微係数値を必要としない downhill simplex method (DSM) を用いた。この最小化アルゴリズムに必要な入力データは、a) マルチスペクトル画像中のサンゴ層における反射率ならびに対応する幾何学的なパラメータ、b) 境界値( $x_{j,\min}, x_{j,\max}$ )(for  $j=1 \dots 9$ )、c) モデルパラメータの初期推定値、 $\hat{M}_0$ 、d) 未知変数の数、等である。

### 3. 解析結果と考察

解析に使用可能なバンド数は10であるが、ここではそのうちの7バンド(中心波長で、430, 550, 650 nm: 航空写真をスキャナーで取り込んだ画像データ, 485, 570, 660, 830 nm: LANDSAT)の画像データのみを用いた。

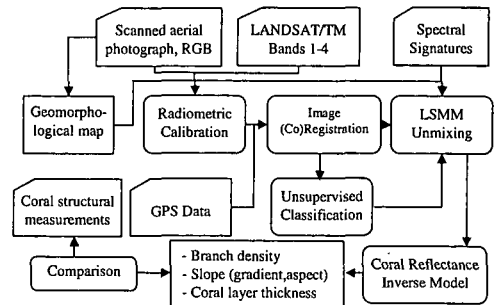


図-2 データの入出力関係ならびにデータ処理の流れ

全バンドの画像データの histogram を調べて見た結果、砂地とサンゴに起因したピークが2つだけ現れ、長波長側ではほぼ一定となった。予備的な非教師付き分類の結果からは、スペクトル上の一般的な区別は6つのクラス(大型藻類、海草、サンゴ、砂地、固結した石灰岩(以下、“reef pavement”と称する)、砂礫)のみ可能であることが示された。表-2に、各ベントス・タイプ、および reef pavement, 砂礫, 砂地からなる海底基質タイプをまとめている。

図-3は、いくつかの典型的な海底被覆要素に対する分光反射特性を示したもののだが、互いによく似ており、強度レベルのみが有意な違いを持つ形になっていることがわかる。最初の LSMM による分類結果は、現地でのサンプリングや知見、航空写真の判読等による結果と整合するものとなった。

表-2 解析対象領域中の Habitat Type とそれぞれに含まれる分類対象海底基質

| Habitat Type  | Description                                                                                               |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coral cover   | <i>Porites cylindrica</i>                                                                                 |
|               | <i>Heliopora coerulea</i>                                                                                 |
|               | <i>Montipora</i> sp.                                                                                      |
|               | <i>Acropora</i>                                                                                           |
|               | <i>Pavona</i>                                                                                             |
| Reef pavement | Consolidated limestone and calcified corals<br>Includes the Pleistocene limestones exposed near the shore |
| Macroalgae    | Calcareous algae                                                                                          |
|               | Coralline algae                                                                                           |
|               | Algal turf                                                                                                |
|               | <i>Padina</i><br><i>Ulva pertusa</i>                                                                      |
| Coral rubble  | Dead coral branches<br>Coral rubble > 50% sand                                                            |
| Seagrass bed  | <i>Thalassia hemprichii</i>                                                                               |
|               | <i>Halodule uninervis</i>                                                                                 |
|               | <i>Cymodocea rotundata</i>                                                                                |
| Sand          | Bare substratum                                                                                           |
|               | Sand and occasional branching algae                                                                       |

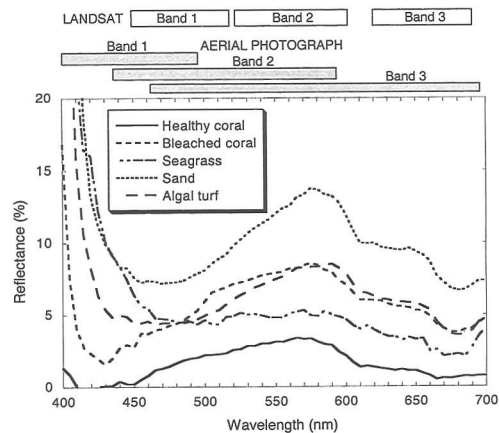


図-3 いくつか海底被覆要素に関する分光反射特性

表-3 誤差マトリックスで表した LSMM 法による分類結果の評価 (Cr=coral, Al=Algae, Sn=sand, Pv=pavement, Rb=rubble, Sg=seagrass

| Classified Data | Reference Data (n=140) |     |     |     |     |     |          |
|-----------------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
|                 | Cr                     | Sn  | Pv  | Al  | Rb  | Sg  | Total    |
| Cr              | 24                     | 3   | 2   | 2   | 1   | 1   | 33       |
| Sn              | 1                      | 20  | 2   | 1   | 4   | 3   | 31       |
| Pv              | 3                      | 3   | 11  | 0   | 1   | 0   | 18       |
| Al              | 1                      | 1   | 0   | 7   | 2   | 2   | 13       |
| Rb              | 0                      | 5   | 3   | 2   | 15  | 1   | 26       |
| Sg              | 2                      | 2   | 0   | 1   | 2   | 12  | 19       |
| Total           | 31                     | 34  | 18  | 13  | 25  | 19  | 140      |
| $P_p$           | 77%                    | 59% | 61% | 54% | 60% | 63% | $P=64\%$ |

ング部分の密度 (表-1 の facet area index  $F$ , 単位は  $m^2/m^2$ ) を表したものである。サンゴ層厚の算定値は、1-2 m という実際の値に対して、0.2-0.5 m 程度と、かなり低めの値を与える結果となった。ここで行った逆推定解析は 5 m のピクセルサイズの画像データでの解析であったことから、そのスケールでのサンゴ層の aspect や slope の変動性は小さく、画像値へはあまり反映されていない。このことは、サンゴの個々の形態特性を推定することよりも、サンゴ層の諸元を推定することの方がより難しくなることを意味している。このことは、バンドごとの画像値ではなく分光反射特性をフルに用いたサンゴ層光学モデル (Paringit・Nadaoka, 2002b) に対するパラメータ逆推定結果と符合している。

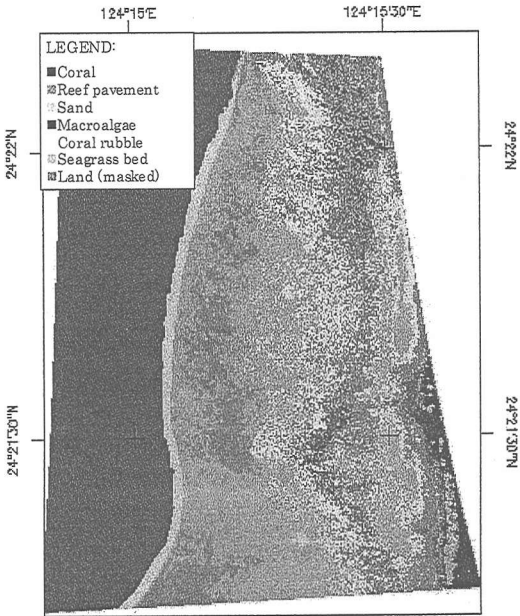


図-4 LSMM による海底被覆分類結果

表-3 は、LSMM に基づく分類結果を、いわゆる誤差マトリックスの形でまとめて示したものである。図-4 は、対応する各分類項目の空間分布を示した画像である。表-3 で、全分類精度  $P$  は、マトリックス対角要素中の数の合計値を全サンプル数  $n=140$  で割った値として計算できるが、ここでは  $P=64\%$  である。この値は必ずしも高い値とは言えないが、各被覆要素についてみるとサンゴが最も分類精度が高く、大型藻類の分類精度が最も低くなっている。user's accuracy ( $P_u$ ) と producer's accuracy ( $P_p$ ) は、ほぼ一致しているが、このことは、情報供給側と使用側が同じ識別・認知傾向を有していることを意味している。大型藻類はサンゴとスペクトル特性が比較的近いため、その分類精度が低下している。同様に、砂地と砂礫についても誤分類のケースが多い。これは、ここで対象とする砂礫がサンゴ起源のものであり、砂地も大半がサンゴ砂であることによる。

なお、いわゆるカッパ係数は 0.63 となったが、これはランダムな分類に基づく誤差の 63% が排除できていることを意味している。一方、タウ係数は 0.59 で、これは 59% のピクセル画像が、偶然に一致のケースを排除して正しく推定できていることを意味している。

地形学的なゾーニングによる contextual 補正の導入で分類指定をリーフ内の現実的な領域の中に限定することによって、分類精度を向上させることが出来た。このことは、例えば、先に示した誤差マトリックスにおいて、“海草”が“reef pavement”に誤分類されていないことから明らかである。ここでは contextual 補正を導入しない場合との直接的な比較は行っていないが、他のサンゴ礁マッピングに関する研究例 (Mumby ら, 1998) を見ると 6-23% の分類精度の増加が得られている。

図-5 の下段の図は、上段の画像に対して、サンゴ層光学モデルをベースとした逆推定法によって計算されたサ

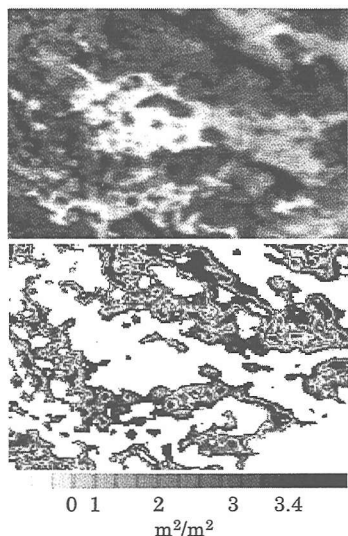


図-5 上図：航空写真画像データ (Band 1 のみ)。

下図：サンゴ層光学モデルに基づく逆推定結果により得られたサンゴ部分領域の密度 ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )。白色部分は非サンゴ領域。

さらに、対象海域中の 33 地点での水深の推定結果を潮位補正をした現地データ (水深範囲：0.3-1.92 m) と比較したところ、相関係数で  $R^2=0.72$  という、ある程度的一致が得られた。なお、海底被覆状態に関するマッピング結果の解釈には注意を要する。図-4 で示した分類画像は、各画素において、主要な海底被覆要素、あるいは最大面積割合を有する要素を表したものである。このような表現では、他の被覆要素が無いものと勘違いしやすいので注意を要する。例えば、画像中の左上に位置する礁池は、海草域と接しており、*Acropora*, *M. digitata*, *Porites cylindrica* といった造礁サンゴ類のパッチが存在する (Iryu ら, 1995) が、砂地がこの領域で相対的に卓越している要素のため、解析結果のこの図においては砂地しか現れていない。もし、そのような状況を改善する必要があるれば、分類結果の表示方法として、異なった海底被覆要素の分布を表示できる multi-thematic map を用いる必要がある。

また、contextual 分類は、何らかのバイアスをもたらし可能性があるし、本質的に、他の底棲生物環境において使用する際に、LSMM 手法のロバスト性に制限を加えることにもなり得る。バイアスの発生は、海底被覆状態に関して解析対象領域の全てを現地調査でカバーできているわけではないことや既存研究による知見が存在する領域も限られていることに起因する。

#### 4. おわりに

本論文では、新たに開発したサンゴ層光学モデルと逆解析手法を組み合わせたサンゴ礁マッピング手法を提案し、具体的な現地データに基づいてその性能評価を行った。サンゴ礁海域の海底被覆構成要素間で、互いに分光反射特性が類似している場合が少なからずあることや、モデルに必要な情報がまだ不十分なこともあって、現段階での分類推定精度は限られたものとなっている。しかし、単純な 2 次元平面からの反射を想定した従来の「海底反射率」概念に基づくアルゴリズムに比べて、ここで提案している手法は、有限の層厚を有する 3 次元的なサンゴキャノピーの存在という、現実のサンゴ礁海域の基本的な特徴を最も重要なポイントとして位置づけてモデル化したもので、解析の結果から得られる情報も、サンゴの幾何学的な形態を反映したものとなることから、将来、解析精度がさらに向上すれば、サンゴ分類学的な応用も期待できる。また、サンゴ・キャノピーの流体力学的モデル開発への応用も想定している。

**謝辞：**本研究を実施する上で、特に現地データの取得に際して、東工大・灘岡研究室の波利井助手に多大なご協力を得た。ここに記して謝意を表します。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究 (B) (1) (課題番号：12450198, 研究代表者：灘岡和夫)、同・基盤研究 (A) (1) (課題番号：14205071, 研究代表者：灘岡和夫) の補助を受けて行ったものである。

#### 参考文献

- Congalton, R. G. and K. Green (1999): Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Boca Raton: Lewis Pub. 137 pp.
- Iryu, Y., T. Nakamori, S. Matsuda and O. Abe (1995): Distribution of marine organisms and its geological significance in the modern reef complex of the Ryukyu Islands, *Sedimentary Geology*, Vol. 99, No. 3-4, pp. 243-258.
- Mumby, P. J., C. D. Clark, E. P. Green and A. J. Edwards (1998): Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 19, No. 1, 203-210.
- Paringit E. C. and K. Nadaoka (2002a): Two approaches to reflectance modeling for coral reef areas. *Proc. 7th Int. Conf. Remote Sensing for Marine and Coast. Env.* (submitted).
- Paringit E. C. and K. Nadaoka (2002b): Reef morphological inferences from inversion of coral reflectance model. *Proc. Pan-Ocean Remote Sensing Conf.* (submitted).
- Settle, J. J. and N. A. Drake (1993): Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 14, No. 6, pp. 1159-1177.