生物光学モデルを利用した濁ったサンゴ礁上の海色再現

Turbid Ocean Color Reproduction on the Coral Reef using Bio-optical Model

作野裕司¹・三宅拓馬²

Yuji SAKUNO and Takuma MIAKE

The objective of this study is to reproduce turbid ocean color on the coral reef of Amami-Oshima Island which located in Kagoshima Prefecture, Japan using the bio-optical model in consideration of bottom reflectance. The comparison between the model and in-situ reflectance at the surface water under four kinds of conditions is tested. As a result, the absolute values is different, but the significant correlation ($R^2>0.80$) was acquired. Moreover, ocean color at the time of changing water depth and SS on coral reef was reproduced using CIE color coordinate theory (xyY color coordinate). It was confirmed that the significant correlation between water depth and SS have hue (x, y) and brightness (Y) of ocean color, respectively. This bio-optical model serves as a good tool reproducing ocean color under turbid condition on coral reef.

1. はじめに

2010年4月に発生したアイスランドのエイヤフィヤトラヨークトル火山の爆発による火山灰（Gislason et al., 2010）や2011年3月に日本の東北地方で発生した東日本大震災による津波（Lekkas et al., 2011）等、近年大規模な自然災害に起因する動植物への影響が懸念されている。

同様な問題で、サンゴ礁域では豪雨に伴う土砂流出がサンゴに被害を与えることが知られている。例えば、わが国では沖縄周辺のサンゴ礁域における土砂流出として沖縄周辺海域の赤土汚染が有名である。赤土汚染とは、豪雨後に開発現場や農地などから土壌を流出し、透明に輝くサンゴ礁の海を濁らせる現象である。赤土汚染の自然的要因は、有機物が少ないため分散されやすい土壌、急峻で河川が短小な地形、浸食性が非常に強い降雨の3つが上げられる。そのため沿岸をとりまく礁池は半閉鎖的で、流出した赤土等の大部分をここに堆積させる。堆積した赤土は、台風や季節風の波浪で巻上げられて再び海中に懸濁する（大見謝, 2004）。以上のことからサンゴ被害を軽減するために赤土堆積に関する水中のモニタリングは非常に重要である。赤土汚染のモニタリング方法の開発では現場の簡易赤土測定手法であるSPSS法（大見謝, 2003）や衛星データによる赤土堆積指標（灘岡・田村 1992；灘岡・田村, 1993）等の開発が行われている。しかし、これらの研究はほとんど沖縄周辺（沖縄本島や石垣島）に限られ、沖縄県以外の地域における土砂流出がサンゴに与える影響の研究や継続的な土砂堆積モニタリングの例は非常に少ない。

本研究で対象とする鹿児島県の奄美大島は、内陸部では国内最大規模の亜熱帯照葉樹林が広がり、多くの固有で希少な動植物が生息する。また海岸部ではサンゴ礁、マングローブや干潟等の多様な環境を有する。そのため陸域海域ともに生物多様性が高く国際的にも保全重要性の非常に高い地域の一部であると評価されている。このような重要な地域で、2010年10月下旬に発生した記録的な豪雨による濁流は河川から海へと流出しサンゴ礁に大きなダメージを与えた。特に国内有数の規模のマングローブ林、干潟を有する住用湾周辺でその被害は最も大きかった。しかしこのような大規模な災害では、陸域の被害対策が優先され、水域の現地調査自体が危険であったこと等から、災害直後のサンゴの被害調査は極めて難しかった。そのため、災害直後はもとより災害直前のモニタリングとして、海岸管理者は岸からの目視やカメラによる海水の色の変化からサンゴ礁の状況を間接的に推測することも重要となる。ただし、目視やカメラによるサンゴ礁上の海色は底質の種類や水深により異なり、客観的な判断も非常に難しい。

そこで本研究では、そのような目視判断基準の一助として、底質の反射率も考慮される生物光学モデルを利用して、サンゴ礁上の海色を色度理論で再現し、濁度や水深の違いによる海色の再現を試みた。

2. 方法

(1) 現地調査および使用データ

本研究の対象とした地域は、図-1に示される鹿児島県奄美大島の南東部に位置する2地域である。対象とした地域は、2010年10月以降の豪雨により大きなサンゴ被害があった住用湾口のトビウ島付近（図-1のA域）と、サンゴ被害がほとんどなかった大浜海浜公園（図-1のB域）

1 博(工) 広島大学助教大学院工学研究院
2 広島大学工学部第四類

である。筆者らは2011年10月11日と2012年12月20日に分光反射率、透視度、潜水によるサンゴ種の同定等を現地で行った。分光測定には、小型分光放射計MS720 (EKO社) (観測波長域350~1050nm, 波長間隔3.3nm, 半値幅10nm) と13cm四方の標準白色板 (可視~近赤外波長において99%の反射率が得られる) を用いた。観測方法は船上から分光計の開口部を鉛直下向きにして、水面および甲板上に置いた標準白色板の分光放射照度をそれぞれ測定した。測定条件は分光計の開口度25°, 測定距離約30cmで鉛直下向きに3回ずつ測定した。最終的な反射率は3回の測定値の平均とした。本研究の反射率は「水面直上の分光放射照度」と「標準板の放射照度の比」と定義した。水深は船上からポータブル測深機PS-7 (HONDEX社) を使って測定した。また、透視度計TP-M100 (OPTEX社) を使って透視度も測定した。底質の実測反射率は筆者らがすでに奄美海洋展示館の水槽で取得しているハナヤサイサンゴ、トゲスギミドリイシ、ハマサンゴの値 (作野ら, 2007) を純水の吸光係数を利用して、水による光吸収影響を除いた反射率 (サンゴ本来の反射率) に変換して使用した。図-2に本研究で使用した4種類のサンゴの水中写真を示す。

(2) 生物光学モデルによる分光反射率再現

本研究では水深、底質の反射率、水質 (Chla, SS) を

図-1 奄美大島における分光反射率/水質測点。白丸は2010年10月の豪雨時にサンゴ被害がなかった水域、赤丸はサンゴ被害があった水域。

表-1 サンゴ別反射率測点の位置と水深

サンゴ名	経度 (°)	緯度 (°)	水深 (m)	透視度 (m)
ハナヤサイサンゴ	129.45255	28.40320	1.6	1.6
トゲスギミドリイシ	129.45313	28.40332	1.8	1.8
ハマサンゴ(1)	129.44878	28.23117	2.2	0.53
ハマサンゴ(2)	129.44667	28.23205	3.5	0.53

図-2 研究に使用した奄美大島のサンゴの水中写真 (2012年12月20日撮影)

関数としたAlbert・Mobley (2003) と虎谷ら (2003) の生物光学モデルを組み合わせて水色の再現を試みる。ただし今回、SS測定はできなかったため、透視度から換算した。まず底質反射率、水質、水深を入力した場合の水面直上の反射率計算 (400-700nm, 10nmごと) を行い、船上から測定した水面直上反射率と一致するか検証した。

ここではまず、生物光学モデルについて簡単に説明する。Albert・Mobley (2003) によると水面直下の反射率は、底質の反射率を関数として、以下の式で表わされる。

$$R^-(\lambda) = R_\infty^-(\lambda) [1 - A_1 \exp\{-(\kappa_0 / \cos \theta_s + (1+u)^{\kappa_{1,w}} \times (1 + \kappa_{2,w} / \cos \theta_s))(a(\lambda) + b_b(\lambda))z_B\}] + A_2 R_B(\lambda) \exp\{-(\kappa_0 / \cos \theta + (1+u)^{\kappa_{1,B}} \times (1 + \kappa_{2,B} / \cos \theta_s))(a(\lambda) + b_b(\lambda))z_B\} \quad (1)$$

ここで、 R^- は水面直下の反射率、 R_∞^- は無限水深の反射率、 a 、 b_b はそれぞれ水中物質の吸収係数、散乱係数で、 u は a と b_b の関数 ($u=b_b/(a+b_b)$) から求められる値である。また、 R_B は底質 (ここではサンゴ) の反射率、 z_B が水深、 θ_s は太陽天頂角、 λ は波長である。残りの A_1 、 A_2 、 κ_0 、 κ_1 、 κ_2 は定数である。つまりこの式では底質の反射率 R_B 、水深 z_B 、水質 (a 、 b_b はクロロフィルとSSを使って計算可能) が既知であれば、いくつかの仮定を経て、水面直下の反射率を計算で再現できることを示している。一方、式 (1) のうち a 、 b_b 、 u は日本近海のSS、Chlaの関数として求められる虎谷ら (2003) のモデルをそのまま使用した。

また、モデルに入力するChlaは現地調査した各測点の値 ($0.5 \sim 0.7 \mu\text{g/l}$) をそのまま使用した。さらに本研究では、現地調査においてSSではなく、透視度を測定したため、沖縄の赤色度研究で使われている次のような関係

式（花城ら，1994）を使って，透視度をTSSに変換して用いた．

$$\log[TSS] = 1.2131 \times \log[Tr]^{-1} + 3.0979 \quad \dots\dots\dots (2)$$

また，式（1）の定数 A_1 ， A_2 ， k_0 ， k_1 ， k_2 は，Albert・Mobley（2003）の文献値をそのまま用いた．さらに船上から測定する水面直上反射率 R^+ は，式（1）で求められる水面直下にある R の0.55倍（杉原・杉森，1986）として，以下の式で近似した．

$$R^+(\lambda) = 0.55R^-(\lambda) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) xyY表色系による色再現

測定した反射率を実際の水色に再現する，また水色と水深や水質と比較するために，CIE（国際照明委員会）xyY表色系を用いた．この表色系を用いることにより水の色や明るさを定量的に表わすことができる．ここでは簡単に，xyY表色系の計算方法のみを説明する．

xyY表色系では，まず以下の式に従って， X ， Y ， Z を計算する．

$$X = \int_{380}^{780} S(\lambda)x'(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Y = \int_{380}^{780} S(\lambda)y'(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z = \int_{380}^{780} S(\lambda)z'(\lambda)R(\lambda)d\lambda \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで， S は光源の分光特性， x' ， y' ， z' はXYZ表色系の等色関数， R は物体の分光反射率である．次に，以下の式で， x ， y を計算する．

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad \dots\dots\dots (8)$$

このようにして表わされた， x ， y は色相， Y は明度に関する情報で，色を定量的に表わすことができる．なお，本研究で用いられる S はCIEの標準光D65を採用し， S ， x' ， y' ， z' の数値は，JISハンドブック（日本規格協会，2010）から5nm nmごとの値を引用した．

3. 結果および考察

図-3は調査船上で測定された水面直上の分光反射率と水族館で測定されたサンゴ本来の分光反射率（式（1）の底質反射率に相当）の特性を示す．これより水面直上の分光反射率特性は水による吸収，散乱などで，底質本来のそれとは大きく異なることがわかる．波長別にみると，特に水面直上の分光反射率は400～550 nm付近と，

680～700 nm付近において，水族館で測定されたサンゴの分光反射率形状と大きな違いがみられた．この事実は，水面上で見ている水面の色はサンゴ本来の色とは大きく異なり，水深や水質などを考慮しなければ，水中の状態を間違った認識で捉える可能性があることを示唆している．

図-4は，生物光学モデルによる推定値と実測値の相関関係を示す．これより，両者は高い相関（(a)～(c)は R^2 が0.8以上，(d)は0.4だが500-700 nmの範囲では R^2 が0.9以上）が得られた．また図-5は図-4によって得られた回帰式を使って反射率のオーダーを一致させて，横軸を波長，縦軸を反射率として，両者の分光反射率を比較した図である．これより，(a)，(c)の場合，図-3と比較してどの波長においても極めてよく一致していることがわかる．一方，(b)，(d)の場合，550nm付近より長波長では比較的よく一致しているが，短波長では，分光反射率特性が一致しないことがわかる．このような短波長側での不一致の大きな理由のひとつには，生育環境の違いから「水族館で測定されたサンゴ」と「海域で生育しているサンゴ」の分光反射率が共生藻類等の影響で異なることが考えられる．従って，本来は現場における水中のサンゴの反射特性を測定し，両者の反射率を比較するのが望ましい．しかし現場でのサンゴ直上の分光反射率測定は容易ではない．そこで，ここでは水族館のサンゴと現場のサンゴの分光反射率特性が等しいと仮定した場合，このような生物光学的なモデルから，(a)，(c)のように水表面の反射率特性を再現できる可能性があることが示唆された．次に，これらの反射率シミュレーション値をCIEのxyY表色系で表す．ここでは，実際に土砂流出によるサンゴの白化が見られた住用湾におけるハマサンゴ1のサンプルを例にとって説明する．

表-2，表-3はそれぞれ水深とSSを変動させた場合の x ， y ， Y 値の推定値を示す．また図-6はそれぞれ「SS=10mg/l，Chla=0.5μg/l」の条件下で「水深を変化させた場合」と「水深一定（z=2 m）でSSを変化させた場合」の推定xy色度座標例を示す．これより，水深を変化させることにより，色度座標が赤側から青側（右下）にシフト，SSの変化は水深を変化させた場合と比較して，色相の変化が非常に小さいことがわかる．

図-7（左）は「 z （水深）と x ， y 座標の関係」，図-7（右）は「SSと Y （明度）の関係」をそれぞれ示す．それぞれの関係式は以下の式で表わすことができる．

$$z = 843.48 \exp(-21.962x) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$z = 216371 \exp(-34.044y) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$SS = 3.05Y - 34.45 \quad \dots\dots\dots (11)$$

このことは，対象水の色から x ， y ， Y の情報が求められれば，式（1）を利用して，水深やSSを逆推定することができることを示している．

4. まとめ

本研究では底質の反射を考慮した生物光学モデルを利用して、奄美大島のサンゴ礁の海色を再現する研究を行った。その結果、4種類の条件下でモデルと実測値を比較すると絶対値は異なるが、 $R^2=0.80$ 以上の高い相関が得られた。また、CIE色度理論を利用して、生物光学アルゴリズムから得られるサンゴ礁上の水深、SSを変化させた場合の海色を再現した。水色は水深を変化させた場合に大きく変化する。一方、SSを変化させた場合、水色変化は相対的に小さく、明度によく依存することが確かめられた。

以上の結果から、実用上はサンゴの種類・水深が既知の場所において、目視検査、監視カメラや人工衛星等の画像から抽出される表面の水色情報（水色表等のマンセル値、カメラのRGB輝度値、衛星の分光反射率値等）をxyY表色系に変換することにより、これらの水色情報を定量的かつ可視化して表わすシステムに利用できると考える。このような水色の定量化はサンゴ礁被害軽減の資

図-5 生物光学モデルと実測の水面反射率(400-700nm)の分光特性比較

図-3 異なる水深、サンゴ種の条件下における表面（船舶上）と底質（水族館）の分光反射率特性

図-4 生物光学モデルと実測の水面反射率(400-700nm)の相関

図-6 底質がハマサンゴで濁度一定、水深を変化させた場合の推定xy色度座標例（上）、水深一定、濁度を変化させた場合の推定xy色度座標例（下）

図-7 水深と x , y 座標の関係 (左) と SS と Y (明度) の関係 (右)

表-2 水深変動ケースの xyY 値 (ハマサンゴ上)

z (m)	x	y	Y
0	0.43	0.43	8.52
0.5	0.34	0.38	9.16
1	0.30	0.36	9.79
1.5	0.28	0.35	10.32
2	0.28	0.34	10.74
2.5	0.27	0.34	11.06

表-3 SS 変動ケースの xyY 値 (ハマサンゴ上)

SS (mg/l)	x	y	Y
0	0.24	0.29	10.19
20	0.23	0.28	16.08
40	0.23	0.28	26.01
60	0.24	0.29	33.10
80	0.25	0.30	38.04
100	0.25	0.30	41.55

料として役立たせることが期待される。

今後は、本論文で得た知見をもとに、衛星から得られる表面反射率データとあらかじめ測定された水深データから平水時（災害前）の底質反射率分布の推定を行う手法を研究する。また求められた底質反射率分布を元に、濁水時（災害後）の SS 分布推定を行う研究を行いたい。

謝辞：本研究は「JSPS 科研費 24560623, 23404001, 24404006」の成果の一部である。また、現地の潜水によるサンゴ調査はティダ企画の興克樹氏にお願いした。関係者各位に謝辞を表す。

参考文献

- 大見謝辰男 (2003) : SPSS 簡易測定法とその解説, 沖縄県衛生環境研究所報, 第37巻, pp. 99-104.
- 大見謝辰男 (2004) : 陸域からの汚濁物質の流入負荷, 日本のサンゴ礁, pp. 64-68.
- 作野裕司, 田中 力, ルイ・ソチュ, 田中義和 (2007) : 奄美大島におけるサンゴと藻の分光反射率特性と QuickBird データによる検証, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1061-1065.
- 杉森康宏, 坂本 亘 (1985) : 海洋環境光学, 東海大出版会, 356p.
- 灘岡和夫, 田村英寿 (1992) : LANDSAT / TM データに基づいた沖縄赤土流出問題の解析の試み, 日本リモートセンシング学会誌, 第12巻, 3号, pp. 3-19.
- 灘岡和夫, 田村英寿 (1993) : 沖縄赤土流出問題に関する汎用衛星モニタリングシステム構築の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1106-1110.
- 日本規格協会 (2010) : JIS ハンドブック 61 色彩, 1509p.
- 花城可英, 大見謝辰男, 比嘉栄三郎, 満本裕彰, 普天間朝好, 古堅勝也, 下地幸枝, 田代 豊 (1994) : 濁水の評価に関する研究 - SS , 濁度, 透視度の関係について -, 沖縄県衛生環境研究所報, 第28巻, pp. 67-71.
- 虎谷充浩, 田中昭彦, 福島 甫, 陳 文忠, 高橋 理, 村上浩 (2003) : ADEOS/GLI の海色大気補正アルゴリズム, 日本リモートセンシング学会第35回学術講演会論文集, pp. 175-176.
- Albert, A. and Mobley, C. (1994) : An analytical model for subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-2 waters, Opt. Express, Vol.11, No.22, pp. 2873-2890.
- Gislason, S., Hassenkam, T., Nedel, S., Bovet, N., Eiríksdóttir E., Alfredsson, H., Hem, C., Balogh, Z., Dideriksen, K. and Oskarsson, N. (2011) : Characterization of Eyjafjallaj kull volcanic ash particles and a protocol for rapid risk assessment, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol.108, No.18, pp. 7307-7312.
- Lekkas, E., Andreadakis, E., Kostaki, I. and Kapourani, E. (2011) : Critical Factors for Run-up and Impact of the Tohoku Earthquake Tsunami, International Journal of Geosciences, Vol.2, pp. 310-317.