

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

Spectral Reflectance Measurements of Coral and Seagrass and its
Validation using QuikBird Data in Amami-Oshima Is.

作野裕司¹・田中 力²・ルイソチエ³・田中義和⁴

Yuji SAKUNO, Tsutomu TANAKA, Luy SOCHEA and Yoshikazu TANAKA

The discrimination technique of coral and seagrass by coral remote sensing is very important study. To dissolve this problem, the spectral reflectance (R) measurement and its validation using satellite "QuickBird" data were conducted. First of all, R s of 5 coral and a seagrass species were measured at the aquarium water tank in Amami-Oshima Is. The basic difference of R characteristic of coral and seagrass was the gradient of 570-600nm (Band 2 of QuickBird) and 600-650nm (Band 3 of QuickBird). The discrimination of coral and seagrass using QuickBird data using band ratio algorithm in the north-east part of Amami-Oshima Is. was tried. Conclusively, coral and seagrass were distinguished schematically using QuickBird data.

1. はじめに

近年, 広域で非接触観測が可能な衛星リモートセンシング(RS)によるサンゴ礁底質図の作成が期待されており, 関連の研究(Andréfouët ら, 2003; Yamano・Tamura, 2004)が各地で行われている。しかし, 従来のサンゴ礁 RS 研究では分光特性が似ているサンゴと海藻等の生物との判別が難しいという問題点があった(環境省, 2004)。最近では, 衛星の高解像度化, ハイパースペクトル化等により, 徐々にそのような問題点を克服するための研究が進められてきているが(Paringit ら, 2003; Yamano ら, 2002), 我が国のサンゴ礁 RS の研究事例は非常に少なく, その研究地域も石垣島や沖縄本島等の一部地域に留まっている。またサンゴ礁 RS の基礎となる我が国のサンゴや藻のスペクトルデータベースも十分ではない。そこで, 本研究では水族館のサンゴ礁水槽においてサンゴの分光反射率測定を行い, その特性を把握するとともに, サンゴ礁 RS の研究事例がほとんどない奄美大島のサンゴ礁地帯において高解像度衛星の QuickBird データを使って, 藻とサンゴの判別可能性について検証することを目的とした。

2. 方 法

(1) 研究地域におけるサンゴ礁底質の概要

研究地域の奄美大島は鹿児島市の南東約 400 km に位

置する(図-1)。同島最北部の笠利半島では, サンゴ礁が比較的良好に発達している。奄美海域には, 約 220 種の造礁サンゴが分布しており, 島々の周囲にはミドリイシ(*Acropora*)が優占していたが, 1998 年の大規模な白化現象の影響で多くのミドリイシ属が死亡し, 礁池～礁縁では, 生存したハマサンゴ属(*Porites*), キクメイシ属(*Favia*)が優占している(環境省, 2004)。一方, 藻場に関しては, 近年その生育範囲が減少しており, 2004 年 9 月の筆者らの聞き取り調査(作野ら, 2004)では, 比較的大規模な藻場としては島北東部の笠利半島の一部(佐仁地区)に海草(ホンダワラ)が存在する程度である(ただし調査時には繁茂していなかった)。その他は, 島北東部の笠利半島周辺の海岸に緑色の海草(又は海藻)が肉眼で観察できる程度存在していた。

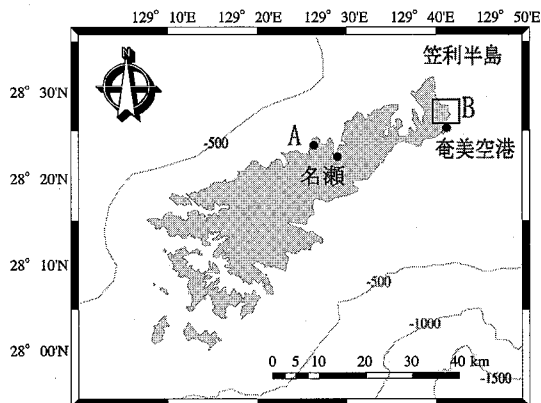


図-1 研究地域の位置

(2) サンゴ及び藻の分光反射率測定方法

今回の分光反射率測定は鹿児島県奄美市奄美海洋展示館(図-1のA地点)の水槽内(深さ約1m)で飼育さ

- | | | | |
|-------|------|------------------|--------------------|
| 1 正会員 | 博(工) | 広島大学助教 | 大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 2 | | 広島県環境部環境対策局環境調整室 | |
| 3 | | 広島大学 | 大学院工学研究科社会環境システム専攻 |
| 4 | 博(情) | 広島大学助教 | 大学院工学研究科社会環境システム専攻 |

れているサンゴ・海草（奄美大島の大浜海岸に生息するサンゴ・海草）を対象とした。このうち、サンゴについては種類や水深の測定条件を変えて分光測定を行った。分光測定に使用した機器は Spectra Vista 社の GER1500 である。表-1 に GER1500 の性能を示す。照明は展示水槽の上に設置されたハロゲン光を用いた。また、入射光量の測定には labsphere 社の標準白色板（約 13 cm 四方の寸法で、可視・近赤外域の全波長域にわたり 99 % のほぼ均一な反射率を有する）を用いた。反射率はこの「白色板に反射させた入射光の放射輝度」と「試料（サンゴ及び海草）」の放射輝度の比と定義した。水中での観測においては GER1500 に 1 m の光ファイバケーブルを装着し、水深ごとの測定を行った。分光測定は各 3 回ずつ行い、それぞれの波長域における反射率の平均化処理を行った。測定に使用したサンゴは、*Acropora intermedia*（トゲスギミドリイシ）、*Acropora tenuis*（ウスエダミドリイシ）、*Pocillopora damicornis*（ハナヤサイサンゴ）、*Porites australiensis*（ハマサンゴ）である。また測定した藻は、緑色の海草（高さ数 cm の房状海草であるが名称は特定できなかった）1 種類である。

表-1 使用した分光計の性能

型 式	GER 1500
波 長 範 囲	350-1050 nm
チャンネル数	512 ch
波 長 分 解 能	1.5 nm
計 測 単 位	$[W/cm^2/nm/sr] \times 10^{-10}$
寸 法	15 cm (W) * 26 cm (D) * 8 cm (H)
重 量	2 kg

(3) 衛星データの反射率変換

今回検証に用いた衛星 QuickBird データは、奄美大島北東部岸（図-1 の B 地点）において、2003 年 4 月 16 日に撮影された解像度約 2.5 m の可視・近赤外 4 バンド画像（16 ビットプロダクト）である。衛星データからの反射率変換は、以下の式（Lathrop, et al, 1991）を用いて行った。

$$R_s = (\pi L_s d^2) / (ESUN_\lambda \cos \theta_s) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 R_s は反射率（無次元値）、 L_s は衛星データから得られる放射輝度 ($W/m^2/sr/\mu m$)、 d は太陽-地球間距離（天文単位）、 $ESUN_\lambda$ は大気圏外分光放射照度 ($W/m^2/\mu m$)、 θ_s は太陽天頂角 ($^\circ$) (90° - 太陽高度角) である。このうち、QuickBird データのデジタル値からの L_s 変換は、以下のような変換式と表-2 の変換係数（Krause, 2003）に基づいて計算された。

$$L_s = K_\lambda q_\lambda / BW_\lambda \cdots \cdots (2)$$

ここで、 K は放射輝度変換係数、 q はデジタル値、 BW は波長幅をそれぞれ表す。また、太陽天頂角は次式

(Iqbal, 1983) から求めた。

$$\cos \theta_s = \sin \theta \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \cdots \cdots (3)$$

ここで、 ϕ は観測地の緯度 ($^\circ$)、 δ は赤緯 ($^\circ$)、 h は時角 ($^\circ$) である。このうち、 ϕ は QuickBird の画像中心緯度 (28.1292°)、 δ 及び d は Iqbal (1983) の推定式（年月日及び時刻の関数）を、 $ESUN$ は Iqbal (1983) の文献値（波長ごとの $ESUN$ を QuickBird のバンド幅で積分した値）をそれぞれ用いた。以上のようにして求められた本研究で用いた QuickBird データの $ESUN$ 、 d 、 $\cos \theta_s$ の値を表-3 に示す。

表-2 QuickBird の観測波長と放射輝度変換係数(2003 年 6 月 6 日 0 時以前の 16 bit プロダクトデータの場合)

バンド	観測波長(幅) (μm)	$K (W/m^2/sr/count)$
1	0.45-0.52 (0.07)	1.604120×10^{-2}
2	0.52-0.60 (0.08)	1.438470×10^{-2}
3	0.63-0.69 (0.06)	1.267350×10^{-2}
4	0.76-0.90 (0.14)	1.542420×10^{-2}

表-3 反射率計算に使用した $ESUN$ 、 d 、 $\cos \theta_s$ 値

バンド	$ESUN (W/m^2/\mu m)$	d	$\cos \theta_s$
1	1959	0.983	0.922
2	1851		
3	1546		
4	1061		

ところで式 (1) で得られる反射率は、大気の影響を受けており、一般に大気補正を行わなければ、真の反射率と比較することはできない。一方、沿岸部において、衛星データから厳密な大気補正を行うことは、大気パラメータの決定等が複雑で、一般に非常に難しいのも事実である。そこで、本研究では、湖沼の水質解析等によく用いられ、簡便であるが多くの論文で大気補正効果が認められている暗画素法（MacFarlane・Robinson, 1984）と呼ばれる大気補正法を用いて、QuickBird データの大気補正を行った。ここでいう暗画素法とは、画面内の最も暗い画素（一般に清浄な海域の値が使われる場合が多い）の値を大気ノイズ成分（一般にパスラジアンと呼ばれる）として衛星観測した各バンドの値から差し引く方法である。実際の大気補正には、サンゴ礁外の暗い海域の画素値をパスラジアン L_{ps} と仮定して、式 (1) の L_s の値から L_{ps} の値を差し引く処理を行った。

3. 結果及び考察

(1) サンゴの分光特性

図-2 は 4 種類のサンゴの分光反射率測定結果である（ただし図は分光的な特徴を比較しやすいように反射率の最小値を 0、最大値を 1 とする正規化処理を行って

る)。これより今回の測定試料の分光反射率測定結果から次のような一般的な特性がわかる。即ち、これらの種類のサンゴの分光反射率は 400 ~ 500 nm の波長で低く、560 ~ 650 nm の波長で高い。また 675 nm $\pm$ 5 nm 付近の反射率は低く (図-2 の C), 680 nm より長い波長の反射率は急激に上昇する (図-2 の D)。このような分光反射率特性は、従来世界各地で行われてきた分光反射率測定実験結果 (Hochberg ら, 2004) と非常に調和的である。また 675 nm 付近の吸収は、サンゴと共生している藻類 (一般に褐虫藻) によるクロロフィル吸収の影響だと考えられる。さらに詳細なサンゴの分光特性として、600 ~ 650 nm 波長の反射率が平坦な形状をしている場合と長波長側に反射率がやや下がる傾きを持った場合があることがわかる (図-2 の E)。これは、Hochberg ら (2004) が提唱している「blue coral」(可視で紫、青、ピンク、グレーに見えるサンゴ) の特徴であり、「brown coral」(可視で茶、赤、オレンジ、黄、緑に見えるサンゴ) と分光的な区別がなされている。今回の測定で、600 ~ 650 nm 波長の反射率が比較的平坦な形状が見られたのは、*Acropora tenuis* (ウスエダミドリイシ) と *Pocillopora damicornis* (ハナヤサイサンゴ) であったが、他の種類のサンゴとの分光的差異は非常に微細であった。従って、今後のリモートセンシングによるサンゴの種類の区別には、まず 600 ~ 650 nm 波長のハイパー化とともに、この間の分光的な特徴を最大限引き出す感度等が要求されると考えられた。

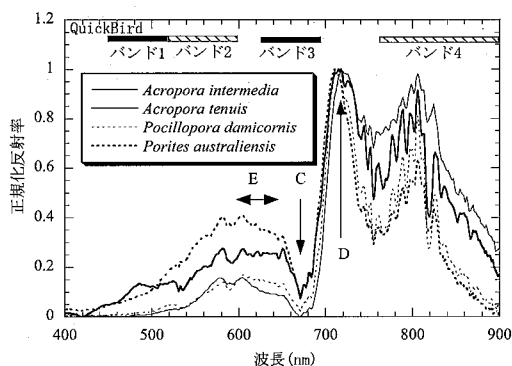


図-2 種別によるサンゴの分光反射率特性

一方、サンゴ礁の底質リモートセンシングを想定した場合の問題点として、分光的な特徴の類似の他、水深 (又は潮位) による分光特性の変化の影響も考えられる。そこで筆者らは、水深ごとの分光も測定した。ただし、白色板は水槽中に入れることができなかったため、水面直上の白色板値を一律入射光の放射輝度とした。図-3 は水深によるサンゴの分光反射率特性の違いを示している。これより 700 nm より長波長では絶対値として大き

な反射率の差が出るが、逆に 700 nm より短波長では水深による反射率の差は小さいことがわかる。これは、700 nm より長い波長の近赤外波長領域では水による吸収が大きい (Morel・Priel, 1977)、長波長ほど水深による分光的な特徴が変化するが短波長では比較的水の吸収が少ないからだと考えられる。これより 700 nm より短波長では水深が異なっても、絶対値の違いはあるものの基本的な分光特性の変化は小さいことがわかる。このことは、リモートセンシングによるサンゴ礁の底質マッピングの際、Lyzenga (1978) の底質指標原理 (底質が同じならば反射率比は一定となる) を応用した「水深補正アルゴリズム」(松永ら, 1999) で、しばしば可視の短波長比 (Landsat TM の場合、「バンド 1 とバンド 2」又は「バンド 2 とバンド 3」等) でよい結果が得られる (松永ら, 2000) ことと調和的である。

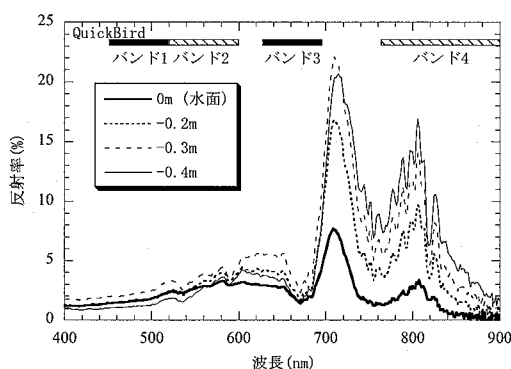


図-3 水深によるサンゴの分光反射率特性の違い

(2) 藻の分光特性

図-4 は藻の分光反射率測定結果である (ただし図-2 同様、反射率の最小値を 0、最大値を 1 とする正規化処理を行っている)。今回の実験で藻の分光反射率データが非常に少なかったため、筆者らが別の場所 (広島県竹原市吉名地区) において測定した藻の分光反射率測定結果 (作野ら, 2006) も同時に表示した。吉名地区で測定した藻は、しばしばサンゴ礁地帯でも見られるアマモ科 (*Zosteraceae*) 及びホンダワラ科 (*Sargassaceae*) の海草である。この図より、基本的な分光特性は、サンゴの特性 (図-2) と陸上の植物の分光特性 (吉村, 1998) と極めて類似していることがわかる。サンゴの分光特性と比較すると、600 ~ 650 nm の傾きが若干大きく、570 ~ 600 nm にかけての細かな吸収・散乱ピーク (例えば 570 nm や 600 nm 付近) は藻の場合は比較的小さいように思われた。ただし Paringit ら (2003) の研究では、550 nm と 690 nm 以上の間で種間での分光反射率の差が大きいと指摘しているように、そのような観点で詳細にみれば種間での違い (570 ~ 600 nm 付近のピークのずれ等) が若干見られた。

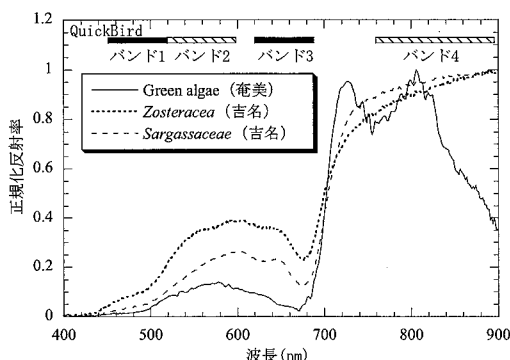


図-4 藻の分光特性

(3) 分光データによる衛星反射率シミュレーション

図-5は測定したサンゴ及び海藻の平均的な分光反射率データを使って、QuickBirdの波長帯における海藻・サンゴの分光反射率を計算した結果である（ただし図-2、図-4と比較するため、計算した反射率の最小値を0、最大値を1とする正規化処理を行っている）。計算されたQuickBirdの反射率データから、バンド2（560 nm付近）とバンド3（660 nm付近）の傾きの閾値を適当に設定する（サンゴと比較して藻の反射率の傾きの絶対値は大きい）ことによりサンゴと藻を区別できる可能性が示されている。ただし、サンゴや藻の種類及び測定条件によっては両者が同様の傾きになることもあり、QuickBirdのような観測波長幅が比較的大きいデータでは慎重な閾値設定が必要である。

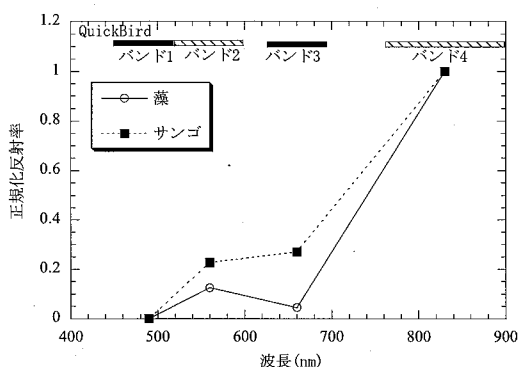


図-5 分光反射率データを使った QuickBird 観測波長における藻とサンゴの分光反射率シミュレーション結果の例

(4) QuickBird データによる検証

図-6は QuickBird 画像(バンド2)の全体画像と水深(日本水路協会販売の沿岸の海の基本図シェープファイル使用)の関係を示している。これより、この画像周辺のサンゴ礁は海岸から沖に 500 m ~ 1 km に渡って水深 10 m の等深線以浅に沿うように発達している様子がよくわかる。このうち、白枠 F 中には写真判読で明らか

に藻場と判読できる地点がある。この地点を含むエリアを切り出し、波長ごとにならべた画像が、図-7である。この図中の G 地点が藻場（北東から南西に伸びる）であり、H 地点がサンゴ地帯である。紙面では白黒画像でわかりにくい、自然色カラー画像で見ると、藻場は鮮やかな緑色をしており、サンゴは茶〜褐色をしている。

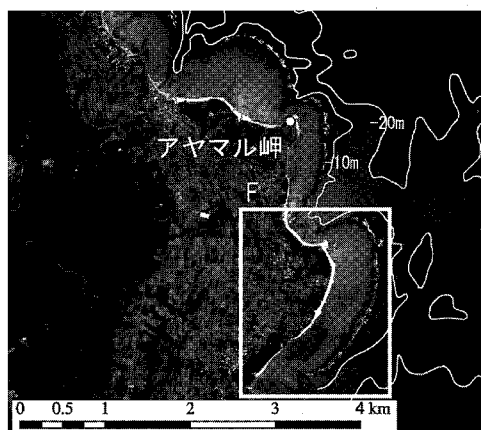


図-6 QuickBird 画像 (バンド2) の全体画像と水深の関係

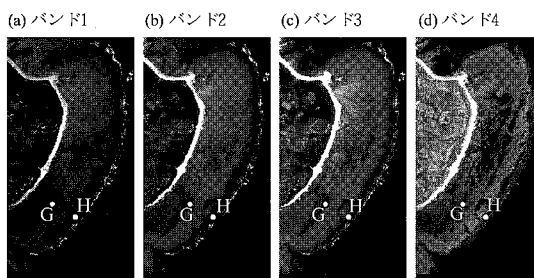


図-7 QuickBird 各バンド画像 (G は藻場, H はサンゴを示す)

次にこれらの2地点が水槽で観測したサンゴや藻の反射率のように再現可能であるか検証するために、式(1)を使って、QuickBird データからサンゴと藻の分光反射率を計算した。その結果を図-8に示す。これより、バンド2の値が若干水槽で観測した結果より大きく、絶対値の大小関係が異なるものの、分光反射率形状（波長間の反射率の比や差等）は図-5と同様であった。このことから、QuickBird のバンド2（560 nm 付近）とバンド3（660 nm 付近）の傾きにより、サンゴと藻の判別が実際にも可能であると考えられた。そこで、実際に QuickBird バンド2とバンド3の反射率比を計算し、サンゴと藻を判別した画像を図-9に示す。図-9のような底質分布は、環境省（2004）の底質図のサンゴ分布や目視判読による藻の分布とよく一致していた。以上から、今回提案した反射率比による方法によって概略的に

QuickBird データからサンゴと藻を判別できる可能性が高いことが示された。

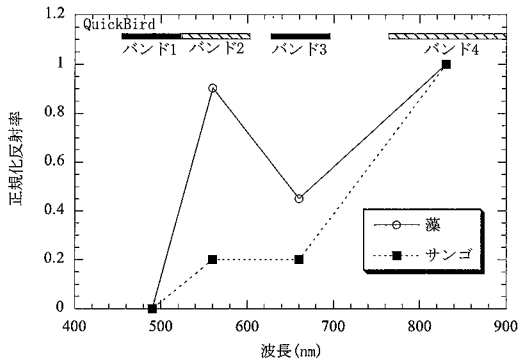


図-8 QuickBird データから推定されたサンゴと藻の反射率

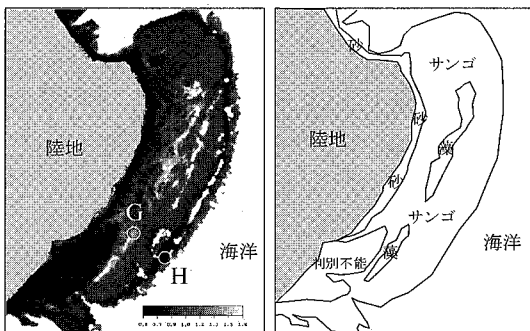


図-9 QuickBird バンド1とバンド2の反射率比 (左) とその画像値から判別された概略的な底質図 (右)

4. ま と め

水族館のサンゴ礁水槽において奄美大島産のサンゴと藻の分光反射率測定を行い、サンゴと藻の基礎的な分光特性を把握した。また、このような分光測定結果と実際奄美大島で撮影された QuickBird データから、バンド2 (560 nm 付近) とバンド3 (660 nm 付近) の傾きにより、サンゴと藻の判別の可能性が示された。今後は、波長分解能の高いハイパースペクトルセンサや藻の季節変化等を利用した判別方法を検討する等、より現実性の高いサンゴ礁底質マッピング手法を検討していくつもりである。

謝辞：本研究は、「平成18年度環境技術開発等推進費」及び「平成18年度科学研究費補助金(若手研究(B))」の助成を受けて行われた。また本研究の現地実験に関しては、奄美海洋展示館の職員の方々、関西気球の若松芳樹氏に大変お世話になった。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 環境省・日本サンゴ礁学会(2004)：日本のサンゴ礁，375p.
- 作野裕司・酒井一徳・山野博哉・松永恒雄(2004)：ASTER 画像から判読した奄美大島のサンゴ礁の特徴と2004年の現地調査結果，第37回日本リモセン学会学術講演会論文集，pp. 181-182.
- 作野裕司・田中力・ルイソチエ・田中義和(2006)：吉名干潟におけるアマモの分光測定実験，第41回日本リモセン学会学術講演会論文集，pp. 161-162.
- Paringit, E. C.・灘岡和夫・M. D. Fortes・波利井佐紀・J. J. Strachan, 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，海工論文集，第50巻，pp. 1386-1390.
- 松永恒雄・梅干野晃・水上陽誠(1999)：石垣島サンゴ礁の多時期 Landsat TM データを用いた礁内水深補正アルゴリズムの検証，第27回日本リモセン学会学術講演会論文集，pp. 323-324.
- 松永恒雄・梅干野晃・水上陽誠(2000)：消散係数比の空間・時間変化と底質指標によるサンゴ礁内経時変化の検出，第28回日本リモセン学会学術講演会論文集，pp. 281-282.
- 吉村晴佳(1998)：葉齢による樹葉の近赤外域分光特性と重なり効果，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 18, NO.1, pp. 42-56.
- Andréfouët, S., P. Kramer, D. Torres-Pulliza, K. E. Joyce, E. J. Hochberg, R. Garza-Perez, P. J. Mumby, B. Riegl, H. Yamano, W. H. White, M. Zubia, J. C. Brock, S. R. Phinn, A. Naseer, B. G. Hatcher and F. Muller-Karger (2003)：Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments, Remote Sens. Environ., 88, pp. 128-143.
- Hochberg, E. J., M. J. Atkinson, and A. A. S. Andrefouët (2004)：Spectral reflectance of coral, Coral Reefs, Vol. 23, pp. 84-95.
- Iqbal, M. (1983)：An introduction to solar radiation, Academic Press, 390p.
- Krause, K. (2003)：Radiometric conversion of QuickBird data, Technical note of Digital Globe, Inc (Release Date: 02/27/2002).
- Lathrop, R. G., T. M. Lillesand and B. S. Yandell (1991)：Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters, Int. J. Remote Sens., 12, 2045-2063.
- Lyzenga D. R. (1978)：Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features, Applied Optics, Vol. 17, No.3, pp. 379-383.
- MacFarlane, N. and I. S. Robinson (1984)：Atmospheric correction of LANDSAT MSS data for a multirate suspended sediment algorithm. Int. J. Remote Sens. 5, pp. 561-576.
- Morel, A. and L. Prieur (1977)：Analysis of variations in ocean color, Limnol. Oceanogr., 22, pp. 709-722.
- Yamano, H., M. Tamura, Y. Kunii and M. Hidaka (2002)：Hyperspectral remote sensing and radiative transfer simulation as a tool for monitoring coral reef health., Mar. Tech. Soc. J., Vol. 36, No. 1, pp. 4-13.
- Yamano, H. and M. Tamura (2004)：Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: Simulation and data analysis, Remote Sens. Environ., 90, pp. 86-103.