

海底分光反射特性解析に基づくサンゴ礁海域衛星 モニタリングの一般化の試み

灘岡 和夫* ・二瓶 泰雄**・横山 智子
大見謝辰男***・下池 和幸****

1. 序 論

沖縄では、農地開発やリゾート開発に伴う森林伐採等によって裸地化が進んでいることから、降雨の際に赤土と呼ばれる土壌が浸食され、その赤土が沿岸海域に流れ込むことが大きな社会問題となっている。その赤土流出が引き起こす環境問題の一つとして、赤土に起因した水質汚濁によってサンゴ礁が大きなダメージを受けるということが従来より数多く指摘されている（例えば、津嘉山ら, 1991）。そのため、赤土流出の実態把握や赤土流出がサンゴの生態環境に与える影響を現地調査により把握する努力（例えば、大見謝, 1996）が精力的に行われているが、一方で、このようなサンゴ礁海域を対象にした汎用的で一般性の高い赤土汚染モニタリング手法の必要性が強く認識されてきている。というのも、沿岸海域における赤土汚染問題の実態解明のためには、広域かつ継続的なモニタリングを行う必要があることから、赤土汚染モニタリング手法としては、比較的容易に広域のデータを継続的に取得できる衛星リモートセンシングに基づく手法が有効と考えられるからである。

この衛星画像を用いた赤土モニタリング手法としては、著者らの一人が、既に、従来のような経験依存型の解析手法とは大きく異なった、光学的原理に基づいた汎用衛星モニタリングシステムを提案し、その妥当性を検証している（灘岡・田村, 1991, 1992, 1993；灘岡, 1995）。この手法では、LANDSAT TM データを用いて、沿岸海域での衛星データ解析を行う上で重要となる水深分布の算定法を開発するとともに、赤土汚染指標として、赤土による海底被覆率や海水の濁り（光の水中消散係数）を合理的に算定する手法を導出することに成功している。しかしながら、そこで対象としている海域は、赤土汚染が進みサンゴ礁が死滅している比較的単調なリーフ海域限定されている。したがって、モニタリング対象海域を

離島をも含めた沖縄全域に拡張した場合、リーフ海域の海底が砂、サンゴ、海藻・海草という複雑な底質要素で構成されていることから、灘岡・田村が提案するモニタリング手法の適用性に問題が生じてくる可能性がある。特に、生きたサンゴを含めて解析しようとする、サンゴ自体の分光反射特性を知る必要がでてくるが、それに関しては、いくつかの現地観測が行われているものの（原島ら, 1994；松永・茅根, 1994）、そこでは水深などの factor をうまく除去できておらず、サンゴの分光反射特性を定量化するまでには至っていない。

そこで本研究では、現地観測によってこれらのサンゴ礁構成要素自体が持つ分光反射特性を明らかにし、得られた分光反射特性をもとに画像解析を行うことによって、より広範な海底被覆状況を対象としたサンゴ礁海域衛星モニタリングの可能性を検討することを試みた。

2. 現地観測に基づくサンゴ礁構成要素の分光反射特性の把握

（1）現地観測の概要

現地観測は、様々な底質の基本的な光学特性をおさえるために、まず、赤土汚染のない沖縄県慶良間列島の阿嘉島で（1996年8月27～31日）、ついで、実際に赤土汚染のある沖縄本島中央部に位置する恩納村で（1996年12月18～21日）行われた（図-1）。サンゴ被覆率の高い阿嘉島では主として数多くの種類のサンゴと白砂地を、そして、赤土流出が時々起きている恩納村では、サンゴ・砂地に加えて、赤土や海藻等の分光反射率を測定することを試みた。ここで、底質の分光反射率を求めるために、分光照度計（（株）阿部設計製）を用いて、海底に位置する対象物に対してほぼ真上より分光照度計を向けて測定を行った。また、ここで対象とする光の波長帯域は、可視光域の 400～750 nm の範囲で、阿嘉島では 50 nm、恩納村では 25 nm ごとに分光反射率を測定した。

（2）海底反射率の算定法

この分光照度計から得られるバンド i における分光入射光量 $E_{\lambda i}$ は、以下のように表される（例えば、杉森, 1982）。

* 正会員 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

** 正会員 工修 東京工業大学助手 大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

*** 沖縄県衛生環境研究所 環境生活部赤土研究室長

**** 阿嘉島臨海研究所研究員

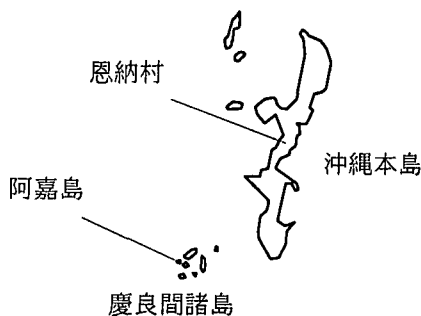


図-1 観測海域の概略図

$$E_{1i} = [\Gamma_i \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi) K_i h\} + \Gamma_{a1wi}] \cdot L_i \Delta \lambda_i + I_{sci} \quad (1)$$

ここで、 Γ_i : 海底(底質)の反射率, θ, ϕ : 水中での屈折角, 反射角, K_i : 光の水中消散係数, h : 水深, Γ_{a1wi} : 水表面での反射率, L_i : 単位波長帯幅あたりの太陽光量, $\Delta \lambda_i$: 波長帯幅, I_{sci} : 水中, 大気中の散乱光のうちセンサーに入射するものの和, である。この分光入射光量から底質からの分光反射率 Γ_i を求めるためには, 水表面からの反射光や水中・大気中からの散乱光成分を除去するのみならず, 太陽光量や水深などの影響を何らかの形で取り除く必要がある。そこで, ここでは, 灘岡(1995)にならって, あらかじめ分光反射率が求められている白色板と黒色板を海底に置いて, そこでの分光入射光量を測定した。白色板と黒色板の反射率を, それぞれ, Γ_{2i} , Γ_{3i} とすると, それぞれの入射光量 E_{2i} , E_{3i} は以下のようになる。

$$E_{2i} = [\Gamma_{2i} \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi) K_i h\} + \Gamma_{a1wi}] \cdot L_i \Delta \lambda_i + I_{sci} \quad (2)$$

$$E_{3i} = [\Gamma_{3i} \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi) K_i h\} + \Gamma_{a1wi}] \cdot L_i \Delta \lambda_i + I_{sci} \quad (3)$$

この式(1)~(3)を用いることにより, 水深や太陽光量などの効果を合理的に除去した海底反射率 Γ_i に関する式が, 以下のような形で導出される。

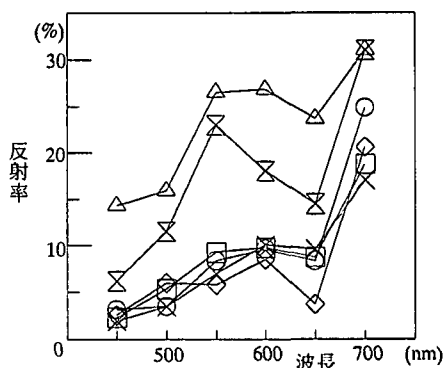
$$\Gamma_i = \Gamma_{3i} + (\Gamma_{2i} - \Gamma_{3i}) \frac{E_{1i} - E_{3i}}{E_{2i} - E_{3i}} \quad (4)$$

なお, ここで用いられた白色板, 黒色板の反射率は, 分光光度計の付属品となっている標準白色板の反射率を100%とした場合の値から算出されており, 白色板はほぼ100%, 黒色板は約5%の反射率となっていた。

(3) 底質構成要素の分光反射特性

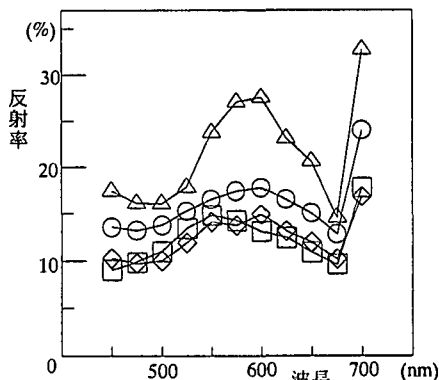
以下に, 2. (2) で示した手法に基づいて得られた海底反射率の結果について示す。まず, ささまざまな形や色を有するサンゴ自体に関する分光反射特性を図-2に示す。図中には, 阿嘉島, 恩納村, それぞれの観測ポイントにおいて, 卓越して存在していたサンゴに関する分光

- △ チヂミウスコモンサンゴ × オヤユビミドリイシ
◇ クシハダミドリイシ ○ ミドリイシの一種
□ オトメミドリイシ × エダコモンサンゴ



(a)阿嘉島

- ユビエダハマサンゴ ○ トグスギミドリイシ
△ クシハダミドリイシ ◇ エダコモンサンゴ



(b)恩納村

図-2 サンゴの分光反射特性

反射特性が示されている。なお, これらのサンゴに関する詳細な特徴は, 例えば西平・Veron (1995) に記載されているため, 紙面の都合上, ここでは省略する。これらの図を見てみると, サンゴの分光反射率は, 575~600 nm までは, 全体的に, 波長とともに大きくなり, 650 nm, もしくは, 675 nm において明確な凹のピークが現れている, という共通した特徴が存在していることが分かる。このような凹のピークの存在は, サンゴのポリプ内でサンゴと共生している褐虫藻と呼ばれる植物プランクトンのもつ光の吸収帯の効果によるものと考えられる(原島ら, 1994)。凹のピーク以外の分光反射特性も全体的に似かよっており, サンゴの分光反射特性が, サンゴに共通して存在する褐虫藻の光学的特性によって基本的特徴づけられていることが示唆される。

次に, サンゴ以外の底質構成要素である赤土や白砂(死

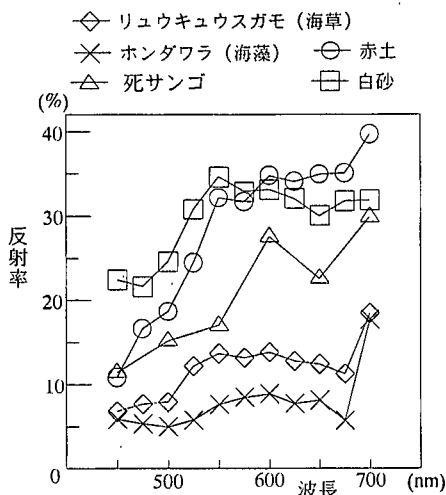


図-3 サンゴ以外の底質構成要素の分光反射特性(死サンゴのみ阿嘉島, それ以外は恩納村)

滅したサンゴが起源になっているもの), 海草, 海藻, 白化した死サンゴに関する分光反射特性を図-3に示す。これを見ると, 赤土や白砂に関しては, 反射率が全体的に大きく, 550 nm より大きい波長領域では比較的フラットな分光反射特性となっており, サンゴで見られた 675 nm における凹のピークはほとんど見られない。また, 海草や海藻に着目してみると, 反射率が全体的に 10% 程度で, 675 nm における凹のピークが見受けられるなど, サンゴとかなり類似した分布になっているが, 詳細に比較してみると, 凹のピークがサンゴほど明確でない傾向になっていることが分かる。白化した死サンゴは, 全体的な分布パターンとしては白砂と非常によく似ているが, これは, 褐虫藻がポリプ内にいないために白っぽい色をしているためである。しかしながら, 死サンゴの分光反射特性をさらに詳しく見てみると, その反射率の大きさが白砂と比べて全体的に小さく, しかも, 650 nm に凹のピークの存在が見受けられる。これは, 死サンゴの表面に藻類が付着していることによる。

このように, サンゴ礁を構成する底質の分光反射特性は, それぞれ異なっていることから, この特性の違いを生かしてサンゴ礁海域の海底被覆状況を分類・判別することが可能であることが示された。

(4) 衛星画像の波長帯域から見たサンゴ礁海域構成要素の分光反射特性

これまで得られた観測データ結果を衛星画像解析で利用するには, 観測データを衛星で使用している波長帯域に対応したデータに変換する必要がある。すなわち, 上述の現地観測では, 波長 25 nm (阿嘉島では 50 nm) ごとのデータを取得しているが, 本研究に用いている

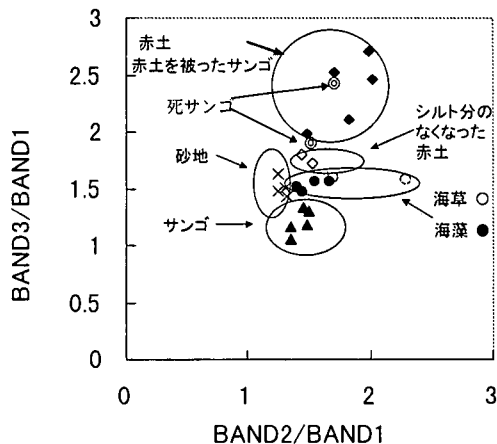


図-4 現地観測データの BAND 間の反射率比による分類

LANDSAT の TM センサーは, 可視域では, それより広い波長帯幅の BAND 1 (450~520 nm), BAND 2 (520~600 nm), BAND 3 (630~690 nm) の 3 つの波長帯域で測定している。そこで, 現地観測で得られた分光反射率をこの 3 つの BAND の波長帯域の値に変換して考察することを試みた。その結果, 海草・海藻とサンゴは, 共に植物プランクトンを有するため, 675 nm 付近, つまり BAND 3 での値が類似しており, 単一 BAND のみでの分類は困難であることが明らかになった。そこで, 図-4に示すように, 複数の BAND 間の反射率の比をとることを試みたところ, 各構成要素ごとに, おおまかに分類されることが分かった。その詳細を見てみると, I_2/I_1 に関しては, 白砂地が最も小さくなっているのに対して, I_3/I_1 に関しては, サンゴが最も小さく, 赤土が最も大きくなっているという大小関係が得られており, これらの傾向は, 図-2, 3 で示した各底質構成要素の分光反射特性の結果と概ね一致している。

以上のことから, 衛星画像解析で用いる各 BAND の波長帯域で分光反射特性を見た場合にも, BAND 間の反射率の比を利用することにより, サンゴ礁海域構成要素ごとに異なった特徴を抽出することができ, この分光反射特性に基づくことにより, サンゴ礁海域底質構成要素の分類を行うことが可能となることが見いだされた。

3. サンゴ礁海域に対する衛星画像解析の適用性に関する検討

(1) 衛星画像解析手法の概要

上記したようなサンゴ礁海域における底質構成要素の分光反射特性を用いて, LANDSAT の TM データに基づいた衛星画像解析を行うことを試みた。ここで適用する解析手法は, 灘岡・田村 (1993), 灘岡 (1995) をベースにしたものであるため, 詳細については省略し, 重要

なポイントだけを以下に述べる。

まず、リモセン画像データから得られる輝度値に対して、バンド5を用いた大気補正を行う。その結果、深海域における輝度データを用いて、水表面での反射光や水中・大気中の散乱光の成分を取り除いた後のバンド*i*における補正輝度値 V_i が、以下のように記述される。

$$V_i = T_{Ai} [I_i \exp\{-(-\sec \theta + \sec \phi) K_i h\}] \cdot L_i \Delta \lambda_i / S_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 T_{Ai} : 大気透過率、 S_i : センサー感度の逆数である。式(5)を用いて、バンド1, 2, 3の間の比を取ることで、2. (4) で述べたサンゴ礁海域における底質分類指標としての I_2/I_1 , I_3/I_1 が以下のように記述される。

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_2}{V_1} \frac{T_{A1} L_1 \Delta \lambda_1 S_2}{T_{A2} L_2 \Delta \lambda_2 S_1} \cdot \exp\{(\sec \theta + \sec \phi)(K_2 - K_1)h\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{I_3}{I_1} = \frac{V_3}{V_1} \frac{T_{A1} L_1 \Delta \lambda_1 S_3}{T_{A3} L_3 \Delta \lambda_3 S_1} \cdot \exp\{(\sec \theta + \sec \phi)(K_3 - K_1)h\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、大気透過率をエアロゾルを考慮しないで簡単に見積れば(近藤, 1994), 以下のような値を得ることができる。

$$\frac{T_{A1} L_1 \Delta \lambda_1 S_2}{T_{A2} L_2 \Delta \lambda_2 S_1} = 2.759 \quad \dots\dots\dots (8a)$$

$$\frac{T_{A1} L_1 \Delta \lambda_1 S_3}{T_{A3} L_3 \Delta \lambda_3 S_1} = 1.748 \quad \dots\dots\dots (8b)$$

また、水中への屈折角 θ , 反射角 ϕ は画像データ撮影時における太陽高度より与えられる。光の水中消散係数 K_i に関しては、ここでは、灘岡 (1995) の比較的近い時期に行われた現地観測結果を用いて、 $K_1 = 1.96 (\text{m}^{-1})$, $K_2 = 1.62 (\text{m}^{-1})$, $K_3 = 2.85 (\text{m}^{-1})$, として、空間的に一定に与えている。さらに、水深を灘岡・田村 (1993) が提案している手法で求めれば、これらを式 (6), (7) に代入することにより、BAND 間の海底反射率の比を求めることができる。

(2) 衛星画像解析結果

ここで対象とする画像データは、1992年5月28日において沖縄本島中央部を撮影したものであり、現地観測も行った沖縄県中央部に位置する恩納村屋嘉田潟原を中心にデータ解析を行うことを試みた。この屋嘉田潟原における底質状況は、図-5に示す航空写真のように、赤土や海草・海藻、白砂、サンゴで構成された典型的な赤土汚染されたサンゴ礁海域である。図中のA~E点の横には、その周辺で卓越している底質要素が付記されている。なお、E地点における赤土は、A地点よりもシルト成分が減少しており、赤色がやや薄いである。

この海域に対して、前節で述べた手法に基づいて、底質の海底反射率のバンド間の比を求めた結果を図-6に

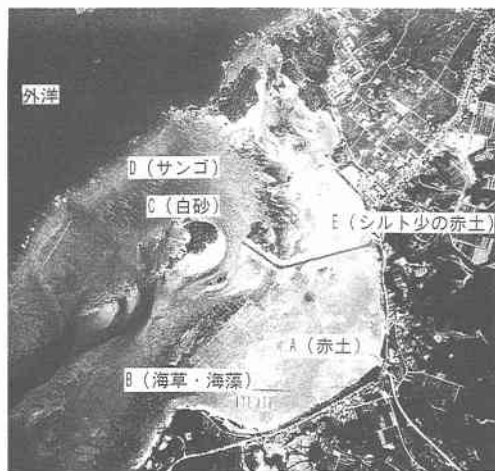
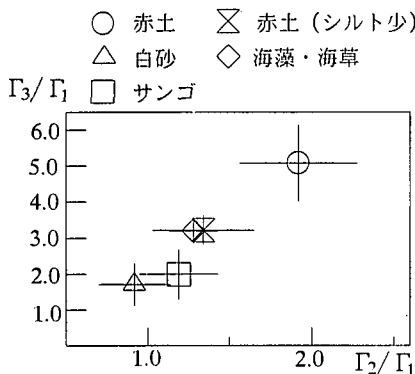


図-5 ヤカカタハラの底質状況
(航空写真上にプロット)

示す。図中に示されている画像解析データは、図-5に示されているA~E地点周辺から得られたものである。また、この図に関しては、各マーカの中心位置が、対応する底質要素の海底反射率の平均値データであり、実線はその分散を表している。これらの図を見ると、 I_2/I_1 は、全体的には、白砂が小さく、サンゴ、海草・海藻やシルト少の赤土は同程度で、赤土はやや大きくなっている。また、 I_3/I_1 に関しては、赤土が最も大きく、次いで、シルト少の赤土と海草・海藻が同程度で、サンゴや白砂が相対的に小さくなっていることが分かる。このようなことから、分光反射率のバンド間比に関する定性的な大小関係は、概ね、図-4に示されている現地観測結果と一致していることが分かる。しかしながら、 I_3/I_1 の値自体は、全般的に、観測結果より大きくなっており、また、 I_3/I_1 における白砂とサンゴの大小関係に関しては、現地観測では、サンゴの方が小さくなっているものの、衛星画像解析結果では、白砂の方がやや小さくなっている。これらは、ここで示している画像データ処理過程において、エアロゾルを考慮しないで大気透過率を与えているなど、シンプルな形で大気補正を行っていることの影響を大きく受けているものと考えられる。この点に関する改善が、今後の大きな課題の一つである。

このような課題が残るものの、ここで示した手法により、衛星画像解析データから算出された底質構成要素の分光反射特性が、図-6に示されているように、定性的には、図-4に示されている現地観測結果と良好に一致していることから、灘岡・田村 (1993) の衛星画像解析手法をベースとして発展させた本論文の手法が、サンゴ礁海域における底質状況の把握に有効な手法となることが検証された。



図一6 画像解析による BAND 間の反射率比

4. 結 論

本研究では、沖縄本島及び離島における現地観測によって、サンゴ礁海域での底質構成要素がそれぞれ特徴的な分光反射特性を有することを明らかにした。さらに、この特性をもとに、衛星画像上での海底被覆分類が可能であることを示すことにより、より広範な海底被覆状況下でのサンゴ礁海域衛星モニタリングの可能性を実証した。

謝辞：本研究を遂行する際に、(財)電力中央研究所・田村英寿氏に数多くの有益な助言をいただいた。ここに

記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 大見謝辰男 (1996): 赤土堆積がサンゴに及ぼす影響, 沖縄県衛生環境研究所報, Vol. 30, pp. 79-86.
- 近藤純正 (1994): 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店.
- 杉森康宏 (1982): 海洋のリモートセンシング, 共立出版.
- 津嘉山正光・仲座栄三・高良尚樹・大山幸徳 (1991): 南西諸島海域における赤土流出の実態と新たな防止工法の開発, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 911-915.
- 灘岡和夫・田村英寿 (1991): 衛星画像データによる沖縄リーフ海域における赤土堆積状況把握の試み, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 906-910.
- 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, Vol. 12, No. 3, 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.
- 灘岡和夫 (1995): 衛星画像データに基づいた沖縄赤土流出モニタリングシステムの開発と汎用化, 平成 5 年度文部省科学研究費補助金 (試験研究 B(1)) 研究成果報告書.
- 西平守孝・Veron, J. E. N. (1995): 日本の造礁サンゴ類, 海遊舎.
- 原島 省・宮崎忠国・御前 洋・浅井信吉・鈴木孝雄・興石 隆, 中谷幸廣, 稲見 薫 (1994): サンゴ礁のモニタリング (1) 水中分光輝度計測, 日本海洋学会春期大会講演要旨集, pp. 328-329.
- 松永恒雄・茅根 創 (1994): 携帯型分光計による石垣島サンゴ礁の上向き分光放射輝度の測定, 日本リモートセンシング学会学術講演会論文集, 第 17 回, pp. 33-36.