

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

灘 岡 和 夫*・田 村 英 寿**

1. はじめに

衛星リモートセンシングを利用した沿岸海洋汚染の解析は従来から盛んに行われているが、その対象としては、水表面付近における水質汚濁・水温に関するものがほとんどである。しかしながら、沿岸海洋汚染の実態解明に当たっては、海底底質に関する情報が必要とされる場合も少なくない。

そこで本研究では、可視光にはある程度の中透過性があるという点に着目し、水深が 10 m 程度以下で水が比較的澄んだ穏やかな沿岸海域では海底底質情報の抽出が原理的に可能であると考え、それによる沿岸海洋汚染の評価を新たに試みた。

具体的には、ここでは解析対象として沖縄のリーフ海域における赤土堆積問題を取り上げ、LANDSAT 衛星画像データによるリーフ海域での海底における赤土堆積状況の把握を試みた。

2. 解析対象領域ならびに衛星画像データの概要

本論文で示す内容は、沖縄本島中北部におけるリーフ海域の衛星画像データを対象とした解析結果である。

衛星データとしては、LANDSAT 5 号の TM センサーによる画像データを用いている。このセンサーには可視域から熱赤外域の範囲内に 7 つの波長域 BAND が設定されており、それらの空間解像度は BAND 1~5 および 7 で約 30 m, BAND 6 で約 120 m である。このうち、BAND 1~3 は可視光領域にあって、大体 BAND 1 が青、2 が緑、3 が赤色の波長域に対応している。これらの可視光はある程度の中透過性を有し、特に、透過率の高い青・緑色の波長域データでは、澄んだ海域において約 12 m 程度までの深さの情報を得たという報告がある(黒田ら, 1977)。

沖縄本島の沿岸域には、図-1 に模式的に示すように、沖合数 100 m ないし数 km にまで広がる、ごく浅い水深のリーフ海域が存在している。このリーフ海域の

水深は、潮位にもよるが、およそ 1~3 m 程度であり、比較的深い場所でも 10 m 以下である。また、降雨時にこの海域に流出した赤土は、その大半が 2~3 日のうちに海底に堆積し、海水の濁りはほとんど見られなくなることが知られている(翁長ら, 1990)。ここで対象とした衛星画像データの撮影日(1986年 7 月 15 日)には、その 1 週間ほど前から晴れないし曇りといった穏やかな天候が続いていたことから、リーフ海域の水は比較的よく澄んでいたと考えられる。

このようなことから、今回対象とした可視光領域の衛星画像データを解析することにより、沖縄リーフ海域における赤土堆積状況に関する海底情報を抽出することが可能であると考えられる。

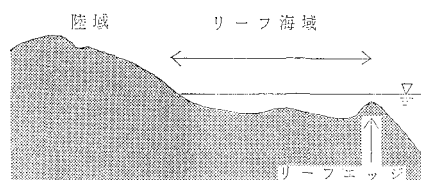


図-1 沖縄本島海岸部の断面図(模式図)

3. 解析手法

(1) 画像データの前処理

解析対象とする衛星画像には、海域の他に陸域や雲などが混在していることから、それらをまず分離しておく必要がある。ここでは、近赤外波長域にある BAND 4 の輝度値が海域でかなり小さくなるという事実を利用して海域の分離を行った(沢本ら, 1985)。

また、海域のような輝度値の場所的な変化が微小な領域においては、パスラジアンズなどの大気の影響が無視し得ないものとなる。そのため、分離後の海域画像データに対して何らかの大気補正を行う必要があるが、ここでは、大気の影響がない場合に近赤外領域の BAND 4, 5 の輝度値が海域でほとんどゼロになることを利用してこの補正を行った。すなわち、この BAND の輝度値がゼロからずれていれば、その偏差が大気の影響に相当す

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 学生員 東京工業大学大学院 土木工学専攻

ると考えて、本来の解析対象としている可視領域の BAND 1~3 の輝度値からその偏差値を差し引くことで大気の影響を除去ないしは軽減することを試みた。

なお、BAND 4 のデータにはストライピングノイズの影響が強く見られたため、ここでは BAND 5 の輝度値を用いて上記の補正を行ったが、各バンドに含まれる大気の影響が BAND 5 と同じ輝度値で現れるとは限らないため、本来ならば BAND 5 の輝度値に適当な重みを掛けて差し引きを行う必要がある。しかしながら、今回使用したデータに関しては、単純に重みを 1 として演算処理を行ったところ、BAND 1~3 の各 BAND とも良好な結果が得られた。

(2) 画像解析上のポイント

さきに述べたように、水深がごく浅いリーフ海域を対象とする場合には、ある程度の水中透過性を有する可視光領域の衛星画像データを用いることにより、海底の赤土堆積状況に関する情報を得ることが原理的に可能なのである。しかしながら、このことは同時に、水深の違いによる光の減衰など水深の変化に直接関連した情報も輝度データに反映し得ることを意味している。

そこで、ここではまず、これらのことを具体的に把握しておくために、赤土堆積の有無と水深変化の効果が画像データにどのように現れるかを具体的にしておくことにする。

図-2 (a)~(c) は、沖縄本島の海図からある程度のリーフ上の水深データが得られる場所の中で、赤土堆積が見られる場所(名護市屋我地島周辺)と見られない場所(知念村知念岬周辺)の 2 箇所を選定し、それぞれについて BAND 1~3 の輝度値を横軸に水深 h をとって示したものである。これを見ると、以下のことがわかる

- 1) 赤土堆積がある場所では、ない場所と比べて BAND 1 では輝度値が低く、BAND 2 では同程度、BAND 3 では若干高くなるという傾向が現れている。
- 2) 各 BAND とも、小さな水深領域で輝度値が明確な水深依存性を示しており、逆にある水深以上になると輝度値はほぼ一定になる。
- 3) 特に BAND 3 では、他の 2 つの BAND と比べてより浅い水深から一定の輝度値となっている。

上記の 1) のような形で赤土堆積の有無が輝度データに反映していることから、これらの画像データから赤土堆積状況に関する情報を抽出できる可能性があることがわかる。しかしながら、赤土堆積がない場所においても水深の違いによって輝度値がかなり変化しており、このような生の輝度値のままでは、赤土堆積状況そのものを表す指標とはなり得ないことがわかる。

また、赤土堆積の有無に対する輝度値の差はそれほど明瞭ではない。このことも、このような生の輝度値のま

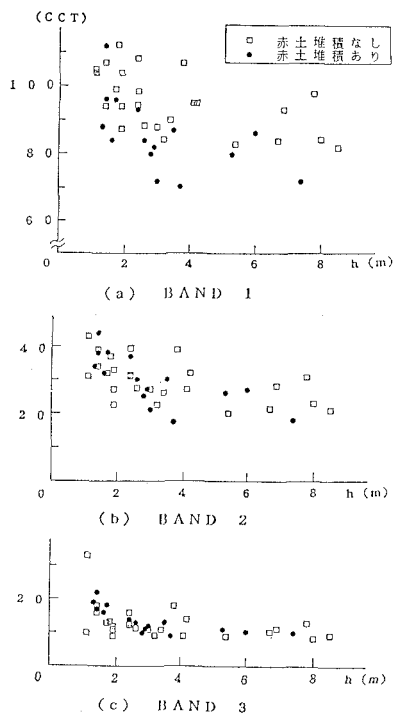


図-2 BAND 1~3 の輝度値と水深との関係

までは有用な赤土堆積指標となり得ないことを意味している。

したがって、i) 水深依存性ができるだけ小さく、ii) 赤土堆積の有無や程度をできるだけ鋭敏に反映し得る、合理的な赤土堆積指標を新たに開発する必要がある、その成否が衛星画像から赤土堆積情報を得ることの可能性を基本的に左右することになる。

なお、ある程度の水深まで明確な水深依存性が現れるということは、その程度までの水深であれば海底情報を抽出し得ることを意味しているが、3) で述べているように、BAND 3 ではこの水深がごく浅い。このことは、BAND 3 の波長域の光が、BAND 1 や 2 と比べて水中透過性が低下することと対応している。したがって、対象が赤土だからということで、単純に赤色に近い BAND 3 の輝度データだけを用いることには問題がある。

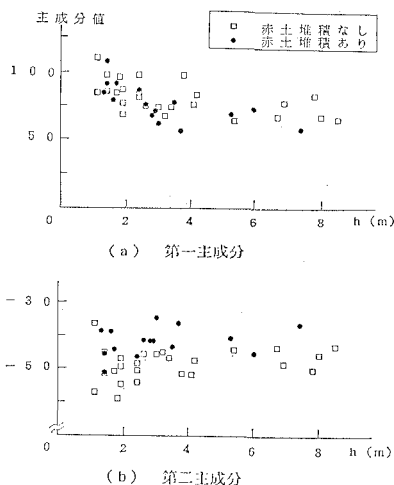
(3) 赤土堆積指標の開発

ここでは、3 つの方法に基づいて赤土堆積指標を導出することを試みた。そのうちの二つは、衛星画像解析によく用いられる主成分分析ならびにバンド間の差をとるという手法に基づくもので、残る一つは今回新たに開発した光学的原理に基づく理論的指標である。

以下に、これらの 3 つの手法による指標の内容について述べるとともに、具体的な解析結果を示すことによって、今回新たに理論的に導いた堆積指標が最も妥当なものであることを示す。

表—1 主成分分析による計算結果

	第1主成分	2	3
BAND 1	0.4965	-0.6218	0.4334
2	0.8529	-0.0275	-1.0172
3	0.6584	0.8930	0.5278
寄与率	77.7%	20.2%	2.1%

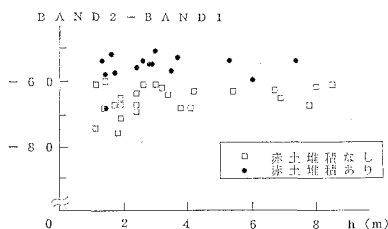


図—3 各主成分と水深との関係

a) 主成分分析による方法

1～3の各 BAND の輝度値には水深の影響などのような共通因子が含まれることから、これらの各バンドの輝度値は互いにある程度相関関係をもち、主成分分析によるデータの集約が可能であると考えられる。そこで実際に解析対象としているリーフ海域の BAND 1～3 のデータに関して主成分分析を行うことにより、これらの3バンドのデータを総合化した指標を得ることを試みた。

表—1に、主成分分析の結果を示す。これから、第1主成分と第2主成分の寄与率が、それぞれ約78%および約20%で、この2つで全体の寄与率の98%近くを占めていることがわかる。そこで、(2)で述べた2箇所について、この2つの主成分の水深および赤土の有無に対する依存性を調べてみた。その結果が、図—3(a), (b)である。まず第一主成分を見ると、赤土堆積の有無にはほとんど無関係で、かつ全体的に右下がりの分布形になっていることから、これが水深情報を主として表す指標となっていることがわかる。一方、第2主成分は、逆に水深にはほとんど依存しておらず、赤土堆積の有無に対応してデータが分離して現れている。したがって、この第2主成分が赤土堆積指標として使える可能性があるが、水深依存性はかなり除去できているものの、赤土堆



図—4 BAND 1, 2の差による赤土堆積指標と水深との関係

積の有無に対する指標値の分離具合は十分とはいえない。

b) バンド間の差をとる方法

上記のように、各 BAND の輝度値には水深情報が含まれているが、これはどの BAND にも現れる共通要因である。このような場合、この共通要因を取り除くためによく用いられる方法として、2つのバンド間で輝度値の差をとる方法がある。そこでここでは、水中透過率が比較的高い BAND 1, 2 を対象としてその輝度値の差をとる演算処理を行った。その場合、本来は各輝度値に対して重みをつけて演算処理を行う必要があるが、ここでは濁りの少ない沿岸海水中でのこの2つの波長域における水中消散係数すなわち水中透過率がほぼ等しいこと(杉森, 1982)を考慮して、重みを1として計算した。

図—4は、この演算によって得られた値に関して、やはり先ほどと同様に水深及び赤土堆積の有無に対する依存性を調べた結果を示したものである。これから、この指標値に水深依存性がほとんど見られず、しかも先の第2主成分の指標に比べて赤土堆積の有無に対する値の分離具合が向上していることがわかる。しかしながら、この程度の分離ではまだ赤土堆積指標としては十分ではなく、実際にこの指標で画像を作成してみたところ、特にリーフエッジあたりで値が高くなってしまうという不合理な点が現れてしまった。

c) 光学的原理に基づく理論的堆積指標

(バンド間の比をとる方法)

そこで最後に、光学的原理に基づいた理論的な考察により、より合理的な指標を導出することを試みた。

海底面における赤土堆積の有無や程度の違いは、海底面での光の反射特性の変化となって現れると考えられる。そこで、ここではまず各 BAND のセンサーへの入射光量に関して光の散乱・吸収・反射を考慮した理論式をたて、さらに若干の仮定を導入したうえで理論展開を行うことにより、海底での反射特性を表す指標を導いた。

まずセンサーへの BAND i の入射光量は、次式のように表せる(例えば、杉森, 1982)。

$$E_z(d\lambda_i) = [I'(\lambda_i) \exp\{-(\sec \theta + \sec \phi)K(\lambda_i)h\} + \Gamma_{a/w}(\lambda_i)]L_{\lambda_i}d\lambda_i + I_{so}(d\lambda_i) \cdots (1)$$

ここに、

$E_s(\Delta\lambda_i)$: センサーへの入射光量, h : 水深

$\Gamma(\lambda_i)$: 海底面での反射率, L_λ : 入射光と天空光の和

$\Gamma_{a/w}(\lambda_i)$: 水面での反射率, $\Delta\lambda$: 波長帯幅

$K(\lambda_i)$: 水中での消散係数, θ, ϕ : 水面下の入射屈折角

$I_{sc}(\Delta\lambda_i)$: 水中・大気中の散乱光のうちセンサーへ入射するものの和。

ここで、水深が十分に大きい海域におけるセンサーへの入射光量 $E_\infty(\lambda_i)$ を導入することにより、式 (1) は次のように表される (以下、深水域および浅水域の海水の光の透過率は等しいという仮定で議論を進める)。

$$E_s(\Delta\lambda_i) = \Gamma(\lambda_i) \exp[-(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_i) h] \cdot L_{\lambda i} \Delta\lambda_i + E_\infty(\Delta\lambda_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここでは水中透過率の良い BAND 1 と 2 のみを対象とすることとし、それぞれについて式 (2) をたて、それを用いて次のように水深 h の影響を排除する。

$$\frac{\ln \frac{E_s(\Delta\lambda_2) - E_\infty(\Delta\lambda_2)}{\Gamma(\lambda_2) L_{\lambda 2} \Delta\lambda_2}}{\ln \frac{E_s(\Delta\lambda_1) - E_\infty(\Delta\lambda_1)}{\Gamma(\lambda_1) L_{\lambda 1} \Delta\lambda_1}} = \frac{(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_2) h}{(\sec \theta + \sec \phi) K(\lambda_1) h} = \frac{K(\lambda_2)}{K(\lambda_1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、BAND 1, 2 の消散係数がほぼ等しいとみなして (杉森, 1982), $K(\lambda_1) = K(\lambda_2)$ と仮定することにより、式 (3) は次のように表される。

$$\frac{E_s(\Delta\lambda_2) - E_\infty(\Delta\lambda_2)}{\Gamma(\lambda_2) L_{\lambda 2} \Delta\lambda_2} = \frac{E_s(\Delta\lambda_1) - E_\infty(\Delta\lambda_1)}{\Gamma(\lambda_1) L_{\lambda 1} \Delta\lambda_1} \quad \dots\dots\dots (4)$$

さらに、センサーの出力 V_i は入射光量 $E_s(\Delta\lambda_i)$ に比例するので、比例定数を α_i として

$$V_i = \alpha_i E_s(\Delta\lambda_i) \quad \dots\dots\dots (5)$$

とすると、最終的に次式が得られる。

$$\frac{V_2 - V_{\infty 2}}{V_1 - V_{\infty 1}} = C \frac{\Gamma(\lambda_2)}{\Gamma(\lambda_1)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

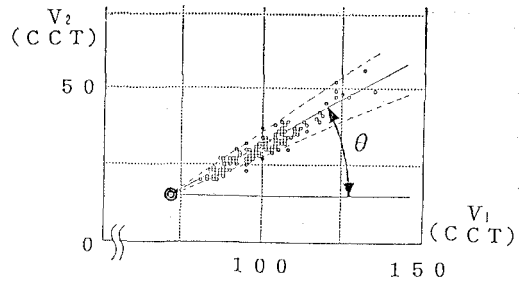
ここに、

$$C = \frac{\alpha_2 L_{\lambda 2} \Delta\lambda_2}{\alpha_1 L_{\lambda 1} \Delta\lambda_1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

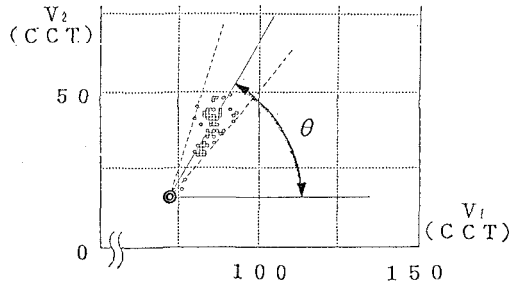
で、したがって、この C は場所に依存しない定数とみなせる。このことから、式 (6) の左辺は海底面の反射特性を表す指標となっていることがわかる。

さきに述べたように、ここではこの反射特性指標 (具体的には BAND 1 と BAND 2 の海底での反射率の比に比例する量) が赤土堆積状況を表す指標になると考えている。図-5 (a), (b) は、このことを具体的に検討したもので、BAND 1 と 2 の輝度値 V_1 と V_2 を横軸と縦軸として表している。図中の◎印は、水深無限大での輝度値に対応する座標 ($V_{\infty 1}$, $V_{\infty 2}$) を示している。

式 (6) の左辺で示される指標は、このグラフ上でちょうどこの◎印を起点とした傾き θ を表わしているが、この図からわかるように、赤土堆積があるケースではな



(a) 赤土堆積が見られない場所 (知念岬付近)



(b) 赤土堆積が見られる場所 (久志湾湾岸部)

図-5 赤土堆積の有無による BAND 1, 2 の輝度特性

いケースに比べて θ が全体的にかなり大きくなっており、しかもある程度の分布幅を持っている。したがって式 (6) の左辺の値が赤土堆積指標として十分使える可能性があることがわかる。

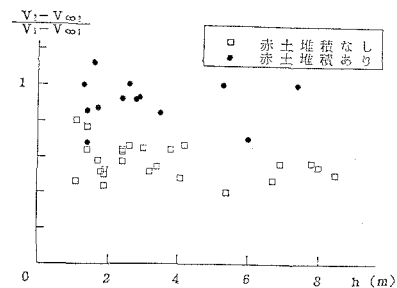


図-6 光学的原理に基づいた理論的赤土堆積指標と水深との関係

そこで、この指標の定量的な面での特性を a) と b) で示した指標と比べるため、さきと同様に、この指標について水深及び赤土堆積の有無に対する依存性を調べた。その結果が図-6 である。この結果から、この指標の示す値に水深依存性がほとんど見られず、しかも赤土堆積の有無に対する値の差が、他の指標のものと比べてかなり大きくなっていることがわかる。したがってこれらのことから、ここで理論的に導いた指標が、赤土堆積指標として最も優れたものであることがわかる。

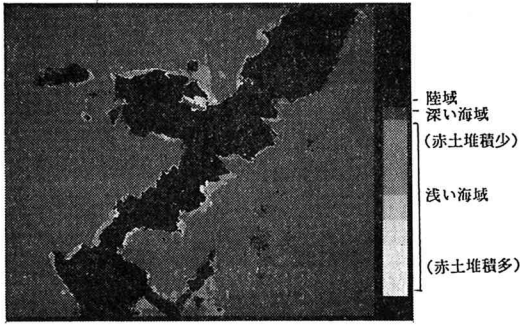


図-7 理論的赤土堆積指標による画像

図-7 は、この理論的指標を用いて作成した沖縄本島リーフ上の赤土堆積状況を示す画像である。一方、図-8 は、沖縄県公害衛生研究所によって測定されたリーフ上の底質のサンプリング結果（大見謝・池間，1990）を示したもので、図中の記号がサンプリングポイントを表しており、その中の■印が赤土堆積が顕著にみられた場所を示している。図-7 をこの図-8 と比較することにより、ここで示した指標値による値が、実際の赤土堆積状況とよく合致した結果を示していることがわかる。

4. おわりに

本研究では、可視光がある程度の中透過性を持つことに着目し、衛星リモセンデータによって沖縄リーフ海域の海底における赤土堆積状況を把握することを試みた。そして光学的原理に基づいた理論的な考察により、リーフ海域における衛星画像データの解析法として、水深の影響が排除でき、しかも赤土堆積状況をよく反映しうる指標を新たに導いた。またそれを実際に沖縄のリーフ海域データに適用することにより、その有効性を確認した。

ただし、式（6）の形からわかるように、この指標は赤土やリーフの分光反射特性が解析対象領域内でほぼ一定であることを前提としている。実際にはこの仮定は成立するとは限らないので、その点を考慮した改良を今後行っていく必要がある。

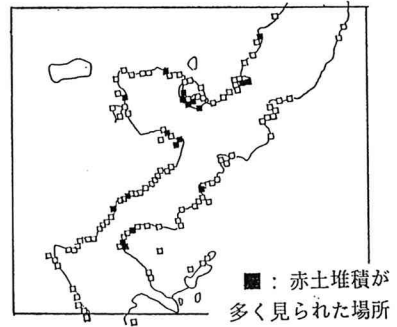


図-8 現地サンプリングデータによる赤土堆積状況（大見謝・池間，1990）

なお、沖縄赤土問題をより包括的に把握するには海域データの解析だけでは不十分で陸域データの解析も連結させた『海・陸統合型の解析』が必要となる。この点は、従来の沿岸海洋汚染解析において抜け落ちている視点で、その意味で沖縄赤土問題は格好の研究対象になっている。これに関する解析結果は別に発表する予定である（灘岡・田村，1991）。

謝辞： 本研究を行うにあたり、沖縄県公害衛生研究所の大見謝辰男氏、ならびにリモートセンシング技術センターの田中総太郎氏には有益な御教示を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 大見謝辰男・池間修宏 (1990): 沖縄県内各地の海域における赤土汚濁の現状, 沖縄県公衆衛生学会誌・別刷 21 号, pp. 1-15.
- 翁長謙良・他 (1990): 総合赤土砂対策検討調査報告書, 財団法人日本土壌協会, 74 p.
- 黒田泰弘・他共訳 (1977): 人工衛星写真リモートセンシング, 朝倉書店, 180 p.
- 沢本正樹・季立 亜・村越 潤 (1985): 駿河湾および天竜川の河口流出の解析, 第 32 回 海岸工学講演会論文集, pp. 767-771.
- 杉森康宏 (1982): 海洋のリモートセンシング, 共立出版, 254 p.
- 灘岡和夫・田村英寿 (1991): 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, 投稿予定.