

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

灘 岡 和 夫*・田 村 英 寿**

1. はじめに

沖縄での赤土流出はいまや大きな社会問題となっている(例えば、翁長ら, 1990)。このような沿岸海洋汚染問題の実態解明にあたっては、広範かつ継続的な解析を行っていくことが不可欠となるが、衛星リモートセンシングはその手段として非常に高い潜在的利用価値を持っている。しかしながら、衛星リモートセンシングを用いた従来の研究の多くは、衛星データのある特定のシートウールス・データと経験的に結びつけて解析しようとするもので、多時点・多シーンの画像データを統一的・包括的に解析し得る段階には至っていない。本研究では、このような従来の経験依存型の解析手法の限界から脱却すべく、衛星データに対して光学的原理に基づいた物理的な意味付けが明確な解析手法の体系を開発し、それを沖縄赤土流出問題に適用してその有用性・妥当性を確認することにより、一般性・汎用性の高いモニタリングシステムを構築することを試みた。

具体的にここでは、沖縄リーフ海域を対象とした衛星データに対して、まずその物理的な意味付けを明確にするために必要となる前処理手法を開発することを試みた。そして、この前処理データに基づいて、赤土による海水の濁りを表す特性値として光の水中消散係数を、また、赤土流出の受け皿としてのリーフ地形の基礎情報となる水深を算定する手法を、それぞれ開発することを試みた。

2. 対象領域及びデータの概要

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。ここでは、衛星データとしてLANDSAT 5号のTMセンサーの画像データを利用している。このセンサーには、数m～十数mの水中透過性を有する可視域BAND 1～3が設定されているが、沖縄本島沿岸海域は水深が2～3mの浅遠なリーフ地形を有しており、これらの可視域BANDを利用することによって、このリー

フ海域での水中消散係数や水深を算定することが、原理的に可能であると考えられる。

3. 衛星データの前処理

衛星データに対して物理的な意味付けが明確な解析を行うには、何らかの前処理を行うことが不可欠となる。というのも、衛星生データには、このような解析に対して不都合となる情報が不可避的に存在するからである。

衛星センサーへの入射光量は、理論的に次式のように表現される(例えば、杉森, 1982, Stewart, 1985)。

$$V_i = S_i \cdot [T_A \cdot \{ \Gamma(\lambda_i) \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi)\} \cdot K(\lambda_i) \cdot h\} + \Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw} \cdot L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i + P_{sc}] \quad \cdots (1)$$

ここに、

V_i : 輝度値, S_i : センサーの感度, T_A : 光の大気透過率, $\Gamma(\lambda_i)$: 光の海底反射率, θ, ϕ : 入射・屈折角, $K(\lambda_i)$: 光の水中消散係数, h : 水深, $\Gamma_{a/w}$: 光の海面反射率, Γ_{scw} : 光の水中反射率, $L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i$: 太陽光量, P_{sc} : 大気散乱光量。

この式(1)において、何等かの海域情報を輝度値から得るためには、「大気散乱光 P_{sc} 」, 「光の大気透過率 T_A 」, 「太陽光量 $L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i$ 」といった海域情報と無関係な情報を、衛星データから合理的に排除することが不可欠となる。そこでここでは、以下のような検討を行った。

(1) 大気散乱光 P_{sc} の影響の除去

衛星センサーには大気で散乱された光が到達するが、これは海域の物理量を得るにあたってノイズとして作用するものであるため、この影響を画像データから合理的に排除することが必要となる。そのための方法として、近赤外域BANDを利用する手法があり、現在までにもよく利用されている(例えば、宇多ら, 1988)。この手法は、近赤外光が海面でほぼ完全に吸収されることから、海域におけるこの波長域BANDの輝度値が大気散乱光の影響そのものに相当する、と考えて大気散乱の効果を取り除こうとするものである。具体的には、次式に示すように、可視光BANDの輝度値から近赤外BANDの輝度値を適当な重みをつけて差し引くことによって、可視光BANDの輝度値に含まれる大気散乱光の影響を除去する。

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部

補正後可視光 BAND=可視光 BAND

$-\alpha \times \text{近赤外 BAND} \cdots (2)$

ここで、式(2)における係数 α を如何に決定するかが従来の研究における課題の一つであった。例えば、宇多ら(1988)は、大気散乱光量が太陽光量に比例するとして、この α を決定している。しかしながら、この方法では散乱光の波長依存性が考慮されない、などといった不合理な点も多い。そこでここでは、この α を合理的に算定すべく、以下のような手法を開発することを試みた。

いま、沖縄本島周辺の、光が海底にほとんど届かないような深海域を対象として考える。このような海域では、海面や海中の状態は場所によらずほぼ同様であると考えられるため、式(1)において $h=\infty$ とすれば、この海域での輝度値の場所毎の違いは大気散乱光量 P_{sc} の違いそのものに相当していると考えられる。

図-1(a)-(c)は、1986年7月15日の沖縄本島周辺の深海域のデータから、可視域 BAND 1~3 の各 BAND と近赤外域 BAND 5 との輝度値の二次元分布を調べた結果である。このように、これらの輝度値の間には強い相関があり、これから、各輝度値の深海域での場所毎の違いが、大気散乱光という共通要因の影響によっているということが裏付けられる。そして、この回帰直線の傾

表-1 係数 α の算定結果

場所	撮映日	BAND1	BAND2	BAND3
沖縄本島	1986/ 7/15	1.15	0.59	0.90
〃	1986/ 7/31	1.35	0.82	0.94
〃	1987/ 5/31	1.31	0.94	1.00
八重山列島	1984/ 7/ 7	1.16	0.51	0.79
〃	1989/10/25	1.36	0.72	1.03
太陽光量より算定した値		1.81	0.86	1.00
波長域中心波長(μm)		0.49	0.56	0.66

きから式(2)における係数 α を合理的に算定することが出来る。

表-1 は、沖縄本島および八重山の周辺海域を対象として、可視域 BAND 1~3 について、この α を算定した結果を、宇多ら(1988)のように大気散乱光量が太陽光量に比例するとして算定した α の値と併せて示したものである。これを見ると、近赤外 BAND 5 から遠く離れた波長の短い可視域 BAND ほど、 α の値が両者の方法で大きく違っていることが分かるが、これは、大気散乱光量が波長に依存しているためであると考えられる。

(2) 大気による光の減衰及び太陽光量の影響の除去

衛星データから海域の物理量を得るためには、大気による光の減衰や、太陽高度の違いなどによる太陽光量そのものの変化の影響もまた除去する必要がある。後ほど 4. で示すような多時期・多シーンのデータを対象としてそれらの相互比較をするような場合には、このことがとりわけ重要となる。

大気散乱光の影響が補正されたものとする、 $P_{sc}=0$ となって、式(1)は次のようになる。

$$V_i = S_i \cdot T_A \cdot [\Gamma(\lambda_i) \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi) \cdot K(\lambda_i) \cdot h\} + \Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}] \cdot L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i \cdots (3)$$

ここで、一つのシーン内では、光の大気透過率 T_A は場所によらず一定値であると仮定する(Bierwirth, 1990)と、水深が十分に大きな海域での衛星データ $V_{i\infty}$ を導入することにより、式(3)は、次式のように表現される。

$$V_i = S_i \cdot T_A \cdot [\Gamma(\lambda_i) \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi) \cdot K(\lambda_i) \cdot h\}] \cdot L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i + V_{i\infty} \cdots (4)$$

ここに、 $V_{i\infty}$: 深海域におけるセンサーへの入射光量。

ここで、式(4)の右辺の $V_{i\infty}$ を左辺に移項し、さらにこの $V_{i\infty}$ を用いてこの式を無次元化することにより、次式を得る。

$$\frac{V_i - V_{i\infty}}{V_{i\infty}} = \frac{\Gamma \cdot \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi) \cdot K \cdot h\}}{\Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}} \equiv V'_i \cdots (5)$$

上式で定義される V'_i は、 T_A 、 $L_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i$ が除去された形の、海域情報のみを反映した輝度値となっている。ここでは、この V'_i を「標準化された輝度値」と呼ぶ。

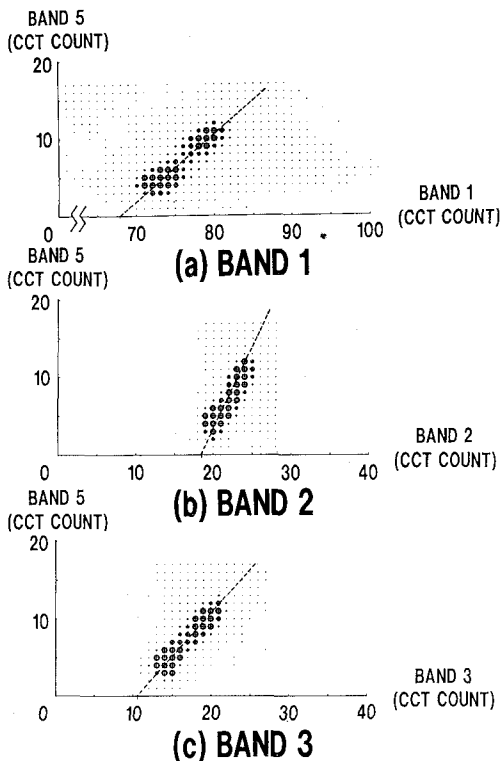


図-1 可視・近赤外域 BAND の輝度値の二次元分布

4. 光の水中消散係数の算定

降雨時に陸域から流出した赤土は、海水を濁らせ、やがて海底に堆積する。灘岡・田村 (1991, 1992) は、衛星データから海底面の色合いを表す指標を開発することにより、沖縄本島リーフ海域での赤土堆積状況にある程度把握することに成功している。しかしながら、一口に赤土といっても様々な種類のものが存在し、それぞれがかなり異なった色合いを有している。そのため、赤土堆積度合の定量的な把握という意味においては、この色合いに着目した方法は不十分であった。

そこでここでは、海底での赤土の反射特性よりも海水中での赤土の濁りによる光の透過特性の方が赤土の色の違いに対する依存性が小さいこと、ならびに、海底に赤土が堆積している海域ほど海水の濁りが大きいという観測事実 (沖縄県環境保健部, 1988) に着目して、光の水中消散係数 K という海水の濁りを表す物理量を理論的に算定することを試みた。具体的にここでは、以下のように潮位が異なる二時期のデータを利用する方法を考えた。

いま、時期 A とそれよりも潮位が Δh だけ異なる時期 B の二時期のデータが存在するとする。ここで、両時期は相近く、またこの間に目立った降雨などがなかったものとする、各場所における両時期での海面・海中・海底状態がほぼ同一であると仮定できる。このとき、A, B 両時期について式 (5) を立てると、

$$V'_{iA} = \frac{\Gamma \cdot \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi) \cdot K \cdot h\}}{\Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}} \dots\dots\dots (6)$$

$$V'_{iB} = \frac{\Gamma \cdot \exp\{-(\sec\theta + \sec\phi) \cdot K \cdot (h + \Delta h)\}}{\Gamma_{a/w} + \Gamma_{scw}} \dots\dots\dots (7)$$

となる。これから、若干の演算によって、未知数 h , $\Gamma_{a/w}$, Γ_{scw} を消去することができ、次式のように光の水中消散係数 $K(\lambda_i)$ を理論的に算定することができる。

$$K(\lambda_i) = \frac{-1}{(\sec\theta + \sec\phi) \cdot \Delta h} \ln(V'_{iB}/V'_{iA}) \dots\dots\dots (8)$$

以下に、1986年7月15日、及び1986年7月31日(それぞれ時期 A, B とする) の二時期のデータを利用して実際に計算を行った結果を示す。なお、この両時期の潮位差は、中城湾潮瀬で測定した実測潮位 (沖縄総合事務局, 1986) より、 $\Delta h = -58 \text{ cm}$ であった。また、両時期の間に目立った降雨は見られなかった。

図-2(a)-(c) は、海底に赤土堆積がほとんど見られないリーフ海域を対象として、可視域 BAND 1~3 について両軸にそれぞれ V'_{iA} , V'_{iB} をとって、データを二次元的にプロットしたものである。図中に実線で示した回帰直線の傾きより、この海域での V'_{iB}/V'_{iA} を算定し、これを式 (8) に代入することにより、赤土堆積が見られない海域

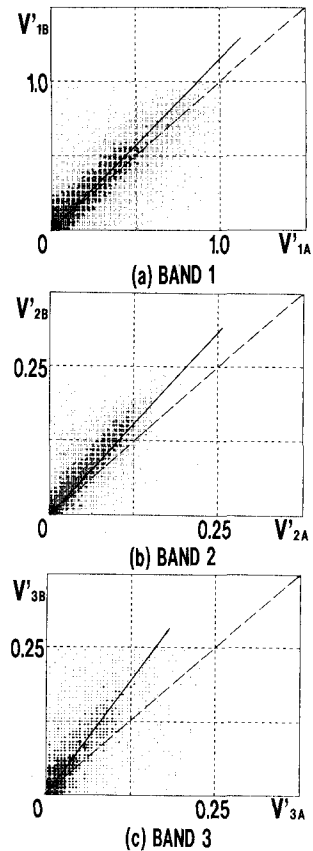


図-2 V'_{iA} , V'_{iB} の二次元分布

における可視域 BAND 1~3 の K を理論的に算定した。

さらにここでは、この手法によって算定した結果を検証すべく、分光照度計を用いた現地観測を行い、このような赤土堆積が見られない海域における光の水中消散係数 K を測定した。図-3 は、各波長における K の計算値と実測値とを比較した結果を示したものである。ここで実線は現地観測結果を、二重線は上記の衛星データに基づいた計算結果をそれぞれ表しているが、各波長域について両者はよく一致しており、この手法によって求めた K が定量的にも概ね実態とよくあったものであることが分かる。なお、ここで実際に現地観測を行ったのは1992年10月で、衛星の撮影日(1986年7月15日)とは時期も季節もかなり違っているが、赤土堆積がほとんど見られない海域では、海水の濁りはそれほど大きく変化することはないものと考えられる。

図-4 は、沖縄本島中北部を対象として、BAND 2 の水中消散係数の分布を示したものである。ここで注目すべき点は、図中右下の中城湾においてかなりの濁りが認められることである。先の著者ら(灘岡・田村, 1991, 1992) によるリーフ上の赤土堆積状況の解析結果では、この海

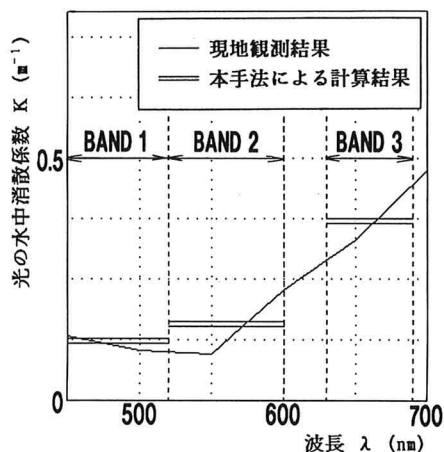


図-3 Kの計算値と実測値との比較

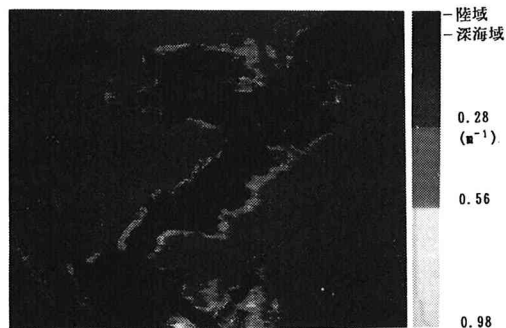


図-4 沖縄本島中北部におけるK (BAND 2) の分布

域における赤土堆積はほとんど見られなかった。それは、この海域に流入する赤土の種類が、灰色っぽい色合いのジャーガルと呼ばれるものであるためと考えられる。これに対して、今回の解析結果では、かなりの濁りが存在するという結果になっており、当時のこの海域で海水の濁りがかなり大きかったという、調査結果と符合している。このことは、本解析手法が、赤土の色の違いへの依存性が小さいものであることを実証するものである。

5. 水深の算定

リーフ海域に流出した赤土は、そこで堆積するか、あるいは潮流などによって外海に流出するが、このような赤土の挙動は海底地形によって大きく左右されるため、リーフ海域における水深情報は赤土流出の解析を行う上で不可欠となる。しかしながら、リーフ海域の海図や深浅図データは、実際にはほとんど整備されていないのが現状である。そこでここでは、空間解像度の高い衛星データを利用することによって、リーフ海域における水深情報を得ることを試みた。具体的には、4.で得られた水中

消散係数 K の値を利用して、水中透過性のよい二つの波長域 BAND 1, 2 のデータから水深 h の分布を理論的に算定する手法を開発することを試みた。

光は水中で減衰するため、同じ海域では、当然ながら、水深が増すほど海底は暗く見える。しかし、海底の色合いすなわち海底反射率が場所によって異なるため、暗く見える海域ほど水深が大きいと単純にはいえない。とりわけ沖縄リーフ海域の場合、海底の色合いの違いから赤土堆積状況のある程度把握することが出来るという事実(灘岡・田村, 1991)からも分かるように、海底の色合いの場所毎による違いが解析上無視し得ないものとなる。

そこでまず、沖縄リーフ海域における海底反射特性を把握すべく、沖縄本島各地の沿岸海域において可視 BAND 1, 2 に相当する波長域での海底反射率を、分光照度計を用いて測定した。図-5 はその結果を二次元的にプロットしたものであるが、これより、海域によらず両波長域における海底反射率の間にきれいな直線関係が見られることが分かる。

いま、式(5)の標準化された輝度値に関して、BAND 1, 2 について値が与えられているとすると、式が2本立つことになる。しかし、未知数の方は、水深 h 及び、BAND 1, 2 の海底反射率の3つで、式数<未知数となってしまう、これからは水深 h を算定することはできない。しかしながら、上記のように、BAND 1, 2 の海底反射率の間に直線関係が見られることが分かったので、この条件を加味すれば、式数=未知数となって、水深 h を理論的に算定することができる。具体的な式展開は、紙面の都合上ここでは示さないが(灘岡・田村 1993 を参照されたい)、最終的に得られる式は以下ようになる。

$$h = \frac{1}{(\sec \theta + \sec \phi) \cdot K(\lambda_i)} \ln \left(\frac{V_{i0} - V_{i\infty}}{V_i - V_{i\infty}} \right) \dots (9)$$

ここに、 V_{i0} : 水深ゼロでの輝度値 V_i のとる値。

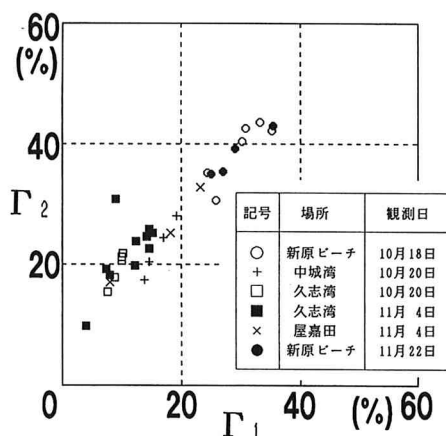


図-5 海底反射率 Γ_1 , Γ_2 の二次元分布

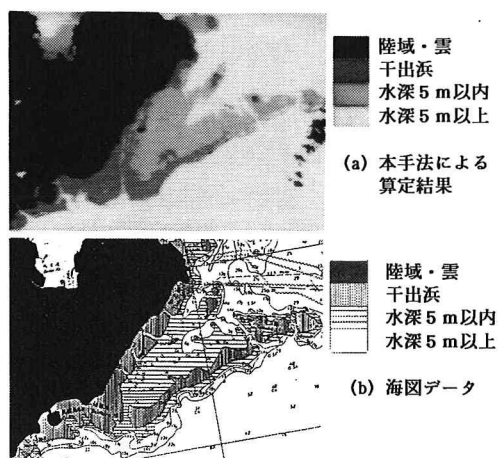


図-6 水深分布算定結果と海図データとの比較

図-6 は、沖縄本島の知念岬付近において、この手法によって算定した水深の分布と海図とを比較した結果を示したものである。なお、両者を定量的に比較するために、前者については実測潮位の観測結果に基づいた潮位補正を行っている。リーフ海域は非常に遠浅であるために、もともと誤差が生じ易いと考えられるにも関わらず、両者は定量的にも比較的良好に一致しており、この手法の有効性が確認できる。

6. おわりに

本研究では、衛星画像データに対して光学的原理に基づいた物理的な意味付けを与えることによって、沖縄赤土流出の一般性・汎用性の高いモニタリングシステムを新たに開発することを試みた。その結果、まず衛星データを物理的に取り扱うための前処理を合理的に行う手法を開発し、この結果を利用することによって、衛星データから光の水中消散係数、及び水深の分布を理論的に算定することに成功した。

なお、沖縄赤土流出問題を包括的にとらえるためには、海域のみならず赤土の発生源である陸域をも含めた解析を行っていく必要がある。これまで、陸域の緑被状態の解析、土壌分類、及びこれら陸域の解析結果を反映させ

ることによる海底赤土の面的被覆率の算定などを試みており、かなりの成果が得られている。これらに関する解析結果は別途発表する予定である(灘岡・田村, 1993)。

謝辞: 本研究を進めるにあたって、仲座栄三助手をはじめとする琉球大学水工研究室の方々、沖縄県公害衛生研究所の大見謝辰男氏、田中総太郎氏をはじめとする財団法人リモートセンシング技術センターの方々には、数々の有益な御教示を戴くと共に、現地観測ならびに画像解析を行うにあたって様々な便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表します。

最後に、本研究は平成4年度文部省科学研究費試験研究B(1)「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」(研究代表者: 灘岡和夫, 課題番号: 04555124)ならびに総合研究(A)(研究代表者: 宝 馨, 課題番号: 04302044)の補助を受けて行われたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 宇多高明・村井禎美・竹淵勉(1988): 海域調査における衛星リモセンデータの実用的補正法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 787-791.
- 沖縄県環境保健部(1989): 赤土汚濁モニタリング調査報告(1), 55 p.
- 翁長謙良ほか(1990): 平成元年度沖縄総合事務局委託業務総合赤土砂対策検討調査報告書, (財)日本土壌協会, 74 p.
- 杉森康宏(1982): 海洋のリモートセンシング, 共立出版, 275 p.
- 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): 衛星画像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, 日本リモートセンシング学会誌, 投稿予定.
- Bierwirth, P.N. (1990): Mineral mapping and vegetation removal via data-calibrated pixel unmixing, using multispectral images, Int. J. Remote Sensing, Vol. 11, No. 11, pp. 1999-2017.
- Stewart, R.H. (1985): Methods of Satellite Oceanography, University of California Press, 360 p.