

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

津嘉山正光*・仲座栄三**・高良尚樹***・大山幸徳****

1. はじめに

最近地球規模の環境問題がクローズアップされてきた。地球温暖化や熱帯林の広範囲な伐採・消失などもその一つである。南西諸島においては河川及び海域への土壌流出（いわゆる赤土汚染）が大きな社会問題となっている。この赤土のサンゴ礁海岸への流出によって、地球上の二酸化炭素を吸収できる唯一の生物、サンゴの生息する場所が着実に消滅しつつある。沖縄県下で赤土問題がクローズアップされて以来、こうした赤土流出あるいは土壌流出の問題は、農学的な見地から多くの研究・対策が実施されてきた。これらの研究の多くは、降雨強度や土の分散特性にまで踏み込んだ、赤土土壌流出の実態や赤土の河川流出特性把握に関するものである。また、赤土の海域汚染に関する研究としては、赤土流出時の河口付近の濁水あるいは底質の採取により赤土の海域流出量の把握を行ったり、ランドサットや航空写真を利用した赤土の海域汚染の把握などに関するものがある。

本研究では当初、赤土の海域への拡散問題を数値解析し、モズク養殖場など漁場の赤土汚染の数値予報システムの開発を目指そうとした。しかし、実際に赤土の海域拡散現象の数値計算を実行しようとすると、先ず、河川からの赤土の流出特性が未だ明かでない、強風時に発生する海域堆積土の再浮遊の発生メカニズムが検討されていない、さらには海浜流による赤土の移流拡散に対する数値計算の検証に耐え得るデータが未だ得られていない；などの重要な問題がことごとく未解決のまま残されている事態に直面した。

以上の状況に鑑み、本研究においては、赤土による海域汚染の数値予報に対する入力条件となる「降雨一河川流量一濁度」の関係、すなわち赤土の河川流出特性を検討すると共に、海浜流による赤土の移流拡散と底質濃度の変化を明らかにし、海域の赤土汚染に対する数値予報システムの確立に向けての基礎データを得ることを主な

る目的とした。また、畑地からの赤土流出防止に対する新たな工法の開発をも目指した。

2. 南西諸島における赤土流出の実態

—その歴史の変遷

写真—1 に、現在大量の建設機械の投入により大規模かつ急速な山地開発がなされている沖縄本島北部のある造成地を示す。この一帯の造成地は、工事完了後約 100 ha の畑地となる。写真—2 は、造成後の畑地のガリー侵食状況を示している。写真—3 は天然記念物の、沖縄本島北部本部半島の塩川が完全に赤土で染まり、サンゴ礁海域へ注ぐ状況を示している。また、写真—4 は、海域へ流出した赤土が潮流及び吹送流に乗り外洋へと移流拡散していく様子を示している。

南西諸島、特に沖縄本島において土壌侵食が顕著になったのは、1950年代後半のバイン作付けの導入に伴う本島北部の山地においてと言われている。当時、現金収入に乏しい沖縄の農家にとって換金作物であるバインの導入は画期的なものとなり、山地の開拓は、重機類の使用と共に、沖縄の農業史上かつてない規模と速さで谷密度の高い山地で行われるようになった。さらにこの土壌侵食は、1972年の沖縄の祖国復帰を契機に激しくなった。他県に比べて立ち後れていた社会基盤の整備ということで、ダム建設、高速道路、土地改良事業が急速に進められた。このような山地開発による土壌侵食は、結果として河川や海域の赤土による汚染をもたらした。このことが1972年頃から社会問題となった。それまで土壌侵食問題が社会問題となり得なかったのは、開発が個々の農家レベルでなされており、侵食防止対策に意を注ぐゆとりがなかったことや、侵食を容認する農業政策的な側面もあったことも否めない（翁長・吉永, 1987）。

このような赤土による海域汚染はさらに1980年代に入って、新たな局面を迎える。海洋性リゾートホテル・ゴルフ場の建設ラッシュなど、リゾートブームと共にさらに赤土汚染が拡大する結果となった。反面、リゾート施設や漁場の赤土汚染が深刻なものになるにつれ、観光・リゾートの資源であるサンゴ礁海域の赤土汚染問題が深刻な社会問題としてマスコミ等で頻繁に取り上げられる

* 正会員 工博 琉球大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 琉球大学助手 工学部土木工学科

*** 琉球大学大学院 工学研究科

**** 琉球大学研究生 工学部土木工学科

ようになった。

土地改良事業現場や土木工事現場における赤土流出防止対策としては、比較的粒径の大きな土砂を対象とした全国的な土木施工基準に準じた工法が主に取り入れられているが、こうした工法の殆どはシルト質成分からなる赤土流出に対する対策としては不十分であることが指摘されている。ごく最近では、フィルターを用いた赤土分離工法も開発されており、この工法は土木工事など比較的小規模の山地開発などにはかなりの威力を発揮するものと思われる。

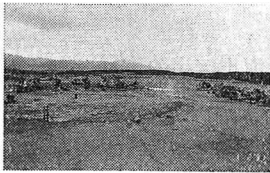


写真-1 急速な山地開発



写真-2 造成地のガリー侵食

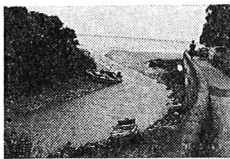


写真-3 赤土の海域への流出

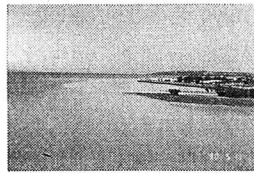


写真-4 海域へ流出した赤土の移流拡散

3. 赤土による海域汚染数値予報の確立に向けて

3-1 数値予報のために解明すべき問題点

沖縄におけるサンゴ礁海域の赤土による汚染は、降雨直後に河川などから直接流出した赤土の拡散と、河川から流出した赤土が一旦リーフ上（海底）及び汀線付近に堆積した後、“風波”や“うねり”によって攪乱され再浮遊することなどによってもたらされていると考えられる。図-1 に、サンゴ礁海域における赤土汚染の発生メカニズムの概念図を示す。図示のとおり、河川から直接流出した赤土は、海水と殆ど混合せず安定したフロントを形成し、潮流や海浜流により移流拡散される。このように拡散した赤土の一部は、外洋へと拡散するが、一部は汀線付近やその沖側のサンゴ礁上に堆積する。これらの堆積した赤土は、強風の際に発生する“風波”や“うねり”によって再度巻き上げられ、エメラルドグリーンに輝くサンゴ礁海域を真っ赤に染める。汀線付近に堆積した赤土は来襲波の碎波に伴う強い乱れによって巻き上げられるが、碎波点より沖側の比較的浅い所では、風波が風の息 (gasp) に応ずる形で弱い spilling 型の碎波を

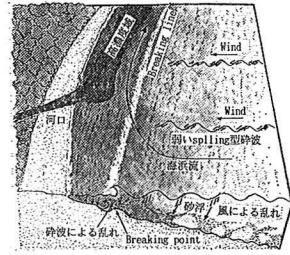


図-1 サンゴ礁海域における赤土汚染発生メカニズム

起こす時に生じる水表面からの乱れや、砂れん頂部で生じる組織渦による砂雲となって巻き上げられるものと考えられる。本研究では、ここで問題提起した赤土の河川流出特性と海浜流による赤土の移流拡散とに注目している。

このように、リーフ上の海浜流が赤土の拡散に重要な意味を有しているにも関わらず、これまで海浜流による赤土の拡散現象を定量的に評価した研究は殆ど行われていない。

3-2 赤土の河川流出特性

河川から流出する濁水の拡散を数値計算する場合、濁水濃度を単純に河川流量に比例するものとして取り扱うのが一般的である。ここでは、この仮定が赤土流出の場合にも適用し得るかどうかを現地観測データを基に検討する。（なお、ここで示す現地観測データは、赤土流出研究プロジェクトの共同研究者である吉永らによって行われたものである。）

図-2 に、現地観測の位置図を示す。図示のとおり、現地観測は、流域全体からの河川流出水量・濁度の測定、及び造成地のみからの赤土の流出を検討する為にそれぞれ河川観測点及び三角ゼキ位置で行った。この流域における赤土の発生源は、主に [図-2] で示す造成地である。図-3 に現地観測によって得られた降雨強度及び造成地からの赤土濃度・流量の経時変化を示す。図示のとおり、造成地から流出する赤土流出は降雨強度に敏感に反応しながら、流量曲線とほぼ同じような変化を示している。これは、測定時期がサトウキビの植え付け直後であったことから集水域の殆どが裸地の状態であり、ガリー発生と同時に降雨が表面流出となり短時間に用水路に流出した結果と考えられる。一方、図-4 は、流域全体からの河川流出を対象とした河川観測点において得られた河川流量及び赤土濃度の経時変化である。この場合、赤土濃度のピークは河川流量のそれよりもかなり早い時間に発生している。このような、河川流量と濃度とのピークの発生時間の相違は、流域のどの位置に赤土の発生源があるかに関係してくるものと思われる。このことを確かめるために、図-5 に示すような簡単な流域モデルを考えて数値実験を行った。図示のとおり、[図-5] で示す赤土

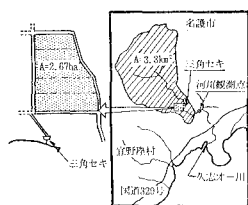
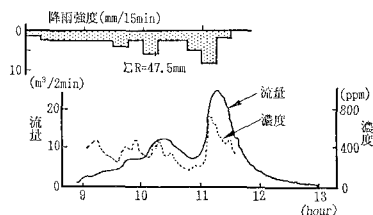
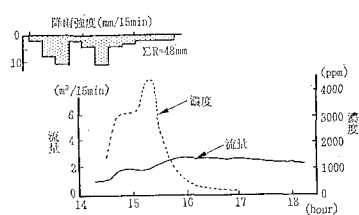


図-2 現地観測位置図

図-3 造成地から流出する赤土の
流量・濃度の経時変化図-4 流域全体から流出する赤土の
流量・濃度の経時変化

の発生源としての造成地を流域の上流，中流，及び下流にそれぞれ変化させた場合の河川流量と赤土濃度の変化を検討した。図中， $\square$ で示すヶ所は地表面が全般的に植生によって覆われており，赤土流出の発生がゼロとなる領域である。また，それぞれの小領域から流出する流量及び赤土濃度は，図-3に示す曲線をそのまま用いた。図-6に計算結果を示す。図示のとおり，赤土の濃度を示す曲線は，赤土発生源の位置（洪水到達時間の違い）により明瞭な相違を示している。すなわち，このことは赤土発生源が流域に点源として存在している以上，赤土濃度と河川流量とを単純に比例関係に置くことがやや無理な仮定であることを示している。また，このような赤土の流出特性を利用し，赤土濃度を河口付近でモニタリングすることにより，逆に赤土の発生源が流域のどの位置にあるのか，あるいはゲリラ的に発生する大規模ガリーの発生位置や斜面崩壊による赤土の局地的な発生位置の推定が可能になると思われる。

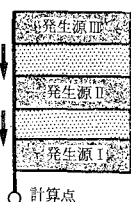


図-5 流域モデル

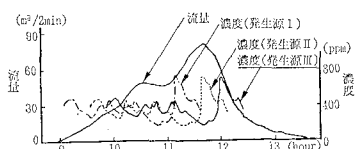


図-6 流量及び濃度の経時変化

3-3 赤土の海浜流による移流拡散及び波による底質の巻き上げ効果に関する現地調査

先に説明したとおり，海浜流がサンゴ礁海域における赤土拡散に対して重要な要素であるにも拘らず，現在のところ海浜流により赤土がどの程度移流拡散されるかの基礎的なデータさえも得られていない。調査では，こうした赤土の海浜流による移流拡散と波による底質の巻き上げ効果を現地観測により明らかにし，今後の数値計算の検証の為の基礎資料を得ることを目的とした。

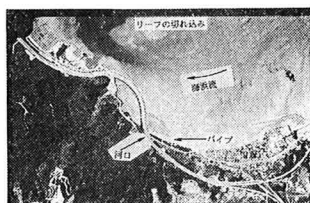
写真-5は，現地観測を行った海岸の航空写真である。写真に写っているリーフ上の筋の様子からも判断されるが，当海岸はリーフ先端（写真の右上）から写真左

上にあるリーフ切れ込みに向かう海浜流がかなり強い所である。この海浜流により赤土はリーフ切れ込み付近にあるリゾート施設まで移流拡散するため，大雨時の人工ビーチの赤土汚染が問題となっている。

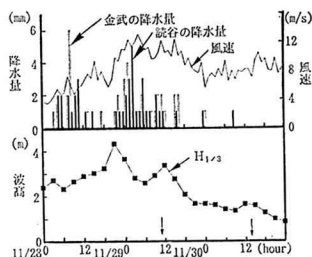
現地観測は，海浜流による赤土の移流拡散や波による赤土の巻き上げ現象の把握を目的としていることから，比較的風速が大きく，かつ沖波波高が1m以上であることを実施条件とした。このような条件下で現地観測は台風 T 9028 号が沖縄諸島に接近中の11月28日～30日にかけて行われた。観測期間中の気象条件及び沖波波高の経時変化を図-7に示す。図示の通り，観測期間中は7m/s～13m/sの風が吹き，降雨は28日に日雨量17mm，29日には日雨量23mmであった。観測点は，写真-5に矢印で示される排水パイプから流出する赤土の拡散状況を調べるために放射線状に設置した。図-8は，調査海岸に赤土を大量に流出する河川（パイプ位置）からの流量の経時変化を示している。図中には，パーの高さで河口位置における赤土濃度も示した。この海岸における主な赤土の流出口は写真-5に示すパイプ及び河口と記した位置にある。

図-9は，降雨開始6時間後，11月28日11時20分における海水の赤土濃度分布（SS濃度，ppm表示）を示している。図中に示す海浜流の向きと大きさは，フロートにより求めたものである。また，図中の破線は35mmカメラで捉えた写真から判断した赤土汚染領域のフロントである。図示のとおり，赤土による海域の汚染範囲は，海浜流によって移流され，汀線近傍の極めて狭い範囲に集中し，写真-5に示すリーフ切れ込みへと拡散している。

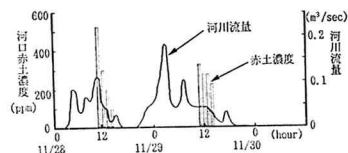
図-10は，河川からの赤土流出が殆ど無くなった時間帯における赤土濃度分布を示している。図-9でわずかにあった岸沖方向の拡散は殆どなく，赤土の広がりは碎波帯付近に限られている。図-11は，29日12時における海水の赤土濃度分布を示している。この場合，数時間前に大量の赤土が流出しているにも拘らず，赤土による汚染帯は，碎波帯付近にのみ広がっている。図-12に河口からの赤土流出が完全に止まり，24時間経った後の濃度分布を示す。図示のとおり，高濃度の赤土汚染帯は，一



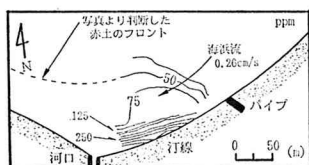
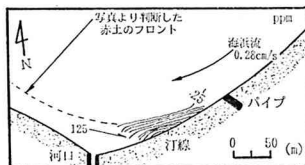
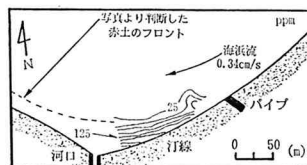
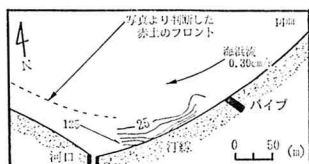
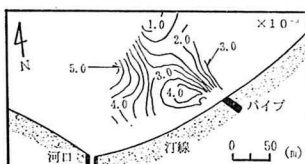
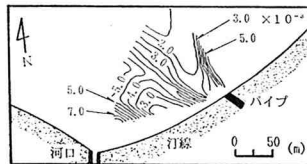
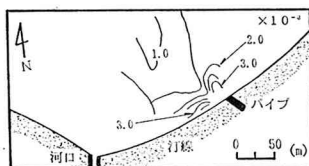
写真—5 現地観測位置の航空写真



図—7 現地の気象及び波高の経時変化



図—8 河川流量及び赤土濃度の経時変化

図—9 海水中の赤土の濃度分布
(11/28 11:20 風向: NE
風速: 3.6 m/s)図—10 海水中の赤土の濃度分布
(11/28 14:20 風向: NNE
風速: 3.4 m/s)図—11 海水中の赤土の濃度分布
(11/29 12:00 風向: NNE
風速: 6.5 m/s)図—12 海水中の赤土の濃度分布
(11/30 14:00 風向: N
風速: 8.0 m/s)図—13 底質中の赤土の濃度分布
(11/28 11:20 風向: NE
風速: 3.6 m/s)図—14 底質中の赤土の濃度分布
(11/29 11:00 風向: NNE
風速: 4.8 m/s)図—15 底質中の赤土の濃度分布
(11/30 14:00 風向: N
風速: 8.0 m/s)

且堆積した赤土が碎波によって巻き上げられる領域のみにあり、ここで示す赤土拡散がかなりの割合で海浜流に依存していることが分かる。

図—13～15には現地観測期間における24時間ごとの底質濃度を示した。但し、この場合の濃度は、底質1kgに対する赤土の重量として定義した。赤土流出開始後6時間経った底質中の赤土濃度は、図—9に示す赤土濃度と同様な傾向を示しているが、赤土の濃度分布に比較してわずかに沖側まで広がっている。この濃度分布に対応する時点から24時間経過した後の底質濃度分布が図—14

である。図示のとおり、この時間帯における底質中の赤土濃度は、図—13に示す値より大きくなっている。これは、図—8に示すように、29日の1時に流出した赤土がさらに堆積した結果と考えられる。この場合も、赤土の高濃度域は、海水の赤土濃度分布の場合と同様な傾向にある。赤土流出が完全に止まり、13時間経った後の底質濃度は、図—15に示すようになんかなり低下している。すなわち、高濃度で堆積していた赤土は、約0.3 m/sec程度の海浜流や波の存在により巻き上げられリーフ切り込みに向かって移流されたものと判断される。

以上のことから、赤土拡散に対する海浜流による移流効果はかなり大きく、拡散の数値計算ではこの現象をいかに解析し得るかが大きなかぎとなるものと思われる。

4. 畑地における赤土流出防止工法の開発

これまで議論してきたように、海域への赤土流出の発生源は、主として内陸部における畑地や山地の開墾地、あるいは土木工事現場にある。こうした赤土の発生源では、赤土流出に対する様々な防止工法が取り入れられて

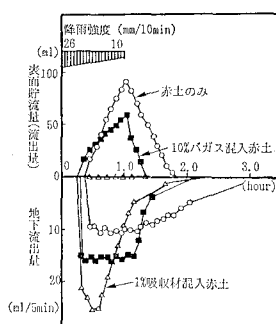


図-16 表面流出及び地下流出の経時変化

いる。例えば、土木工事や開墾地における掘削斜面には、植生やセメントモルタル及びアスファルトの吹き付けなどの対策が取られている。しかしながら、頻繁に耕される畑地においては、こうした赤土流出防止対策をとることができず、現在まったく打つ手なしの状態である。このような問題に対し、仲座ら(1990)は、製糖工場から大量に排出されるバガス(サトウキビの絞りかすの一種、有機物)や病院・家庭から廃品として回収される高分子吸水材による土壌改良により、畑地における表面流出を抑え、逆に地下水流出を促進させる試みを行っている。その検討結果が図-16である。実験では、赤土の場合と赤土に10%のバガスを混入した場合、及び高分子吸水材を1%混入した場合について検討した。○印で示す赤土のみの場合かなりの表面流出を生じているのに対し、地盤改良を行った場合は、かなり表面流出を抑えることに成功している。特に、1%の高分子吸水材を混入した場合は、表面流出がゼロとなっており、ここで開発した手法が畑地からの赤土流出防止に極めて有効であることが理解される。

5. おわりに

本研究では、まず赤土の海域汚染の実態とその歴史的変遷について述べた。さらに、赤土の海域汚染に関する

定量的な検討を行った研究はこれまでのところ殆どないことを指摘し、定量的な流出特性把握を目指してサンゴ礁海域における赤土拡散の現地観測を行った。その結果より、サンゴ礁海域における赤土の拡散及び堆積には波及び海浜流の存在が支配的な水理現象となることを定量的に示した。現地観測の初日、筆者らは大海に広がる赤土の帯を目の辺りにして、点にしかならない測定範囲と手持ちの測定器の貧弱さから、赤土による海域汚染の把握のむくろみは「螭蝦の斧」のような感じがしたが、実際に小領域ながらも観測することにより、海浜流による赤土拡散の実態と底質の経時変化を知ることができた。本研究で得られた成果は赤土拡散数値予報に関して、今後の貴重な資料となり得るものと思われる。

謝辞：本研究の一部は、農学及び工学の研究者からなる研究プロジェクト「島嶼環境下における赤土流出及び汚濁防止に関する研究」の下に行われたものである。本プロジェクトの代表者である琉球大学農学部の翁長謙良教授には、終始多くのご指導を頂いた。また、吉永安俊助教授は、赤土の河川流出に関する貴重なデータを快く提供して頂いた。赤土流出の現地観測に関しては、当時琉球大学工学部土木学科水工学研究室の学生であった与儀実和・砂川勇二・照屋雅彦・錨忠宏・赤嶺好祐・下地英樹・仲里直樹・禰保武・玉城重則の諸氏の協力を得た。ここに記して心より感謝の意を表する。なお、本研究の一部は文部省科学研究費・一般研究(A)(研究代表者：翁長謙良)の援助を受けていることを付記する。

参考文献

- 沖縄県環境保健部(1988)：赤土汚濁モニタリング調査報告
- 翁長謙良・吉永安俊(1987)：赤土流出機構及び流出防止対策に関する調査・研究、沖縄協会。
- 谷本修志・中野泰雄・大月和義・宇多高明・小保篤(1988)：沖縄県仲泊地区のリーフ周辺での波と流れの観測、第35回海岸工学講演会論文集, pp. 207-211。
- 仲座栄三(1990)：沖縄の海の文化性と科学性、(財)沖縄産振協, p. 54。
- 山本聡(1990)：赤土流入を追う、沖縄の自然地形と地質、琉球大学公開講座委員会, pp. 60-67。