

2-5

陸域からの汚濁物質の流入負荷

大見謝辰男

1 はじめに

世界中で人間活動の影響によるサンゴ礁環境の悪化が報告されており、サンゴ礁への脅威の陸域由来の代表格として、増大する堆積物や栄養塩などの流入による汚染が挙げられている (Wilkinson 2002)。日本の琉球列島では、開発に伴う度重なる土壌流出によって、沿岸のサンゴ礁が堆積物で衰退した歴史を持つ (大見謝 1992)。また、東京都小笠原諸島では、人間が島に持ち込んだヤギが野生化して植生を荒らした結果、表土が流出して海域環境に悪影響を及ぼしたとされている (川窪 1988 ; 稲葉・鈴木 2000)。ここでは、ケーススタディとして、琉球列島の沖縄県における土壌流出を紹介し、栄養塩調査についても述べる。

2 赤土汚染とは

沖縄の島々では、まとまった強い雨が降ると開発現場や農地、米軍演習場などから土壌が流出し、透明に輝くサンゴ礁の海を濁らせている (写真1)。このような現



写真1 陸域から流出した赤土によって濁ったサンゴ礁

象は、沿岸海域のサンゴ礁生態系を衰退させ、水産業や観光産業にも悪影響を及ぼしている。流出土壌には、一般的に赤土とよばれる国頭マージばかりではなく、ジャーガルとよばれる灰色系の土壌や、その母岩でクチャと呼ばれる泥岩が侵食されたものも含まれている。ここでは、これらの土壌などを総称して「赤土等」と称し、その流出に伴う水環境への悪影響を「赤土汚染」と称する。

3 赤土汚染はなぜ発生するか

赤土汚染は、赤土等が流出しやすい自然的要因に、開発工事のような人為的要因が加わると起きやすい。自然的要因としては、沖縄の場合は、有機物が少ないため分散されやすい土壌、急峻で河川が短小な地形、侵食性が全国平均の3倍も強い降雨の三つが挙げられる (図1)。もちろん、このような自然的要因だけでは赤土汚染は発生しにくい。これに、開発などで山の緑地が裸地状態にされるなどの人為的要因が加わって赤土汚染が増大する。沖縄では、農用地、開発事業、米軍基地からの流出量が圧倒的に多く、「三大流出源」と呼ばれている。

また、沿岸をとりまく礁池は半閉鎖的で、流出した赤

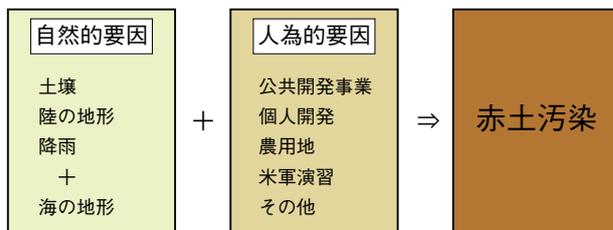


図1 赤土汚染が引き起こされる仕組み。赤土等が流出しやすい「自然的要因」をはらんでいるところに、「人為的要因」が加わると流出が起きやすい。さらに、礁池内は海水の循環が悪く、赤土等が堆積してサンゴ礁に悪影響を及ぼしやすい

土等の大部分はここに堆積する。堆積した赤土等は、台風や季節風の波浪で巻き上げられて再び海中に懸濁する。すなわち、赤土汚染は強い雨が降った時だけの一時的な現象ではなく、慢性的にサンゴ礁の海を蝕んでいるのである。

4 赤土汚染モニタリング

沖縄で実際に用いられた赤土汚染レベル評価手法の例としては、沖縄県水産試験場（1978）が漁場環境調査で用いた底質を塩酸で処理する方法、氏家（1986）が海底の泥の堆積分布調査で用いた底質の粒度分布ふるい分け、沖縄県企画開発部（1993, 1994）がサンゴ礁調査で用いた底質の5段階目視法、藤岡（1997）がサンゴ礁生態系調査で用いたセディメントトラップ法などが挙げられる。

沖縄県衛生環境研究所では、海域の赤土汚染をモニタリングするため、1985年にSPSS簡易測定法を開発した（大見謝1987；大見謝2003）。SPSSは「content of Suspended Particles in Sea Sediment」の略で、日本語では底質中懸濁物質含量と称す。この測定法は、簡便な器材と簡単な操作で科学的なデータが得られ、検査にかかる時間が短く、実験施設が無くとも検査できる（図2）。このため、多くの行政機関や大学、NGOの調査研究や、小中学校における環境教育、漁業者の漁場管理などで用いられるようになった。1983年より採取されたこれまで

の底質の測定結果はデータベースとして構築されており、データ件数は2003年9月現在で約4,000件になる。SPSS簡易測定法による実際の測定値と底質の外観などはよく対応しており（表1）、海域の状況を説明しやすい。この測定法は、沖縄県における海域赤土汚染モニタリングの標準手法として位置付けられている。



図2 SPSS (content of Suspended Particles in Sea Sediment = 底質中懸濁物質含量) 簡易測定法。サンゴ礁海域の底質は大部分がサンゴの骨格等の生物由来でできた砂で、流出してきた土壌粒子と粒径が異なる。これを利用し、底質1 m²あたりに懸濁物質（赤土等）として何 kg 含まれているかを求める

表1 SPSS (content of Suspended Particles in Sea Sediment = 底質中懸濁物質含量) と底質状況、サンゴなどとの関係

ランク	SPSS kg/m ³		底質状況、その他参考事項
	下限	上限	
1		<0.4	定量限界以下。きわめてきれい。 白砂がひろがり生物活動はあまり見られない。
2	0.4≦	<1	水中で砂をかき混ぜても懸濁物質の舞い上がりを確認しにくい。 白砂がひろがり生物活動はあまり見られない。
3	1≦	<5	水中で砂をかき混ぜると懸濁物質の舞い上がりが確認できる。 生き生きとしたサンゴ礁生態系が見られる。透明度良好。
4	5≦	<10	見た目ではわからないが、水中で砂をかき混ぜると懸濁物質で海が濁る。 生き生きとしたサンゴ礁生態系が見られる。
5a	10≦	<30	注意して見ると底質表層に懸濁物質の存在がわかる。 生き生きとしたサンゴ礁生態系のSPSS上限ランク。
5b	30≦	<50	底質表層にホコリ状の懸濁物質がかぶさる。 透明度が悪くなりサンゴ被度に悪影響が出始める。
6	50≦	<200	一見して赤土等の堆積がわかる。底質攪拌で赤土等が色濃く懸濁。 ランク6以上は、明らかに人為的な赤土等の流出による汚染があると判断。
7	200≦	<400	干潟では靴底の模様がくっきり。赤土等の堆積が著しいがまだ砂を確認できる。 樹枝状ミドリイン類の大きな群体は見られず、塊状サンゴの出現割合増加。
8	400≦		立つと足がめり込む。見た目は泥そのもので砂を確認できない。 赤土汚染耐性のある塊状サンゴが砂漠のサボテンのように点在。

5 赤土汚染がサンゴ礁に及ぼす影響

沖縄沿岸では、サンゴ群落を中心とした豊かなサンゴ礁生態系がみられる。サンゴ礁は生物種の宝庫である熱帯雨林とならんで地球上で単位面積あたりに棲息する生物の種類数が最も多い場所であるといわれている。立体的空間を無数に有する枝状やテーブル状のサンゴ群落はいわば海底の「アパート群」で、エビやカニなどの小動物に「住家」や「隠れ家」を提供している。また、その小動物を捕食しようと魚類が集まるなどして、サンゴ群落を中心とした生態系が成り立っている。このような樹枝状構造の主要な造礁サンゴ（以下、サンゴ）としては、ミドリイシ属 (*Acropora*) などが挙げられる。海底のサンゴが死滅し、サンゴ群落の立体的空間が減少すると、そこではいずれ魚たちの姿も見られなくなる。

外海に開放的な地形で、強い風によって波が立ち、底質が巻き上げられやすい礁池では、SPSS の季節変動が観察される場合がある（大見謝ら 1993）。そのような礁池では、SPSS の最高値は、サンゴの被度の上限とよく対応している（大見謝ら 2000a）。沖縄県内97地点で調査された SPSS とサンゴの被度の分布は次式で示される。

$$Y^{(1/2)} \leq -5.43 \log X + 15.6$$

X : SPSS (kg/m^3)

Y : サンゴ被度 (%)

赤土汚染がほとんど見られない慶良間諸島海域では、概してサンゴの被度が高く、ミドリイシ属が優占している（写真2）。赤土汚染が進行し、SPSS が $30\text{kg}/\text{m}^3$ を超えるようになると、サンゴ種全体におけるミドリイシ属の出現割合は減少する。さらに赤土汚染が進行するにつれ、ミドリイシ属の大きな群体は姿を消し、サンゴ被度も減少していく。一方、塊状ハマサンゴ類 (*Porites*) やキクメイシ科 (*Faviidae*) などの、立体空間に乏しい塊状タイプの出現割合が相対的に高くなる。SPSS の最高値が $400\text{kg}/\text{m}^3$ を超えると、濁った海に塊状サンゴが点在する光景となり、「砂漠のサボテン」を思い浮かばせる。このような海域でもミドリイシ類は岩礁の上部などに着床するが、大きく成長することができず大部分は1～2年で死亡する（大見謝ら 2003）。ここまで至った海は、漁業や観光などの資源としての価値をほとんど失ってしまう。



写真2 赤土汚染がほとんど見られない慶良間の海は概してサンゴの被度が高く、ミドリイシ属 (*Acropora*) が優占している

サンゴ礁におけるサンゴ種の構成と、季節変動する SPSS の最高値とは関連性がある。塊状ハマサンゴ類は、どのような赤土等堆積レベルでも相対的に出現割合が高く、また、白化耐性も強いので（大見謝ら 2000b）、最も環境変動に強いサンゴの一つとして挙げられる。なお、キクメイシモドキ (*Oulastrea crispata*) は SPSS の最高値が高い海域に特徴的に出現するので、海底の泥っぽさの指標種として有効だと考えられる（大見謝ら 1999）。

6 赤土汚染の歴史

第二次世界大戦後、沖縄島北部や八重山群島の山地において、米軍が持ち込んだブルドーザーなどの重機類を使用してパイナップル畑を造成するようになったのが、赤土汚染の始まりといわれる。1972年の日本復帰後、沖縄を「本土並み」の社会基盤に整備するため大規模な公共工事などが相次いだ。当時、沖縄の公共工事では赤土等流出防止対策が皆無か、とられていたとしても赤土等の流出を半分程度に抑制するレベルであった。このため、大規模開発を行うと沿岸が赤土等で覆われ、漁業被害に対する苦情が相次いだ。

これに対し、県内のマスコミ各社は1980年代後半から赤土汚染を止めようとキャンペーンを張り、沖縄の世論は開発優先主義から赤土等流出防止へと傾いていった。1992年には、沖縄県内の水産関係6団体は55,000名の署名を携え、赤土流出防止条例の早期制定を県に要請した。

これを受け、沖縄県は1994年に沖縄県赤土等流出防止条例（以下、赤土条例）を制定し、1995年10月から施行した。

赤土条例により、開発面積が1,000m²以上の事業は事前届出などの規制がかかるようになった。また、開発現場からの排水基準をSS（水の濁りの目安）で200mg/l以下と定めている。たとえば農地造成工事を無対策で行うと、SSは赤土地域で最大10,000mg/l、泥岩地域では80,000mg/lに達する。開発事業者は、濁水流出防止対策を実施し、赤土等流出の98～99%を抑制する義務を求められるようになったのである。

7 今後の赤土汚染問題の展開

SPSSのデータベースを解析して、1995年の赤土条例施行前後における沖縄沿岸の赤土汚染状況の変化を評価した。その結果、開発事業からの赤土等の垂れ流しが規制され、極端な赤土等の堆積は減少したが、いまだに沿岸の4割弱が赤土汚染にさらされていることが明らかになった。その主要な流出源として、農地が挙げられた（大見謝ら 2002）（写真3）。

農地からの赤土等流出防止対策には、行政機関によっていくつかの有効な手法が提案され、その効果が実証されているが、農家への普及はコストや労力などの問題があり、遅れている。今後、農家が対策を取り入れやすくする制度の導入やシステムの構築が必要である。その前段階として、「農地からの赤土等の流出量をどの程度まで削減すればサンゴ礁を保全できるか」という論議が不



写真3 一部が崩れ、侵食された農地。赤土の主要発生源となっている

可避である。そのためには、今後、サンゴ礁における赤土等流出に関する環境指針値設定、陸域での流出とサンゴ礁での拡散・堆積予測モデルの確立、各種農地対策効果の実証データの蓄積、農地対策のコストとサンゴ礁の経済的価値の比較など、陸域とサンゴ礁を繋ぐ包括的な研究が求められる。

また、JICA研修を通して、サンゴ礁を有する発展途上国の研修員にSPSS簡易測定法を活用したモニタリング手法や沖縄の赤土等流出防止技術情報などを技術移転しており、沖縄における赤土等流出防止の取り組みが、近い将来これらの国々で役に立つ日が来るものと期待される。

8 栄養塩調査

沖縄での陸域起源の栄養塩がサンゴ礁に及ぼす影響に関するフィールド調査事例は、土壌流出問題に関する調査と比較するときわめて少ない。栄養塩がサンゴに及ぼす影響に関する室内実験に関しては、中野（2002a）が総括している。ここでは、栄養塩に関するフィールド調査をいくつか紹介する。

沖縄県では、公共用水域水質監視の一環として、県内10海域53定点で年2～6回の全窒素（TN）、全リン（TP）の測定を行っており、その結果を年報で報告している。

環境省では、海域の利用目的に応じてTN、TPの環境基準を定めている。この基準は、海洋植物プランクトンの著しい増殖が生ずる恐れがある海域を指定して適用されたもので、貧栄養のサンゴ礁生態系については考慮されていない。沖縄県では、指定海域がなく、この基準は適用されていない。国内の最も厳しい環境基準は、年間平均値（算術平均）でTNが0.2mg/l、TPが0.02mg/lである。仮にこれが適用されたとして、2001年度の沖縄県の公共用水域（海域）測定結果（沖縄県文化環境部 2003）で環境基準を超えるのは、TNが16地点（30%）、TPが5地点（9%）であった。これらは、那覇港海域で4地点、宮古島与那覇湾で3地点、金武湾で3地点、中城湾2地点、北谷町沿岸で2地点、その他2地点で出現した。最も高い平均値を示したのは、TN、TPとも、那覇港海域那覇港入り口で、TNが1.10mg/l、TPが0.063mg/lであった。これは、下水処理場の排水口の

近くで採水しているため、その影響と思われる。

サンゴ礁における過剰な栄養塩は、おもに表流水または地下水によって陸域から供給される。窒素には、質量数が14と15の原子が存在する。梅沢ら（2001）は、石垣島において、外洋よりも、河川水や地下水の方が有意に質量数15の窒素原子が多いことに着目した。そして、サンゴ礁で、海岸線から沖合いに向けて海藻に含まれる質量数15の窒素原子含有比率が減少していくことから、陸域からの栄養塩流出を類推している。河川水や地下水が海域に流入すると塩分濃度は低くなる。大見謝ら（2003）は、沖縄沿岸のサンゴ礁において、栄養塩濃度が高い海域は塩分が低くなる傾向があり、栄養塩濃度の増大は陸域由来としている。

沖縄において、定点を設け栄養塩とサンゴの関係を長期にわたって観察した事例はないものと思われる。単発的な研究事例としては、下田ら（1998）が県内25海域で栄養塩濃度とサンゴの状態を観察し、TNで0.1mg/l、TPで0.01mg/l以上では、サンゴの生育が良い地点はなかったとしている。

大見謝ら（2003）は、長期にわたって SPSS とサンゴの成長を 2 m × 2 m の方形枠で観察している県内各地の24定点において、栄養塩と塩分濃度調査を加えた。この調査の中で、相対的に TN、TP とも高かったのは金武湾奥に位置する石川市漁港地先と沖縄電力石川発電所地先、玉城村アージ島、石垣市轟川河口北カメイシの4地点であった。これらの方角枠内では、ミドリイシ属の着床が全く観察されないか、または1群体の生息が確認された地点があったが、それもその後消失し新たな着床はみられなかった。これらの地点よりも SPSS が同等か高い海域でもミドリイシ属の着床は観察されているので、高濃度の栄養塩がミドリイシ属に悪影響を及ぼしていることが示唆された。

沖縄県環境保健部（1989）は、1988年に金武湾における赤土の堆積とサンゴの生育に関する調査を実施した。サンゴの調査は27地点で行われたが、ミドリイシ属が卓越した地点はなかった。また、調査地点ごとによく見られたサンゴを数種挙げているが、ミドリイシ属の記載は1地点のみであった。金武湾は半閉鎖的な地形で、沿岸に人口密集地や多くの畜舎などがあり、前述のように栄養塩濃度が高い。ミドリイシ属が少ないのは、栄養塩濃度と関連している可能性がある。

9 サンゴ礁保全のための環境指針

サンゴ礁海域への陸域からの影響として、土壌や栄養塩の過剰な流出が挙げられる。サンゴ礁海域における赤土等の堆積や栄養塩などに関しては、環境基準を設け、基準を達成するために陸域の開発等を規制するなどの方策が望まれるが、残念ながら日本ではまだ明確な環境基準は制定されていない。筆者らの長期にわたる定点観測や、県内各地での調査では、ミドリイシなど赤土の堆積に対する耐性が弱いサンゴが生育している、環境が良好な海域では、SPSS が $30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下であることから、沖縄のサンゴ礁を健全に保つための赤土等の堆積に関する環境指針として、SPSS の最高値を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑えることを提案した（大見謝ら 2003）。また、栄養塩濃度に関しても、早急に指針を提示することが望まれる。