

## 第2章 赤土と濁水評価

### 2.1 はじめに

この章ではまず、調査研究で対象とした沖縄県の本島と西表島の土壌分布状況を提示すると共に、分布している土壌の主要な特徴について説明している。次に赤土の流出問題に対して現在実施されている防止・管理対策と赤土濁水の測定方法について記述している。最後に、沖縄本島中部地域の貯留型沈砂池で実施している濁水評価測定装置の開発に関する従来の検討経緯等についてまとめている。

### 2.2 沖縄本島と西表島の土壌分布

沖縄県は亜熱帯海洋性気候帯に属し、降水量は年間 2000 mm を超える。そのため年間を通して本土よりも気温が高く、また雨量が多いことから高温多雨地域といえる。高温多雨に代表される熱帯雨林地域では、水や炭酸ガス、酸素などの働きで岩石の表層部分の化学成分が変質し、粘土鉱物などが造られる「化学的風化」が活発で、地表から深いところまで風化がおよぶ厚層風化が生じる。沖縄県も高温多雨地域であることから同様に化学的風化が活発であり、熱帯雨林地域ほどではないが厚層風化が生じている。

沖縄本島に分布する主要な土壌は国頭マーヅ、島尻マーヅ、ジャーガル、沖積土である。西表島では国頭マーヅ、島尻マーヅおよびカニクと呼ばれる海成沖積土壌が分布している。沖縄本島における土壌分布図を図 2-1 に、西表島における土壌分布図を図 2-2 に示している。マーヅ（真土）とは赤色系土壌、ジャーガルとは灰色系土壌を指す沖縄県の方言であり、マーヅはさらに国頭マーヅと島尻マーヅに区分される。国頭マーヅとは非石灰岩母材に由来する赤黄色土の酸性風化土壌であり、島尻マーヅとは石灰岩質母材に由来する暗赤色土の風化土壌である。沖縄県において赤土とは通常、この国頭マーヅ土壌を指す。国頭マーヅの土壌が赤色を呈しているのは土壌中に含有されている赤鉄鉱によるものである。一般的には、国頭マーヅ、島尻マーヅ、ジャーガルおよびジャーガルの母材であるクチャなどの土壌母材を含めて赤土等と呼んでいる。主要赤土の内、国頭マーヅ、島尻マーヅ、ジャーガルの各種特性を表 2-1 にまとめている。

本研究で赤土の調査対象地域とした本島中部と北部地域では、大部分が国頭マーヅ地域であり、一部に島尻マーヅと沖積土壌の存在が確認される。西表島も同様に大部分を国頭マーヅが占め、沿岸に島尻マーヅとカニク（海成沖積土壌）の堆積がわずかに認められる。これらの土壌

の内、国頭マージは表 2-1 に示すように母材が多様である。北部地域の国頭マージは図 2-3 に示すように、東西に分布する国頭層群(名護層)、中央部を南北に分布する国頭層群(嘉陽層)、そして太平洋沿岸に分布する琉球層群(国頭礫層)に由来する。中部地域での国頭マージは図 2-4 に示すように北部と西部に分布する国頭層群(名護層)、中央部に分布する国頭層群(嘉陽層)と太平洋側および東シナ海側に点在する国頭礫層に由来する。また西表島では八重山層群(砂岩)の風化残積土が国頭マージと呼ばれている。これら母材の堆積年代について表 2-2 に示している。同表によると、本島北部・中部地域に分布する名護層の国頭マージは中生代白亜紀の堆積年代であるが、嘉陽層の国頭マージと南部地域の島尻マージは新生代第三紀の堆積土壌である。また島一面に分布する西表島の八重山層群の国頭マージは、新生代第三紀中新世の地層となっている。

### 2. 3 赤土流出問題と現在の防止・管理対策

沖縄県での赤土流出は公共事業や土地改良などの大規模開発事業、リゾート開発などの民間事業、農地や米軍演習地からの流出が主な原因である。その割合について比嘉ら<sup>7)</sup>の報告によると、赤土等の年間流出量において主要流出原因である赤土流出の割合は、開発事業：52.8%、農地：32.5%、米軍基地：8.6%、民間事業：3.7%という結果になっている。またこれらの地域の年間単位面積当りの流出量では、開発事業：178.6t/ha 年、農地：2.2t/ha 年、米軍基地：1.1t/ha 年、民間事業：24.4t/ha 年となっている。この結果によると、流出量では開発事業と農地が多く、1ha 当たりでは開発事業と民間事業地域からの流出量が多くなっている。

これらの地域では公共土木工事や農業の耕作による裸地の地域が多く存在し、国頭マージ土壌がむき出しになっている地域が多い。国頭マージ土壌は土粒子の分散性が高いため、裸地では降雨による土壌浸食が生じやすい。さらに沖縄の降雨はスコール型であり雨滴も比較的大きく、梅雨や台風の季節以外においても時間強度の高い雨が観測される。そのため裸地化した地域では特に赤土が流出・流亡しやすい状態にある。これらの地域より流出した赤土は、河川を経て海域に流出する。その赤土の流出により、①珊瑚礁の成育、②水産業、③観光業、④水源地や生活用水などは深刻な被害を受け、1991年の被害額の総計は1億4688万円に達している。その中でも水産業関連の被害が最も大きく、年間被害額は1億1850万円(80.7%)に達している<sup>8)</sup>。このため沖縄県では開発行為によって発生する赤土等の流出を規制し、河川や海域の汚濁防止を図るために1995年に「赤土等流出防止条例」<sup>1)</sup>を施行している。この条例では、事業行為者に対し、事業行為の届出を義務付けると共に、赤土等の流出防止のために必要な措置を講じ

るように定めている。その措置として条例では、3つの赤土等流出防止対策<sup>9)</sup>を義務付けている。それは①発生源対策（裸地面からの赤土発生の抑制を目的とした植生などの表土保全や仮表土保全）②流出濁水対策（流出濁水による侵食の防止や工事区域外の雨水の混入防止）③最終処理対策（濁水の一時貯留、沈殿、ろ過等による排出基準値までの濃度低下）の3点である。これらの対策のうち、②は③の濁水処理量の軽減化を図る対策であることから、流出防止対策は発生の抑止（①）と流出の防止（②と③）に大別される。

発生の抑止については裸地化した地域への植生、種子吹付け、マルチング等があり、流出の防止には②の小堤、水路、柵と籠および③の沈砂池がある。特に流出防止の施設である②の小堤については、裸地傾斜2度以上で30mごとに一箇所、2度以下で40mごとに1箇所を設置し、③の沈砂池では、裸地面積1000m<sup>2</sup>につき150m<sup>3</sup>以上の容積を確保することが義務付けられている。また沈砂池の排出基準値は浮遊物質（SS濃度）が200mg/l以下と管理基準により規定されている。

以上の対策のうち、③の最終処理対策として貯留型沈砂池を設置した地域が本島中部にある。この地域では流出する赤土の大部分が米軍の演習場内からもたらされており、発生源対策を行うことが困難であるため、河道域での濁水対策として貯留型沈砂池を設置している。現在、貯留型沈砂池は太平洋側に10地点、東シナ海側に2地点の計12地点に設置されている（図2-5）。この貯留型沈砂池は演習地内から流出した赤土の濁水を一時的に貯留し、排出基準値を満たすまで自然沈降を行った後、その上澄みを排出する施設である（写真2-1）。この施設を建設することによる赤土流出の防止効果に関して中部地域の金武町加武川で実施した谷口ら<sup>10)</sup>の研究では、貯留型沈砂池の赤土除去率は約9割であり、その有効性が立証されている。このため現状では、貯留型沈砂池は赤土流出の防止対策として非常に有効な施設となっている。

貯留型沈砂池に貯留した赤土濁水の排出判断は、現状ではSS濃度を直接測定する方法と、濁度計あるいは透視度計を使用した簡易測定により濁度から間接的にSS濃度を推定する2つの方法で実施されている。

## 2.4 濁水濃度の測定方法

最終処理対策である貯留型沈砂池で貯留された赤土濁水の排出は、赤土等流出防止条例の施行規則により、濁水の排出基準が浮遊物質（SS濃度）200mg/l以下と定められている。SS濃度とは濁水の濁りを評価する指標であり、この他に濁度、透視度による濁りの評価方法がある。排出基準とされるSS濃度の測定は室内で行われる測定方法であり、SS濃度は現地での排

水の可否判断には即応できないパラメーターである。そのため濁度計または透視度計による簡易計測を行い、濁度値から SS 濃度の値を推定している。ここでは、まず濁水の評価指標である SS 濃度、濁度、透視度に関する測定方法について概説する。さらに花城ら<sup>11)</sup>の研究成果を参考にし、原田<sup>12)</sup>がまとめた本島中部地域の貯留型沈砂池での各指標間の相関関係について例示する。

#### 2. 4. 1 SS 濃度測定法<sup>13)</sup>

懸濁水中の浮遊物質の濃度指標となっている SS 濃度は、水溶液 1*l*中に含まれている水中の不溶性物質を表している。測定は濁水試料をメンブランフィルターなどのろ過材（口径 0.45  $\mu\text{m}$  または 1.00  $\mu\text{m}$ ）を使用して吸引ろ過を実施し、ろ過材上に残留した物質をろ過材と共に時計皿に入れて 105~110°C で 2 時間過熱、乾燥させる。その後デシケーター内で放冷し、その質量 (*mg/l*) を求める。算出式を以下に示す。

$$S = (a - b) \times \frac{1000}{V}$$

*S* : SS 濃度 (*mg/l*)

*a* : ろ過後のろ過材および時計皿の質量 (*mg*)

*b* : ろ過材および時計皿の質量 (*mg*)

*V* : 試料 (*ml*)

#### 2. 4. 2 透視度測定法<sup>14)</sup>

試料の透明度を評価する方法で、透視度の単位については 10 *mm* を 1 度として表し、測定範囲は 1~30 度である。

よく振り混ぜた試料水を透視度計に入れて上部から透視し、底部に置いた標識板の二重十字が初めて鮮明に識別できるまで下口から試料水を流出させる。その時の水面の目盛りを読み取る。この操作を 2~3 回実施して平均値を求めて透視度として度に変換する。

#### 2. 4. 3 濁度測定法<sup>15)</sup>

濁度は水の濁りの程度を表し、測定方法は視覚濁度、透過光濁度、散乱光濁度および積分球濁度に区分される。濁度はカオリンまたはホルマジンの標準液と比較され求められる。なお本研究で使用した濁度測定装置は散乱光濁度の方法による測定装置である。

#### (1) 視覚濁度

試料水とカオリン標準液を比色管に入れたものを暗箱で肉眼により透視して濁りを比較し、該当するカオリン標準液から試料水の視覚濁度を算出する。

#### (2) 透過光濁度

試料水を吸収セルにとり、波長 660 nm 付近における透過光の強度を見掛けの吸光度で求める。その後カオリンまたはホルマジン標準液から求めた検量線から試料水の透過光強度を求める。

#### (3) 散乱光濁度

試料水を吸収セルにとり、散乱光濁度計により試料中の粒子によって散乱した光の強度を波長 660 nm 付近で測定して散乱光の強度を測定する。その後カオリンまたはホルマジン標準液から作成した検量線から試料水の散乱光濁度を求める。

#### (4) 積分球濁度

水中の粒子による散乱光の強度  $Td$  と透過光  $Tt$  の強度との比 ( $Td/Tt \times 100$ ) を算出し、カオリンまたはホルマジン標準液を用いて作成した検量線から、試料水の積分球濁度を求める。

### 2. 4. 4 SS 濃度、濁度、透視度の相関性

SS 濃度、濁度、透視度の相関性を求める際に使用した貯留型沈砂池の赤土濁水は、02 前山原、03 山原、05 平川原 1 号、09 シッチ原、10 ウッタ川の 5 沈砂池のものである (図 2-5 参照)。測定については平成 7 年～9 年に降雨終了翌日から約 6 日間にわたり、SS 濃度、濁度、透視度について測定している。この各測定法により得られた SS 濃度、濁度、透視度の逆数の間の回帰式について表 2-3 にまとめている。各沈砂池の関係を集計し、全沈砂池に適用できるように表した平均的な回帰式を以下に示している。

SS 濃度と濁度の回帰式については

$$\log(SS) = 0.9539 \log(\text{濁度}) - 0.0728$$

$$R^2 = 0.941$$

SS 濃度と透視度の逆数の回帰式については

$$\log(SS) = 1.2299 \log(\text{透視度の逆数}) + 2.6764$$

$$R^2 = 0.897$$

また濁度と透視度の回帰式については

$$\log(\text{濁度})=1.2029 \log(\text{透視度の逆数})+2.8181$$

$$R^2=0.933$$

各関係式の  $R^2$  値は高く、相関性も高い。現在建設されている 12 基の貯留型沈砂池では、現地で堤内濁水の濁度を計測し、上式のような相関式を適用して SS 濃度を推定することによって、赤土濁水の管理や放流判定を実施している。

## 2. 5 濁水評価測定装置における従来の検討経緯

花城らや原田により、簡易測定での透視度～SS 濃度関係および濁度～SS 濃度関係には高い相関性のあることが指摘されている。この結果により、貯留型沈砂池での濁度あるいは透視度の簡易測定による SS 濃度の推定精度は高いといえる。しかしながら沈砂池の設置地域は図 2-5 に示すように、中部地域の太平洋側と東シナ海側に点在し、各沈砂池において濁度あるいは透視度測定を実施し排出の可否を決定するには多大な時間と労力を要する。また沈砂池の多くが米軍演習場内にあるため、入場する際、やっかいな手続き許可が必要となり、頻繁な測定は困難となる。そのため赤土濁水の流入量が多い梅雨や台風の時期の場合、適切な沈砂池の運用・管理が困難となり、オーバーフローする可能性も考えられる。さらに濁度による現地測定は沈砂池の貯留水を採水する必要があるため、特に悪天候時に測定を実施する機会が多く、転落、落水などの危険が伴う。これらの実情を踏まえた場合、沈胴型の濁度自動測定装置の導入が望ましいが高価であり、建設された 12 地点の沈砂池へは現在導入されていない。このため従来から行われてきた人力による現地測定に変わる安価な自動濁水評価測定装置の導入が望まれていた。そこで伊原<sup>16)</sup>は安価に入手可能な市販のデジタルカメラを利用して濁水を撮影する測定装置を初めて試作し、デジタル画像による輝度から SS 濃度を推定する方法について検討を試みている。本研究ではこの測定原理に基づき、さらに不都合な点に種々の改良を加えた測定装置の開発を試みている。ここでは、まず伊原によって作製された測定装置の原理と測定方法についてまとめている。

### 2. 5. 1 測定原理

デジタル画像は赤、緑、青 (RGB) の輝度値を持った画素 (ピクセル) の集合で表現される。伊原の研究<sup>16)</sup>はデジタルカメラにより撮影された画像が有する画素の特徴と濁度の関連付けを試みている。撮影された画像の RGB の各成分について各画素の輝度をもとに等輝度線 (等高線) を引き、それぞれの輝度が占める面積比をもって、画像全体のパターンとして

いる。デジタル画像の面積比は、画像中の全画素数に対してその色調となっている画素の度数を数えることにより求めることが可能であるため、輝度値 0～255 範囲を 7 階級に区分して度数分布を求め、画像の有するパターンとしている。この方法により標準試料の濁水の濁度に応じたパターンを求め、未知試料のパターンとの比較を行うことにより未知試料の濁度の判定を行っている。

### 2. 5. 2 濁水評価測定装置の構造と測定

デジタルカメラを使用した濁水評価測定装置の概念図を図 2-6 に示す。測定装置はデジタルカメラと本体および容器から構成される。撮影は、赤土の濁水を下部の容器に満たした後、本体およびカメラを設置して実施する。この際、外部からの光は本体により遮断されるため撮影への影響はない。また撮影時の光源はカメラに内蔵されているストロボを使用し、発光は本体の反射鏡により反射され、赤土濁水中を水平に進行する。この光により濁水中に生じる散乱光を上方に設置したカメラにより撮影する。この撮影の際、シャッタースピードなどの露出は固定し、同一条件下で各濁水の撮影を実施している。

測定については本島中部の 12 箇所の沈砂池のうち、02～11 の各沈砂池（図 2-5 参照）において実施している。各沈砂池から採取した赤土を試料とし、沈砂池ごとに濃度調整を 10～1000 mg/l 範囲で変化させて、濁度に伴う濁水の画像撮影を実施している。

### 2. 5. 3 測定した度数による検量線

画像については、輝度値 0～255 を 0, 8, 16, 32, 64, 128, 256 の 7 階級に分け度数分布を求めている。この階級と濃度の関係から、SS 濃度 200 mg/l に相当する濁度 150 ppm 以下の範囲では、輝度 0 の階級の RGB 各成分において負の相関性が認められている。図 2-7 には 02 前山原沈砂池で求めた輝度 0 の度数と濁度の関係について示している。また 02～11 の沈砂池での各色調について求めた回帰式を表 2-4 に示している。表 2-4 より信頼値である  $R^2$  値は高く、開発した装置による濁度の推定は濁度 150 ppm 以下において測定可能であるといえる。

## 2. 6 まとめ

赤土の大きな土性としては、亜熱帯海洋性気候に属するため本土の土壌と異なり風化の進行が早く、熱帯地域の土壌に近いことが挙げられる。そのため赤土は細粒質で耐水性団粒が少ない土壌のため、降雨特性の影響を受けやすく、流出が容易な土壌である。赤土等流出防止条例による対策では、流出抑制と流出防止が主眼となっている。後者の施設である貯留型沈砂池の濁水の評価に関する既往の研究（SS濃度、濁度、透視度についての相関性）では高い相関性が認められ、濁度および透視度によるSS濃度の推定においては、信頼性の高いことが理解できる。またデジタルカメラによる濁水の評価に着目した伊原の研究では、濁度 150 *ppm* 以下の推定が可能であることが確認された。