

長期観測連続データに基づく農地流域からのサンゴ礁への 赤土流出特性の解析

灘岡和夫*・山本高大**・Enrico Paringit***

琉球列島における赤土流出現象は様々な時間スケールの変動要素が内在する複雑な非定常過程である。そのため赤土流出の定量的な把握には長期間の連続観測が不可欠となるが、これまでそのような長期連続観測の実施例は見当たらない。本研究では、石垣島轟川流域において河川濁度・水位および降水量について長期連続観測を約4年間にわたり実施し、時間履歴効果や季節変動特性について解析した。それにより、赤土流出量が先行降雨量の大小にかなり大きく依存することを明らかにし、USLE 式に代表される既存の表層土壌流出評価モデルに先行降雨影響が全く考慮されていないことの問題点を指摘した。また、赤土流出の季節変動特性を調べることで、サトウキビ収穫後の時期での赤土流出対策の重要性を指摘した。

1. はじめに

琉球列島では赤土流出によるサンゴ礁の汚染が大きな環境問題となっている。赤土流出現象は、沖縄固有の土壌や特徴的な降雨条件といった自然要因に加えて、農地開発やリゾート開発などの人為的な要因が大きく関与している(大見謝, 1992)。赤土流出をもたらす出水イベントは数時間程度の短期的現象であるが、赤土流出には、さらに植生の季節変動や土地利用変化の経年変動といった様々な時間スケールを持つ変動要素が加わっている。すなわち、実際の赤土流出過程は、さまざまな時間スケールの現象が混在した複雑な非定常過程として捉える必要がある。したがって、その実態を定量的に明らかにするには、長期的な連続観測データが不可欠となる。しかしながら赤土流出現象を含めた土砂流出のモニタリングは数多く行われているものの(例えば、長谷川・中原, 1987; 吉永・扇長, 1993; 木本ら, 1998; 南ら, 2002)、長期連続観によるものはほとんどない。したがって、当然ながら、赤土流出現象における時間履歴効果の解析といった、時間軸上の情報が必要となる解析はこれまでほとんど行われていない。

そこで本研究では、当研究室で実施している約4年間に及ぶ長期連続観測によって得られた、沖縄県石垣島轟川流域の下流端での水深および濁度データ、そしてやはり当研究室で行った当該流域の降水量観測によるデータを解析することによって、これまでほとんど明らかにされていない、赤土流出に対する先行降雨条件の影響や赤土流出の季節変動特性について検討した。

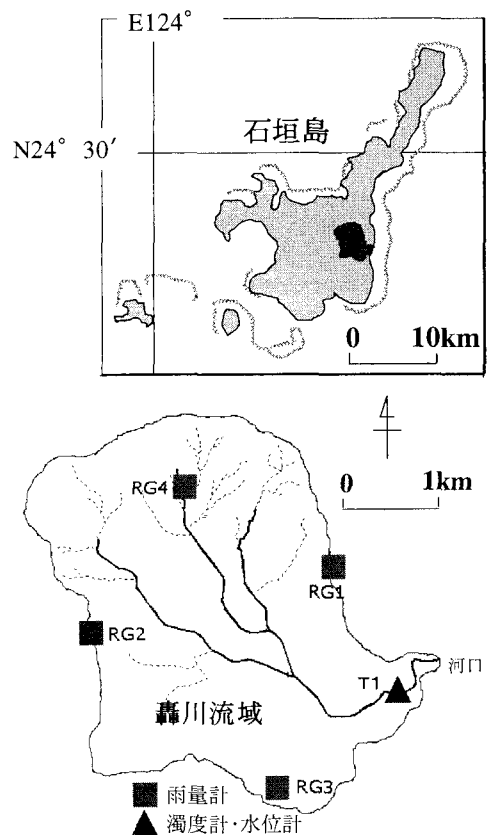


図-1 石垣島轟川流域と観測機器設置場所

2. 方 法

(1) 観測地概要

観測対象とした沖縄県石垣島の轟川は、石垣島の東部を流れる全長約3km、流域面積12.4km²の小規模な河川である(図-1)。流域にはサトウキビやパイナップルといった農地や畜産用の放牧地が広がっている。轟川河口が位置する石垣島東海岸は、もともと豊かなサンゴが

* フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報工学専攻
** 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻
*** (博)工 Assistant Professor, Department of Geodetic Engineering, University of the Philippines, Diliman

表-1 使用測器を観測モード

測定機器	名 称	測定間隔
水位計	DIVER (Van Ennen 社製)	10 min
濁度計	ATU-3, ATU-5 (ALEC 電子社製)	15 min
雨量計	DATA LOGGING RAIN GAUGE (Onset computer 社製)	—

生育している南北に広がるサンゴ礁海岸だが、近年、赤土流出によるサンゴの衰退が報告されており（満本ら、2000）、沖縄における典型的な赤土流出問題を抱えるリーフ海域の一つであるといえる。

(2) 観測方法

観測は、図-1 に示す流域のほぼ末端に位置する T1 地点（轟橋地点）での河川水位・濁度計測と、流域内の降雨量計測からなる。用いた計測装置は、それぞれ光学式自記メモリタイプ濁度計、圧力式自記メモリタイプ水位計、転倒マス型自記メモリタイプ降雨計である（表-1）。なお、熱帯・亜熱帯地域特有の局所性の強い降雨パターン（カタ降り）がこの地域でも見られるため、降雨観測点は図-1 に示す 4 地点（RG1～RG4）とした。観測期間は2000年8月から2004年11月である（一部データの欠落期間有り）。

(3) 解析方法

長期連続観測データに基づいて以下の諸量を算出した。

a) 流 量

大気圧補正を行った後の水位データから、轟橋地点における水位-流量関係式（沖縄県環境保健部環境保全課、1994）によって流量値に変換した。

b) 濁質濃度

濁度計測に用いた自記メモリタイプ濁度計は後方散乱光計測に基づくセンサーで、発光・受光部分のガラス面の汚れをある一定間隔で機械的にクリーニングする機能を持つワイパー装置が装着されているが、ときどき、流下してきた草木やゴミなどの異物の影響と思われる異常なデータが現れる場合があった。そこで、そのようなノイズ部分を生データからあらかじめ排除した後に、観測期間中に採水した河川水の赤土濁度値から得られた検定カーブを用いて濁度データに換算した。なお水質の濁度はすべて赤土によるものと仮定した。

c) 降雨量

降雨量を求める際の降雨イベント（降雨が降って止むまで）の定義としては、「無降雨である時間が降雨前後で24時間以上の場合」とした。

d) 赤土流出量

赤土流出量は濁質濃度に河川流量を乗じた値で、観測地点 T1 における河川断面を単位時間あたりに通過する量、すなわち赤土輸送フラックスとして求めた。

e) 全赤土流出量

全赤土流出量は赤土流出量を 1 回の降雨イベントに対して時間積分した赤土の流出量とした。積分は降雨開始から降雨終了 1 日後まで行った。

$$SL = \int_{\text{降雨期間}} c \cdot Q dt \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 SL は全赤土流出量、 c は濁質濃度、 Q は流量である。

f) 有効降雨量

有効降雨量は降雨時における河川の流量増分（直接流出量）を流域面積で除した値とした。直接流出は実際の流量から基底流出量分を減じることによって算出した。また直接流出量は、降雨開始から降雨終了 1 日後までを計算の対象とした。

g) 流出率

流出率は降雨イベントの有効降雨量を平均降雨量で除した値とした。

3. 観測結果と考察

(1) 降雨条件と赤土流出特性

図-2 に降雨量、流量、濁質濃度の時系列データの一例を示す。平常時の濁質濃度はほぼ 0 に近い値を保っており、出水時に濁質濃度が急増している。

図-3 は、これらの時系列連続データに基づいて、降雨イベントごとの全赤土流出量と総降雨量の時系列の形で示したものである。これを見ると、総降雨量と全赤土流出量の間の量的関係は降雨イベントごとにかなり異なっていることがわかる。例えば、22日の降雨イベントによる降雨量（36 mm）は13日の降雨量（121 mm）に比べておよそ 1/3 程度であるにもかかわらず、全赤土流出量はほぼ同程度になっている。このことは、降雨-赤土流出関係に何らかのメモリ効果が存在することを示唆している。そこで、当該降雨イベントに先立つ期間の状況との関係を見てみると、22日の降雨イベントでは、2度の先行降雨が見られるが（13日125 mm、20日27 mm）、それに対して、13日の降雨イベントでは先行降雨はほとんどなかったことがわかる（1日1.6 mm）。この事実は、赤土流出過程における有意な先行降雨依存性の存在を強く示唆するものである。

先行降雨依存性については、これまで、流量と濁質濃度の関係（hysteretic loop）が異なることについての報告例（Seeger, 2004）があるものの、本格的な検討はほとんど行われていない。そこで、本研究では、まずこの先行降雨依存性に焦点を当てて解析を行った。

赤土流出量は式（1）に示すように流量と濁質濃度の積として表されるので、以下では別々に検討した。

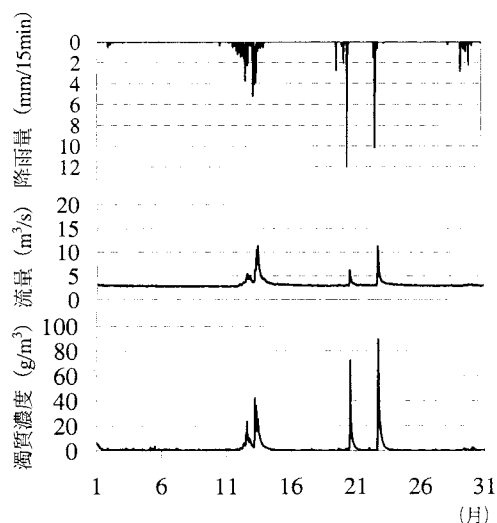


図-2 降雨量, 流量, 濁質濃度の時系列の一例 (2001年5月)

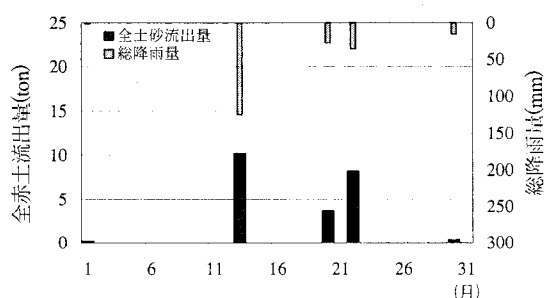


図-3 降雨イベントごとの全赤土流出量と総降雨量 (2001年5月)

まず流量に関しては, 表面流による表層土壌の剥離・輸送が土砂流出の発生メカニズムの一つとされており (木本ら, 1998), 赤土流出の大きな要因となっている (吉永・翁長, 1993). そこで降雨イベントの表面流の程度を示していると考えられる有効降雨量 (= 流量 / 流域面積) と降雨量の比, すなわち流出率を, イベントごとの先行降雨量によってグループ分けして示したのが図-4 である. 14日間の先行降雨量が20 mm 以上の場合, 20 mm 未満の場合に比べ, 平均的な流出率すなわち回帰直線の傾きが約1.8倍大きくなっており, 流出率が先行降雨量に大きく依存していることがわかる. このように先行降雨量によって流出率が異なるのは, 先行降雨量によって土壌の初期含水比が変化し (地頭蘭ら, 1997), 浸透能が変わることにより表面流量が変化したためと考えられる.

つぎに, 濁質濃度に関して, 降雨イベント中の最大濁質濃度と最大降雨強度の関係を流出率によってグループ

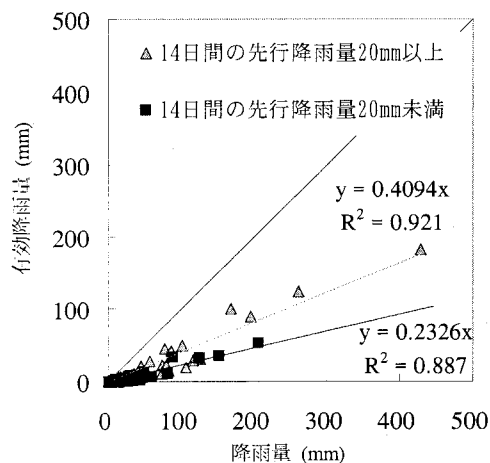


図-4 降雨イベントごとの流出率

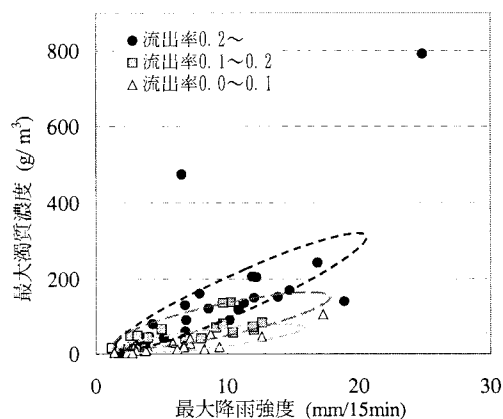


図-5 降雨イベントごとの最大濁質濃度と最大降雨強度

分けした結果を図-5 に示す. 最大濁質濃度は当然ながら最大降雨強度が大きいほど高くなっている. 重要な点は流出率との関係で, 同じ降雨強度であっても最大濁質濃度は流出率の増加に伴って顕著に大きくなっている. 表面流による土壌の侵食は, 流出率が高いほどが強くなると考えられ, 表面流による剥離・拡散作用が最大濁質濃度に及ぼす影響が大きいことがわかる. これにより, 流出率が最大濁質濃度の重要な支配要因の一つになっていることが明らかとなった.

図-6 は, 全赤土流出量と最大降雨強度の関係を流出率によってグループ分けした結果である. これから, 最大降雨強度が6 (mm/15 min) 程度を境にして全赤土流出量が急増していることがわかる. しかし, 詳細に見ると, 最大降雨強度が6 (mm/15 min) 程度以上であっても全赤土流出量がごくわずかな降雨イベントが存在する. それは流出率が小さいグループの値で, 逆に全赤土流出

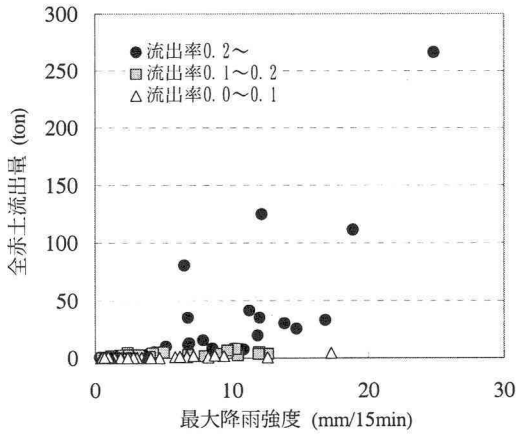


図-6 降雨イベントごとの全赤土流出量と最大降雨強度

量が大きい降雨イベントはいずれも流出率が0.2以上となっている。このことから、明らかに流出率の違いの効果が赤土流出量にかなり大きく効いていることがわかる。これは、先に示したように、全赤土流出量を支配する流量と濁質濃度の双方に強い流出率依存性が存在するため、この相乗効果によって、流出率の違いにより全赤土流出量が数倍も異なるという結果になっている。この流出率自体は先の図-4で示したように先行降雨量によって大きく異なることから、全赤土流出量は先行降雨量に大きく依存することがわかる。

赤土流出量の算出には、下記の Universal Soil Loss Equation (USLE) が用いられることが多いが(比嘉ら, 1995), この式では先行降雨の影響は全く考慮されていない。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 A : 単位面積あたりの年間土壌流出量, R : 降雨係数, K : 土壌係数, LS : 地形係数, P : 保全係数, C : 作物係数である。同程度の降雨量でも先行降雨量の違いによって赤土流出量に数倍もの違いが現れることを示した本研究の成果は、この USLE モデルの枠組みに本質的な変更・改良を迫るものである。

(2) 赤土流出の季節変化

つぎに、連続観測データを用いて、赤土流出量の季節変化特性を調べた結果について述べる。図-7に示す2001年1月～2003年5月までの月ごとの全赤土流出量と総降雨量を見ると、赤土流出量の変化は大局的に降雨量の季節変化に対応していることがわかる。

つぎに各月の全赤土流出量ならびに総降雨量を3ヶ月ごとにまとめた結果を図-8に示す。なお計算には2001年2月～10月、2002年5・6月、9月～2003年4月のデ

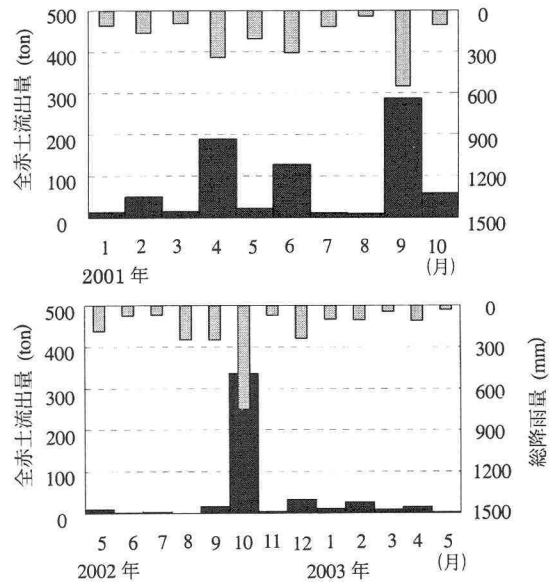


図-7 各月の全赤土流出量と総降雨量

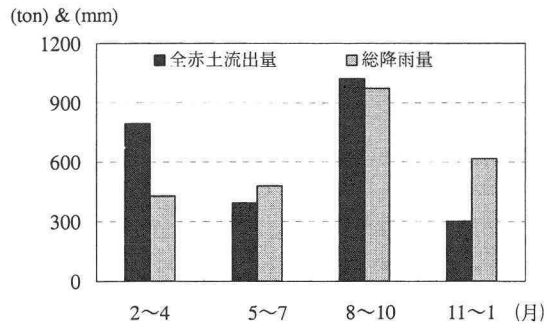


図-8 赤土流出量の季節変化

ータを用い、各月の平均値を3ヶ月ごと合計した。全赤土流出量は、8月～10月で最大になり(1,019 t)、ついで2月～4月となっている(794 t)。一方、総降雨量は8月～10月にかけて最も多かった(972 mm)のに対し、2月～4月に最も少なかった(430 mm)。ここで全赤土流出量(ton)を総降雨量(mm)で除した値でみると、2月～4月は1.84となり、他の四半期の値(5～7月0.82, 8～10月1.05, 11～1月0.49)に比べかなり大きくなっている。このように2月～4月の赤土流出が激しくなっている原因の一つとして、農地利用状況の季節変化の影響が考えられる。轟川流域では農地の7割近くがサトウキビ畑となっている(仲宗根ら, 2001)。図-9に示すサトウキビの栽培状況を見ると、夏植え、春植え、株出しといずれの栽培方法でも2月～4月は刈入れもしくはその直後の時期にあたる。このため2月～4月は農地の植生被覆率が下がり、相対的に少量の降雨でも多量

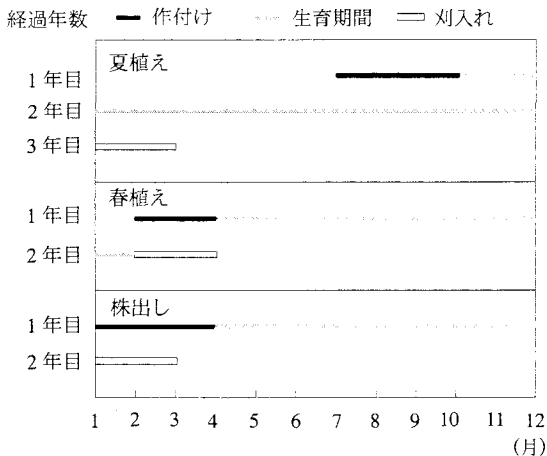


図-9 サトウキビの生育期間

の土砂流出が発生したのと考えられる。これらのことから、赤土流出防止の観点からは、降雨量の多い8月～10月とともに、この2月～4月の時期での適切な赤土流出防止対策の実施が重要になることが示された。

4. おわりに

本研究では、沖縄県石垣島轟川流域で約4年間にわたって実施した、河川水位・濁度および流域内における降水量についての連続観測によるデータに基づいて、時系列特性に着目した赤土流出特性解析を行った。その結果、

- 降雨イベントの流出率が、先行降雨量によって大きく変化することが分かった。
- また濁質濃度に関しては最大降雨強度に依存するとともに流出率にも大きく影響されることが示された。
- これらの相乗効果によって赤土流出量は流出率、したがって先行降雨量に大きく依存することが示された。
- 赤土流出量の算出によく用いられる USLE モデルでは先行降雨の影響は全く考慮されていない。同程度の降雨量でも先行降雨量の違いによって赤土流出量に数倍もの違いが現れることを示した本研究の成果は、この USLE モデルの枠組みに本質的な変更・改良を迫るものである。

e) 轟川流域での赤土流出特性には明瞭な季節変化がみられ、流域農地の約6割を占めるサトウキビの収穫時期である2月～4月にかけて降雨レベルに対する相対的な赤土流出量が多くなることがわかった。このことから、この時期の赤土流出防止対策の重要性が示唆された。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (1) (一般) (研究代表者：灘岡和夫、課題番号：14205071) を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 大見謝辰男(1992)：沖縄県における赤土汚染の現状，沖縄県公害衛生研究所報，第26号，pp. 87-96.
- 沖縄県環境保健部環境保全課(1994)：赤土流出実態調査，2章，平成5年度轟川流域赤土流出実態調査報告書，pp. 11-44.
- 木本秋津・内田太郎・大手信人・永山高久・李昌華(1998)：中国江南省の花崗岩山地の降雨流出特性と流出土砂量，砂防学会誌，第51巻，第1号，pp. 3-11.
- 国松孝男・村岡浩(1989)：河川汚濁のモデル解析，技法堂出版，pp. 150-161.
- 地頭園隆・永田治・寺本行芳・下川悦郎(1997)：火砕流堆積物および火山灰に覆われた雲仙普賢岳山腹斜面における表面流出，砂防学会誌，第49巻，第5号，pp. 42-48.
- 仲宗根一哉・比嘉榮三郎・大見謝辰男・安村茂樹・灘岡和夫(2001)：石垣島轟川のSSと栄養塩濃度，沖縄県衛生環境研究所報，第35号，pp. 93-101.
- 満本裕彰・大見謝辰男・小林孝(2000)：石垣島白保海域の赤土汚染とサンゴ礁の現況(第2報)，沖縄県衛生環境研究所報，第34号，pp. 121-124.
- 長谷川修・中原誠(1987)：赤土流出調査と抑制対策，新砂防，第40巻，第5号，pp. 23-28.
- 比嘉榮三郎・大見謝辰男・花城可英・満本裕彰(1995)：沖縄県における年間土砂流出量について，沖縄県衛生環境研究所報，第29号，pp. 83-88.
- 南哲行・山田孝・仲野公章・富坂峰人・徳永敏朗・山城修(2002)：耕作ステージの異なるパイナップル圃場での赤土流出特性，砂防学会誌，第54巻，第5号，pp. 30-38.
- 吉永安俊・扇長謙良(1993)：沖縄県国頭マージの造成農場における浮遊土砂流出について，農業土木学会論文集第168号，pp. 105-110.
- Seeger, M., M.-P. Errea, S. Begueria, J. Arnaez, C. Marti, J. M. Garcia-Ruiz (2004)：Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees, Journal of Hydrology, 288, pp. 299-311.