

◆ 特集：土砂災害 ◆

沖縄島における赤土砂生産のメカニズムの解明と生産モデルの開発

桜井 亘* 小山内信智** 南 哲行*** 山田 孝****

1. はじめに

我が国では、微細土砂の流出により、貯水ダムの濁水の長期化や河道、海域での生態系、景観に深刻な被害が生じている。特に沖縄地方では、「赤土砂」とよばれる浮遊微細土砂の流出により、生態系のほか、水産業、観光産業へも大きな被害が生じる等、深刻な環境問題となっている。

赤土砂はパイナップル圃場が主要な生産源であるが¹⁾、圃場からの面的発生の対策は必ずしも十分ではなく、河川域における利水阻害、海域でのサンゴ礁等に被害が生じている。そのため、圃場での対策が重要であり、圃場における赤土砂生産機構の解明及び、それを反映した赤土砂生産量予測手法と対策手法の開発が必要である。しかし、圃場や流域単位における赤土砂の流出量の観測や調査に基づく研究事例は多く存在するが、圃場地表面の土質強度変化に着目し、降雨時に圃場から赤土砂がどのように生産されているのかについての研究はほとんどされていない。また、圃場における作物等の被覆の経時変化により、土砂流出量も変化すると考えられるが、この変化を考慮して赤土砂流出特性を論じた研究は前田らの研究²⁾のみである。そこで、本報では、赤土砂の生産・流出メカニズムを明らかにし、圃場における作物の耕作段階に応じた地表面や地被状態の変化と対策工の効果を反映できる赤土砂生産モデルについて報告する。

2. 赤土砂の生産・流出実態と生産機構

2.1 主要な赤土砂生産場と赤土砂の流出実態

まず、赤土砂生産場の分布と土砂生産実態を現地調査や観測により把握し、赤土砂の主要な生産場を明らかにした。

これまでの調査によると、出水時に海まで到達する浮遊土砂の粒径は0.075mm以下が大半を占めている²⁾。このことから、海洋環境に悪影響を与えるいわゆる「赤土砂」は0.075mm未満の粘土、シルト分を主成分とした微細粒土砂であると言える。そこで、沖縄県北部の東村のサーン川流域において、赤土砂の生産源を推定するため、流

域内で地表面から深さ20cm程度までの土壌試料を採取し、粒度分布試験を行った。その結果、粒径0.075mm未満の粘土、シルト分は、パイナップル耕作地等では50～70%程度、溪床では6%程度、4年周期で鋤き込みが施されるパイナップル圃場に比べて表土の攪乱が少ない果樹園及び休作地では20～30%程度である。また、土地利用が異なる流域における浮遊砂(SS)濃度の観測結果より、降雨時にはパイナップル耕作地の開発が進んだ流域は無開発の流域に比べて10倍から1,000倍もSS濃度が高いという結果が得られた¹⁾。以上のことから、赤土砂の主要な生産源はパイナップル畑であると考えられる。

2.2 耕作開始からの時間経過による土砂侵食特性の変化

次に、平成12年3月～8月にかけて、沖縄県北部の東村古島川流域(流域面積5.5km²)における耕作開始からの経過時間が異なる4圃場(圃場A～圃場D)において赤土砂流出の現地観測を行った³⁾。観測項目は降雨量、流出量、流出土砂量である。各圃場の面積および観測開始時点での耕作開始からの期間を表-1に示す。

表-1 観測圃場の諸元及び観測された流出率

観測場所	圃場A	圃場B	圃場C	圃場D
面積	180m ²	3842m ²	3811m ²	3870m ²
耕作開始からの期間	天地返し直後	2年以上	3年以上	3年以上
流出率	0.19	0.24	0.22	0.18

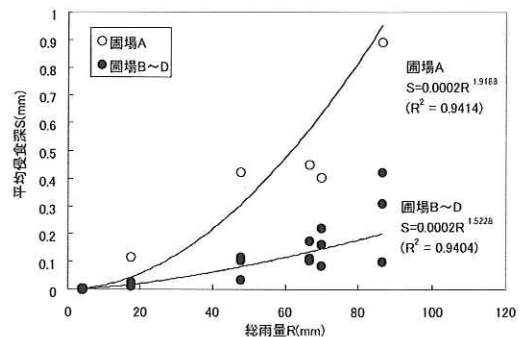


図-1 総雨量と平均侵食深の関係

Sediment Yield Mechanism of Red Soil at Okinawa Island and the Numerical Yield Model

表-1には観測された流出率（一雨の総雨量に対する総流出量の割合）の平均値を併せて示した。また総雨量に対する平均侵食深を図-1に示す。

表-1に示す流出率では天地返し（専用の機器で圃場を鋤き込む作業）直後の圃場Aと耕作から2年以上経過している圃場B～Dに明確な違いは見られないが、流出土砂量は、2年を経過すると減少する。また、別途行った降雨遮断量の計測から、圃場が完全にパインアップルの葉に覆われたとしてもパインアップル畑が有する降雨遮断量は0.6mm程度と少ない結果が得られた⁴⁾。

このように葉の被覆が増加しても降雨に対する流出量はほとんど変化しないことから、写真-1に示すように地表面における苔等の繁茂や葉の密閉に伴い増加する下層の枯葉が地表面へ密着することにより、土砂移動が阻害され流出土砂量が変化したと考えられる。

そこで、葉の投影面積から枯葉の密着による実質の地表面の被覆率を求める手法を検討した。まず、耕作開始からの時間経過（生育齢）が異なるパインアップル株による地表面の被覆率（単位面積当たりのパインアップルの葉により覆われている投影部分の面積）を計測した。これと翁長らによる耕作地での被覆率算定結果⁵⁾を整理して、生育齢と投影面積から求めた被覆率の近似式（近似曲線）を作成した（図-2実線）。次に、投影面積から求めた被覆率と実際に地表を被覆している被覆率の関係から、実線で示した近似式を補正した（図-2破線）。図-2から分かるようにパインアップルの葉による被覆率は、耕作開始からの時間経過とともに増加し、耕作開始から約2年半で90%以上となる。葉の被覆率の増大により地表面を枯葉が覆うようになり、侵食を受ける部分が減少すると考えられる。

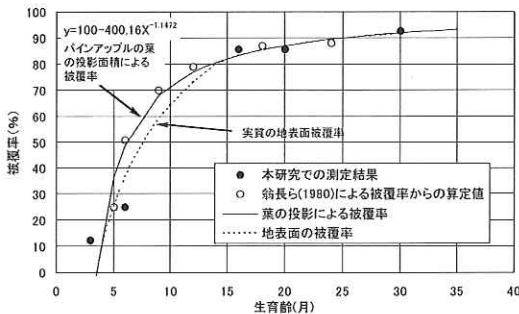


図-2 耕作開始からの経過時間と圃場地表面の被覆率

2.3 圃場の表面の土質特性の変化による赤土砂生産機構

次に、赤土砂の生産機構について検討を行った^{7,8)}。最初に人工降雨実験により、土壌変化と地表流及び赤土砂の流出特性を観測した結果、赤土砂流出限界降雨量（10mm）と同程度の降雨量（11mm）で表層10mm程度が飽和状態になった。次に、圃場と同程度の密度に調整した現地採取試料を水浸させると、赤土砂に含有されるパーミキュライト等の粘土鉱物が膨潤し、水浸から30分以内に、見かけ飽和度が100%を超える過飽和層が地表面から1cm程度の厚さに形成された（図-3）。

この過飽和層のせん断強度を表層部のせん断試験により求めると1kPaであり、これは下層にある非過飽和層の半分の強度となった（図-4）。

さらに侵食試験により、過飽和層が形成された状態の限界掃流力を求めると0.65Paであり、一方非過飽和層の限界掃流力は5Pa程度となった。以上の結果から、赤土砂の生産は、地表面に形成された過飽和層の形成により、土質強度が低下し

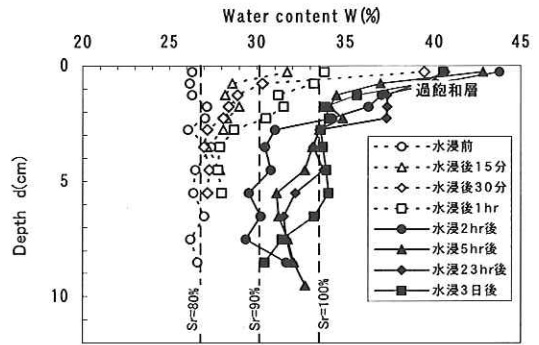


図-3 水浸後の含水比分布

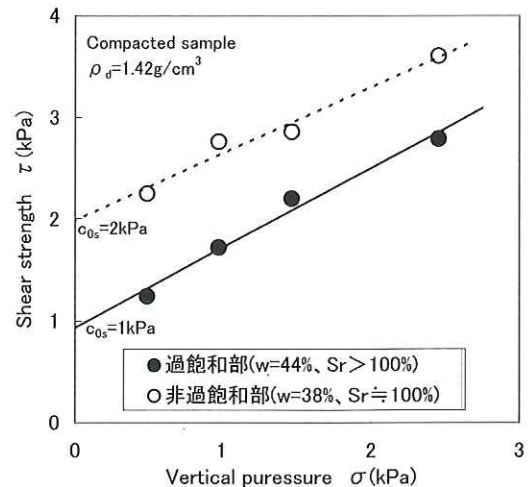


図-4 過飽和部・非過飽和部のせん断強度

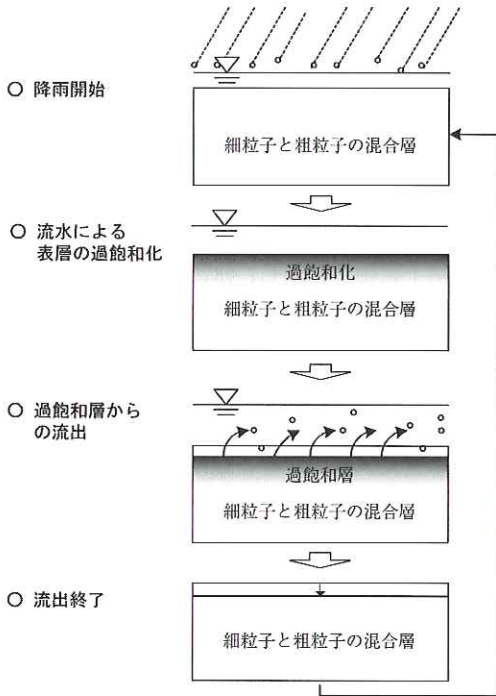


図-5 赤土砂生産・流出の概念図

た結果、表面流により侵食されて生じることが明らかとなった(図-5)。

3. 圃場の耕作からの時間経過を考慮した赤土砂流出シミュレーション手法の検討

3.1 シミュレーションモデル

3.1.1 シミュレーションモデルの考え方

流域単位での赤土砂シミュレーション手法を作成する上で、流域内での赤土砂の主要な生産場であるパインアップル圃場の空間分布、パインアップル

圃場の耕作段階による赤土砂の流出実態の違い、パインアップル圃場以外の河道や森林などの各種土地要素の空間分布、流域内の地形の面的変化などを表現する必要がある。そこで、本研究では、二次元河床変動計算法を用いた赤土砂生産シミュレーションモデルを検討した。メッシュ間の流水の移動は浅水流の運動方程式により追跡し、雨量は連続式の中で「わき出し」として与える。

2.3で示したように降雨により圃場地表面の表層約1cmにおいて過飽和層が形成され、粘着力が低下するため、赤土砂を構成している個々の土粒子が流出し易くなる。これに対して図-1から分かるように圃場A、Bとも単位面積当たりの流出土砂量(平均侵食深)は1mm以下であることから、土砂の生産量は主に流水の輸送能力によって規定されていると考えられる。また、圃場地表面の粒径の殆どが1mm以下であること、過飽和層の形成による粘着力の低下により流出し易くなること、土砂流出形態を浮遊砂として取り扱えると考えられることから、流水に伴って移動する土砂は浮遊砂量式により計算し地表面に交換層を想定して粒度分布を考慮した。

一般に地表面では、一出水終了後には細粒分が流出し、粗粒分が残存してアーマーコートが形成されることが考えられる。しかしながら写真-1の圃場の断面構造が示すように赤土砂粒子の分布は粗粒分と細粒分がおおむね均等に分布していること、これまで実施した粒度分布試験結果にも粗粒分は多く見られないことからシミュレーション実施の際に粒度分布の変更が必要なほどの粗粒化現象は生じないと考えられる。

また、圃場では約4年ごとに天地返しが行われるため定期的に表層の土砂と下層の土砂が混合されることから、各降雨の開始時には、それ以前の降雨による表層の粒度の変化を考慮しないこととした。

3.1.2 基礎式

本研究で用いた二次元河床変動計算の基礎方程式を以下に示す。

・運動方程式

(x方向)

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \beta \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \quad (1)$$

(y方向)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \beta \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \quad (2)$$

・水の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \times f \quad (3)$$

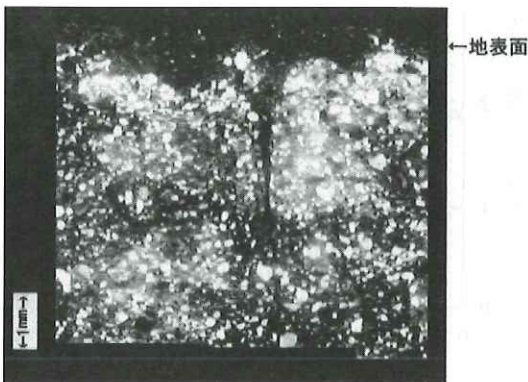


写真-1 パインアップル圃場地表面の断面図

・土砂の連続式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

ここに、 $M = uh$, $N = vh$, $H = h + zb$, u, v : x 及び y 方向の平均流速, h : 水深, z_b : 流動層底面の地盤標高, g : 重力加速度, β : 運動量補正係数 ($\beta = 1$ とした), ρ : 流体の密度, q_{sx} : x 方向流砂量, q_{sy} : y 方向流砂量, z : 地盤高, λ : 空隙率である。なお, r : 単位時間当たり雨量, f : 流出率である。流出率の設定方法については 3.2.2 で検討する。

τ_{bx} , τ_{by} は x 及び y 方向の抵抗力でありマンシングの粗度係数 n を用いて式(5)、式(6) で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 u \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1/3}}} \quad (5)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 v \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1/3}}} \quad (6)$$

流水に伴って移動する土砂は浮遊土砂とし、式(7)の浮遊砂量の芦田・道上式を用いた⁸⁾。

$$\frac{q_{si}}{q \cdot f(d_i)} = C_B \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \right) \Lambda_1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \Lambda_2 \right] \dots (7)$$

ここに、 q_{si} : 粒径 d_i の単位幅当たりの流砂量, κ : カルマン定数, C_B : 底面濃度である。 Λ_1 , Λ_2 については、道上の研究⁸⁾ によった。

$f(d_i)$ は粒径 d_i の砂粒の割合で、式(8)のように地表面に厚さ δ の交換層を想定し交換層内における粒径 d が占める割合として求めた。

$$\frac{\partial f(d_i)}{\partial t} = -\frac{1}{\delta(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} - f(d_i) \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} - f(d_i) \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) \dots (8)$$

ここに、 q_{sxi} , q_{svi} : 粒径の砂粒の x 及び y 方向の流砂量である。

地表面被覆率の増大をその分だけ各粒径の地表面における割合が減少するものとし、図-2に示した破線の地表面被覆率 ε を用いて $f_{si} = (1-\varepsilon)f(d_i)$ を計算し、式(7)において $f(d_i)$ を f_{si} に置換した。したがって、地表面被覆率が増加するに伴い、x, y 方向の流砂量が単純に減少することとなる。

3.2 観測圃場での赤土砂流出再現シミュレーション

3.2.1 シミュレーション条件の整理

シミュレーション条件を整理し以下に示す。

1) 対象圃場と地表面被覆率

対象圃場は、耕作開始からの時間経過が反映さ

れるように天地返直後の圃場 A と耕作開始から、2年経過している圃場 B を対象とした。圃場の地表面被覆率は、現地の状況から圃場 A : 0%、圃場 B : 80% とした。

2) 対象出水

古島川流域で実施した赤土砂流出の現地観測で得られた赤土砂発生限界降雨量 (累積 10mm) 以上の降雨のうち、台風や豪雨による特異な降雨でないこと、データの欠測が無いことを考慮し、当該流域の年平均出水規模程度の 3 出水 (4月1日~2日, 4日~5日, 14日~15日) を選定した。

3) 地盤高

地盤高の現地測量を行い、圃場の大きさの違いを考慮して、圃場 A は 1m x 1m、圃場 B は 5m x 5m のメッシュデータを作成した。

4) 粒度分布

現地資料の粒度分布試験結果を参考に図-6に示すように設定した。

5) その他の条件

その他の条件として、圃場におけるマンシングの粗度係数は、これまでの研究による赤土砂を用いた水路実験の結果が、0.03 ~ 0.08 であったことから⁷⁾ $n=0.06$ を用いた。交換層厚は過飽和層の厚さから 1cm とした。また、砂粒、水の密度は、それぞれ 2.6, 1.0g/cm³ とし、土砂の空隙率は 0.4 とした設定した。

3.2.2 流出率の検討

式(3)での流出率は、沖縄での現地観測により行われた吉永・翁長・山城の検討⁹⁾ に準じて式(9)で与える。

$$f = 1 - a/R^b \quad (9)$$

ここで、 a, b は定数, R は降雨開始からの累積雨量である。式(9)より損失雨量 R_f は以下のように表される。

$$R_f = aR^{(1-b)} \quad (10)$$

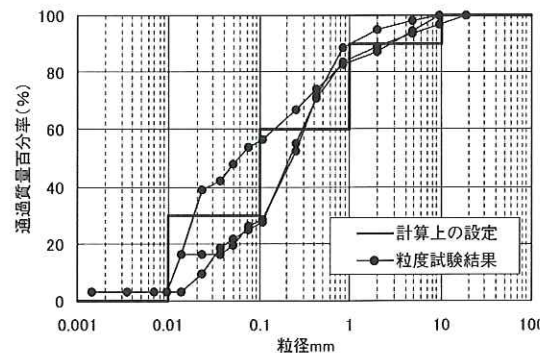


図-6 粒度分布の設定

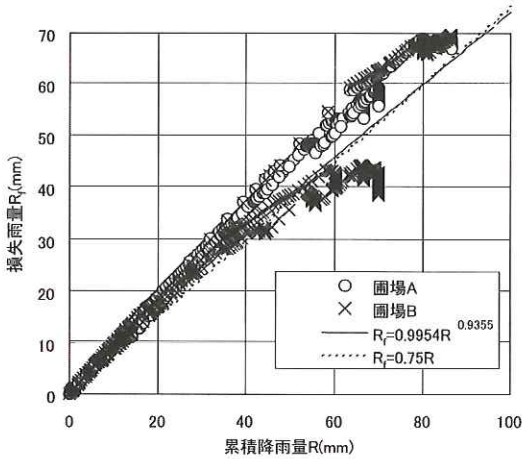


図-7 対象集水の累積雨量と損失雨量

圃場 A 及び B での対象出水の観測結果を累積雨量 (R) と損失雨量 (R_f) の関係に整理し図-7 に示す。

図-7 より $R \sim R_f$ の関係は線形近似も可能と考えられるため、参考として $f=c$ (流出率一定) とした場合の損失雨量 (式(11)) の c の同定を行った。

$$R_{f_c} = (1 - c)R \quad (11)$$

最小自乗法により式(10)の a, b と式(11)の c を求めた結果を以下に示す。 R^2 は 0.9 以上で、累積

表-2 E の値

検証出水		$f=1-0.9954/R^{0.0645}$	$f=0.24$
圃場 A	H12.4.1	0.212	0.287
	H12.4.4	0.637	0.627
	H12.4.14	0.212	0.221
圃場 B	H12.4.1	0.955	0.908
	H12.4.4	0.494	0.591
	H12.4.14	0.816	0.777
合計		3.326	3.411

表-3 比流出土砂量の観測値と計算値

圃場	検証出水	観測値	計算値
圃場 A	H12.4.1	0.45	0.47
	H12.4.4	0.89	0.59
	H12.4.14	0.40	0.47
圃場 B	H12.4.1	0.10	0.12
	H12.4.4	0.42	0.42
	H12.4.14	0.09	0.12

(単位:mm)

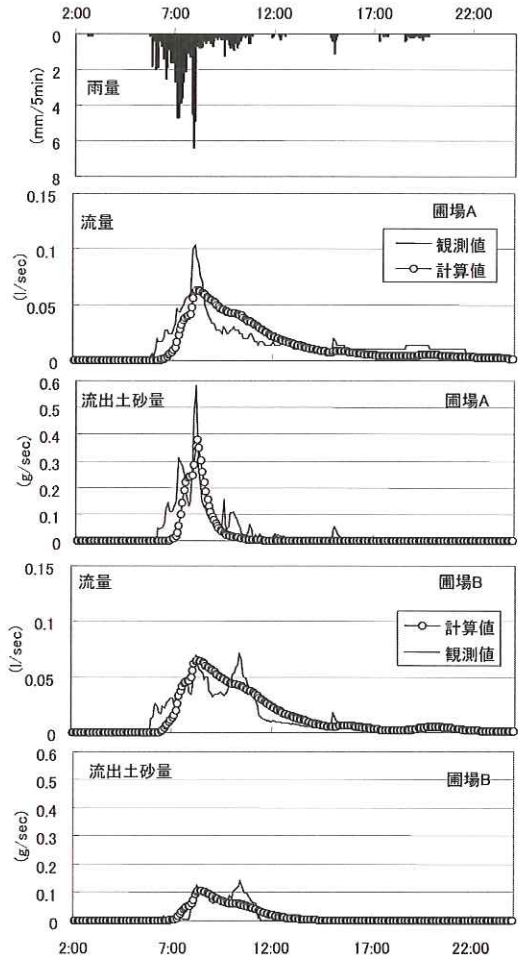


図-8 観測圃場でのシミュレーション結果

雨量と損出雨量の相関は式(10)、式(11)いずれを用いても非常に高い。

$$a=0.9954, b=0.0645 \quad (R^2=0.990)$$

$$c=0.24 \quad (R^2=0.913)$$

流出率を上記の2通りに設定し、検証出水について流量の適合性を検討した。観測結果 (q_{obs}) と計算結果 (q_{cal}) の適合性の検討には以下の式(12)を用いた。ここで、 N は観測データ数である。

$$E = \sqrt{\sum (q_{OBS} - q_{CAL})^2 / N} \quad (12)$$

式(12)より算出された E の値を表-2 に示す。この表より式(9)の流出率を用いた方が、若干ではあるが適合性が良いことが分かる。従って以降の計算では流出率を以下の式で与えることとした。

$$f = 1 - 0.9954/R^{0.0645} \quad (13)$$

3.2.3 赤土砂流出再現シミュレーション結果

圃場 A、圃場 B のそれぞれについて対象 3 出水に対して式 (13) による流出率を適用し、赤土砂流出再現シミュレーション計算を行った。図-8 に再現結果を示す。また、単位面積あたりの流出土砂量の観測値と計算値の比較を表-3 に示す。

図-8 が示す様に圃場 A、圃場 B ともに観測値と計算値はかなり近似しており、地表面被覆率を考慮した二次元河床変動計算法により圃場からの流出土砂がある程度の精度で再現できていることが分かる。

また、表-3 の圃場 A と B の単位面積当たりの流出土砂量を比較すると、同一出水において観測結果と同様に計算結果においても圃場 A の流出土砂量が多くなっており、シミュレーションにより圃場の耕作期間の違いが赤土砂流出に与える影響を再現できていると考えられる。

6. おわりに

本報では、二次元河床変動計算法に圃場の耕作期間の違い及び過飽和層の形成を考慮したシミュレーション手法を提案し、赤土砂生産の再現計算を行った。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 流出計算過程で用いる流出率は、吉永・翁長らの検討手法に準じて算定された式 (13) を適用することで、観測結果に適合性の高い流出波形が得られた。
- 2) パインアップルの耕作期間による赤土砂流出特性の違いを、パインアップルの生育齢による地表面被覆率の違いとして取り入れ、地表面被覆率の増加に伴い地表面の流出可能土砂量が減少すると設定した。その結果、実験圃場においては、本研究で提案した二次元河床変動計算法を用いたシミュレーション手法により、天地返直後の圃場と耕作開始後 2 年あまり経過した圃場の流出土砂量とその違いを比較的良好に再現できた。

沖縄総合事務局には、現地での観測、調査に多大なるご協力を頂いた。感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 南 哲行、小山内信智、山田 孝、黒崎靖介、中村勝正、与那嶺淳：沖縄島における流域単位での赤土砂の流出特性について、砂防学会誌, Vol.54, No.3, p.39-46, 2001
- 2) 前田勝弘、天田高白、石川芳治、小山内信智、欧国強、渡辺文人：沖縄本島における赤土の侵食特性、平成 6 年度砂防学会研究発表会概要集, p.159-160, 1994
- 3) 南 哲行、山田 孝、仲野公章、富坂峰人、徳永敏朗、山城 修：耕作年代が異なるパインアップル圃場での赤土砂流出特性、砂防学会誌, Vol.54, No.5, pp.30-38, 2000
- 4) 南 哲行、山田 孝、溝口昌晴：赤土砂の生産実態と要因に関する基礎調査、砂防学会誌, Vol.54, No.4, pp.77-81, 2000
- 5) 翁長謙良、宮城武治：沖縄における農地保全の基礎的研究Ⅶ-パインアップルの土壌侵食抑制効果について(2)-、琉球大農学報, No.27, pp.265-273, 1980
- 6) 南 哲行、山田 孝、下村幸男、黒崎 靖：介鉢込み圃場の飽和化に伴う赤土砂流出過程に関する実験的考察砂防学会誌, Vol.55, No.1, pp.47-51, 2002
- 7) 南 哲行、仲野公章、山田 孝、下村幸男、小野寺勝：沖縄の圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂侵食機構、砂防学会誌, Vol.55, No.3, pp.3-11, 2002
- 8) 道上正規：流砂と河床変動に関する基礎的研究、京都大学学位論文, p.91-105, 1972
- 9) 吉永安俊、翁長謙良、山城三郎 (1990)：沖縄の畑地帯における降雨の浸入および流出特性、農業土木学会誌, 第 58 巻第 5 号 pp.39 ~ 46

桜井 亘*



フィリピン公共事業道路省治水砂防センター派遣専門家 (元独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム主任研究員)
Wataru SAKURAI

小山内信智**



独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員、農博
Dr. Nobutomo OSANAI

南 哲行***



奈良県土木部 (元建設省土木研究所砂防部砂防研究室長)、農博
Dr. Noriyuki MINAMI

山田 孝****



北海道大学大学院農学研究科 (元国土交通省土木研究所砂防部砂防研究室主任研究員)、農博
Dr. Takashi YAMADA