

## II-5 山腹斜面における受食性、地被状態の変化を考慮した微細土砂生産モデルと数値

### 解析手法

研究予算：一般勘定

研究期間：平12～平14

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：平12 仲野公章(室長)、山田 孝

平13～14 渡 正昭(上席)、桜井 亘 山越隆雄

#### 【要旨】

我が国では、崩壊地や圃場からの微細土砂の流出により、河川域、海域で生態系の破壊や景観の悪化等、深刻な被害が生じており、その対策を検討する上で、微細土砂生産量を推測する手法が必要となっている。

そこで、本研究では、微細土砂(赤土砂)の流出により、深刻な社会・環境問題が生じている沖縄地方において、現地観測により、微細土砂の生産実態を把握し、その結果と人工降雨実験や模型実験により、微細土砂の生産機構を解明するとともに、微細土砂生産量の数値解析手法を提案した。

キーワード：微細土砂、微細土砂流出予測手法、過飽和層、地被状態、二次元河床変動計算

#### 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を与えるなど、深刻な環境問題となっている。

赤土砂はパインアップル圃場が主要な生産源であるが<sup>1)</sup>、圃場からの面的発生の対策は必ずしも十分ではない。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<sup>2)</sup>のみである。そこで、本研究では、赤土砂の生産・流出メカニズムを明らかにして、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の作成を検討した。

#### 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。

旧土木研究所の調査によると、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<sup>2)</sup>。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、パインア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ンア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SS濃度の観測結果より、降雨時にはパインア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<sup>1)</sup>。以上のことから、赤土砂の主要な生産源はパインア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5.5km<sup>2</sup>)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<sup>4)</sup>。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単位面積当たりの総流出土砂量を図-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 <sup>2</sup>	3842m <sup>2</sup>	3811m <sup>2</sup>	3870m <sup>2</sup>
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

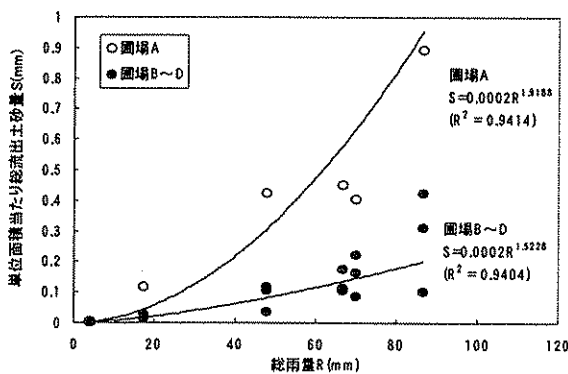


図-1 総雨量と総流出量の関係

表-1に示す流出率では天地返し直後の圃場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降雨遮断量は0.6mm程度と少ない結果が得られた<sup>5)</sup>。

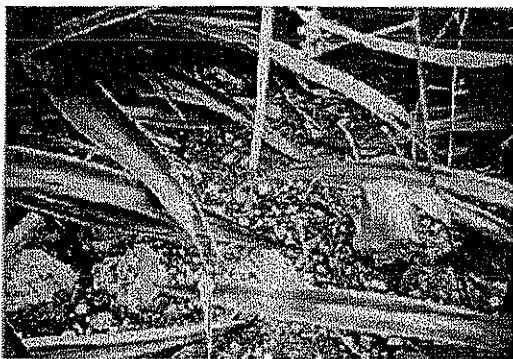


写真-1 植え付け後、20ヶ月を経過した地表面の状況

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に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<sup>6)</sup>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。これに伴い、雨滴が直接地面に到達することが少なくなるとともに、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。

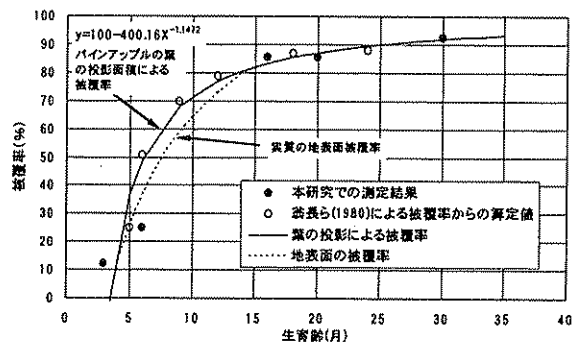


図-2 耕作開始からの経過時間と圃場地表面の被覆率

### 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<sup>7)8)</sup>。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、赤土砂に含ま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)。

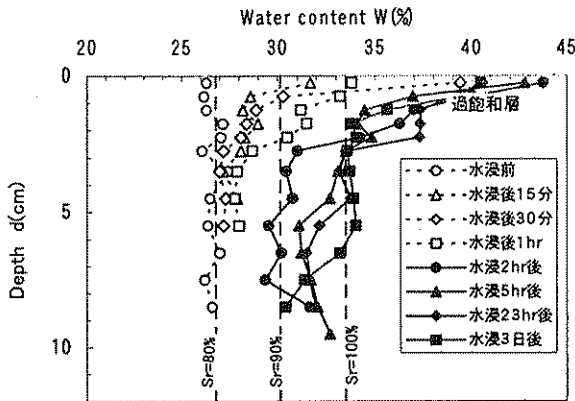


図-3 水浸後の含水比分布

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)。

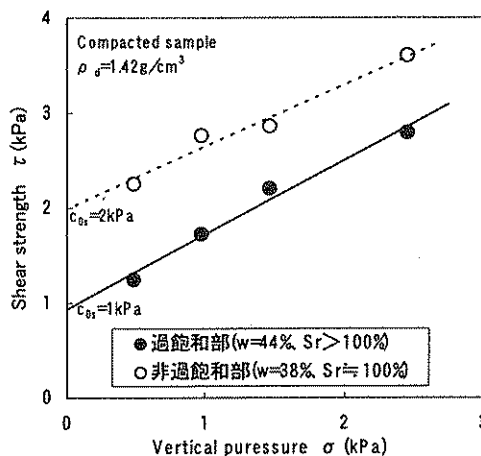


図-4 過飽和部・非過飽和部のせん断強度

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

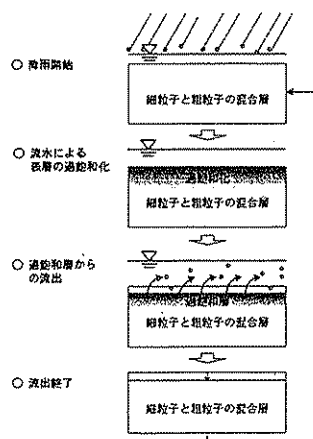


図-5 赤土砂生産・流出の概念図

層の形成により、土質強度が低下した結果、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モーク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-2 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。

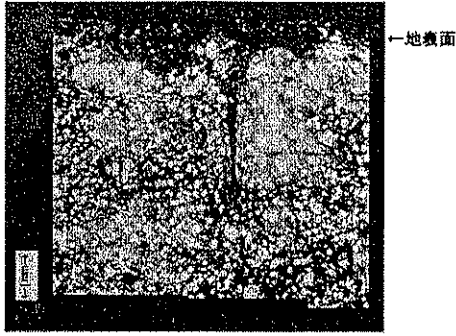


写真-2 パイナップル圃場地表面の断面図

### 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)

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

・連続式

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

・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、 $M=uh$ ,  $N=vh$ ,  $H=h+z_b$ ,  $u, v$ : 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,  $\beta$ : 運動量補正係数 ( $\beta=1$  とした。),  $\rho$ : 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,  $\lambda$ : 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 4.2.3 で検討する。

$\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  は x 及び y 方向の抵抗力であり Manning 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<sup>9)</sup>。

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

ここに、 $q_{si}$ : 粒径  $d_i$  の単位幅当たりの流砂量、 $\kappa$ : カルマン定数、 $C_B$ : 底面濃度である。 $\Lambda_1$ ,  $\Lambda_2$  については、道上の研究<sup>9)</sup> 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  $\delta$  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、 $q_{sxi}$ ,  $q_{syi}$ : 粒径の砂粒の x 及び y 方向の流砂量である。

地表面被覆率の減少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  $\varepsilon$  を用いて  $f_{\varepsilon i} = (1-\varepsilon)f(d_i)$  を計算し、式 (7) において  $f(d_i)$  を  $f_{\varepsilon i}$  に置換した。したがって、地表面被覆率が減少するに伴い、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×1m、圃場 B は 5m×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。

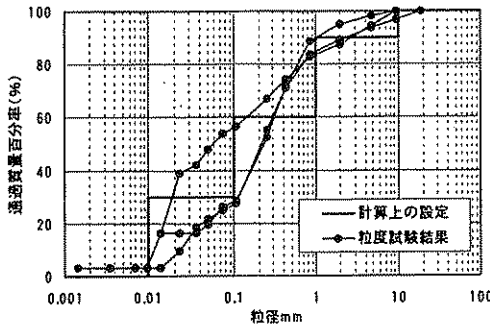


図-6 粒度分布の設定

### 5) その他の条件

その他の条件として、圃場におけるマンングの粗度係数は、本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<sup>8)</sup>  $n=0.06$ 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、1.0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<sup>10)</sup>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 $Rf$ は以下のように表される。

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

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( $Rf$ )の関係に整理し図-7に示す。

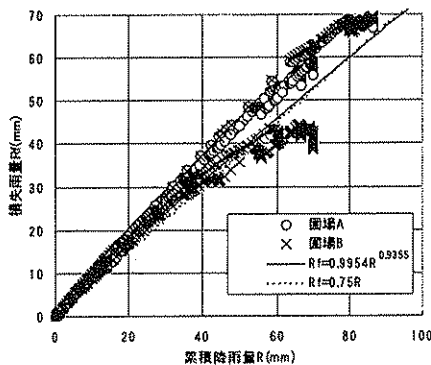


図-7 対象集水の累積雨量と損失雨量

図-7 より  $R \sim Rf$  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  $c$  の同定結果も行った。

$$Rf_c = (1-c)R \quad (11)$$

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。

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

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

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-4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。

表-4 単位面積当たりの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	0.4	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)

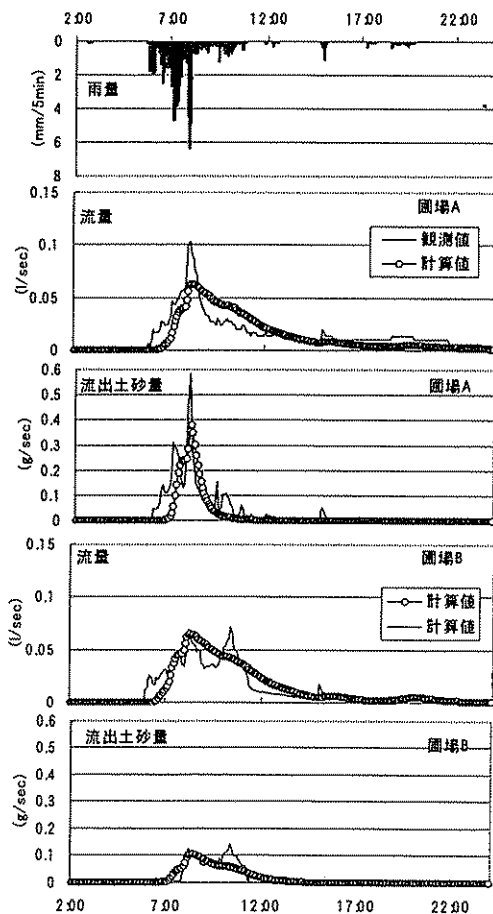


図-8 観測圃場でのシミュレーション結果

## 6. おわりに

本研究では、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) 建設省土木研究所：平成8年度 微細流土砂の生産・流下解析業務 報告書, 1996
- 4) 南哲行・山田孝・仲野公章・冨坂峰人・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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 南哲行・山田孝・下村幸男・黒崎靖：介鉄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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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