

沖縄地方で発生する赤土砂の流出予測モデルの 開発とシミュレーション

Development on the numerical model of the red sediment outflow in a catchment and its simulation

南 哲行*¹ 桜井 亘*² 山田 孝*³
Noriyuki MINAMI Wataru SAKURAI Takashi YAMADA
菊池 英明*⁴ 武蔵 由育*⁴
Hideaki KIKUCHI Yoshiiku MUSASHI

Abstract

The aim at this research is to develop a numerical simulation method that can predict the red sediment outflow from pineapple fields to river mouths in Okinawa river basins where red sediment outflow causes serious turbid water problems. The red sediment outflow model was developed under various conditions: expanding the ratio of field surface cover by pineapple leaf reduces the area of sediment yielding, erosion occurrence due to the shear force by the surface flow on the over-saturated surface of the pineapple field, and sediment movement as suspended load. This model was employed to develop a numerical simulation method based on a two-dimensional analysis for the riverbed variation, and can predict the red sediment outflow from the pineapple fields to rivers. Results of a numerical simulation of the Saan River catchment in Higashi Village accurately reproduced the red sediment hydrograph.

Key words : Okinawa, erosion of over-saturated surface of the pineapple field, red sediment outflow, numerical simulation model

1. はじめに

沖縄地方をはじめとする南西諸島の流域では、降雨によって膨潤性粘土鉱物を含む「赤土砂」と呼ばれる細粒土砂が上流域のパイナップル圃場などから土壌侵食によって流出し、河道域、河口域において深刻な濁水が生じ、水質悪化、水域生物相へのダメージ、景観の損失などの深刻な社会問題を引き起している。そのような濁水問題を軽減するためには、赤土砂の侵食機構に基づく流域単位での赤土流出予測手法の開発が不可欠となる。

これまでに、土壌侵食モデルとして、USLE (Wischmeier and Smith, 1978), RUSLE (Renard, 1991), MUSLE (Williams and Berndt, 1977) などの経験モデルが提案されてきたが、これらは年間単位の長期間にわたる大まかな流出土砂量を予測するものであり、出水ごとの予測はできない。また、流域内の様々な土砂生産場の空間分布とそれによる土砂流出特性の経時変化を考慮した流域単

位での土砂流出過程をモデル化したものではない。物理モデルとしては、流域単位の土砂流出過程を考慮した WEPP モデル (Lane et al., 1992) や EUROSEM (Morgan et al., 1998), AGNPS モデル (Young, 1987), SMODERP モデル (Holy et al., 1988) があげられ、これらについては、被覆や土壌の受食性をパラメーターとして、土砂流出の程度をある程度表現することができる。

これまでに提案された赤土砂の流出予測モデルとして、流出解析と雨滴侵食による土砂生産や表流水による土砂輸送とを連結させた物理則に基づく研究がいくつか存在する。たとえば、酒井らは、圃場から流出する赤土砂濃度を予測するために、キネマティックウェーブ法による流出解析を行い、LQ 式、Meyer 式によって浮遊土砂量を計算した (酒井ら, 1995)。その後、降雨流出過程にタンクモデル法を用いて表流水を評価し、LQ 式により浮遊土砂を計算したモデルも提案されている (大澤ら, 2002)。これらの予測結果はある程度の再現性が得られ

*1 奈良県土木部 Nara Prefecture, Civil Engineering Department *2 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ Incorporated Administrative Agency, Public Works Research Institute *3 北海道大学大学院農学研究科 Hokkaido University, Graduate School of Agriculture *4 八千代エンジニアリング株式会社水工部 Yachiyo Engineering Co., Ltd.

ているが、流域の諸条件が変わればパラメータをその都度試行的に設定しなければならないといった問題がある。

一方、南ら（2001b）は、パインアップルの耕作段階に伴う赤土砂流出量の変化を調べ、パインアップル株の植付け後、葉による地表面の被覆率の増大とともにパインアップル圃場からの赤土砂流出量が減少することを明らかにした。その中でパインアップル葉による被覆率の増大が地表面における苔の繁茂や枯葉の堆積を進展させ、それらが侵食抑制の効果を発揮していることを推察した。さらに、苔や枯葉がない状態の圃場地表面において表面流が発生する段階での赤土砂侵食のメカニズムとして、パインアップル圃場地表面での過飽和層（見かけ飽和度が約100%以上となった地表面）の形成とそこでの顕著な侵食現象に着目し、土質試験ならびに地盤侵食試験器、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価を行った。その結果、パインアップル圃場での赤土砂の侵食現象は、過飽和層の形成とそこを流下する表面流による侵食として説明できることがわかった（南ら、2002b）。

しかしながら、沖縄に代表される赤土砂のように膨潤性粘土鉱物を含む粘性土の降雨時の過飽和層形成とこれによる土質強度変化を考慮した土砂流出予測手法は未だに提案されていない。

そこで、本研究では圃場の耕作段階によるパインアップル葉の被覆率ならびに過飽和層における表面流による赤土砂侵食機構を考慮した二次元河床変動計算法による流域単位の流出土砂予測手法を提案することを目的とした。

2. 研究方法

流域単位での赤土砂流出予測手法を提案することを研究目的とするが、そのためには、まず、赤土砂の主要な生産場であるパインアップル圃場単位での赤土砂流出予測手法を構築する必要がある。そこで、沖縄県国頭郡東村サーン川流域内での赤土砂生産場と考えられるところ（パインアップル圃場、河床など）から採取した土砂の粒度分布を比較し、パインアップル圃場が主要な赤土砂生産場であることを明らかにした。次いで、耕作開始から時間経過の異なるパインアップル圃場において侵食量調査を行うとともに、既往の観測結果（南ら、2001b、2002a）を整理して、耕作期間と侵食量との関係、耕作開始以降の流出率、単位面積あたりの流出土砂量、圃場地表面、圃場末端部急崖部での侵食量、パインアップルの葉による地表面被覆率と侵食量との関係について検討した。

本論文では、上記の現地における観測や調査結果と、圃場地表面の過飽和化に伴う粘着力低下と表面流による

侵食という赤土砂生産機構に関する研究成果（南ら、2002b）をもとに、過飽和層の形成により流出しやすくなった土粒子が、表面流の輸送によって浮遊砂形態で流出する場合の赤土砂流出量予測手法を検討した。これは、運動方程式、連続式、土砂の連続式、浮遊砂量式を連立させて、圃場の耕作開始からの赤土砂流出量の経時変化を予測できる赤土砂流出シミュレーション手法である。

さらにここで用いた圃場単位での赤土砂流出シミュレーション手法を、パインアップル圃場以外の河道や森林などの土地利用形態、地形の面的な変化を考慮した二次元河床変動計算法による流域単位の赤土砂流出シミュレーション手法へと拡張し、サーン川流域を対象として、再現シミュレーション計算を行い、その再現性と予測手法としての妥当性を検討した。

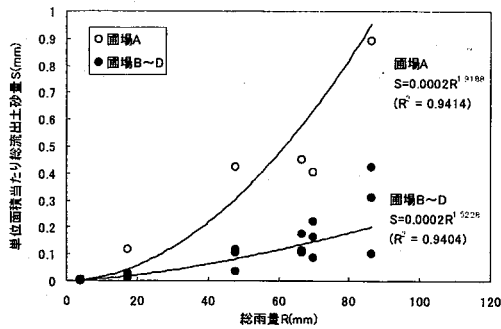
3. 耕作開始からの時間経過にともなう圃場地表面の侵食要因

3.1 赤土砂生産場の特定と侵食実態

沖縄県国頭郡東村に位置するサーン川流域は、パインアップル等の耕作地が広がる台地と、樹木が密生するサーン川の開析谷からなる。流域面積は0.20 km²、平均溪床勾配は1/21で急流を呈している。観測地点上流の集水面積は0.15 km²である。土地利用区分は、パインアップル圃場が約0.04 km²（約27%）、パパイヤや花卉等の圃場、休耕地が約0.02 km²（約13%）、開析谷の斜面に分布する森林及び河道、道路等が0.09 km²（約60%）となっており、沖縄本島北部における典型的な土地利用を呈している（図-1）。

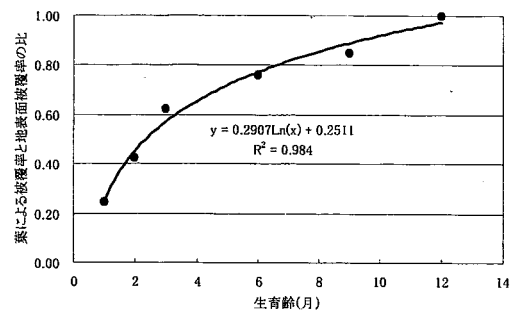
出水時に海まで到達する浮遊土砂の粒径は0.075 mm以下が大半を占めている（吉永ら、1996）ことから、海洋環境に悪影響を与えるいわゆる「赤土砂」は0.075 mm未満の粘土、シルト分を主成分とした微細粒土砂であると言える。また、南ら（2001a）は、東村内の平良川流域でのパインアップル耕作地の開発が進んだ支川流域と無開発の支川流域について、出水のSS濃度を観測し、降雨時にはパインアップル耕作地の開発が進んだ支川流域は無開発の支川流域に比べて10倍から1,000倍もSS濃度が高いという結果を得ており、パインアップル耕作地が赤土砂の主要な生産源であることを推定している。

図-2は、サーン川流域において赤土砂の生産源を推定するため、図-1に示した流域内の①～⑧の各地点で地表面から深さ20 cm程度までの土壌試料による粒度分布を示したものである。台地上の耕作地等で採取した試料には粒径0.075 mm未満の粘土、シルト分が50～70%程度含まれるが、溪床から採取した試料には6%程度しか含まれていない。また、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なされにく

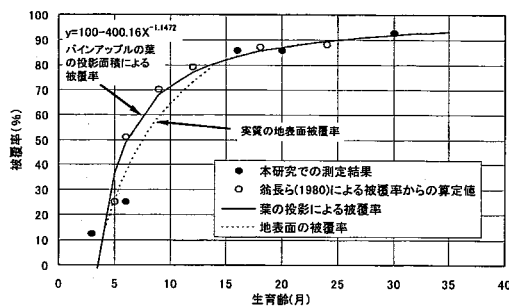


圃場A
圃場B~D

圃場A
圃場B~D



圃場A
圃場B~D



圃場A
圃場B~D

は 0.6 mm 程度 (南ら, 2001 b) であることから, 被覆率が増加しても降雨時の流出にはほとんど影響しないことがわかる。すなわち, 土砂流出量の変化は, 地表面における苔等の繁茂, 枯葉による地表面被覆などにより土砂移動が阻害されたことによると判断される。

3.3 耕作開始からの経過時間ともなうパイナップルの葉の地表面被覆率

東村内の圃場において, パイナップル株の列を上方からデジタルカメラで撮影し, 地表面がパイナップル葉の影となる部分と地表面が露出している部分の画像のピクセル数を数えることによって各々の面積を計測し, 耕作開始からの生育齡が異なるパイナップル葉による地表面の被覆率 (単位面積当たりのパイナップルが地表を覆う部分の面積) を把握した。図-4 にはその結果と, 翁長ら(1980)による同一のポット栽培のパイナップルにおける葉の投影面積より推算された葉の被覆率を整理し, 実線に示すように生育齡と被覆率の近似式 (近似曲線) を作成した。この葉による被覆率を本研究では, 後に記述する地表面被覆率に対して, 投影被覆率と呼ぶ。

図-4 によればパイナップルの葉による投影被覆率は, 耕作開始からの時間経過とともに減少し, 耕作開始から約 2 年半で 90% 以上となることわかる。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, 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-5 には, 生育齡が異なるパイナップル圃場において調査した葉の投影被覆率と実際の地表面の被覆率 (地表面被覆率) の関係を示す。これによれば, 生育齡が 12 ヶ月になると投影被覆率と地表面被覆率は, ほぼ等しくなることがわかる。図-5 の関係を用い投影被覆率から実際の地表面被覆率を推定したものが図-4 の破線である。このことから, 地表面被覆率の増加により侵食を受ける面積が減少するとした。

4. 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

4.1 シミュレーションモデルの基本的な考え方

流域単位での赤土砂シミュレーション手法を作成するには, 流域内での赤土砂の主要な生産場であるパイナップル圃場の空間分布, パイナップル圃場の耕作段階による赤土砂の流出実態の違い, パイナ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, を数量的に表現する必要がある。そのため, 本研究では, パイナップル圃場, その他の土地要素での面的な土壌侵食過程と河道での流下過程を統一的に扱えること, 流域のモデル化がメッシュにより作成可能であることといった解析上の特長を考慮して二次元河床変動計算法を適用することとした。すなわち, 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」として与えることとする。

一般に地表面では, 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ア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粒子の分布は粗粒分と細粒分がおおむね均

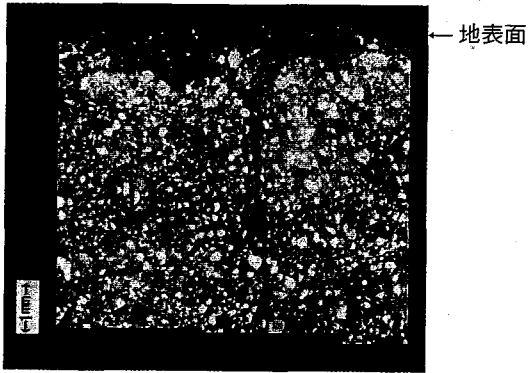


写真-1 パイナップル圃場地表面の断面図
Photo 1 Magnified cross-section of pineapple field surface

等に分布していること、図-2に示した粒度分布試験の結果、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ていないと考えられる。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。

一方、図-3に示すように圃場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、赤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(図-2)であること、降雨により圃場地表面の約1cmの部分において過飽和層が形成され、そこでは粘着力が低下する(南ら, 2002b)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とを考慮して、土砂流出形態は主に浮遊砂状態であると仮定し、その土砂量は浮遊砂量式を用いて計算した。

4.2 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。運動方程式は(1)、(2)式、連続式は(3)式、土砂の連続式は(4)式である。

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

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

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

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots(4)$$

ここに、 $M = uh$ 、 $N = vh$ 、 $H = h + z_s$ 、 u 、 v : x 及び y 方向の平均流速、 h : 水深、 z_s : 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_x : x 方向流砂量、 q_y : y 方向流砂量、 z :

地盤高、 λ : 空隙率、 r : 単位時間当たり雨量、 f : 流出率である。

τ_{ax} 、 τ_{ay} は x 及び y 方向のせん断抵抗力であり、マンニングの粗度係数 n を用いて式(5)、式(6)で表される。

$$\tau_{ax} = \rho g n^2 u \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1.3}}} \quad \dots(5)$$

$$\tau_{ay} = \rho g n^2 v \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1.3}}} \quad \dots(6)$$

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(道上1972)。

$$\frac{q_{di}}{q \cdot f(d_i)} = C_B \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n \sqrt{g}}{h^{1.6}} \right) \Lambda_1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n \sqrt{g}}{h^{1.6}} \Lambda_2 \right] \quad \dots(7)$$

$$\Lambda_1 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^z \int_{\frac{a}{h}}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^z d\eta$$

$$\Lambda_2 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^z \int_{\frac{a}{h}}^1 \ln \eta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^z d\eta$$

$$Z = \frac{w_0}{1.2 \kappa u_{*c}}$$

ここに、 q_{di} : 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、 h : 水深、 a : 浮遊砂と掃流砂を区分する河床からの高さ、 w_0 : 粒子の沈降速度、 $\eta = z/h$ 、 u_{*c} : 摩擦速度である。

式(7)に含まれる $f(d_i)$ は粒径 d_i の粒子の割合を示す項で、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。

$$\frac{\partial f(d_i)}{\partial t} = -\frac{1}{\delta(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{dx}}{\partial x} - f(d_i) \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_{dy}}{\partial y} - f(d_i) \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (8)$$

ここに、 q_{dx} 、 q_{dy} : 粒径 d_i の x 及び y 方向の流砂量である。計算では、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-4に示した破線の地表面被覆率 ε を用いて $f_i = (1-\varepsilon)f(d_i)$ を計算し、式(7)において $f(d_i)$ を f_i に置換した。地表面被覆率の減少に伴い、 x 、 y 方向の流砂量が低減することとなる。

4.3 観測圃場での赤土砂流出再現シミュレーション

4.3.1 シミュレーション条件

シミュレーションの対象圃場は、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とした。圃場の地表面被覆率は、現地での測定値(図-5)を参考にして、圃場A: 0%、圃場B: 80%とした。また、シミュレーションの対象とした出水は、現地観測結果より、データ欠測が無く、古島川流域の年平均出水規模(赤土砂発生限界雨量である連続雨量10mmを上回る降雨で観測期間中に欠測のないもの、かつ台風や豪雨などの特異な降雨ではない降雨による出水規模)である三つの出水(4月1日~2日、4日~5日、14日~15日)とした。デジタルマップの作成にあたっては、現地測量によっ

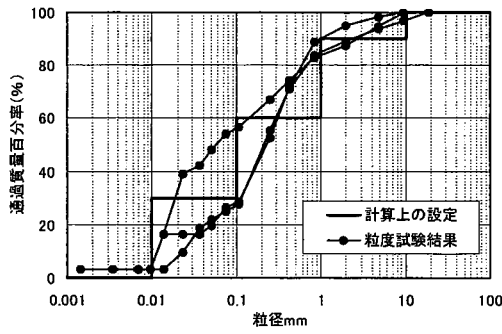


図-6 粒度分布の設定

Fig.6 Grain size distribution used for the numerical simulation

て地盤高を測量し、圃場の大きさの違いを考慮して、圃場 A は 1 m × 1 m、圃場 B は 5 m × 5 m のメッシュデータを作成した。また、粒度分布については、現地試料から求めた粒度分布ならびに既往のシミュレーション条件としての粒径分布の考え方をもとに図-6 に示す 5 段階の粒径階で近似させることとした。

その他の条件として、マンギングの粗度係数は、実験結果 (南ら, 2002 b) から得られた $n=0.03\sim 0.08$ 程度の中間値として $n=0.06$ を用いた。交換層厚は過飽和層の厚さをもとに 1 cm とした。砂粒, 水の密度は各々, 2.6 g/cm³, 1.0 g/cm³ とした。土砂の空隙率は $\lambda=0.4$ とした。

4.3.2 流出率

式(3)で用いる流出率 (f) として、沖縄での現地観測により行われた吉永・翁長・山城の検討 (吉永ら, 1990) を用いると式(9)ようになる。

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

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

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

圃場 A 及び B での対象出水時の累積降雨量 (R) と損失雨量 (R_f) の関係を図-7 に示す。 $R \sim R_f$ 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 の同定結果も行った。

$$R_f = (1-c)R \quad \dots\dots\dots(11)$$

最小自乗法により式(10)の a , b と式(11)の c を求めた結果, ($a=0.9954$, $b=0.0645$, $R^2=0.990$), ($c=0.24$, $R^2=0.913$) であり, 累積降雨量と損出雨量の相関 R は式(10), 式(11)いずれを用いても非常に高い。

流出率は上記の 2 通りに設定し, 対象とする出水の流

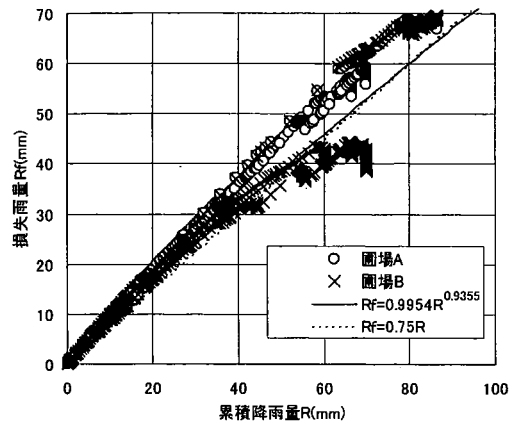


図-7 対象集水の累積雨量と損失雨量

Fig.7 Relation between accumulative rainfall and rainfall loss

表-2 E の値
Table 2 Value of "E"

検証出水		$f = 1 - 0.9954/R^{0.0645}$	$f = 0.24$
圃場 A	H 12.4.1	0.212	0.287
	H 12.4.4	0.637	0.627
	H 12.4.14	0.212	0.221
圃場 B	H 12.4.1	0.955	0.908
	H 12.4.4	0.494	0.591
	H 12.4.14	0.816	0.777
合計		3.326	3.411

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。

$$E = \sqrt{\sum (q_{obs} - q_{cal})^2 / N} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式(12)より算出された E の値を表-2 に示す。式(9)の流出率を用いた方が、若干ではあるが適合性が高い。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。

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

4.3.3 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。圃場 A, 圃場 B ともに観測値と計算値はある程度近似しており, 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, 満足できる精度で再現できていることが分かる。ただし, 同一出水において, 圃場 A と B における単位面積あたりの流出土砂量の観測値と計算値を比較すると, 観測結果, 計算結果ともに圃場 A の流出土砂量がわずかであるが多くなっている

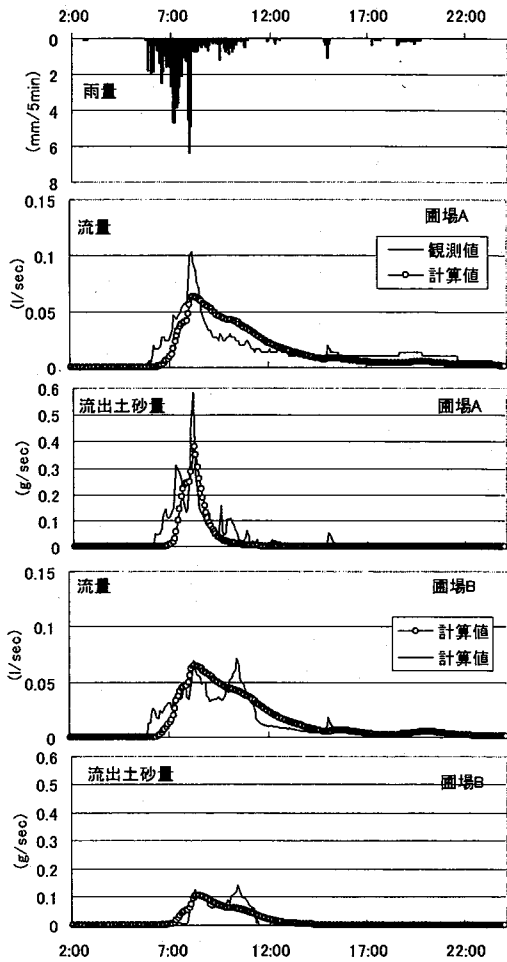


図-8 観測圃場でのシミュレーション結果の一例
Fig.8 Numerical simulation results of red sediment outflow at the model field

(例えば、平成12年4月1日の出水に対しては、圃場Aの観測値、計算値は各々、0.45 mm、0.47 mm、圃場Bの観測値、計算値は各々、0.1 mm、0.12 mm)。

5. 赤土砂流出再現シミュレーション手法の流域への適用

まず、流域のモデル化のために、図-1に示したサーン川流域の流量・濁度観測地点上流を図-9に示すように圃場の平面形状が捉えられる範囲で10m×10mにメッシュ分割し各メッシュに標高を与えた。さらに現地調査及び航空写真判読により、メッシュ毎に圃場、河川、その他の耕地又は休耕地、森林、道路に土地利用区分し、その区分ごとに粒度分布、粗度係数の条件を与えた。計算結果の検証対象地点は流域末端に設けられた砂防堰堤とした。

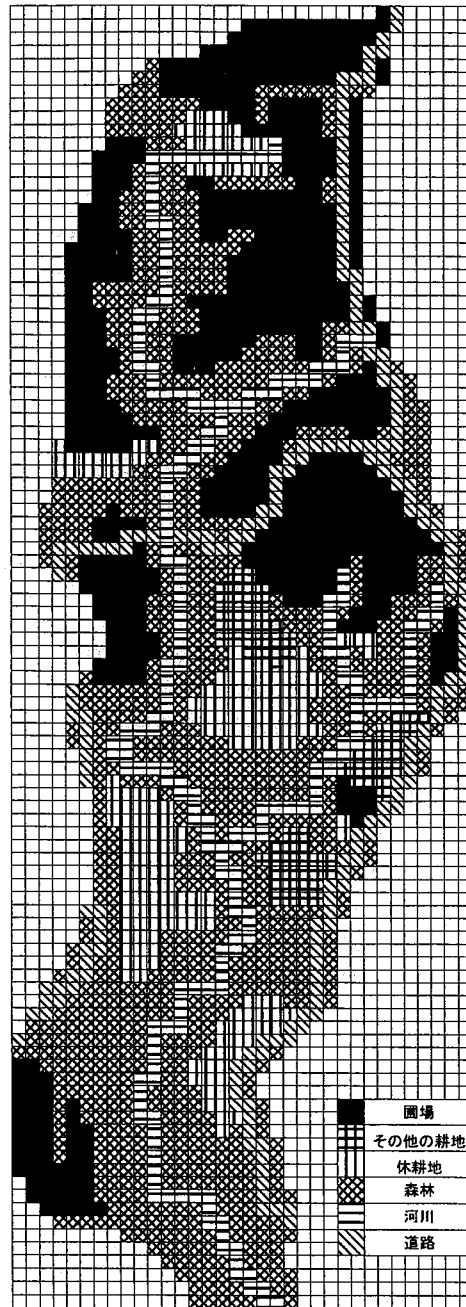


図-9 サーン川メッシュ分割図
Fig.9 Digital elevation map of the Saan river

5.1 シミュレーション条件

サーン川流域では、流域末端の既設砂防堰堤直上流において1993年～1998年に雨量、流量及び濁度の観測データを得ている。本研究では、これらの中から流量、流出土砂量データの欠測が少く、データ異常のないサーン川流域の日常的な降雨の中から表-3に示す2出水を再現対象とした。

表-3 検証出水

Table 3 Runoff data using a verification

出水名	ピーク 流量 (m ³ /s)	総雨量 (mm)	総流 出量 (m ³)	総流出 土砂量 (m ³)	備考
H 10.2.1	0.55	28	1,212	1.17	1山出水
H 5.7.29	0.70	61	3,756	2.46	2山出水

表-4 シミュレーションに用いる粒度分布

Table 4 Grain size distribution of red sediment yield areas used for the numerical simulation

粒径 (mm)	0.01	0.1	1	10
圃場	30%	30%	30%	10%
河川	5%	15%	40%	40%
休耕地	15%	15%	30%	40%
その他	20%	20%	20%	40%

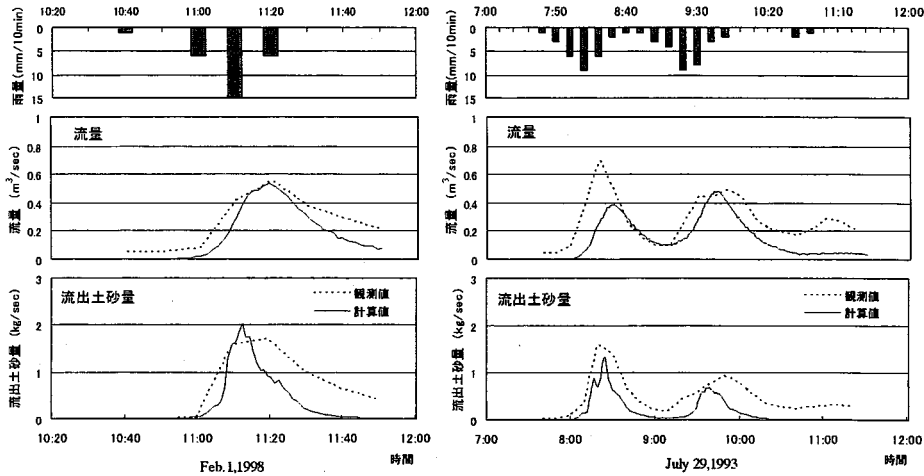


図-10 サーン川における流出土砂シミュレーション結果

Fig. 10 Numerical simulation results of red sediment outflow at the Sann river

粒度分布は、図-2を参考に表-4のように設定した。粗度係数は、圃場（パインアップル圃場以外の耕地、休耕地も含む）については、実験結果（南ら、2002b）から得られた $n=0.03\sim 0.08$ 程度という値と土木学会による値（土木学会、1999）をもとに $n=0.06$ とした。河川については、河床における雑草、淵や浅瀬の分布、蛇行状況から $n=0.04$ とした（土木学会、1999）。道路は $n=0.03$ とした。流出率は前章の検討結果より式(13)により与えた。

5.2 流域内の圃場の耕作開始からの期間の変遷と地表被覆率

図-4で示すように、主にパインアップル葉の成長に伴い、耕作期間により変化する侵食可能面積を、地表被覆率の違いとして流域全体の圃場に平均化して与える。既報告資料よりサーン川流域の圃場ごとに耕作開始からの経過月を与え被覆率を算定することも出来るが、シミュレーションモデルに反映させるためには、流域モデルのメッシュ毎に割り当てる必要があり、非常に煩雑である。本研究ではまず流域全体での赤土砂生産流出モデルの適用可能性の検討を主目的としていることから、耕作期間ごとの圃場面積割合より流域全体の平均的な地表被覆率を算定し、H 10.2.1 出水では 65%、H 5.7.29

出水では 50% を用いることとした。

5.3 シミュレーション結果

図-10に雨量、流量、流出土砂量の観測結果およびシミュレーション結果を示す。流量については、一つのピークを有する場合には流出波形がある程度の精度で再現されており、二つのピークがある場合については、1回目のピークの再現性がやや悪いものの流出波形の傾向については再現性が高い。ただし、流出土砂量については、全体的に計算値が観測値を若干下回る傾向がある。この理由としては、計算メッシュの間隔は 10 m と大きいこと、圃場内のこまかな土砂移動については再現ができないことが考えられる。また、実験圃場では取り扱う領域が狭いため、地表面の被覆率の推定にあたっては、畝間の工作用通路等の隙間を侵食域として考慮し地表被覆率を減少させたが、流域全体では、各圃場で作付け状況が異なるためこのようなことを考慮していないことや、地表面が被覆された状態でも地表面に枯葉等が密着していないと実際には侵食が抑制されないこと（南ら 2002 a）、急崖部の侵食量を考慮していないため等、侵食可能部分が過小評価されていることが一因であると思われる。

6. おわりに

本研究では、沖縄地方における赤土生産・流出の耕作段階における違いを土壌の流出・流下過程を一環したモデルで取り扱い予測することを目的とし、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、赤土砂の流出再現計算を行った。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(9)を適用することで、観測結果との適合性の高い流出波形が得られた。なお、本研究で対象とした実験圃場においては、簡易的に一定値を用いても良好な計算結果が得られた。
- 2) パインアップルの耕作期間の違いによる赤土砂生産流出特性の違いを、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ともな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の違いを表現できた。
- 3) シミュレーション手法をサーン川全流域に拡張し適用した結果、流出土砂量の計算値は観測値よりも全般的に少な目となったが、流出土砂の波形については比較的良好に再現できた。流域内の個々の要因を網羅的に包含したモデルには達していないが、地表面被覆率を増大させるような対策工の効果を流域単位で数量的に把握する目的では適応可能であることが分かった。

謝辞

本研究を行うにあたり、有益なご助言を頂いた京都大学大学院農学研究科の山山高久教授、現地での観測にご協力頂いた沖縄開発庁沖縄総合事務局の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- Williams JR, Berndt HD. (1977): Sediment yield prediction and utilization of rangelands. Documentation and user guide, US Department of Agriculture, ARS 63, Washington, DC.
- Wischmeier WH, Smith DD. (1978): Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation

- Planning, US Department of Agriculture, Agriculture Handbook 537, Washington, DC.
- 大澤和敏, 酒井一人 (2002): 降雨—土砂流出解析のための浮遊土砂流出モデルの構築—沖縄県における赤土流出モデル化に関する研究一, 農業土木学会論文集, Vol. 70, No. 1, p. 65-70
- 翁長謙良・宮城武治 (1980): 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)一, 琉球大農学報, No. 27, p. 265-273
- 酒井一人, 吉永安俊, 翁長謙良 (1995): 浮遊土砂濃度解析モデルの構築—沖縄県における赤土流出のモデル化に関する研究一, 農業土木学会論文集 Vol. 63, No. 6, p. 65-73
- 土木学会 (1999): 水理公式集, p. 89
- 道上正矢見 (1972): 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
- 南 哲行, 仲野公章, 山田 孝, 下村幸男, 小野寺 勝 (2002 b): 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, p. 3-11
- 南哲行, 小山内信智, 山田孝, 黒崎靖介, 中村勝正, 与那嶺 淳 (2001 a): 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
- 南哲行・山田孝・溝口昌晴 (2001 b): 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, p. 77-81
- 南哲行・山田孝・仲野公章・富坂峰人・徳永敏朗・山城 修 (2002 a): 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, p. 30-38
- Holy M, Vaska J, Vrana K.: SMODERP. (1988): A Simulation Model for Determination of Surface Runoff and Prediction of Erosion Processes. Technical papers of the Faculty of Civil Engineering, CTU Prague, Series V 8, p.5-42
- Morgan R. P. C. Quinnton J. N. Smith R. E. Govers G. Poesen J. W. A. Auerswald K. Chisci G. Torri D. Styczen M. E. Folly A. J. V. (1998): The European Soil Erosion Model (EUROSEM) documentation and user guide Version 3.6. Silsoe College, Granfield University
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP. (1991): RUSLE-Revised universal soil loss Equation, Journal of Soil and Water Conservation No.46, p.30-33
- Lane L J, Nearing MA, Laflen JM, Foster GR, Nichols MH. (1992): Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction project (WEPP) model. In : Parsons AJ Abrahams AD (eds) Overland Flow, UCL Press, London, UK, p.377-391
- Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP. (1987): AGNPS : Agricultural Non-Point-Source Pollution Model-A watershed analysis tool. United States Department of Agriculture, Conservation Research Report, p.35-80
- 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, Vol. 58, No. 5, p. 39-46
- 吉永安俊・翁長謙良・酒井一人 (1996): 沖縄県の農地における赤土流出防止対策と赤土等流出防止条例, 水利科学, Vol. 40, No. 1 (228), p. 9

(原稿受理 2002年12月27日)