

沖縄地方における赤土流出モデルの開発

DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED RED SOIL RUNOFF MODEL FOR OKINAWA REGION

市川 温¹・藤原 一樹²・中川 勝広³・椎葉 充晴⁴・池淵 周一⁵
Yutaka ICHIKAWA, Kazuki FUJIWARA, Katsuhiko NAKAGAWA,
Michiharu SHIIBA and Shuichi IKEBUCHI

¹正会員 工博 京都大学大学院地球環境学 助手 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²学生会員 京都大学大学院地球環境学 環境マネジメント専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 独立行政法人 通信総合研究所 沖縄亜熱帯計測技術センター (〒 904-0411 沖縄県国頭郡恩納村字恩納 4484)

⁴正会員 工博 京都大学大学院地球環境学 教授 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 工博 京都大学 防災研究所 教授 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Okinawa region has been suffering from severe red soil runoff which is caused by heavy rainfall and overland flow. The soil particle is very fine and will not sink once the soil is eroded and involved into water flow. The muddy water containing red soil particles pollutes the shores and coasts, and it gives heavy damage to ecosystems of the sea, farming and tourism. In this study we developed a distributed red soil runoff model which describes the erosion process of plane soil surface due to overland flow on the basis of a kinematic wave flow model and a digital topographic model. The erosion of surface soil is assumed to occur at a point where overland flow occurs. The rate of erosion is calculated by using the friction velocity at the point, which is determined from water depth of overland flow. The model was applied to Taiho River basin (24 km²), which is located at the north part of Okinawa main island. The results of simulations showed good agreements with observations, while the model needs further improvements.

Key Words : Red soil, Kunigami Maa'ji, Slope erosion, Runoff, Distributed model, Okinawa region

1. はじめに

沖縄地方では戦後から赤土流出問題が深刻化している¹⁾。赤土とは、沖縄地方に分布する国頭(くにがみ)マージのことで、この土壌が赤黄色を呈していることからこのようによばれている。国頭マージは、一般に粒子が細かく、透水性が小さいため^{2),3)}、降雨によって侵食されやすく、また、一度侵食されて流水に取り込まれると、容易には沈澱しないという性質を持つ。沖縄地方は、日本の他の地方と比較して降水量が多いことから、土壌侵食が発生しやすい状況にあり、また、山地から海岸線までの距離が非常に短く、河川の勾配も急であるため、土壌侵食によって発生した濁流は、ほとんど沈澱することなく、海域にまで達してしまう。

こうした赤土流出によって、珊瑚礁等の水域生態系への悪影響、海水の透明度の低下による観光価値の減少などの問題が発生している。沖縄県としても、公害防止条例の改正や平成7年の赤土等流出防止条例の施行等様々な対策を試みている¹⁾が、赤土流出は依然として続いているのが現状である。

赤土流出を防止・軽減するためには、その物理過程に基づく数値計算モデルを構成し、さまざまな降水に

対して赤土流出量を的確に予測すること、また、流出防止対策を組み込んだ形でシミュレーションを実施し、その効果を評価することが基本となる。筆者らはこれまで、雨水流出機構の物理的数値モデルに関する研究を行ってきた^{4),5),6)}。本研究では、これまでの研究成果を基礎として、赤土流出現象のモデル化に取り組む。

2. モデル開発の方針

赤土流出は主として降雨時に裸地域が表面流で侵食されることによって生じる。つまり、赤土流出量は雨水の流出形態に大きく関係しており、赤土流出量を精度よく見積もるためには、まず雨水の流出現象を時空間的に正しく再現できるモデルが必要となる。

雨水流出のモデル化に関しては多くの研究成果があるが、近年では分布型流出モデルに関する研究が進み、雨水の流動形態を実際の現象に忠実な形で再現することが可能になってきている。たとえば筆者ら^{4),5)}は、流域の地形を矩形の小斜面の集合体でモデル化し、各小斜面に雨水流動を表現する基礎式を適用して、流域からの流出量を算出するモデルを構成している。本研究では、この流出モデルを基礎として赤土流出モデルを

構成する。ただ、このモデルは、基岩盤の上に透水性の高い表土層がのった地質構造を想定しているため、透水性の低い赤土が分布する地域に適用可能か確認されているわけではない。そこで、まず、この流出モデルが沖縄地方にも適用可能であることを検証し、しかるのちに、赤土流出モデルを構成することにする。

3. 分布型流出モデルの適用性に関する検討

(1) 分布型流出モデルの概要

先にも述べたように、本研究で用いる流出モデルは、対象とする流域の地形を矩形の小斜面（以下では斜面素片と呼ぶ）の集合体としてモデル化し、上流側の斜面素片から下流側の斜面素片へと順に計算を行なう^{4),5)}。各斜面素片では、基岩盤の上に透水性の高い表土層がのった地質構造を想定している。

一般に、表土層に浸透した雨水は、主に毛管張力に起因する土層の保水性に従って土層中に貯留されるが、土層の含水率が增大するとやがて自由水として流動し始める。そのときに土層が保持している水の量を圃場容水量という。普通、圃場容水量は土層全体に対する水量のことをいうが、本研究では、この水量が土層中に存在しているときの含水率も圃場容水量と呼び、 γ_c と表すことにする。この時、土層の有効空隙率 γ_e は、 $\gamma_e = \gamma - \gamma_c$ (γ : 空隙率) となる。椎葉ら⁶⁾は、表土層の水量 h と自由水分水量 h_f の関係として(1)式を、単位幅流量 q と自由水分水量 h_f の関係として(2)式を提案している。

$$h = g(h_f) = \begin{cases} h_f + h_c \left\{ 1 - \left(\frac{d - h_f}{d} \right)^N \right\}^{\frac{1}{N}} & (0 \leq h_f < d) \\ h_f + h_c & (h_f \geq d) \end{cases} \quad (1)$$

$$q = f(h_f) = \begin{cases} ah_f & (0 \leq h_f < d) \\ \alpha(h_f - d)^m + ah_f & (h_f \geq d) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 q : 単位幅流量 [m²/sec], h_f : 自由水分水量 [m], $\alpha = \sqrt{\sin \theta / n}$, θ : 斜面勾配 [rad], n : Manningの粗度係数 [m^{-1/3}sec], $m(> 1)$: 流量流積パラメータ [-], $a(= k \sin \theta / \gamma_e)$: 地中水実質流速 [m/sec], γ_e : 表土層の有効空隙率 [-], $d(= \gamma_e D)$: 表土層の有効空隙部分の深さ [m], D : 表土層の厚さ [m], $h_c = \gamma_c D$, $N(> 1)$: 曲線の形状を決めるパラメータ [-] である。

以上の二式と連続式から構成される kinematic wave モデルを各斜面素片に適用し、差分法を用いて、上流側の斜面素片から下流側の斜面素片へと順に計算を行なうことで、対象とする斜面域からの流出量を計算する。

(2) 分布型流出モデルの適用と考察

(1) で説明した分布型流出モデルを沖縄本島北部の

大保川（たいほがわ）流域に適用した。大保川は沖縄県国頭郡大宜味村に位置し、源流を玉辻山（標高 256 m）にもつ2級河川である。流域面積は約 24 km² である。

地形モデルの作成に必要な標高データとして、数値地図 50m メッシュ（標高）を利用した。また、河道の流路位置データとして、国土数値情報の KS-272（流路位置）を用いようとしたが、精密さを欠く部分があったため、数値地図 25000（地図画像）をもとに河道網データセット生成システム⁷⁾を用いて流路位置データを作成した。図-1は大保川の流路位置と流域界を示した図である。やや太い実線が大保川の流路、破線が大保川の流域界、細い実線が海岸線、点線が大保川以外の河川の流路である。ハッチのかかった部分は海である。流域界のデータは国土数値情報の KS-273（流域界、非集水界線位置）を使用した。河口付近にある小支川の集水域が大保川の流域として認識されていない。本研究では、河口までを大保川と考え、河口付近の小河川も含めてモデルを作成している。

図-2は大保川の流路と大保川流域を構成する斜面素片を示したものである。やや太い実線が大保川の流路、細い実線が流域を構成する斜面素片、点線が大保川以外の河川の流路である。先ほど述べた河口付近の小河川の集水域も大保川の流域としてモデル化されている。

流出シミュレーションの対象としたのは、1997年8月16日から18日にかけての72時間である。用いた降水データ、流量データは内閣府沖縄総合事務局北部ダム統合管理事務所で取得されたものを用いた。

まず、筆者らがこれまで本州の流域に流出モデルを適用する際に一般的に用いてきたパラメータ値をそのまま適用して、大保川流域の流出シミュレーションを行なってみた。パラメータの値は次の通りである。

- Manningの粗度係数 n : 0.3 [m^{-1/3}sec]
- パラメータ m : 1.667 [-]
- 透水係数 k : 0.015 [m/sec]
- 空隙率 γ : 0.4 [-]
- 圃場容水量 γ_c : 0.1 [-]
- 表土層の厚さ D : 1.0 [m]
- パラメータ N : 6.0 [-]

計算結果を図-3に示す。実線が計算流量、点線が観測流量、一点鎖線が観測降雨量である。観測流量と計算流量を比較すると、ピーク時の流量に大きな違いが認められる。また、ハイドログラフの全体の形状を比較してみても、観測流量は降雨に鋭敏に反応しているのに対し、計算流量は全体的に反応が鈍い。このように、本州の流域に対するパラメータ値では、沖縄地方の出水パターンを再現できないことがわかった。

そこで、対象流域において現地調査を行なうとともに、各種文献^{2),3),8),9),10),11)}から赤土（特に国頭マージ）の透水係数、空隙率、圃場容水量、表土層の厚さに関

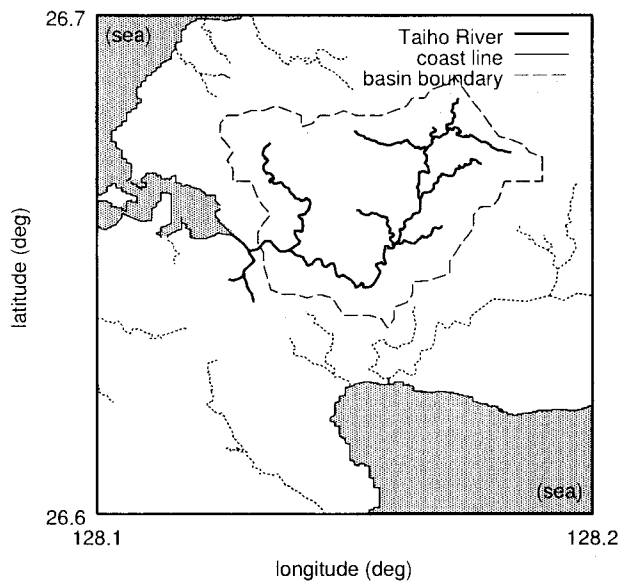


図-1 大保川流域図

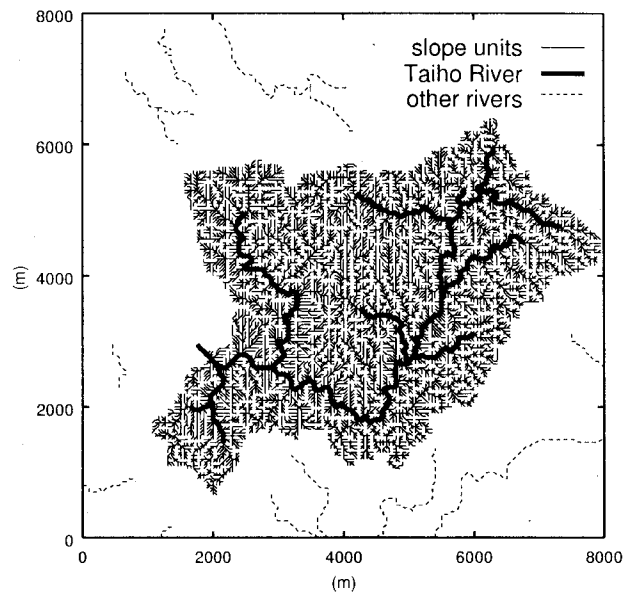


図-2 大保川流域を構成する斜面素片

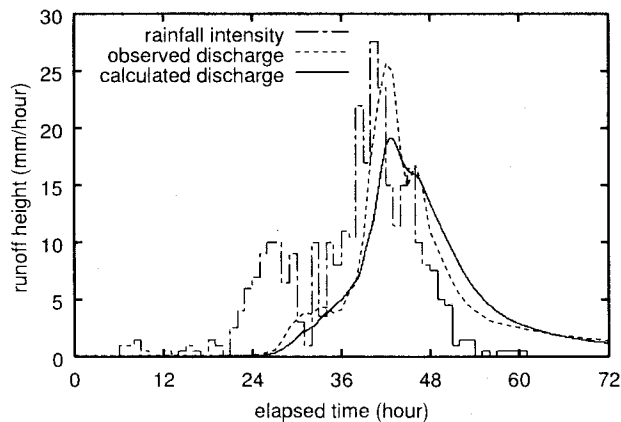


図-3 従来のパラメタ値を使用した場合の計算結果

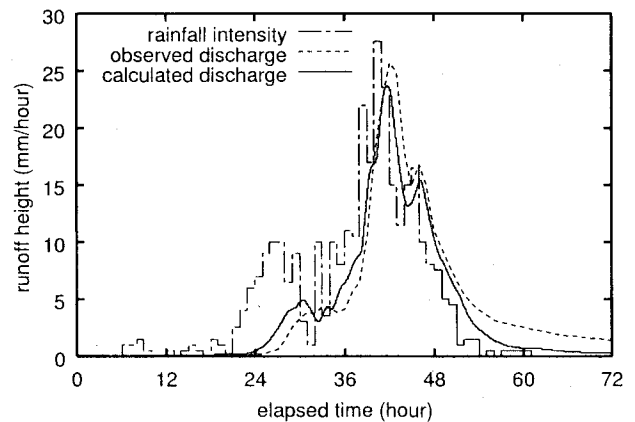


図-4 修正したパラメタ値を用いた場合の計算結果

する情報を収集し、これらの値をそれぞれ、 3.9×10^{-5} [m/sec], 0.5 [-], 0.4 [-], 0.35 [m] と修正して再度シミュレーションを行なった（これらのパラメタ値の変更に付随して、Manning の粗度係数も調整し、0.6 [$\text{m}^{-1/3}\text{sec}$] に変更した）。その結果を図-4 に示す。流量の立上り部と低減部にやや違いが見られるものの、全体としての一致度はおおむね良好といえる。このように、本流出モデルは、土壌の特性にあわせてパラメタ値を設定すれば、沖縄地方の流域にも充分適用可能であることが明らかとなった。次章では、本流出モデルを基礎として、赤土流出モデルを構築する。

4. 赤土流出モデルの構築

(1) 概説

赤土の流出は、雨水によって裸地域が侵食されることで生じる。対象流域（大保川流域）の裸地域を調査したところ、ガリが発達していたことから、本研究で

はガリ侵食を対象としてモデルを構成する。ただ、3. で説明したように、本研究で用いている流出モデルは、流域の地形を矩形の小斜面の集合体として表現しており、その小斜面内の地形の起伏は考慮していない。小斜面のスケールは、使用する標高データの解像度にもよるが、おおよそ 50 m 程度で、一般に考えられるガリのスケールよりはかなり大きい。したがって、本来ならば、ガリのスケール程度の地形起伏を表現できるような標高データを用いるか、あるいは何らかの手法でより小さなスケールの起伏の効果を流出モデルに取り込む必要があるが、本研究では斜面と現象とのスケールの違いは考慮せずに、ガリ侵食を表現する式をそのまま用いる。この点については、今後検討を要する。

また、対象流域には、裸地域以外にも、赤土流出の発生源であるパイナップル畑¹²⁾が含まれているが、本研究では裸地域とパイナップル畑の赤土流出特性の違いも考慮していない。この点も今後の検討課題である。

(2) 基礎式と計算方法

表土層上に表面流が発生すると、流水の作用によって地表面の土が剥離し、下流に流送される。表土層内に存在する微細粒子の重量百分率を p_f とすると、表土層の侵食によって流出する微細粒子の単位時間単位面積当りの質量は (3) 式で与えられる¹³⁾。

$$m_f = \rho_s E(1 - \gamma)p_f \quad (3)$$

ただし、 m_f : 単位時間単位面積当り流出する微細粒子の質量 [kg/m²/s], ρ_s : 土砂礫の密度 [kg/m³], E : 侵食速度 [m/s], γ : 空隙率 [-], p_f : 微細粒子の重量百分率 [-] である。

上式で、 ρ_s , γ , p_f は土壌の基本特性量であり、土質試験等で調べることができる。重要なのは、 E をどのように評価するかだが、本研究では、芦田・田中¹⁴⁾が実験によって得た侵食速度と摩擦速度の関係を利用する。

芦田・田中¹⁴⁾は、粘土成分を含有する土壌の侵食実験を行ない、侵食速度 E と摩擦速度 u_* の比、 E/u_* と、掃流力 τ と土粒子が移動しはじめるときの掃流力（限界掃流力） τ_c の比、 τ/τ_c の関係を調べている。それによると、 τ/τ_c が 1 に近いところでは、掃流力の増加にともなう侵食速度が急増するが、 τ/τ_c が 5 程度を越え、 E/u_* は一定値をとるようになる。彼らの実験によれば、その値は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度となっている。掃流力が大きくなると E/u_* が一定値に近づくという関係は、芦田ら¹³⁾が行なった、裸地斜面における現地実験でも確認されており、その値は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度と報告されている。

本研究では、表面流が発生すれば掃流力は十分に大きくなっていると考え、侵食速度をそのときの摩擦速度に一定値を乗じた値で評価することにする。また、この一定値は本来は実験で求めるべきものであるが、ここでは赤土流出の計算結果が観測結果をよく再現できるように調整する。

以上より、本研究で構築する赤土流出モデルの基礎式は以下ようになる。

$$\frac{\partial(CA)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = R_E \quad (4)$$

$$R_E = \rho_s E(1 - \gamma)p_f S \quad (5)$$

$$E = cu_* \quad (6)$$

ただし、 C : 浮遊土砂濃度 [kg/m³], A : 表面流の通水断面面積 [m²], Q : 表面流の流量 [m³/s], R_E : 単位時間単位長さ当りの侵食量 [kg/m/s], S : 表面流の潤辺 [m], c : 比例定数 [-] である。

表面流の流量と通水断面面積は 3. で説明した流出モデルから求めることができる。また (5) 式の S , (6) 式の u_* は表面流の水深から計算することができる。以上の (4), (5), (6) 式を各斜面素片に適用し、差分解法を

用いて浮遊土砂濃度 C を求める。赤土の侵食は裸地の斜面素片でのみ生じると考える。上流の斜面素片で発生した濁水が下流の斜面素片に流入した場合は、下流側の斜面素片で表面流が発生していれば、土砂は堆積せずにそのまま通過するものとし、表面流が発生していなければ、土砂は堆積するものとする。裸地ではない斜面素片に堆積した土砂は、その後表面流が発生したとしても、侵食されないものとする。裸地の斜面素片に堆積した土砂は、再度侵食・流送されうとする。

以上の計算手続きを全ての斜面素片に対して適用することによって、河道に接続しているすべての斜面素片からの赤土流出量を求め、これらをすべて足し合わせて当該斜面域からの赤土流出量とする。

5. 赤土流出モデルの適用および考察

(1) 概説

4. で構築した赤土流出モデルを前出の大保川流域に適用した。地形モデルは 3.(2) で作成したものをそのまま用いたが、赤土流出の計算では、斜面素片ごとの土地利用情報が必要である。そこで、国土数値情報の土地利用メッシュを用いて各斜面素片の土地利用を特定した。国土数値情報の土地利用メッシュには、3 次メッシュの 1/10 細分区画単位で 11 種類の土地利用形態が記録されている。各斜面素片には、その素片の中心地点を含む細分区画の土地利用属性を与えることにした。赤土の侵食は、土地利用属性が荒地か畑地（田以外の農用地）である斜面素片でのみ生じることとした。

雨水流出モデルのパラメタ値については、図-4 に示した計算結果を得るのに使用した値をそのまま用いた。赤土流出モデルのパラメタとしては、土の密度 ρ_s 、表土層中の微細粒子の重量百分率 p_f , (6) 式の比例定数 c があるが、 ρ_s については文献の記述を参考にして 2750 kg/m³ とし、 p_f については、表土層がすべて微細粒子で構成されていると考え、1.0 とした。比例定数 c については、(A) 10^{-7} , (B) 5.0×10^{-8} , (C) 10^{-8} の三種類の値を試すことにした。ちなみに、空隙率 γ については、雨水流出モデルで与えた値をそのまま用いた。

適用の対象としたのは、1997 年 8 月 16 日から 18 日にかけての 72 時間と、同年 10 月 1 日から 2 日にかけての 48 時間である。降水データ、流量データならびに土砂流出量データは、内閣府沖縄総合事務局北部ダム統合管理事務所で取得されたものを用いた。

(2) 表土層の侵食による流出計算への影響について

赤土流出モデルでは表土層の厚さが時間によって変化する。そのため、同じパラメタ値を用いていても、流量の計算結果が図-4 に示したものと異なり、観測流量とかけ離れてしまう可能性がある。もしそのよう

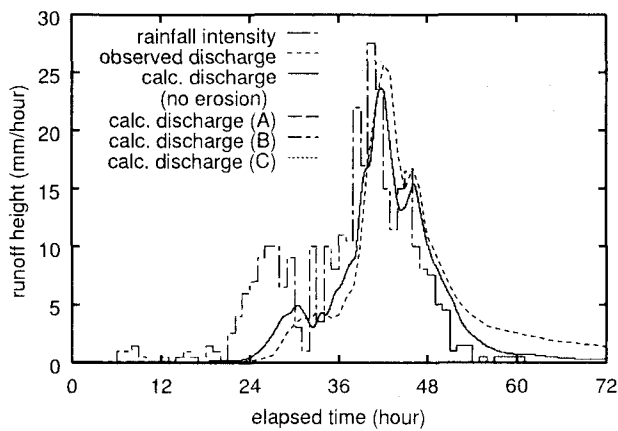


図-5 流量ハイドログラフの比較 (1997年8月16日～18日)

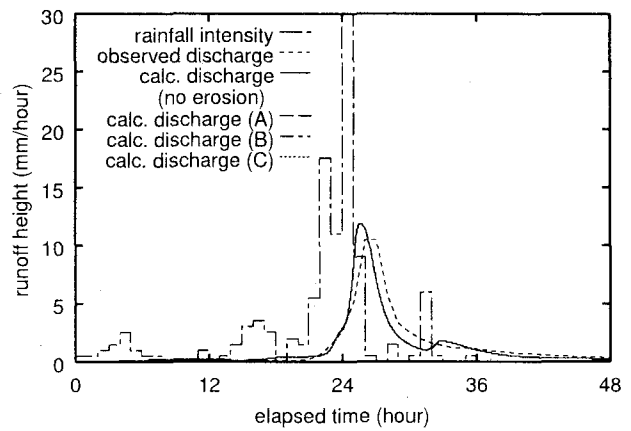


図-6 流量ハイドログラフの比較 (1997年10月1日～2日)

なことになれば、パラメタ値を再調整する必要が出てくる。そこで、赤土流出モデルによる計算流量と、雨水流出モデルによる計算流量、ならびに観測流量とを比較し、パラメタ値が適切であるか再度確認しておく。

図-5, 6 は、上述の三種類の流量ハイドログラフを比較したものである。図-5 は1997年8月16日～18日に対するもの、図-6 は同年10月1日～2日に対するものである。赤土流出モデルによる計算は、上記の(A)～(C)の3パターンで行なっている。

両図には、赤土流出モデルによる3パターンの計算流量を示しているが、いずれも雨水流出モデルによる計算流量とほぼ重なっている。このことから、表土層の侵食が雨水流出計算に与える影響は小さく、パラメタ値を調整する必要はないことが確認された。次節では、上記のシミュレーションによって得られた赤土流出の計算結果を示し、観測値と比較して考察する。

(3) 赤土流出の計算結果と考察

図-7, 8 は、赤土流出の計算結果である。それぞれ、1997年8月16日～18日に対する計算結果、1997年10月1日～2日に対する計算結果である。図中の×は観測値を示しており、また、3本の線は、上からパターン(A), (B), (C)の計算結果である。土砂流出量の観測は、それぞれのイベントにおいて、増水時・ピーク時・減水時の三回行なわれているが、正確な時刻は記録されていない。そこで、観測流量データを参照して、各時刻を次のように設定した。増水時・減水時の時刻は、河川流量がピーク流量の約1/4になる時刻とした。

- 1997年8月16日～18日
 - 増水時 計算開始時刻から38時間後
 - ピーク時 計算開始時刻から42時間後
 - 減水時 計算開始時刻から51時間後
- 1997年10月1日～2日
 - 増水時 計算開始時刻から24時間後
 - ピーク時 計算開始時刻から26.5時間後
 - 減水時 計算開始時刻から45時間後

図-7 をみると、パターン(B) ($c = 5.0 \times 10^{-8}$) の計算結果が比較的良好に観測値と一致している。しかし、図-8 ではいずれの計算結果も観測値と大きく離れており、上記の c の値が適切であると断言することはできない。ただ、 c の値を $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 以外の値にして計算すると、計算結果と観測値が2オーダー程度異なる結果となった。したがって、大保川流域における c の値はおおむね $10^{-7} \sim 10^{-8}$ の範囲であると考えられる。

また、8月と10月のイベントを比較すると、10月のほうが総降雨量が小さいにもかかわらず（最大降雨強度はほぼ同じ）、ピーク時の土砂流出量は多い。本モデルは、基本的には雨が降れば土砂も多く流出するという単純な機構になっているため、10月のイベントでは降雨量の少なさを反映して、土砂流出量も少なく計算されている。実際の赤土流出現象には、降雨だけではなく、植生の状況などの他の要因も影響している。たとえば、南ら¹⁵⁾は、赤土発生源の一つであるパイナップル畑に着目し、圃場を更新する際の鋤き込み後に赤土が多く流出することを報告している。こうしたことを考えあわせると、地被状態が短期間に急激に変化する農地（本流域では主として畑地）からの赤土流出過程をモデルに取り込むことが重要であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、雨水流出機構の物理的数値モデルを基礎として、沖縄地方における赤土流出モデルを開発した。

まず、赤土流出モデルの基礎となる雨水流出モデルそのものが沖縄地方で適用可能か検証した。沖縄地方では、表土層の構造、土壌の物理性が本州のそれらとは異なっているが、表土層の特性にあわせてモデルのパラメタ値を変えて計算したところ、観測値を精度よく再現することができ、本雨水流出モデルが沖縄地方においても適用可能であることが明らかとなった。

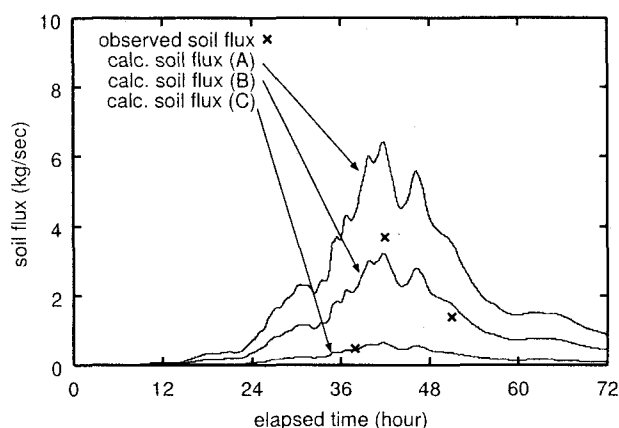


図-7 赤土流出計算結果 (1997 年 8 月 16 日～18 日)

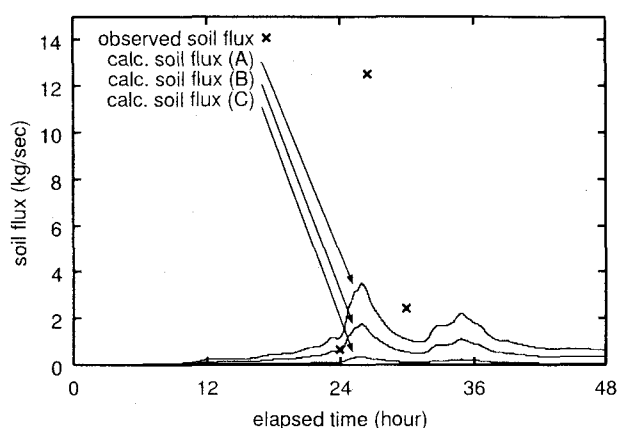


図-8 赤土流出計算結果 (1997 年 10 月 1 日～2 日)

つぎに、流水の掃流力が大きくなると、侵食速度 E と摩擦速度 u_* の比が一定値に近づくという知見を利用して、表面流による赤土流出のモデルを構成した。そして、このモデルを大保川流域に適用し、計算結果と観測値を比較した。赤土流出モデルの適用に際しては、モデルパラメータ値が適切であることを再度確認した。赤土流出の計算結果は、 E/u_* の値によって大きく変わるため、計算結果と観測値がなるべく一致する値を試行錯誤的に探した。その結果、本流域においては、 E/u_* の値はおおむね $10^{-7} \sim 10^{-8}$ であることがわかった。ただ、適用ケースによっては、計算結果と観測値が大きく異なるため、上記の値が適切であるとは断言できない。また、本モデルは雨が多く降れば土砂も多く流出するという単純な機構になっており、降雨と赤土流出の大小関係が逆転するような場合には対応できない。今後は、地状態が短期間の間に急激に変化する農地からの赤土流出過程をモデルに取り込むことが課題となる。

本研究で用いた、雨量・流量・土砂流出量データは、内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所に御提供頂いた。また、沖縄県衛生環境研究所環境生活部赤土研究室室長大見謝辰男氏、ならびに、沖縄県農業試験場化学部部長国吉清氏からは、赤土侵食・流出に関する貴重な資料を頂戴した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉永 安俊・翁長 謙良・酒井 一人：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，No. 228 (第 40 巻，第 1 号)，pp. 1-13, 1996.
- 2) 登川 伸・寺沢 四郎：沖縄県本島の主要土壌の物理性について，土壌の物理性，第 46 号，pp. 2-11, 1982.
- 3) 翁長 謙良・吉永 安俊：沖縄の畑地土壌の物理性，土壌の物理性，第 58 号，pp. 17-29, 1988.
- 4) 椎葉充晴・市川 温・榊原哲由・立川康人：河川流域地形の新しい数値表現形式，土木学会論文集，No. 621/II-47, pp. 1-9, 1999.
- 5) 市川 温・村上將道・立川康人・椎葉充晴：流域地形の

新たな数値表現形式に基づく流域流出系シミュレーションシステムの開発，土木学会論文集，No. 691/II-57, pp. 43-52, 2001.

- 6) 椎葉 充晴・立川 康人・市川 温・堀 智晴・田中 賢治：圃場容水量・パイプ流を考慮した斜面流出計算モデルの開発，京都大学防災研究所，第 41 号，B-2, pp. 229-235, 1998.
- 7) 南 裕一：河道網データセットの新たな表現形式とその生成手法について，京都大学工学部卒業論文，1997.
- 8) 翁長 謙良・宜保 清一：日本の特殊土壌（その 11・最終講）— 沖縄の特殊土壌（マージ，ジャークル）—，農業土木学会誌，第 52 巻，第 6 号，pp. 49-56, 1984.
- 9) 国吉 清：土壌侵食（水食）の要因解析，特に沖縄土壌の受食性について 第 1 報 土壌の受食性と物理的性質，沖縄県農業試験場研究報告，第 12 号，pp. 53-64, 1987.
- 10) 翁長 謙良・呉屋 昭・松村 輝久：沖縄県北部赤黄色土の土壌侵食の評価と対策，土壌の物理性，第 63 号，pp. 19-34, 1991.
- 11) 渡嘉敷 義浩・山田 隆弘・志茂 守孝・翁長 謙良：沖縄本島における造成土壌の表土とその流出土の物理性，日本土壌肥科学雑誌，第 65 巻，第 2 号，pp. 115-125, 1994.
- 12) 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, pp. 39-46, 2001.
- 13) 芦田 和男・江頭 進治・金屋敷 忠儀：斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究，第 24 回水理講演会論文集，pp. 135-141, 1980.
- 14) 芦田 和男・田中 健二：粘土分を含有する砂れき床の侵食と流砂機構に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 17 号，B, pp. 571-584, 1974.
- 15) 南 哲行・山田 孝・仲野 公章・富坂 峰人・徳永 敏朗・山城 修：耕作ステージの異なるパイナ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, 2002.

(2002. 9. 30 受付)