# 石垣島名蔵川流域における土砂輸送に関する 長期観測およびWEPPの検証

# LONG-TERM FIELD OBSERVATION AND APPLICATION OF WEPP MODEL FOR SEDIMENT YIELD AND TRANSPORT IN NAGURA WATERSHED

# 大澤和敏1・池田駿介2・久保田龍三朗3・乃田啓吾4・赤松良久5 Kazutoshi OSAWA, Syunsuke IKEDA, Ryuzaburo KUBOTA, Keigo NODA and Yoshihisa AKAMATSU

<sup>1</sup>正会員 農博 宇都宮大学准教授 農学部(〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350)
<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-1-12)
<sup>3</sup>学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科(同上)
<sup>4</sup>農修 東京大学大学院農学生命科学研究科(〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1)
<sup>5</sup>正会員 工博 琉球大学准教授 工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

Red-soil erosion and runoff have led to agricultural and environmental problems in Okinawa, and effective measures which can reduce sediment yield in the farmland are necessary. For the purpose, advanced model for predicting sediment yield and transport is required. The authors carried out long-term continuous observation for sediment yield and transport at Nagura watershed, Ishigaki Island. Observation items were precipitation, water depth, flow velocity, turbidity, and SS concentration. Observed data contain 31 rainfall events for 1.5 years and some characteristics of sediment runoff were grasped such as sediment runoff variations due to timing of flood and tide. In these studies, the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model was tested to verify their applicability in predicting sediment yield on farmland and sediment runoff at watershed. The calculated sediment runoff was reasonable compared with observed one. Consequently, the applied result of the model using the climate data for the past 13 years has specified the severe eroded hillslopes and the severe sediment runoff months.

## Key Words : red-soil runoff, Sediment yield and transport, Field observation, WEPP model, Okinawa

## 1. 序論

面源における土砂生産が顕著である沖縄では、これを 赤土流出と称して、サンゴをはじめとする沖縄地方独自 の自然形態を破壊する要因として問題視している.経常 的な土砂流出発生源である農地は、現状の侵食量および 各種営農的対策の効果が定量的に把握されていないため に条例規制の対象外となっているが、沖縄県としては、 近い将来規制対象にする方針である.その際、様々な営 農方法に対する侵食量および水域における土砂輸送量を 予測可能なモデルとそのモデルの性能を検証可能な各種 データベースが必要不可欠である.

これまで、沖縄地方における赤土流出に関する観測は 数多く行われてきたが、その多くが数回程度の降雨イベ ントを含む短期間の観測であり、大小様々な規模の降雨 イベントを捉えた長期的な観測事例は少ない.また、短 期間の観測では、主要な土砂生産源である農地における 作物の生育状況に対応した土砂流出過程を的確に捉える ことは困難である.

筆者ら<sup>11</sup>は既往の侵食モデルであるUSLE(Universal Soil Loss Equation)やWEPP(Water Erosion Prediction Project)の 検証を沖縄県本島恩納村における小流域(流域面積: 0.12km<sup>2</sup>)に対して行い,WEPPは精度,適用性ともに優 れていると評価した.さらに,筆者ら<sup>3),4</sup>はWEPPにおけ る作物,土壌,管理作業などに関する機構およびパラ メータを援用した形で土砂流出の時系列まで表現可能な 新たなモデルを構築し,沖縄県本島恩納村における小流 域および沖縄県石垣島名蔵川流域に適用し,その精度は 概ね良好であったことを報告している.しかしながら, 多大な計算時間を要するため,数回の降雨イベント程度 の適用が限界であり,長期的な解析には適していない.

以上のことから,長期的な侵食・土砂輸送解析を実施

するためにはWEPPを利用することが有望である.しかしながら,沖縄地方の流域におけるWEPPの検証事例は 筆者らが実施した1事例のみであり,実用化のためにはより多くの流域における検証が必要である.

そこで、本研究では沖縄県石垣島における名蔵川流域 を対象として、河川における土砂輸送に関する長期連続 観測を実施することを第一の目的とした.具体的には、 流域の末端の河道内において、流量(水深、流速)および 土砂輸送量(濁度,採水試料のSS濃度)の観測を約1.5年間 継続して実施する.本観測により、これまでの研究では 得ることが難しかった大小様々な降雨イベントにおける 土砂輸送特性について検討することが可能となる.そし て、既存の侵食・土砂輸送モデルであるWEPPを対象流 域へ適用し、観測値に対する計算値の適合性を検証する ことを第二の目的とする.それにより、国内流域におけ るWEPPの適用事例が増え、モデルの特徴がより鮮明に なることが予想される.さらに、過去の気象データを用 いたシミュレーションを実施し、土壌侵食の著しい場所 や時期の特定を行い、WEPPの有用性について検討する.

## 2. 土砂輸送の長期連続観測

## (1) 石垣島名蔵川流域の概要および観測方法

沖縄県石垣島西部に位置する名蔵川流域を対象流域とした.流域の概要および2006年6月の土地利用分布を図-1に示す.流域面積は14.9km<sup>2</sup>である.土地利用は2005年 6月および2006年6月に現地踏査によって決定した.

観測点は, 図-1に示した流域の末端におけるSt.Fであ る. St.Fは感潮域にあり、設置型観測機器による連続計 測および降雨イベント時における採水を行なった. 観測 期間は2005年5月~2006年12月までとした。観測項目は、 降水量, 流速, 水深, 濁度, SS濃度である. 降水量は流 域内の3地点において転倒升式雨量計(MW-010, 栄弘精 機)を用いて10分間隔で測定した.流速は2次元電磁流速 計(Compact EM, アレック電子), 濁度はワイパー付き光 学式濁度計(ATU3-8M, アレック電子, またはCompact CLW, アレック電子),水深は圧力式水深計(Diver,大 起理化工業,またはU20-001-01-Ti,オンセットコン ピュータ社)を用いた.これらの機器を河川断面内の, 流心および河床から20cm~30cmの位置に設置し、10分間 隔で連続測定した.得られた計測値を用いて、断面平均 流速、流量、SS濃度、土砂輸送量を後述の方法によって 求め、観測値に関する考察やモデルによる計算値の比較 に用いる. 採水は自動採水機(6712型, ISCO社)による吸 引採水を降雨時に30分~数時間間隔で行った. 採水サン プルは冷蔵空輸し、ガラス繊維濾紙(孔径1µm)を用いた 吸引濾過法によってSS濃度を測定した.

断面平均流速は、流速計で得られる1点の流速を用い て鉛直方向には対数速度分布を仮定することによって決



図-1 石垣島名蔵川流域の概要および土地利用分布

定し,水平方向には水深毎に上述の対数速度分布を適用 することによって算出した.流量は断面平均流速に,水 深から算出される通水断面積を乗じて求めた.

濁度計より得られた濁度をSS濃度へ変換するために、 濁度と採水サンプルから得られたSS濃度の関係を以下の ように求めた.用いた2種類の濁度計は濁度とSS濃度の 傾向が異なったため、濁度計毎に濁度とSS濃度の回帰式 を求め、濁度をSS濃度に換算した.さらに、出水毎に濁 度とSS濃度の関係が異なることが多かったので、出水毎 に採水を行い、その都度新たな回帰式を求めてSS濃度の 時系列を算出した.なお、採水ができなかった降雨イベ ント時は、そのイベント前後の採水によって作成された 濁度とSS濃度の回帰式を用いた.

以上のように求められた流量とSS濃度の積からSSの 断面通過量(以降,土砂輸送量と称する)を求めた. St.F は感潮域であるために,流れが上流方向にある場合は土 砂輸送量を負として取り扱った.

## (2) 結果および考察

## a) 濁度とSS濃度の関係

観測期間において、濁度計による濁度の計測と採水に よるSS濃度の測定が同時に可能であった降雨イベントは 15回あった.その中で、採水回数は約420回であった. 濁度計毎の濁度とSS濃度の関係を図-2に示す.なお、用 いた濁度計は、カオリンを用いた検定が予め行われてお り、出力値の単位はmg(kaolin)/Lである.濁度計ATU3-8Mの使用期間は2005年5月~2005年9月までであり、 Compact CLWの使用期間は2005年8月~2006年12月まで であった.また、ATU3-8Mのみ複数の期間での関係を 例として示した.この結果より、濁度計毎に濁度とSS濃



図-2 濁度とSS濃度の関係

度の関係は大きく異なる傾向にあることが分かる.これ は機器の特性によるものである.また,降雨イベント毎 でも濁度とSS濃度の関係は異なることが確認された.こ れは降雨イベント毎に濁質の粒径が異なることやセン サー面の汚れに起因するものであると考えられる.以上 のように,濁度をSS濃度に変換する際には回帰式の定期 的な更新が必要であることが確認できた.

## b)降雨イベント毎の観測値の時系列

観測期間中における降雨イベントは31回であった.降 雨イベントの定義として、USLE<sup>4</sup>における一連降雨の定 義として用いられている「降水量が12.7mm以上または 降雨強度が6.4mm/15min以上の降雨で、降雨後の無降雨 期間が6時間以上」を採用した.

計測された降水量,水深,断面平均流速,流量,SS濃度,土砂輸送量の降雨イベント時の時系列を図-3に示す. なお,2005年6/23~8/6,2005年11/12~11/17,2006年 1/9~1/13は欠測した観測項目があり,土砂輸送量の算定 が不可能であった.全体的な傾向を見ると,大きな降雨 強度または連続的な降雨に伴い水深,流速,流量,そし てSS濃度が増大し,その結果,土砂輸送量が増大する傾 向にあった.2005年8/30~8/31や2006年2/22~3/2などの降 雨イベントがそれに当たる.2006年2/22~3/2のイベント では,観測期間におけるSS濃度の最大値を記録した.こ の要因として,大規模な出水に伴う河道内の貯留土砂の 再懸濁に加え,1月~2月の期間は流域内における主要作 物であるサトウキビの収穫時期に当たり,地表面が裸地 化したことによって大きな土壌侵食が生じたためであっ たと考えられる.

2006年9/15~18の降雨イベントでは大きな降雨強度お よび連続的な降雨があったのにも関わらず流量の増大が 顕著ではなかったため、土砂輸送量の増大もまた顕著で はなかった.この時の流速に着目すると、水深の増大時 に流速の増大が見られず、逆流している状況にあった. これは、非常に強い勢力の台風に伴う降雨イベントで あったため、強風の影響や流速計に枝等が絡んだことに よって流速が適切に計測できなかったと予想される.

比較的小規模の降雨イベントでは、土砂輸送量が顕著 に増大しない場合もあった. 2005年5/24~5/25や2006年 10/22~10/23などのイベントでは上げ潮時に降雨に伴う流 出がピークに達し、土砂輸送量を減少させたと考えられ る.一方、2005年6/2~6/4や2006年10/22~10/23などのイベ ントでは、下げ潮時に降雨に伴う流出がピークに達した ために、同程度の降雨時より土砂輸送が顕著であったと 考えられる.

#### c)降水量または流量に対する土砂輸送量の関係

降雨イベント毎に降水量,流量,そして土砂輸送量の 総和を求めた結果を図-4に示す.土砂輸送量に着目する と,2006年の年間土砂輸送量は442tであったのに対し, 2006年2/22の降雨イベントの土砂輸送量は173tであり, その寄与は大きい.このように土砂輸送過程において, 年に1または2回程度の大規模なイベントが支配的である ことが分かった.

降雨イベント毎の降水量に対する土砂輸送量の関係お よび降雨イベント毎の流量に対する土砂輸送量の関係を 図−5に示す、これらの関係を見ると、降水量または流量 の増大に伴い土砂輸送量も増大するイベントが多いが、 降水量または流量が大きく土砂輸送量が小さいイベント も複数あった. 2006年9/15~18の降雨イベントの観測値 は誤差を含んでいる可能性が高いので除外すると、降水 量または流量が大きく土砂輸送量が小さいイベントは, 降雨強度が小さく断続的な降雨時系列を有する場合に多 い(例えば2006年1/26~1/31). このような降雨時系列の場 合、斜面において顕著な土壌侵食が生じなかったために 土砂輸送量は小さかったと考えられる.また、前項で述 べたように、潮汐と土砂の流出ピークのタイミングに よって土砂輸送量が著しく異なることから、上げ潮時に 土砂の流出ピークを有するイベントではこのような関係 になると考えられる.

#### 3. WEPPの検証およびシミュレーション

#### (1) WEPPの概要

WEPPは米国農務省を中心に開発が進められ,現在,ソフトウェアー化され,無償で配布されている<sup>5</sup>.WEPP は農地における土壌侵食,水路または河川における土砂 輸送,そして貯水池における土砂輸送の3つの過程で構 成されている.中でも土壌侵食に関して大きな影響因子 である作物の生長,土壌状態の変化,各種営農管理作業 を実際の現象に即した形で表現していることが特徴であ る.さらに,斜面における侵食過程では,リル侵食過程 とインターリル侵食過程が考慮された物理的機構を備え ている.これらを明確に表現した点が古典的な侵食モデ ルであるUSLE<sup>4</sup>と大きく異なる.また,USLEが年間侵 食量を算定可能であるのに対して,WEPPは一雨毎の侵 食量を算定可能である.加えて,USLEは1筆の農地のみ における侵食量が算定可能であるのに対して,WEPPは 流域スケールでの土砂動態を表現することができる.





#### (2) 適用方法

用いたモデルは、「WEPP Model Version 2006.5」であ る. WEPPを適用するには、斜面分割、斜面(農地、森林 等),水路(河道),沈砂池における各種設定が必要になる. 斜面分割は航空写真から土地利用区分を判別した. 斜面 における設定は表-1に示した方法で個々の斜面において 設定した. なお、同種の作物を栽培する場合でも作業時 期が異なる場合があるが、その違いは無視し、一般的な 栽培スケジュールを採用した.水路は断面形状,勾配, 材質、沈砂池は容量、流出部の形状をそれぞれ実状に基 づいて設定した.

適用期間は観測値に対する計算値の比較を行う場合に は、2005年~2006年とし、降水量のみ対象流域で観測し たデータを用い、その他の気象データは石垣島地方気象 台の地上気象観測値を使用した.また、降水量も石垣島 地方気象台の地上気象観測値を用いて1994年~2004年に おけるWEPPの適用も実施し、流域内の斜面における年 間平均土砂生産量分布の算定や月別平均土砂輸送量を算 出した. その場合の地形や土地利用条件は2006年におけ る条件を全ての適用期間において用いた.

## (3) 結果および考察

# a) 適合性の検証

観測期間における土砂輸送量の観測値とWEPPによる

表-1 WEPPにおける斜面の入力データ

気象	降水量,気温,風向,風 力,日射量,露点	降水量のみ実測,他は最寄り(石 垣島)の気象庁地上気象観測デー タを利用
土壤	土性, 有機物含有量, CEC, アルベド, 初期含 水率	土性および有機物含有量のみ実 測,CECは既存の値を使用,その 他のデータはWEPPの推奨値を使 用
地形	斜面方向における傾斜, 斜面長	航空写真,国土地理院数値地図 50mメッシュ,水準測量結果を使 用
作物 管理	作付け品目,各種管理ス ケジュール	品目および管理作業はWEPPで定 められている項目から選択、スケ ジュールは営農指針を参考に設定



図-6 土砂輸送量の観測値とWEPPによる計算値

土砂輸送量の計算値を図-6に示す. 2005年6/12や2006年 2/22などの比較的大きい土砂輸送量が観測されたイベン トに着目すると、観測値と計算値は概ね適合しているイ ベントが多い. しかしながら, 2006年8/21や2006年12/21 などの中規模の土砂輸送量が観測されたイベントでは, 計算値は過大または過小評価する傾向にあった. 前章の 観測値の考察で記した潮汐の土砂輸送への影響が,これ らのイベントにおいても顕著に現れている. WEPPは感 潮域における河道の流れや土砂輸送の機構が組み込まれ ていないため、過大評価したイベントは上げ潮時、過小 評価したイベントは下げ潮時に多い.これらのことから, WEPPは潮汐の影響を顕著に受けた降雨イベントにおけ る適合性は低いと評価できる.また,強い勢力の台風時 の2006年9/15における計算値は、適用期間内で最大とな る土砂輸送量となり、観測値に誤差を含んでいる可能性 が示唆される結果となった.

2006年9/15を除外した場合の適用期間全体の総和は, 観測値が677t (2005年:236t, 2006年:441t), 計算値が542t (2005年:198t, 2006年:345t)となり、適合性は概ね良好で あった. これは、比較的大きい土砂輸送量が観測された イベントにおいてWEPPの適合性が高かったためである.

## b)年間平均土砂生産量分布

1994年~2006年までの計算結果を用いて算出した流域 内の斜面における年間平均侵食量分布を図-7に示す.流 域内の土壌侵食は農地として利用されている流域南西部



図-7 年間平均土砂生産量分布

および南部において顕著であることが分かる.また,流 域南部は山林を開発し農地として利用しているため,侵 食量は流域南東部と比較して大きい傾向にあった.以上 のように,WEPPによる解析によって,過度の土壤侵食 が発生する斜面を特定することが可能となり,侵食抑制 対策場所の選定に利用できる.

#### c)月別平均土砂輸送量

1994年~2006年までの計算結果を用いて算出した月別 平均降水量および月別平均土砂輸送量を図-8に示す.な お,流域末端における年間平均土砂輸送量は,1108t/yr であった.結果を見ると,梅雨期である6月および台風 期である8月~10月の土砂輸送量が大きい.これは,梅雨 期や台風期の集中豪雨が顕著に寄与していると考えられ る.また,6月は春植えサトウキビの生育初期に当たり, 8~10月は夏植えサトウキビの植え付け期から生育初期に 当たるため,地表面の被覆率が小さい状況にあることも この時期の土砂輸送量の増大に寄与していると考えられ る.これらのことから,時期に応じた面源における土壌 侵食抑制対策を検討することが必要である.

## 4.結論

本研究では、沖縄県石垣島名蔵川流域を対象として、 河川における土砂輸送に関する長期連続観測を実施した. そして、既存の侵食・土砂輸送モデルであるWEPPを適 用し適合性の検証および過去の気象データを用いたシ ミュレーションを実施した.その結果、以下のことが明 らかになった.

- (1) 濁度をSS濃度に変換する際には回帰式の定期的な更 新が必要であることを示した.
- (2)約1.5年間観測を継続した結果,比較的大きな土砂輸送量が観測される場合は、大きな降雨強度または連続的な降水に伴い水深,流速,流量,そしてSS濃度



が増大することが条件であった.また、中小規模の 降雨イベント時では、観測点が感潮域にあったため、 土砂の流出ピークのタイミングによって土砂輸送量 が著しく異なった.

- (3) 年間の土砂輸送過程において、年に1または2回程度 の大規模なイベントが支配的であることが分かった.
- (4) WEPPは比較的大きな降雨イベントでの適合性は概ね 良好であり、年間の総量も概ね一致した.しかしな がら、潮汐の影響を顕著に受けた中規模以下のイベ ントにおいて過大または過小評価となる場合がある ことが確認された.
- (5) 過去の気象データを用いてWEPPによる解析を実施 した結果,流域内の土壌侵食は農地として利用され ている流域南西部および南部において顕著であり, 流域末端における土砂輸送量は梅雨期である6月およ び台風期である8月~10月の土砂輸送量が大きいこと が分かった.

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(S)(課題番号:17106006,研究代表者:池田駿介),文 部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号: 18780181,研究代表者:大澤和敏),国土交通省建設技術研究助成(研究代表者:松下 潤)の支援で行われた.

#### 参考文献

- 大澤和敏,池田駿介,酒井一人,島田正志: 農業流域における 土砂動態の現地観測およびUSLE・WEPPによる評価,河川 技術論文集,10,179-184,2004.
- 2) 大澤和敏,池田駿介,髙椋恵,酒井一人:農業主体の流域に対応した侵食・土砂流出モデルの構築,水工学論文集,50,1027-1032,2006.
- 大澤和敏,高椋恵,池田駿介:石垣島名蔵川流域における土 砂動態および流域土砂管理技術,河川技術論文集,12,293-298, 2006.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith: Predicting rainfall-erosion losses, *Agricultural Handbook No. 537*, USDA Washington D.C., 1978.
- USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: USDA-Water Erosion Prediction Project; Hillslope profile and watershed model documentation, *NSERL Report No.10*, 1995.

(2007.9.30受付)