

# 農業流域から河川へ流入する微細土砂の 抑制対策試験および解析

## FIELD OBSERVATION AND WEPP APPLICATION FOR SEDIMENT YIELD IN A FARMLAND AND AGRICULTURAL WATERSHED

大澤和敏<sup>1</sup>・池田駿介<sup>2</sup>・山口悟司<sup>3</sup>・高椋恵<sup>4</sup>・干川明<sup>5</sup>  
Kazutoshi OSAWA, Syunsuke IKEDA, Satoshi YAMAGUCHI, Kei TAKAMUKU,  
and Akira HOSHIKAWA

<sup>1</sup>正会員 農博 東京工業大学助手 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<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 (同上)

<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>学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)

<sup>5</sup>農修 国際農林水産業研究センター沖縄支所 (〒907-0002 沖縄県石垣市字真栄里川良原1091-1)

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 is required. From the observation, canopy or residue coverage ratio of sugarcane field have reduced sediment yield by 39% to 92%, respectively. Zero-tillage perennial farming is found to reduce sediment yield by 94%. However, 0.6m length grass strip did not trap the sediment effectively. In these studies, the Water Erosion Prediction Project (WEPP) was tested to verify their applicability in predicting sediment yield on farmland and sediment runoff at watershed. The results have revealed that the WEPP is effective to estimate the sediment yield at farmlands affected by various agricultural management conditions. In the present application to the watershed, the authors carried out some case studies to choose proper combinations of sediment yield reduction methods. The calculation has shown that the sediment runoff can be reduced by 56% if the combination is adequately chosen.

**Key Words :** Red-soil runoff, Soil erosion, Sediment yield reduction methods, WEPP model, Field observation, Agricultural watershed

### 1. 序論

微細土砂の生産源として農地などの面源からの流出を適切に評価することが、流域一貫土砂管理法の策定のために必要とされている。面源における土砂生産が顕著である沖縄県では、この問題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。営農地域を対象とした赤土流出規制について検討するためには、営農的土砂流出防止対策の効果を定量的に把握し、流域内での土砂動態解析の中に組み込んだ形で統合的な流域土砂管理計画を策定する必要がある。

そこで、本研究では沖縄県石垣島の実際に営農されてきた畑地において同一条件の4つの試験区を設置し、土砂流出抑制対策に伴う侵食量の削減量を定量的に計測することを第1の目的とした。具体的には、畑を4つに区切

り、無耕作(裸地)区、サトウキビ慣行栽培区、植生帯(グリーンベルト)を有するサトウキビ慣行栽培区、そして無耕起状態でのサトウキビ栽培区の4種類の営農形態で侵食量の同時計測による比較試験を行った。それらの試験結果を用いて、作物の慣行栽培による侵食抑制効果、無耕起栽培による侵食抑制効果、そして植生帯による流出土砂の捕捉効果について検討する。第2の目的として、農地における土砂生産過程に加え土砂の流下過程も表現可能な物理的モデルであるWEPP (Water Erosion Prediction Project) を用いたシミュレーションを行う。得られた試験結果を用いてモデルの適合性を検証し、農地における対策シミュレーションを行う。そして、石垣島名蔵川流域内の農地主体の小流域における現状の土砂動態把握および適切な対策を行った場合の土砂流出削減量を試算する。

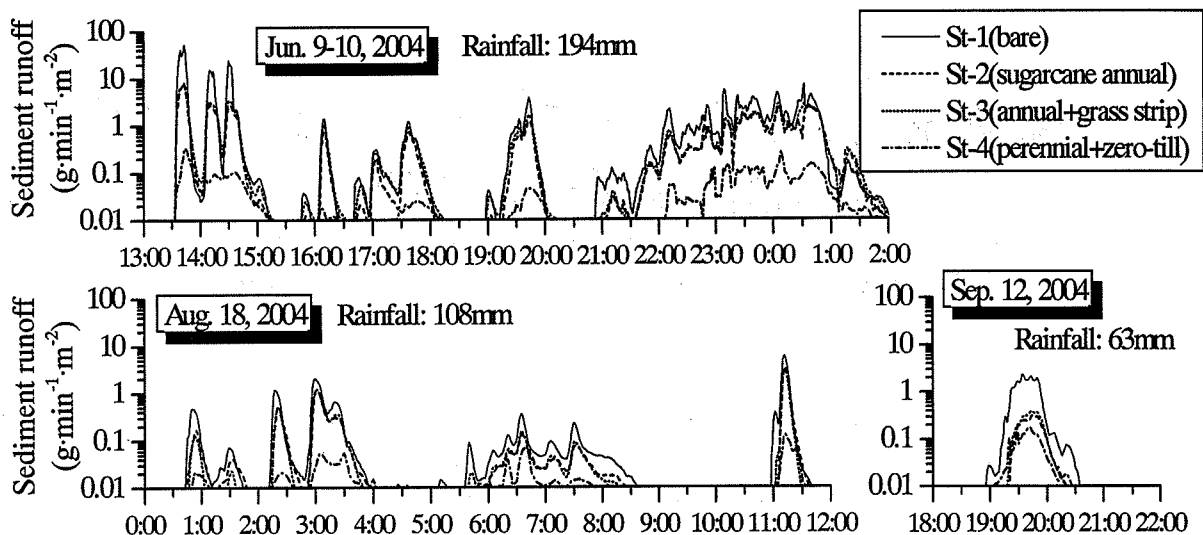


図-2 各試験区における浮遊土砂流出量の経時変化 (上: 6月9~10日, 左下: 8月18日, 右下: 9月12日)

## 2. 農地における土砂生産の比較試験

### (1) 試験農地の概要

試験地は沖縄県石垣市新川におけるサトウキビ畑とした。表層土壌の粒度組成は、国際法による粒径区分を用いると、粘土5%, シルト19%, 砂32%, 礫44%であった。設置した試験区の概要を図-1に示す。試験区はSt-1~St-4の4種類あり、St-1を無耕作(裸地)区、St-2をサトウキビ春植え栽培(慣行栽培)区、St-3を試験区末端に植生帯を有するサトウキビ春植え栽培区、そしてSt-4を無耕起状態でのサトウキビ株出し栽培区とした。サトウキビの春植え栽培とは2~3月に苗を植え付け、翌年の1~2月に刈り取る栽培方法で、株出し栽培とは刈り取り後の株を用いて生育させる栽培方法である。その他のサトウキビの栽培方法として、8~9月に苗を植え付け、翌々年の1~2月に刈り取る夏植え栽培がある。St-3の植生帯の植生には高麗芝を用い、試験区末端より上流に向かい約0.6mおよび斜面幅方向全面に植え付けた。

### (2) 計測方法

各試験区における連続測定項目は降水量、流量、浮遊土砂濃度とした。それとともに適時、被覆率測定や水準測量を行った。降水量は転倒マス式雨量計(MW-010, 栄弘精機)を用いて1分間隔で測定し、流量はパーシャルフリューム(3インチ型, ウイジン)およびフロート式水位計(UIZ-GY30, ウイジン)を用いて1分間隔で測定し、浮遊土砂濃度は降雨時に手採水した試料の分析および後方錯乱光式濁度計(Compact-CLW, アレック電子)によって2~5分間隔で測定した。なお、浮遊土砂を流水中に存在する土粒子(最大粒径100 $\mu$ m程度)と定義する。得られた流量と浮遊土砂濃度の積から浮遊土砂流出量が求められる。試験は2004年6月から2005年1月の作物の収穫まで行った。なお、畑地から流出したがパーシャルフリュームまで運搬されず集水部に堆積した土砂は降雨毎に浚渫し、乾燥重量を求めた。

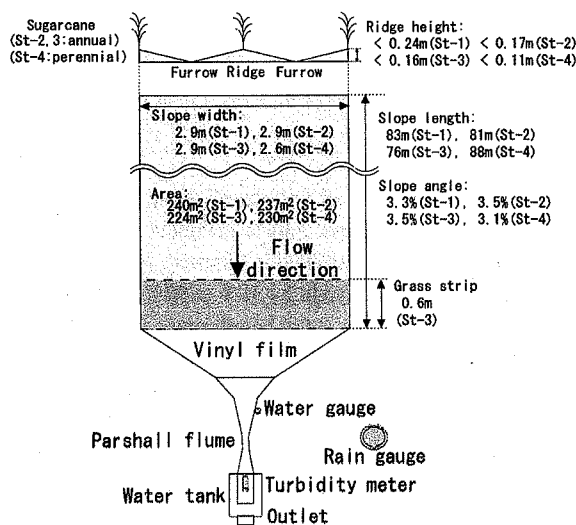


図-1 試験区の概要

### (3) 試験結果および考察

試験期間中での主要な降雨イベントにおける浮遊土砂流出量の経時変化を図-2に示す。St-1が常時最も大きく、St-4は顕著な浮遊土砂流出が起こっていない。St-2およびSt-3はほぼ同じであった。また、降雨時に採水した流出水に含まれる土砂の粒度分布をレーザー回折式粒度分析計(SALD-3100, 島津製作所)によって測定した結果、試験区または経時的に多少異なったが、0.1~50 $\mu$ mの範囲であった。

試験期間中の全降水量の約80%を占めた2004年6月から9月において、土砂流出のあった月毎またはイベント毎で総計した結果を図-3に示す。St-2とSt-1を比較することによって、作物の被覆による侵食抑制効果を検証する。St-2はSt-1の41%であり、削減率は59%であった。降雨イベント毎の削減率では、無耕作区における雑草の影響があった降雨イベントを除くと39%(6月8日)~92%(9月13日)の範囲であった。

St-4に対するSt-1およびSt-2の土砂流出量を比較するこ

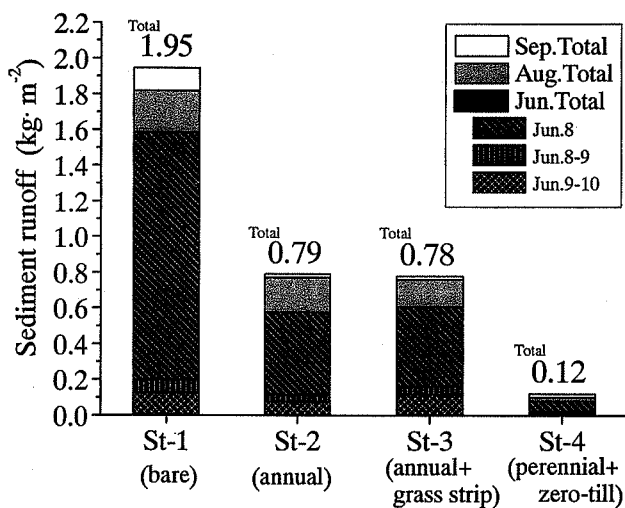


図-3 各試験区における土砂流出量

とによって、無耕起状態での株出し栽培による侵食抑制効果を検証する。St-4はSt-1の6%、St-2の15%であり、削減率はそれぞれ94%、85%であった。これは、サトウキビの株出し栽培は栽培方法上、新たな苗から生育させる春植え栽培より生育が早く作物の被覆率が高かったこと、前年度の収穫後、耕起を行わないことによって土壌の攪乱による侵食量の増大が無いことや地表面の残渣が多く存在していたことが侵食抑制に大きく関与したと考えられる。また、サトウキビの収量調査を行った結果、St-2が54t ha<sup>-1</sup>、St-4が53t ha<sup>-1</sup>となり、ほぼ同じであった。

St-3とSt-2の比較を行い、植生帯による流出土砂の捕捉効果を検証する。植生帯部分の土壌を乱した直後であった6月8日のイベントを除くとSt-3(0.66kg m<sup>-2</sup>)はSt-2(0.72kg m<sup>-2</sup>)の92%で、削減率は8%となった。この結果から、沖縄県において既に実用化されている長さ0.6mの植生帯による土砂の捕捉量は僅かであり、効果的な削減を行うためには適切でないと言える。

以上のことから、営農による侵食抑制方法として、無耕起状態および作物・残渣による被覆率を常時高く保つ方法が極めて効果的であることが明らかになった。

### 3. 農地でのWEPPの検証およびシミュレーション

#### (1) WEPPの概要および農地スケールでの適用方法

WEPPはNearingらによって開発が始められ<sup>1)</sup>、現在、ソフトウェア化され無償で配布されている<sup>2)</sup>。WEPPは農地(斜面)における土壌侵食過程、水路または河川における土砂運搬過程、そして貯水池における土砂運搬過程の3つの過程で構成されている。中でも土壌侵食過程では作物の生長、土壌状態の変化、各種営農管理作業などを実際の現象に即した形で表現している。

WEPPの土壌侵食過程の要素として、気候、表面流、水収支、作物、土壌、圃場管理がある。これらと侵食機構を組み合わせて侵食量を算定する。その概要を図-4に示す。気候因子によって作物は生長し、作物による被覆

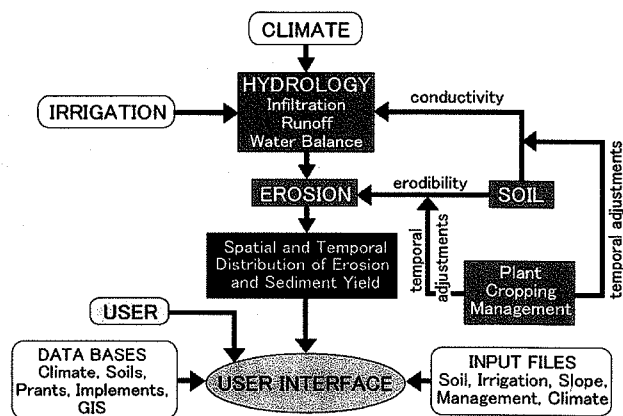


図-4 WEPPの土壌侵食過程の概要

率などが侵食に関わる変数として算定される。また、耕起などの圃場管理作業に伴い、乾燥密度などの土壌状態および地表面における残渣量に変化する。これらの作物、残渣、土壌の状態は日変動する。降雨-流出機構は、有効降雨の算定にGreen-Amptモデルに基づいた式を用い、Kinematic waveモデルを用いて表面流解析を行う。これらの各機構および後述の侵食機構の詳細は技術資料<sup>3)</sup>に記載されている。

侵食機構はインターリル侵食およびリル侵食を考慮し、次式の連続式を用いて土砂の運搬過程を表現する。

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_f \quad (1)$$

ここで、 $G$ :単位幅あたりの土砂流出量(kg s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)、 $x$ :流下方向距離(m)、 $D_i$ :インターリルからの土砂流入量(kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)、 $D_f$ :リル侵食量(kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)。  $D_i$ は次式で表現される。

$$D_i = K_i I_e q_{ir} \quad (2)$$

ここで、 $K_i$ :インターリル侵食係数(kg s m<sup>-4</sup>)、 $I_e$ :有効降雨強度(ms<sup>-1</sup>)、 $q_{ir}$ :インターリル流量(ms<sup>-1</sup>)。なお、インターリル侵食係数は作物、残渣、土壌、地形などに関するいくつかの変数を用いて算定され日変動する。リル領域では運搬可能土砂量 $T_c$ (kg s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>)を掃流力の関数として定義し、流水による土壌剥離が起こる場合( $G \leq T_c$ かつ $\tau_f > \tau_c$ )、次式により $D_f$ を求める。

$$D_f = K_r (\tau_f - \tau_c) \left( 1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (3)$$

ここで、 $K_r$ :リル侵食係数(s m<sup>-1</sup>)、 $\tau_f$ :掃流力(Pa)、 $\tau_c$ :リルにおける土粒子の限界掃流力(Pa)。なお、 $K_r$ および $\tau_c$ は作物、残渣、土壌などに関するいくつかの変数を用いて算定され日変動する。一方、 $G \leq T_c$ かつ $\tau_f \leq \tau_c$ の場合、 $D_f = 0$ である。 $G > T_c$ の場合、 $D_f$ は沈降量として次式で表される。

$$D_f = \frac{\beta V_f}{q_r} (T_c - G) \quad (4)$$

ここで、 $\beta$ :雨滴による攪乱係数、 $V_f$ :土粒子の有効沈降速度(ms<sup>-1</sup>)、 $q_r$ :単位リル幅あたりの流量(m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>)。

本研究で用いた各要素における入力データを表-1に示す。なお、WEPPの適用をする際、各種パラメータの同

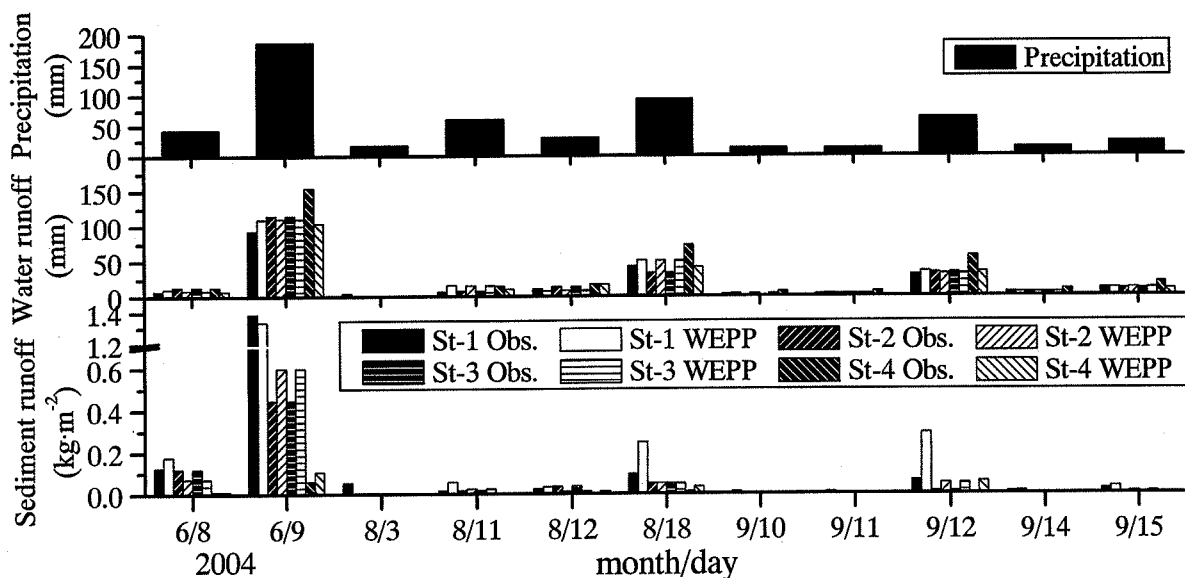


図-5 各試験区における観測値に対するWEPPによる計算値

表-1 WEPPにおける入力データ

|      |                              |                                                   |
|------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| 気象   | 降水量, 気温, 風向, 風力, 日射量, 露点     | 降水量, 日射量のみ実測, 他は最寄り(石垣島)の気象庁地上気象観測データを利用          |
| 土壌   | 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              | 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, スケジュールは実状を設定        |

定は行わず, 実測値やWEPPで予め用意されている推奨値を用いた。

## (2) WEPPの適合性の検証

WEPPによる計算値と本論文の第2章で述べた現地試験結果を比較し, 観測値に対するWEPPの計算値の適合性の検証を行う。2004年6~9月における降雨開始日毎に区切った流出高の観測値, 土砂流出量の観測値, そしてそれらに対応したWEPPによる計算値を図-5に示す。

流出高の結果を見ると, 全ての試験区で概ね観測値と適合している。無耕起状態の株出し栽培試験区であるSt-4では, 多くの降雨イベントに対して計算値が観測値より小さい結果となった。これは, 無耕起状態では雨水の浸入速度が実際には小さかったのに対して, WEPPでは耕起を行わないことによる透水係数の減少を十分に表現できていないことが要因であったと考えられる。今後, 沖縄の土壌特性を反映させた形で, 透水係数などのパラメータを決定できるようにモデルを改良する必要がある。

土砂流出量の結果を見ると, 計算値は概ね観測値と適合している。特に, 確立降雨年が2.6年と算定され, 観測期間中で最大の土砂流出量が観測された6/9の降雨イベントでは, 全ての試験区において適合性が高い結果を

得た。これは, 雨滴衝撃や流水による掃流力による土粒子の剥離機構や土砂の運搬機構をほぼ正確に表現している結果であったと考えられる。また, その他の降雨イベントにおいても, St-2における作物の存在による侵食抑制効果, St-4における無耕起, 作物被覆, 地表面における残渣被覆による顕著な侵食抑制効果, そしてSt-3における植生帯の存在に伴う微小な土粒子の捕捉効果をWEPPの計算値でも的確に表現している。

一方, 無耕作区St-1では, 8/18や9/12の降雨イベントにおいて計算値が観測値を大きく上回った。これは, その期間, 試験区内に雑草が繁茂してしまい裸地状態ではなかったことが大きな要因と考えられる。また, 6月における降雨後, St-1では地表面の粗粒化が起り通常の裸地状態より侵食量が減少した可能性があるのに対し, WEPPでは粗粒化の過程が組み込まれておらず, 過大評価となったと考えることもできる。

以上のように, WEPPは無耕作状態が続いた場合における適合性に問題が残ったが, 通常の農地管理(作物の栽培, 一時的な裸地化)をする場合の侵食過程を十分な精度で表現することができると評価できる。

## (3) WEPPによる農地における対策シミュレーション

第2章で実施した試験を各種対策別, 作物・作業スケジュール別, 地形別の各ケースで行い, 体系的に取りまとめる必要があるが, それには非常に長い試験期間を有する。そこで, 前節で検証を行ったWEPPを用いて, シミュレーションによる対策評価を行う。

本研究で行うシミュレーションの土地利用形態として, 裸地, サトウキビ夏植え栽培, サトウキビ春植え-株出し栽培の3種類とした。想定する対策として, 農地末端における0.5mの植生帯の設置, サトウキビの残渣によるマルチング, そして不耕起栽培の3種類を設定した。ここで, サトウキビの夏植え栽培は現在の沖縄県石垣島に

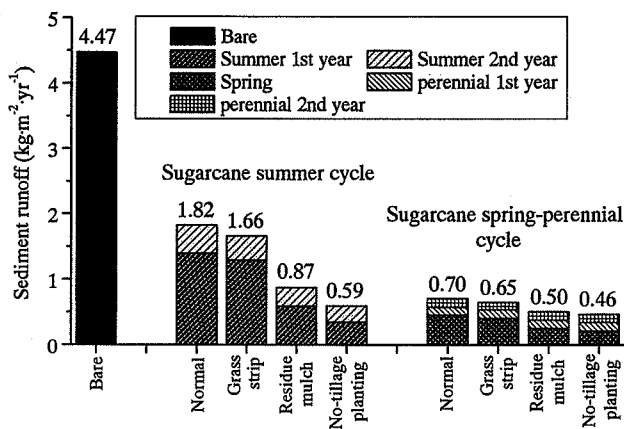


図-6 WEPPによる農地における対策シミュレーションの結果

おけるサトウキビ生産面積の大部分を占め、栽培期間は前述のように約1.5年であり2年周期で行われている。一方、サトウキビ春植え-株出し栽培は、夏植え栽培と比較して栽培面積が非常に少なく、一般的に1年目に春植え栽培を行い、続く2、3年目に株出し栽培を行う方法で3年周期となる。対策の設定として、植生帯は前節と同じ方法とした。残渣によるマルチングは夏植えまたは春植え栽培時における苗の植え付け直後に実施することとした。不耕起栽培として、夏植えおよび春植え栽培時において前年度の作物の収穫後、農地の全面耕起を実施せず苗を植えるための溝のみを耕起し、その溝に苗を植え付ける方法を想定した。なお、3種類の対策方法の中で、不耕起栽培以外は実用段階にある。

WEPPの適用方法として、対策は上記の設定を行い、営農作業・スケジュールは沖縄県における実状に即して設定し、地形は斜面長100m、勾配3%とした。土壌は表-1の値を用いた。気象データは石垣島における1994-2003年(10年間)の気象庁地上気象観測値を用いた。

シミュレーションの結果を図-6に示す。なお、示した土砂流出量は年平均値である。結果を見ると、春植え-株出し栽培は夏植え栽培と比較して土砂流出量が著しく小さい(削減率:61%)。夏植え栽培における1年目の梅雨期および台風期は、苗の植え付け前にあたるために裸地となっていることが大きく影響している。各農地に植生帯を設けることによってそれぞれ8%、10%の削減となり、高い削減率は見込めない結果が第2章と同様に得られた。残渣によるマルチングによって、苗の植え付け直後(夏植え栽培1年目、春植え栽培時)の土砂流出が減少した結果、顕著な抑制効果が算定され、削減率は無対策と比較して、夏植え栽培で59%、春植え-株出し栽培で29%であった。不耕起栽培によって夏植え栽培1年目、春植え栽培時の土砂流出が顕著に抑制され、削減率はそれぞれ68%、34%であった。なお、気象・地形・土壌条件を変更することによってこれらの数値は異なると予想されることから、今後、それらの体系的な整理を行う必要がある。

以上のように、WEPPは作業方法やそのスケジュール

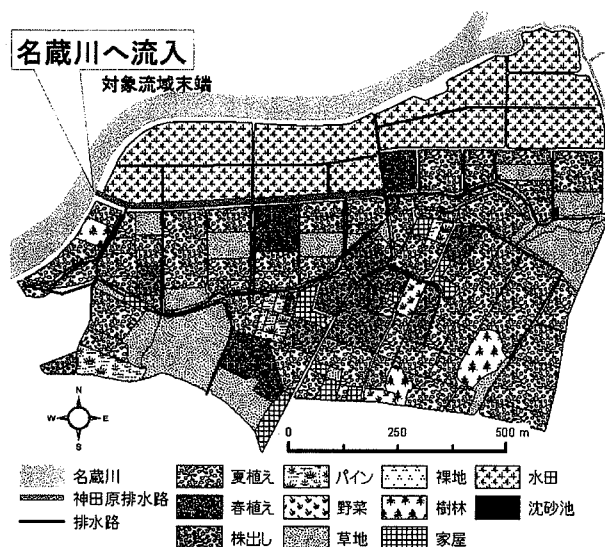


図-7 石垣島名蔵川流域内神田原地区における土地利用

を任意に決定できることから、様々な状況および対策のシミュレーションが可能であることが示された。

#### 4. 流域でのWEPPによる対策シミュレーション

##### (1) 対象流域の概要および適用方法

対象流域を沖縄県石垣島西部の名蔵川流域内に位置する神田原地区(集水面積: 0.82km<sup>2</sup>)とした。2005年に調査した土地利用を図-7に示す。対象流域は農地が全体の大部分を占め、中でもサトウキビ畑の割合は流域全体の49%(夏植え:38%, 春植え:4%, 株出し:6%)であった。サトウキビ以外の作物としては水稻が24%、牧草または草地が14%、パインが2%を占めていた。

WEPPを流域規模に拡張するためには、農地(斜面)・水路・沈砂池(貯水池)における各種設定が必要となる。農地における設定は前章と同様の方法を全ての農地に対して行った。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。水路における土砂生産および運搬過程は、農地での流路(リル部)における生産および運搬過程と同様な解析方法を用いる。沈砂池では、滞留時間に基づいた経験式によって運搬・堆砂過程が表現される。なお、各機構の詳細は技術資料<sup>3)</sup>に記されている。気象データは石垣島における1994-2003年(10年間)の気象庁地上気象観測値を用いた。

##### (2) 流域における対策シミュレーション

現状の営農形態でのWEPPによる計算結果を図-8に示す。図では各農地における単位面積あたりの年平均土砂生産量および流域末端における名蔵川への年平均土砂流出量が示されている。土地利用と合わせて見ると、サトウキビ夏植え栽培やパイン畑における土砂生産量が大きいことがわかる。また、勾配や斜面長によっても土砂生産量は異なった。

この結果をもとに対策シナリオを定める。本来ならば

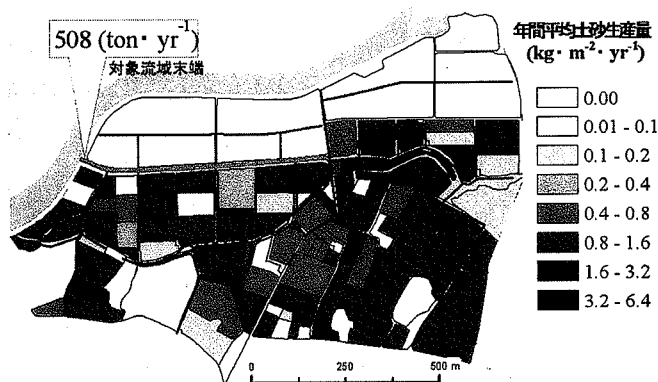


図-8 現状の土砂生産量分布および土砂流出量の試算結果

河川または沿岸域における生態系への影響評価に基づいて土砂流出量の許容量を定め、その量を目標値とするべきであるが、現段階までの研究では許容量の定量化には至っていない。そのため、本研究では、実現可能な範囲で対策を行った場合における土砂流出量の最小値の算定を行う。想定する対策として以下の3種類を挙げた。①サトウキビ夏植え栽培から春植え・株出し栽培へ変更、②サトウキビの残渣によるマルチングの実施、③グリーンベルトの設置。①に関して、沖縄県の報告<sup>4)</sup>によると、沖縄県内の製糖計画および農家へのアンケート調査から夏植え栽培と春植え・株出し栽培の面積割合は2:1が適切であるとしている。よって本研究においても、面積割合を2:1と定め、約4.5haの夏植え栽培農地を春植え・株出し栽培へ変更した。②および③に関して、流域内全てのサトウキビ、パイン、野菜畑に第3章で行った農地における対策方法と同様の方法を設定した。

対策後の結果を図-9に示す。図では対策箇所、対策を行った農地における年平均土砂生産量の削減率、そして流域末端における名蔵川への年平均土砂流出量が示されている。結果を見ると、対策を想定した全ての農地において土砂生産量が減少している。特に、①の対策を想定したサトウキビ畑および②および③の対策を想定したパイン畑における削減率が大きい。流域末端における土砂流出量は現状と比較して56%減少する結果が得られた。

以上のように、WEPPは流域における土砂流出抑制効果の算定のための土砂動態解析モデルとして有望であることが示された。今後、流域内において多点同時計測等の現地観測を行い、WEPPの精度を検証する予定である。

## 5. 結論

面源から生産された微細土砂の河川および沿岸域への過剰な流出が社会的問題となっている沖縄において、農地での土砂流出抑制対策に着目し、同一条件下での比較試験を行った。また、農地における土砂生産抑制対策に伴う流域土砂動態解析を検討するためにWEPPを採用し、試験結果を用いたモデルの検証、農地における対策シ

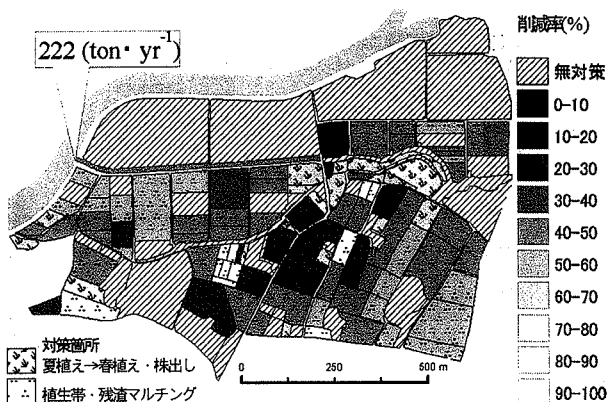


図-9 農地での対策を想定した試算結果(土砂生産量の削減率)

ミュレーション、そして、農業流域における対策シミュレーションを行った。本研究の結果から次のことが明らかになった。

- (1) 営農による侵食抑制方法として、無耕起状態および作物・残渣による被覆率を常時高く保つ方法が極めて効果的であることが明らかになった。一方、長さ0.6mの植生帯は農地から流出した土砂を有意な削減率で捕捉するためには十分な長さではない。
- (2) WEPPは営農条件が異なる農地における侵食過程の違いを十分な精度で表現することができる。また、WEPPは各種営農作業やスケジュールを任意に決定できることから、農地における様々な状況および対策のシミュレーションが可能である。
- (3) 石垣島名蔵川流域内の農業流域における現状の土砂動態および適切な農地対策を行った場合の土砂流出削減量を試算した結果、流域末端における土砂流出量の削減率は56%であった。WEPPは農業流域における土砂流出抑制効果の算定のための土砂動態解析モデルとして有望であることが示された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、現地観測への御支援を頂いた石垣島の農業者の池原吉克氏に心からお礼を申し上げます。なお、この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)および沖縄建設弘済会技術開発支援事業(研究代表者：酒井一人)の支援によって行われた。

## 参考文献

- 1) Nearing M.A., G.R. Foster, L.J. Lane, and S.C. Finkner: A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology, *Transactions of the ASAE*, 32(5), pp.1587-1593, 1989.
- 2) WEPP Home Page:  
<http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/wepp.html>.
- 3) USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation, *NSERL Report No.10*, 1995.
- 4) 沖縄県：平成16年度轟川流域農地赤土対策推進検討委員会第1回検討委員会資料, 2004.

(2005. 4. 7 受付)