

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

SEDIMENT MANAGEMENT TECHNIQUE AT NAGURA WATERSHED,
ISHIGAKI ISLAND

大澤和敏¹・高椋恵²・池田駿介³

Kazutoshi OSAWA, Kei TAKAMUKU, and Syunsuke IKEDA

¹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)

²学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)

³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)

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 sediment management technique is required. GIS for sediment management in watershed was constructed using land use, length, and slope data at each slope to detect the erodible regions in a watershed. Consequently, the multi-point observation was carried out at six points in a watershed. In these studies, a soil erosion and sediment runoff model was tested to verify their applicability in predicting sediment yield on farmland and sediment runoff at watershed. The results have revealed that the model 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 measures. The calculation has shown that the sediment runoff can be reduced by 74% if the combination is adequately chosen.

Key Words : Red-soil runoff, Sediment management, Sediment yield reduction methods, GIS, Field observation, Numerical simulation

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、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、沖縄県石垣島の名蔵川流域を対象として、流域土砂管理のためのGISの構築、現地観測、そして数値シミュレーションによる面源における土砂流出抑制対策効果の算定を行う。

2. GISの構築および現地観測

(1) GISの構築

沖縄県石垣島名蔵川流域の概要を図-1に示す。名蔵川は全長4.6km、流域面積14.9km²、上流の支流には名蔵ダムがあり、河口部にマングローブ域と名蔵アンパルと呼ばれる干潟が広がっている。なお、本章の内容は高椋ら¹⁾で詳述されている。

GISを用いて、土砂動態に関して重要な項目である土地利用、面積、勾配、斜面長、水路網、そして沈砂池のデータベース化を行なった。2003年9月~2004年3月に撮影された航空写真を用いて斜面を分割した。斜面長の決定方法として、現地踏査によって農耕地において畝が確認できた場合は畝方向に斜面長を取り、畝が確認できなかった場合または非農地の場合は勾配方向に斜面長を取った。勾配の決定方法として、水準測量結果および数値地図を用いて、畝がある場合は畝方向に勾配を取り、畝がない場合は斜面の平均勾配を採用した。

土地利用は現地踏査を行って分類した。調査時期は2005年6月であった。土地利用の分類項目は、サトウキビ、パインアップル(以下、パインと記す)、水田、森林・樹林、草・牧草、その他(温室、家屋等)に分類した。

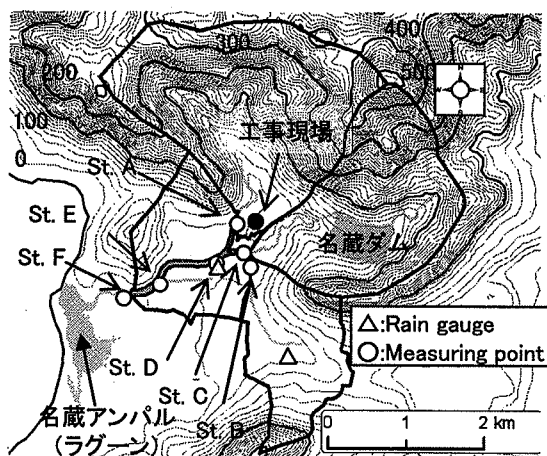


図-1 名蔵流域の概要および観測点

受食性の高い農耕地はサトウキビとパインである。サトウキビに関しては、主な営農方法が3つ(夏植、春植、株出)あり、その中でも、夏植は地表面の状況が1年目と2年目では著しく異なるため、夏植1年目、夏植2年目、春植、株出の4つに分類した。パインに関しても、地表面の被覆状況を考慮して1~4年目の4つに分類した。

サトウキビの各栽培方法と侵食の特徴について説明する。夏植の栽培期間は約2年である。8~9月の夏期に苗を植え付け、翌々年の1~2月の刈取りまで約1年半を要する。その後、約半年間は休閑期(3~8月)で裸地状態となる。夏植1年目の前半は刈取り後の休閑期にあたり、この時期は梅雨や台風期と重なるため侵食されやすい。一方、夏植2年目は、サトウキビが成長し地上面を覆っているために、1年目と比較して侵食量は一般的に小さい。春植の栽培期間は約1年である。2~3月に植付け、次の年の1~2月に刈り取る。梅雨や台風期はサトウキビが既に植えられているが、被覆率は低く侵食量は比較的大きい²⁾。株出栽培は春植のサトウキビの刈り取り後、株を残してそのまま成長させる方法で、耕起による土壌の攪乱がなく、葉殻等の残渣が地表面に残っているために、夏植、春植と比較して侵食量が極めて小さい²⁾。

パインの栽培期間は約4年である。サトウキビと比較すると成長が遅く、植え付け1年後でも、サトウキビと比較して被覆率が低い侵食されやすい。またサトウキビ夏植と同様に刈り取り後、約半年間裸地となるために、さらに侵食されやすい状態になる。

GISとしてまとめた一例として、土地利用分布を図-2に示す。流域南西部ではサトウキビ夏植(1年目、2年目)が多く、南部ではサトウキビ夏植(1年目、2年目)とパインが多くを占めている。農耕地の斜面長分布は、50m以上の斜面が多くを占める。農耕地の勾配は、南西部では3%未満の勾配が多いのに対し、南部では3%以上の勾配を持つ農耕地が多い。これらの結果より、流域南部は南西部より土砂生産が多いと予想される。また、北部、東部には森林・樹林域が広がっているため、農耕地に比べ土砂生産量は少ないと考えられる。

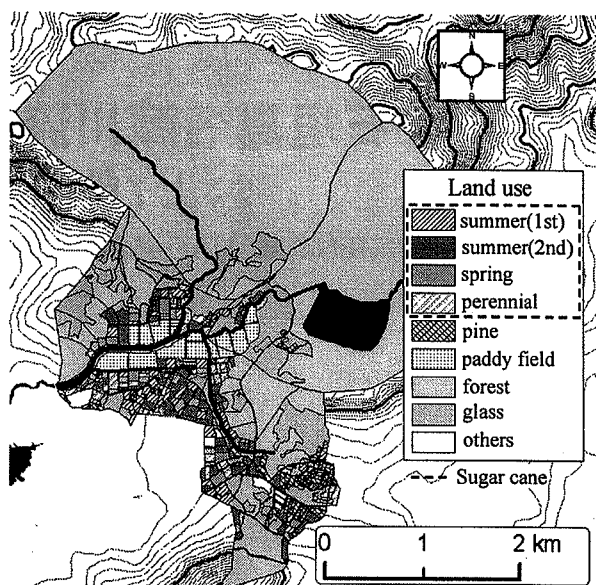


図-2 名蔵川流域における土地利用(2005年6月)

(2) 現地観測

a) 観測方法

観測点として、流域内の水路または河川内に6地点とり、それぞれSt.A~St.Fとした。それら位置を図-1に示す。設置型観測機器による連続計測および降雨期間中における採水を、梅雨時期であった2005年5/3~2005年6/19の期間に行なった。観測項目は、流速、水深、濁度、雨量、SS濃度である。流速は2次元電磁流速計Compact EM(アレック電子製)、濁度は光学式濁度計ATU3-8M、Compact CLW(アレック電子製)、水深は圧力式水深計Diver(大起理化学工業製)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~50cmの位置に設置し、10分間隔で測定した。採水に関して、St.A~St.Dではバケツによる表層採水、St.E、St.Fでは自動採水機(ISCO製)による吸引採水を、それぞれ30分間隔で行った。採水により得られたサンプルを、ガラス繊維濾紙(孔径1 μ m)を用いて濾過することで、SS濃度を得た。雨量は転倒升式雨量計(栄弘精機製)を用いて10分間隔で測定した。

b) 観測結果

観測期間中において、濁度の変化が見られた降雨イベントを、発生順にNo.1~5として表-1に示す。図-3に各観測地点における降雨イベント毎の土砂輸送量を示す。なお、St.Dは取水堰となっており、降雨No.4において取水堰のゲートが開いたために、流量、土砂輸送量は欠測であった。観測期間中における対象流域末端(St.F)での土砂輸送量の総和は98.2tであった。図-4に各観測地点における比土砂輸送量(単位面積あたりの土砂輸送量)を示す。

St.AとSt.Bを比較する。観測期間中の比土砂輸送量はSt.Aで4.1g/m²、St.Bで12.7g/m²となり、St.BがSt.Aの約3倍の値となった。各流域の土地利用を見ると、St.Aでは森林・樹林域が94%、農耕地が確認されなかったのに対して、St.Bでは森林・樹林域が44%、農耕地が28%(サトウキビ1年目6%、パイン6%)を占めている。このように

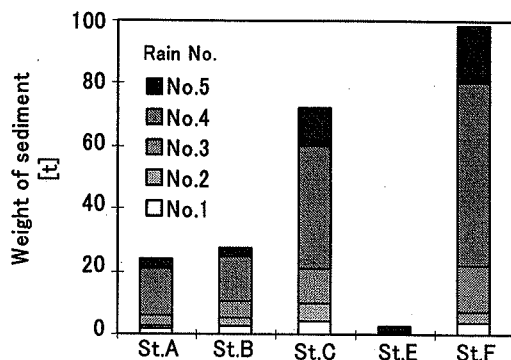


図-3 各観測地点における土砂輸送量

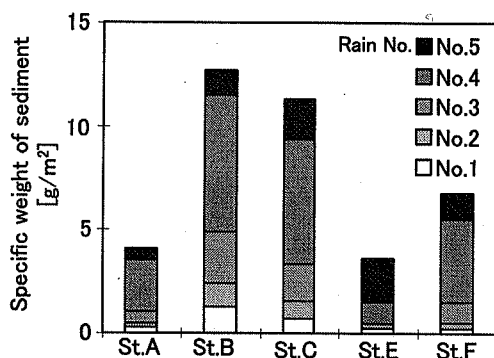


図-4 各観測地点における比土砂輸送量

表-1 観測期間中の降雨イベント

降雨番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
降雨日	2005/5/19	2005/5/24	2005/6/3	2005/6/12	2005/6/15
降水量 (mm)	58.5	44.5	45.5	152.0	81.0
最大降雨強度 (mm/hr)	45.0	30.5	34.5	57.0	22.0

農耕地の存在が、比土砂輸送量の差の主要な要因となっていると考えられる。

St.BおよびSt.Eは農地面積割合が大きい。しかし、St.Eの土砂輸送量や比土砂輸送量はSt.Bに比べて著しく小さい。そこでSt.BとSt.Eの地形に注目する。一般に、斜面長が大きい程、侵食量が大きいと言われており、150m以上の畑面積の割合は、St.Bで10%、St.Eで3%であり、St.Bの方が侵食されやすい状況であったと言える。次に斜面の勾配に注目する。St.Eでは勾配3%未満の畑面積の割合が93%に対して、St.Bでは51%であった。また勾配4%以上の畑面積の割合は、St.Eでは3%であったのに対し、St.Bでは35%であった。St.Bでは、受食性の高いサトウキビ1年目とパイン1年目の畑で急勾配の斜面割合が大きく、侵食および土砂の運搬が顕著であったと考えられる。これらのことより、St.Bの方がSt.Eより土砂輸送量や比土砂輸送量が著しく大きかった要因として、前述の土地利用や営農方法の違いだけではなく、地形もまた重要な一因であることが示された。

3. 流域土砂動態のモデル化

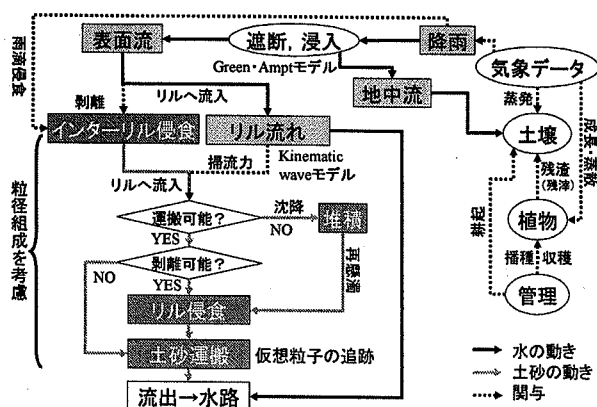


図-5 圃場スケールでの土壌侵食過程の概要

(1) モデルの概要

土壌侵食や土砂流出に関するモデルは数多く提案されている。本研究の目的である土砂流出対策の定量的評価を行なうためには、以下の条件を満足するモデルが必要である。①作物や土壌の状況変化および営農作業を明確に反映可能。②農地、水路、沈砂池、そして河川を組み合わせた流域モデル。③流量、土砂輸送量の時系列まで把握可能。そのため、筆者らが提案した農地主体の小流域に対応した侵食・土砂流出モデル³⁾および2次元非定常の土砂輸送モデルを用いる。

侵食・土砂流出モデルは斜面における侵食過程、それに隣接する水路や沈砂池における土砂輸送過程を表現可能であり、圃場、水路、そして沈砂池の3つの機構から構成される。圃場における土壌侵食過程の概要を図-5に示す。作物および土壌の変動、耕起などの圃場管理作業を表現し、インターリル侵食(畝斜面部における侵食)およびリル侵食(畝間部における侵食)を表現する。土壌侵食に関わる機構は、可能な限り現象に即した形でモデル化を行う。その際、作物、土壌、管理作業などに関する機構およびパラメータはWEPPモデル⁴⁾を一部援用する。土砂生産および土砂運搬過程において、流出土砂の粒度組成を考慮する。なお、土砂流出の時系列まで表現するために、仮想粒子を生成し追跡する方法を用い、土砂の運搬過程を効率良く計算する。一方、水路における土砂流出過程は、圃場におけるリル侵食および運搬過程と同様に行う。なお、本研究で対象としている水路は、U字溝などの幅の比較的狭い流路なので一次元解析とする。沈砂池における水の流れには、一般的な洪水調節池計算の連続式を用いる。流水による土砂の運搬は前述の仮想粒子を生成し追跡する方法を用い、土粒子の沈降速度はストークスの法則を用いる。

土砂輸送モデルは感潮域における潮位による影響および流路幅を考慮できる2次元非定常流れと浮遊土砂輸送の2つから成り立つ。流れの計算過程において、一般座標系で記述された水深平均のレイノルズ方程式を用いる⁵⁾。河床せん断力はマニング則より与え、乱流モデルには0方程式モデルを用いる。浮遊砂輸送の計算過程において、基礎方程式は浮遊砂濃度の輸送方程式および土砂

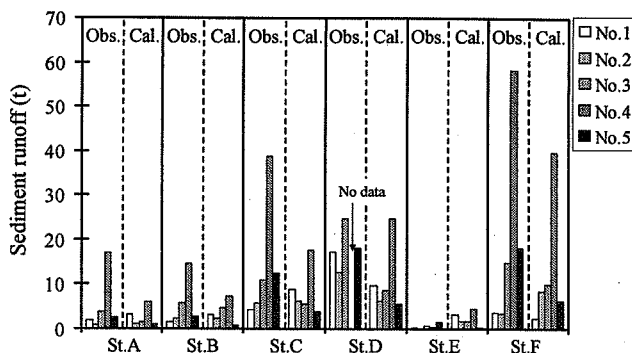


図-6 降雨毎の各測定点における現地観測結果と計算結果

堆積量の変化式により表現される。流れの計算と同様に一般座標系に変換する。巻き上げ速度は浮遊砂で覆われた河床面上の浮遊砂巻き上げ速度式(池田ら⁹⁾)でモデル化した。浮遊砂の堆積速度は河床近傍の浮遊砂濃度に浮遊砂沈降速度を乗じることで算出する。離散化はスタックカード格子を用い、運動方程式の移流項に関しては1次精度の風上差分を用いる。また時間積分に関してはAdams-Bashforth法を用いる。

(2) 計算条件

それぞれのモデルの適用場所は、St.D-St.Fの河川域では土砂輸送モデル、それ以外の斜面、水路、そして沈砂池で構成される領域では侵食・土砂流出モデルを用いる。計算期間は現地観測期間であった2005年5/3~2005年6/19とする。降水量は観測値を用い、それ以外の気象データは最寄りの石垣島気象台のアメダス観測値を用いる。地形、土地利用データは前章で構築したGISを用いる。土壌データとして、流域内の土地利用別に採取した6地点の粒度区分を用いた。水路に関しては現地踏査で確認できたものについては材質や形状を入力した。水路がない場所において、斜面で発生した水の流路を決定する必要があるために、斜面周囲の標高を用いて擬似的に水路を配置した。沈砂池は形状の測定値を入力した。

河川域における計算過程の境界条件および初期条件は、赤松ら⁷⁾が行ったSt.Fより下流のマングローブ域における計算と同様とした。なお、上流端St.Dもしくは横流入箇所における流量や土砂濃度は侵食・土砂流出モデルで得られた計算値を用いる。

(3) モデルの検証

各測定点における降雨イベント毎の土砂流出量の観測値およびモデルによる計算値を図-6に示す。侵食・土砂流出モデルのみが適用されているSt.A~St.Eでは、土砂輸送量の計算値は観測値と概ね同様の傾向は一致しているが、比較的大きな降雨イベントであるNo.4の降雨などでは過小評価する傾向にあった。既往の研究³⁾における検証結果でも検討課題として挙げられているように、誤差の大きい部分については、沖縄の土壌や作物に適したパラメータの再考が必要である。

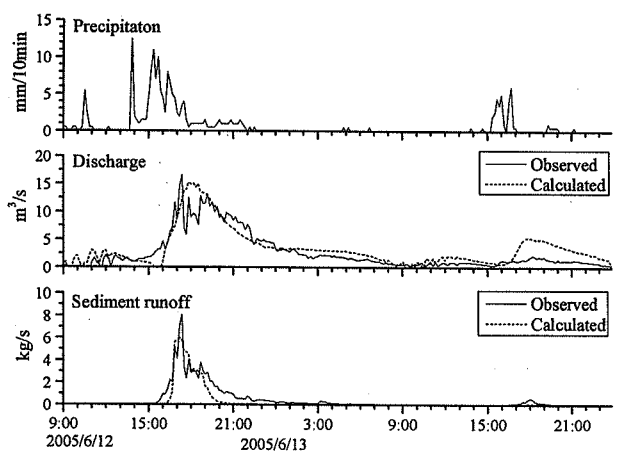


図-7 St.Fでの観測値およびモデルによる計算値(降雨No.4における時系列)

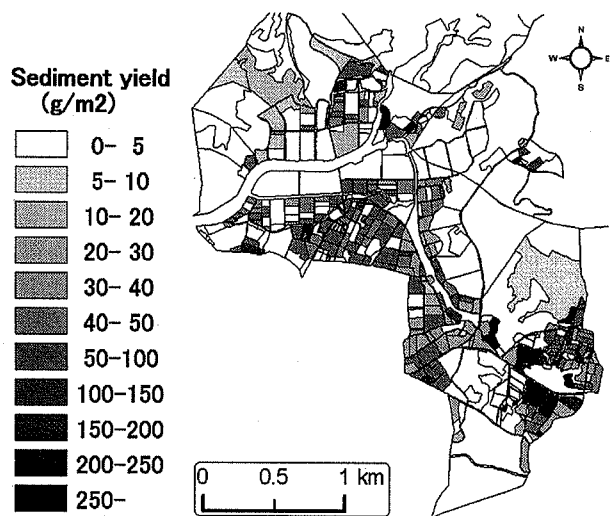


図-8 斜面における土砂生産量分布(降雨No.4)

図-7に観測期間中で最大の降水量を記録したNo.4におけるSt.Fでの観測値およびモデルによる計算値を時系列で示す。結果を見ると、流量、土砂輸送量ともに概ね適合している。土砂輸送量に関して、図-6における総量の結果でも過小評価していたように、ピーク値や逡減部において過小評価する傾向にあった。

降雨イベントNo.4における斜面での土砂生産量の分布を図-8に示す。流域全体の土砂生産量の総和は113tであった。森林域および草地では単位面積あたりの土砂生産量は平均値で 0.8g/m^2 と小さい。森林域、草地では植生により地上面がほぼ完全に覆われていることや、人為的に地表面が乱されないために急勾配であっても土砂生産量は極めて少ない。一方、サトウキビ畑(全ての栽培方法を含む)、パイン畑における単位面積あたりの土砂生産量は平均値でそれぞれ 48.7g/m^2 、 286.0g/m^2 と大きい。その中で、不耕起栽培であるサトウキビの株出は単位面積あたりの土砂生産量が平均値で 20.4g/m^2 であり、他の栽培方法と比べて小さい。

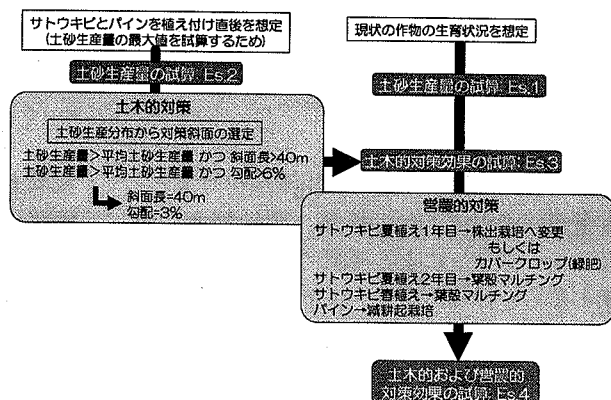


図-9 土砂流出抑制効果の定量的評価の手順

4. 土砂流出抑制対策の数値シミュレーション

(1) 対策方法

流出抑制対策を行なうためには、単一の降雨イベントで評価するのではなく、複数年で評価することが望ましい。サトウキビやパインは、植え付けから収穫までの間、地表面の状態が著しく変化するためである。しかし、本モデルでは計算時間を多く要するため、ある降雨イベントにおける試算を行なうこととする。採用する降雨イベントとして、本観測結果で得られたNo.4(2005年6月12日)の降雨時系列(図-7上)を用いる。降雨No.4は1年に1回起こる程度のイベントであったため、評価に用いる仮想的な降雨として適切であると考えた。また時期を6月と想定した。6月は梅雨の時期であり、台風が上陸する場合もある。またこの時期は主な流出源として考えられるサトウキビ夏植1年目とパイン1年目が裸地または植付け前後であり、農地斜面として最も受食性の高い時期であると考えたためである。

土砂生産の抑制対策として、主に2つの手法が考えられる。1つは土木的対策として農地改良事業に代表される地形修正である。これは農地斜面の勾配や斜面長を小さくすることで侵食量を減少させる方法である。もう1つは営農的対策である。同じ土地利用であるサトウキビであっても、夏植や春植と比較して株出は土壌侵食量が小さい²⁾。これは雨の多い時期である梅雨や台風の時期に夏植1年目が裸地、春植は植え付け直後であるのに対し、株出は植生による被覆率が高く土壌侵食を抑制できるからである。また、裸地化している時期や植付け直後などの植生被覆による流出抑制効果が期待できない時期における対策として、葉殻によるマルチングやカバークロップなどが考えられる。その他、植付け作業に伴う地表面の耕起面積を減らすことで土壌侵食を減少させる減耕起栽培が対策項目として挙げることができる。

一般的に地形修正による土砂流出抑制は効果的であると予想されるが、公共事業の形で行なわれるため、過度に行なうのは適切ではない。また、営農的対策は施策に伴う労働的または経済的な負担が大きいため、合意形成に問題が残っている。そこで、土木的対策および営農的

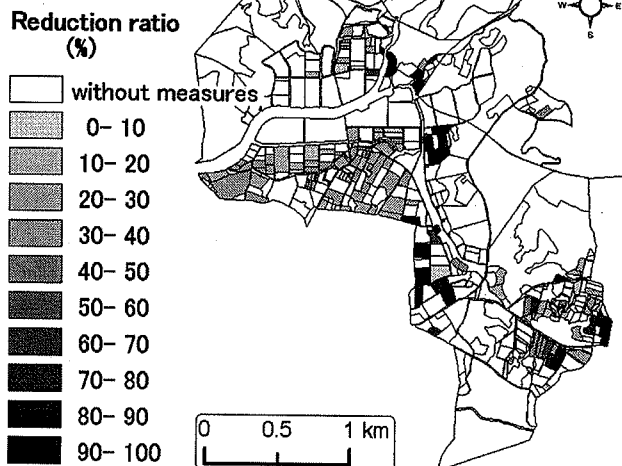


図-10 土木的対策を施策した場合の土砂生産量の削減率

対策を組み合わせた抑制効果の定量的評価を図-9に示す手順で行う。まず、地形修正を想定した数値シミュレーションを行う。その後、営農的対策を加えた数値シミュレーションを行い、それぞれの施策効果について検討する。本来ならば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輸送量の許容量を定め、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。

(2) 土木的対策の効果

作物の生育の差による土砂生産への影響をなくし、土地利用と地形による土砂生産のポテンシャルを評価するために図-9に示した試算Es.2を行った。具体的にはサトウキビやパインを植え付け直後と仮定し、土砂生産量の最大値を試算した。その結果を用いて土木的対策の施策箇所を選定した。なお、斜面長修正および勾配修正に関する閾値または修正値は沖縄県による流域環境保全農業確立体制整備モデル事業⁸⁾に従った。勾配修正を想定する面積は11.9ha、斜面長修正を想定する面積は72.5haとなった。土木的対策の試算Es.3で算定された土砂生産量の削減率分布を図-10に示す。流域全体での土砂生産量は11.2t減少し、削減率は10%であった。勾配修正を施したパイン畑やサトウキビ畑での削減量が顕著であった。

(3) 土木的対策及び営農的対策の効果

前節で行った土木的対策に加えて、営農的対策も想定した場合の施策効果を算定する。各対策は作物の種類または栽培法方によって異なる。サトウキビ夏植1年目の対策として、株出栽培への変更および緑肥作物によるカバークロップを想定した。沖縄県の報告⁹⁾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栽培と春植または株出栽培の面積割合は2:1が適切で

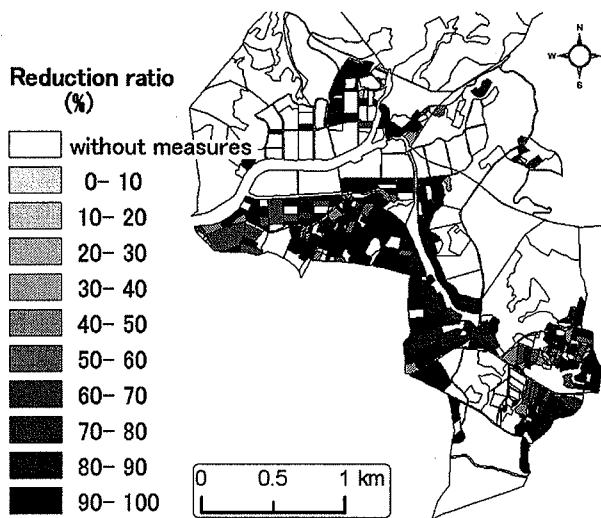


図-11 土木的対策及び営農的対策を施策した場合の土砂生産量の削減率

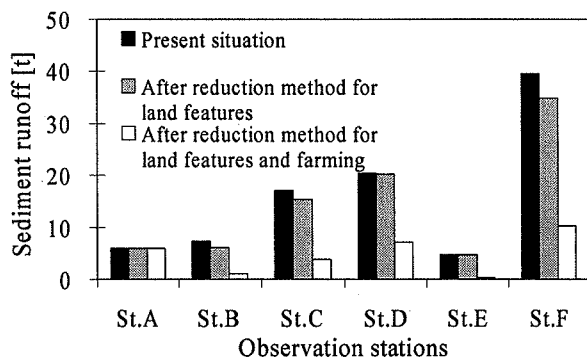


図-12 斜面における土砂生産量分布(降雨No.4)

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、6.3haの夏植栽培農地を株出栽培へ変更した。残りの30.0haの夏植1年目の畑では牧草によるカバークロップを想定した。これは、サトウキビの休閑期における対策として沖縄県が推奨している対策である。夏植2年目および春植では、サトウキビの葉穀によるマルチングを苗の植え付け直後に行う対策を想定した。なお、施策面積は合計56.3haである。パインでは、植付け作業に伴う地表面の耕起面積を減らす減耕起栽培を想定した。なお、施策面積は16.3haである。

上記の施策条件で算定された土砂生産量の削減率分布を図-11に示す。流域全体での土砂生産量は現状の試算Es.1と比較して85.1t減少し、削減率は75%であった。施策した全ての斜面において高い削減率であった。特に夏植1年目およびパインに対する抑制効果が著しく高く、土木的対策とともに営農的対策も重要であることが確認された。

図-12に試算Es.1, 試算Es.3, そして試算Es.4における各観測地点における土砂輸送量をまとめた。対策箇所が多かったSt.Bにおける減少量が大きい。また、流域末端のSt.Fでは、土木的対策のみを行った場合の削減率は12%, それに営農的対策も想定した場合の削減率は74%

と算出され、土砂生産量の削減率とほぼ同様であった。

5. 結論

本研究では、石垣島名蔵川流域を対象として、流域土砂管理のためのGISの構築、現地観測、そして数値シミュレーションによる面源における土砂流出抑制対策効果の算定を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 流域の土砂動態を解析するためのGISを構築し、多点同時観測を行った。その結果、農地主体の小流域での比土砂流出量は、森林主体の小流域でのそれと比べて3倍程度大きかった。また、2つの農地主体の小流域で比較した場合、営農方法と斜面長や勾配の分布によって比土砂流出量が3.5倍程度の差があった。
- (2) 既存の侵食モデル及び河道モデルを組み合わせたモデルを構築し、現地観測結果を用いて検証した結果、計算値は全体的に過小評価する傾向にあったが、流域内における土砂動態を明確に表現することができた。
- (3) 数値シミュレーションによって、土木的対策と営農的対策による対策効果を算定した。その結果、土木的対策のみを施した場合の流域末端での土砂輸送量は、現状と比較して12%減少した。さらに営農的対策を施した場合の土砂輸送量は、現状と比較して74%減少した。土木的対策と営農的対策を合理的に組み合わせることで、効果的に土砂流出量を抑制することができる。

謝辞：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)の支援によって行われた。

参考文献

- 1) 高椋恵, 大澤和敏, 池田駿介, 久保田龍三朗: 石垣島名蔵川流域における土砂流出に関するGISの構築と現地観測, 水工学論文集, 50, 1033-1038, 2006.
- 2) 大澤和敏, 山口悟司, 池田駿介, 高椋恵: 農地における土砂流出抑制対策の比較試験, 水工学論文集, 49, 1099-1104, 2005.
- 3) 大澤和敏, 池田駿介, 高椋恵, 酒井一人: 農地主体の小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.
- 4) USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation, NSERL Report No.10, 1995.
- 5) 長田信寿: 一般曲線座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値計算, 水工学における計算機利用の講演会講義集, 土木学会, 45-72, 1999.
- 6) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生帯が流れ及び粒子態物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, 473, 25-34, 1992.
- 7) 赤松良久, 池田駿介, 中嶋洋平, 戸田祐嗣: マングローブ水域における出水時の粒子態物質の輸送に関する研究, 土木学会論文集, 768, 179-191, 2004.
- 8) 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.

(2006. 4. 6 受付)