

農耕地管理者の面源対策に対する意思決定を 考慮した流域土砂管理技術

SEDIMENT MANAGEMENT TECHNIQUE WITH FARMER DECISION MAKING PROCESS FOR NON-POINT SOURCE MEASURES

大澤和敏¹・畠堀誉子²・菅和利³・池田駿介⁴

Kazutoshi OSAWA, Noriko HATABORI, Kazutoshi KAN, and Syunsuke IKEDA

¹正会員 農博 東京工業大学助教 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-1)

²学生会員 工修 芝浦工業大学 大学院工学研究科 (〒135-8548 江東区豊洲3-7-5)

³正会員 工博 芝浦工業大学教授 工学部 (同上)

⁴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. Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to farmers who cultivate sugarcane for the decision making in sediment yield reduction measures. The authors carried out an interview survey to 8 agriculture-related sections and a questionnaire survey to 20 farmers. The results of AHP analysis have clarified that the ratio of the preferred measures which is shifting cropping pattern of summer sugarcane into spring-perennial sugarcane cycle: mulching by a green manure crop: installing a grass strip was 3:1:0. In the present application of sediment movements analysis to the watershed, the authors carried out some case studies by using WEPP model to apply the decided measures for sugarcane fields. The calculation has shown that the sediment runoff can be reduced by 17% if the decisions of measures are reflected appropriately.

Key Words : Red-soil runoff, Sediment management, Sediment yield reduction methods, Analytic Hierarchy Process (AHP), WEPP model

1. 序論

農地などの面源における過度の土砂生産に始まり、河川および沿岸域における土砂流出が顕著である沖縄では、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されている。沖縄における農業は概して零細で経営基盤が弱く、流域土砂管理のための営農的対策を自発的、継続的に行うことは困難であり、規制、援助方策が検討されている。

大澤ら¹⁾は既往の研究において、流域内の農地等の面源における土壌侵食や河川における土砂輸送の数値シミュレーション技術を確認した。しかしながら、現状の土砂生産を抑制するための対策シナリオを策定する際、対策項目や対策箇所の選定に関しては、対策実施の主体が農業者であることから明確に定めることができなかった。一方、市役所をはじめとする行政機関は、主要な土砂生産源であるサトウキビ栽培に関する営農的対策の指針を出してはいるものの、農業者の意見を聞き入れてい

るとは言い難く、その指針はやや一方的であることが否めない。さらに、個々の農家が抱える経営状況等は多様であることが予想でき、全ての農家に対し画一的な営農的対策を推進することは困難である。

そこで本研究では、石垣島名蔵川流域を対象として、個々の農耕地管理者(農家)の意思決定を考慮した営農的対策を提案するために、階層分析法AHP(Analytic Hierarchy Process)による解析を行うことを第一の目的とした。具体的には、農業関係機関へのヒアリング調査や農家へのアンケート調査の結果を用いて分析を行い、各農家の意思に沿った対策方法を提示する。さらに、得られた対策方法や対策箇所を反映させた形で流域土砂管理シナリオを策定し、侵食・土砂輸送解析モデルであるWEPP(Water Erosion Prediction Project)を用いた数値シミュレーションを実施し、面源における土砂生産量および河川における土砂輸送量の削減効果を定量的に評価することを第二の目的とした。

2. 農家による対策意思決定の評価

(1) 階層分析法の概要

階層分析法(AHP)は、Saaty²⁾によって提唱された不確定な状況や多様な評価基準における意思決定法である。この手法は問題の分析のための、主観的判断とシステムアプローチを融合させた問題解決型意思決定法の1つである。ある事柄についての意思決定を、総合目的、評価基準、代替案という階層構造として捉え、階層毎に pairwise 比較を行った上で、代替案のどれを選択すべきかを定める手法である。階層分析法は以下に示す3段階から成る。分析の手順を図-1に示す。

a) 第1段階

複雑な状況下にある問題を階層構造に分解する。ただし、階層の最上層は1個の要素から成る総合目的である。それ以下のレベルでは意思決定者の主観的判断により、いくつかの要素が1つ以上のレベルの要素との関係から決定される。なお、各レベル(総合目的を除いて)の要素の数は、 (7 ± 2) が最大許容数となる。また、レベルの数は問題の構造により決定されるもので、特に限界はない。階層の最下層に代替案を置く。

b) 第2段階

各レベルの要素間の重み付けを行う。つまり、ある1つのレベルにおける要素間の pairwise 比較を、そのレベル以上にある関係要素を評価の基準として行う。 n を比較要素数とすると意思決定者は、 $n(n-1)/2$ の pairwise 比較をすることになる。この pairwise 比較に用いられる評価値(重要度)を表-1に示す。

以上のようにして得られた各レベルの pairwise 比較行列(既知)から各レベルの要素間の重み(未知)を計算する。その計算方法は木下・大野³⁾に詳述されている。なお、意思決定者の答えの pairwise 比較において、一貫性のある回答を得ることは期待できない。そこで、回答の整合性の尺度として整合度(CI)を用いて判別する。

c) 第3段階

各レベルの要素間の重みが計算されると、この結果を掛け合わせて階層全体の重み付けを行う。これにより、総合目的に対する各代替案の総合評価値が決定される。

(2) 階層分析法の適用方法

本研究では、経営状況等が異なる個々の農家の意思を反映させた形で、赤土等流出問題に対する営農的対策を提案することを目的としている。したがって、先に示した総合目的を「営農的対策の選択」、評価基準を「サトウキビの経営方針を決める際の決定因子」、代替案を「赤土等流出問題に対する営農的対策」とした。評価基準や代替案の要素を抽出するために、関連機関へのヒアリング調査を行う。評価基準における各要素間の重要度を決定するために、アンケート調査を行い、得られた pairwise 比較行列から重みを算定する。各評価基準における代

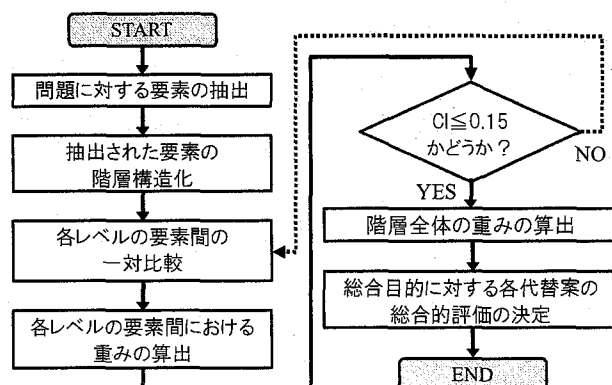


図-1 階層分析法(AHP)の分析手順

表-1 重要度の尺度とその定義

重要度	定義
1	同じくらい重要
3, (1/3)	やや重要, (やや重要でない)
5, (1/5)	かなり重要, (かなり重要でない)
7, (1/7)	非常に重要, (非常に重要でない)
9, (1/9)	極めて重要, (極めて重要でない)

替案の重み付けにおいては、統計値や数値シミュレーションによるデータを整理し、代替案の重みを算定する。これらの評価基準の重みと代替案の重みより総合目的の評価値を算出し、アンケート回答者の意思に沿った対策方法を決定する。

(3) ヒアリング調査および階層構造の構築

サトウキビ農家が経年的にサトウキビを栽培していく中で、多様な栽培方法や営農方法等をどのような視点で選択しているのかを明らかにするため、個々のサトウキビ農家が経営方針を決定する上で重要としている視点をヒアリング調査によって抽出することを目的とした。後に、この抽出したそれぞれの視点を、階層分析法を行う際の階層構造における評価基準とする。さらに、代替案となる営農的対策の項目を抽出することも試みた。

調査時期は2006年10月であり、調査対象機関として、市や県などの行政機関(4件)、国の研究機関(1件)、製糖会社(1件)、農業関連団体(2件)の計8団体に対して実施した。その内容を要約し、表-2に整理した。その結果、経営方針を決定する上で重要としている視点は、収益性、快楽性、環境性、作業性、安定性の5項目に絞ることができた。また、主要なサトウキビ栽培における営農的対策項目は、夏植え栽培から春植え・株出し栽培への移行、グリーンベルトの設置、緑肥作物による被覆の3項目に絞ることができた。なお、抽出した各種対策の説明は次節で行う。機関によってサトウキビ農家に対して接する機会とは異なっているが、抽出された視点はほぼ共通であった。このことから、サトウキビ農家が経営方針を決定する因子は一致しているが、その因子に対する重みが個々の農家によって異なることから多様性が生じると

表-2 評価基準の抽出(ヒアリング結果)

評価基準	ヒアリングから得たキーワード
収益性	たくさん収益を上げたい ・農家は儲からないことはやらない ・行政による補助金があるから対策をしている ・赤土流出対策をすると減収の場合もある
快楽性	農作業を楽しんでやりたい ・農作業は楽しい ・作物に魅力を感じるからこそ農業をしている
環境性	土が雨で流されないようにしたい ・土が流れることは農家にとって経済的損失でもある ・対策はその人の環境保全に対する意識次第である ・補助事業を一度した地域は対策の認識が強い
作業性	労力をあまりかけたくない ・サトウキビは他の作物と比較するとやりやすい ・作業に支障のない対策が比較的好まれる ・兼業農家が実施可能な対策は限られる
安定性	安定して作物を収穫したい ・病気・災害に強いものを選びたい ・自然災害(台風等)により計画通り農作業ができず農家の経営意識が落ちる

考えられる。図-2に階層分析法による解析のための階層構造を示す。

(4) 営農的対策方法

ここでは、代表的なサトウキビ栽培方法について説明するとともに、先に抽出された営農的対策方法について説明する。夏植えの栽培期間は約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。夏植え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、夏植え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。春植えの栽培期間は約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⁴⁾。株出し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1年間生育させる方法で、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、夏植え、春植えと比較して侵食量が極めて小さい⁴⁾。

本研究では、石垣島で大部分の栽培方法を占める夏植え栽培に関する対策を3種類抽出した。第一に、夏植え栽培から春植え・株出し栽培への移行は栽培方法そのものを変更する方法である。株出し栽培による侵食抑制効果が見込める。第二に、グリーンベルトの設置は、農地末端に芝等の植生を斜面長方向に1m程度の長さで生育させ、農地内で発生、流下する土砂を捕捉するための方法である。第三に、緑肥作物による被覆は、裸地として放置される夏植え栽培の休閑期にマメ科植物等を生育させ、地表面の被覆率を高めると同時に、作物の肥料としての効果も見込む方法である。

最終目的

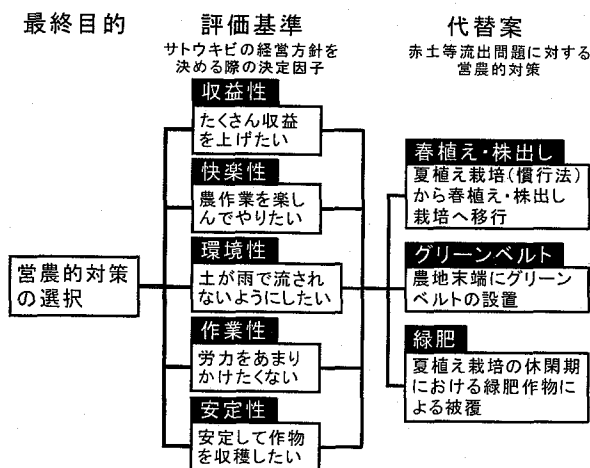


図-2 階層分析法(AHP)による解析のための階層構造

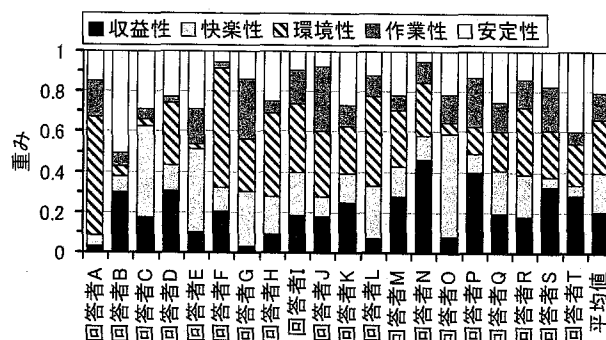


図-3 アンケート調査による評価項目の重み

(5) アンケート調査および評価基準の重み付け

ヒアリング調査によって抽出した5つの評価基準に対して各農家の重要度を決定するため、農家に対してアンケート調査を実施した。調査時期は2006年12月であり、対象者は、次章における土砂流出抑制効果のシミュレーションの対象流域である石垣島名蔵川流域内にサトウキビ圃場を所有する64名中の20名の農家であった。なお、農家個々の自宅に訪問し口頭にてアンケートを行う対面式アンケートとした。農家毎に各評価基準を一对比較させ、表-1に示した重要度で評価させる。その結果、農家毎の一对比較行列が作成できる。また、属性調査として、現在における農業収入・家庭収入、現在また過去において栽培している販売作物、赤土流出の認知有無、赤土流出に関する対策有無、将来におけるサトウキビ栽培の意識傾向等を尋ねた。

アンケート結果から得られた一对比較行列を用いて、評価項目毎の重みを算出した結果を図-3に示す。個々の農家によって重みに差はあるものの、平均値で見た場合、環境性と収益性そして安定性についての評価が高かった。環境性については、土が雨で流されないようにしたいという視点であったため、重みが大きいからといって一概に環境保全意識が高いということにはならない。しかしながら、土が雨によって流れないようにしたいという意思は結果として環境性の意思としても同等であると考え

表-3 各評価基準に関する営農的対策の定量的数値および重み

評価基準	代替案の定量的数値および重み		
	春植え・株出し	グリーンベルト	緑肥作物
収益性	275535 円 (0.537)	204000 円 (0.105)	217000 円 (0.258)
環境性	0.36 (0.714)	0.17 (0.143)	0.10 (0.143)
作業性	106 時間 (0.287)	132 時間 (0.078)	101 時間 (0.535)
安定性	2267 (0.053)	630 (0.474)	630 (0.474)
快楽性	- (0.333)	- (0.333)	- (0.333)

代替案における()内の数値は評価基準における重みを表す

た。また、一対比較における整合性を示す指標である整合度(CI)は全体的に高い傾向が見られた(平均値:0.12)。これは、用いた評価基準が完全に独立ではないためであると考えられる。

(6) 営農的対策の重み付け

ヒアリング調査で得られた3つの営農的対策項目に対する個々の農家の重みを算定するため、各種統計資料や数値シミュレーションを用いて3つの対策の定量的数値を5つの評価基準毎に定めた。本来、各評価基準に基づく代替案の一対比較もアンケート対象者に行ってもらいたいことが望ましいが、アンケート対象者への負担を考慮し実施しなかった。

収益性に関する各対策の比較方法として、10a当たりの粗収入を用いた。環境性に関する各対策の比較方法として、侵食解析モデルであるWEPPによる数値シミュレーションを対策毎に実施し、慣行栽培法に対する侵食量の削減率を算定した。なお、試算の方法は大澤ら⁵⁾に詳述されている。作業性に関する各対策の比較方法として、農家へのアンケート時に各対策に伴う作業時間をヒアリングし、その平均値を用いた。安定性に関する各対策の比較方法として、過去6年間の各栽培方法に対する単収(10a当たりの実の重さ)の標準偏差を用いた。快楽性については主観的な値であることから本研究においては全て同等であるとした。以上の結果を表-3に示す。これらの値を参照し、各評価基準における重みに変換した。

(7) 意思決定の総合評価

前々節にて算出した各農家の評価基準の重みと前節にて算出した各評価基準に関する営農的対策(代替案)の重みを掛け合わせることによって、個々の農家における各営農手法の総合評価値を求めた。図-4にある回答者における結果、図-5に全ての回答者の値を幾何平均した結果を示す。これらの結果は、評価基準および代替案の重みが反映された結果となっている。図-5の結果では、春植え・株出しへの移行、緑肥作物の栽培、グリーンベルト設置の順に総合評価値が大きい。特に、春植え・株出し

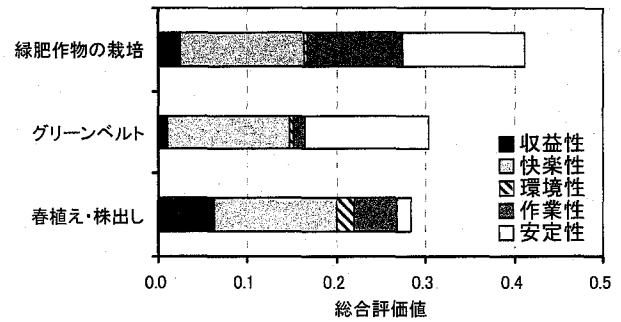


図-4 回答者Eにおける各営農的対策に対する総合評価値

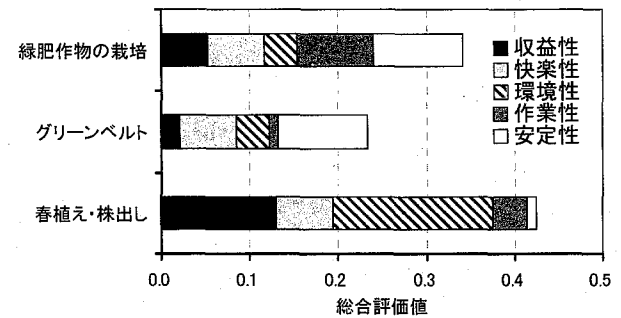


図-5 全回答者における各営農的対策に対する総合評価値の幾何平均値

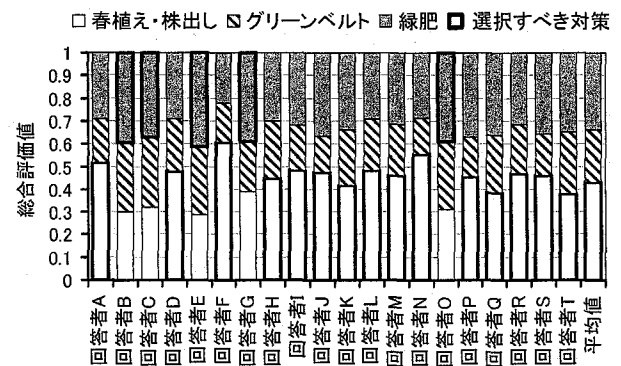


図-6 全回答者における各営農的対策に対する総合評価値

への移行においては、気象条件による不安定性以上に、一度の収穫に対する高収益性や土壌侵食を顕著に抑える高環境性の点で評価が高かったことが特徴的である。

全回答者20名の総合評価値を検討した結果を図-6に示す。最も大きい重みに対応する項目が、その回答者が選択すべき対策となる。その結果、15名が春植え・株出しへの移行、5名が緑肥作物の栽培を対策として選択すべきであると判別され、グリーンベルトを選択すべきであると判別された回答者数は0名であった。以上の結果より、春植え・株出しへの移行、緑肥作物の栽培、グリーンベルト設置を実施する可能性のある農家の割合は3:1:0となることが分かった。

3. 解析モデルによる土砂流出抑制効果の評価

(1) 流域の概要

対象流域である沖縄県石垣島名蔵川流域の概要および土地利用分布を図-7に示す。流域面積は14.9km²である。

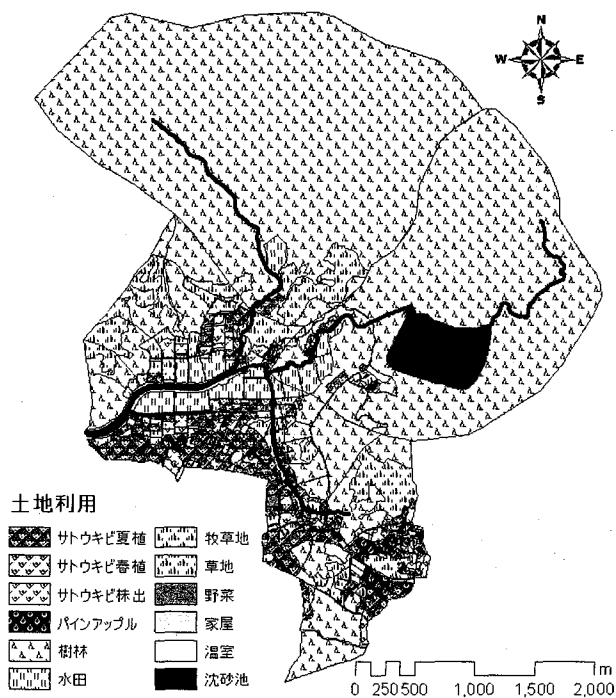


図-7 石垣島名蔵川流域の概要および土地利用分布

土地利用分布は2006年6月に現地踏査によって決定した。また、地形や水路網のデータは既往の研究⁶⁾で得られているGISデータを用いた。土地利用分布に着目すると、流域南西部ではサトウキビ夏植えが多く、南部ではサトウキビ夏植えとパイナップルが多くを占めている。

(2) WEPPの概要

WEPPは米国農務省を中心に開発が進められ⁷⁾、現在、ソフトウェア化され、無償で配布されている。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。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(Universal Soil Loss Equation)⁸⁾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。

WEPPモデルは筆者らの研究⁹⁾によって、農地スケールおよび流域スケールでの検証が行われた。その結果、観測値との適合性は概ね良好であることが示されたことから、赤土流出抑制対策の効果算定のためのシミュレーションモデルとして相応しいと考えられる。

(3) 現状の土地利用条件におけるシミュレーション

a) 試算方法

現状の土地利用における土砂生産量および土砂輸送量

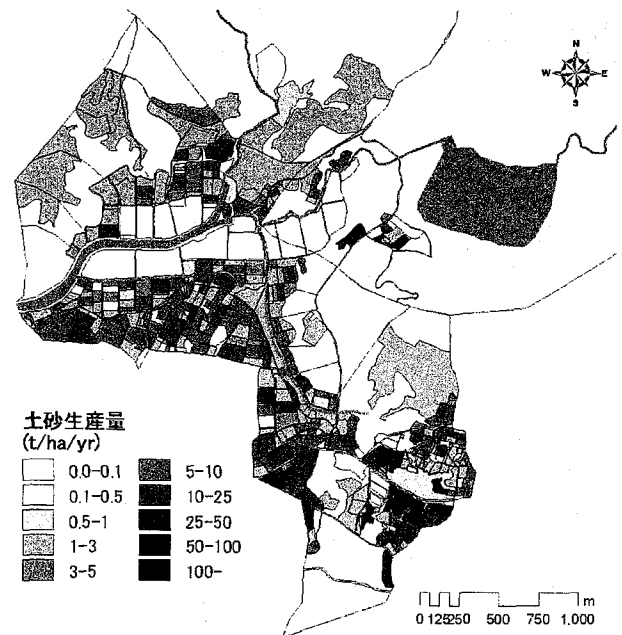


図-8 現状の土地利用での土砂生産量分布

を試算する。WEPPを適用するには、流域分割、農地、水路、沈砂池における各種設定が必要になる。それぞれの方法は大澤ら⁹⁾で詳述されている。サトウキビの栽培方法は、夏植え栽培(2年周期(1期))と春植え・株出し栽培(3年周期、春植え：1年(1期)、株出し：2年(2期))の2種類とした。降雨については、石垣島における1994年から2005年の計12年分の石垣島地方気象台の地上気象観測値を使用し、各年の土砂生産量および土砂輸送量を試算し、その平均値を用いた。

b) 結果と考察

計算対象流域における土砂生産量分布を図-8に示す。なお、流域末端における年間平均土砂輸送量は、1071t/yrであった。土地利用毎の土砂生産量に着目すると、サトウキビ夏植え栽培の平均値は8.4t/ha/yrであったのに対し、サトウキビ春植え・株出し栽培の平均値は3.5t/ha/yrであり夏植えと比較して小さかった。一方、パイナップルにおける平均値は26.7t/ha/yrであり、作付面積は小さいが土砂生産量は大きかった。これは、作物の被覆率が常時小さいことと、勾配および斜面長が比較的大きい農地で栽培されていることによる。今後、パイナップルの対策についても検討する必要がある。

(4) 農家の意思決定を反映させた対策シミュレーション

a) 試算方法

前章において検討した階層分析法(AHP)による農家の対策意思を反映させた形で、対策に伴う侵食・土砂流出シミュレーションを実施する。想定するシナリオは2種類あり、一方はアンケートを実施した農家の所有するサトウキビ畑のみを対象に対策を適用した場合(シナリオ1)、もう一方は全てのサトウキビ畑を対象に対策を適用した場合(シナリオ2)を設定した。

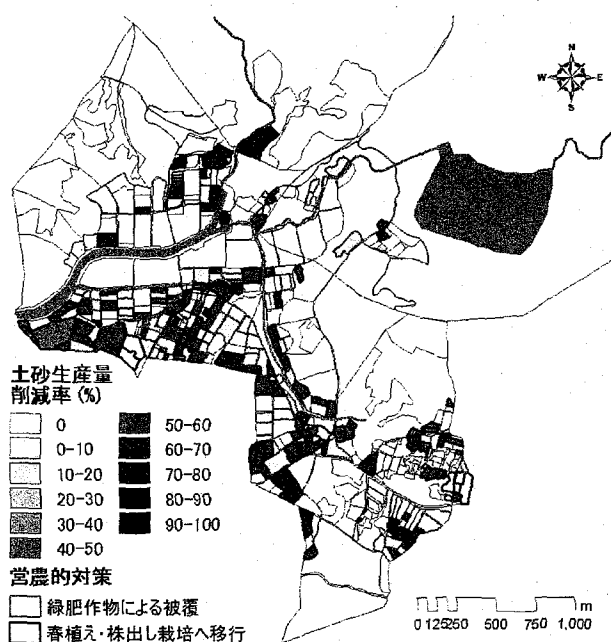


図-9 シナリオ2における土砂生産量の削減率

シナリオ1では、AHPによって判別された夏植えから春植え・株出しへの移行、もしくは緑肥作物の栽培の一方の対策を施す。これは、全サトウキビ畑115ha中の33haを占める。シナリオ2では、シナリオ1の対策に加え、全てのサトウキビ畑に対して、夏植えから春植え・株出しへの移行する畑と緑肥作物の栽培を行う畑の比が前章で得られた3:1となるように配分した。なお、対策農地の配分方法は、農地数が3:1となるのに加え、前節で試算した現状の単位面積当たりの土砂生産量の和が約3:1となるようにした。

b) 結果と考察

シナリオ1における流域末端での年間平均土砂輸送量を試算したところ、1054t/yrであり、削減率は2%であった。一方、面源における土砂生産量の総和で見た場合、1515t/yrから1479t/yrに減少した。シナリオ2における流域末端における年間平均土砂輸送量は、888t/yrであり、削減率は17%であった。面源における土砂生産量の総和で見た場合、1515t/yrから1240t/yrに減少した。ここで、シナリオ2の土砂生産量の削減率を図-9に示す。春植え・株出し栽培への移行を想定した農地における削減率は緑肥作物を想定した農地における削減率より大きい傾向にあった。

以上のように、前章で得られた農家の意思決定を反映させた形で対策シミュレーションが実施でき、定量的な削減量の試算が可能であることを示した。本来ならば、施策者の意思決定の検討とともに、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た土砂輸送量の許容量を定め、その量を目標値とした対策の検討が必要であるが、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。今後、許容量を設定し、負荷の削減目標値と施

策者の意思を同時に満足可能なシナリオの検討が必要不可欠である。

4. 結論

本研究では、石垣島名蔵川流域を対象として、過度の土砂生産源である農地の管理者(農家)による営農的対策の意思決定を階層分析法(AHP)によって検討した。また、その結果を反映させた形で土砂生産・土砂輸送モデル(WEPP)を用いた対策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) AHPを各農家へ適用した結果、サトウキビ春植え・株出し栽培への移行対策が最も多く選択される傾向にあり、気象条件による不安定性以上に、一度の収穫に対する高収益性や土壌侵食を顕著に抑える高環境性の点で評価が高かった。春植え・株出しへの移行、緑肥作物の栽培、グリーンベルト設置の各対策を選好する農家数の比は3:1:0となることが分かった。
- (2) AHPで得られた対策項目を想定した数値シミュレーションを実施した結果、流域末端での土砂輸送量は、現状と比較して17%減少した。

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)、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)、そして国土交通省建設技術研究助成(研究代表者: 松下 潤)の支援によって行われた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) T.L.Saaty: The Analytic Hierarchy Process, McGraw-Hill, 1980.
- 3) 木下栄蔵, 大野栄治: AHPとコンジョイント分析, 現代数学社, 2004.
- 4) 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.
- 5) 大澤和敏, 池田駿介, 山口悟司, 高椋 恵, 干川 明: 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, 河川技術論文集, 11, 309-314, 2006.
- 6) 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.
- 7) USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: USDA-Water Erosion Prediction Project; Hillslope profile and watershed model documentation, NSERL Report No.10, 1995.
- 8) Wischmeier, W.H. and D.D. Smith: Predicting rainfall-erosion losses, Agricultural Handbook No. 537, USDA Washington D.C., 1978.
- 9) 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.

(2007.4.5受付)