

農地における土砂流出抑制対策の比較試験

FIELD OBSERVATION OF SEDIMENT RUNOFF REDUCTION METHODS ON FARMLAND

大澤和敏¹・山口悟司²・池田駿介³・高椋恵⁴

Kazutoshi OSAWA, Satoshi YAMAGUCHI, Syunsuke IKEDA, Kei TAKAMUKU

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-M1-1)

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)

⁴学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)

In these years, red-soil erosion and runoff have led to agricultural and environmental problems in Okinawa, and effective sediment runoff reduction methods are required for comprehensive sediment management in an entire river basin. A purpose of this study is to grasp the effect of some sediment runoff reduction methods on farmlands. In order to estimate the effect of canopy and residue cover, no-tillage farming, and grass strip on the reduction of sediment runoff, four experimental plots were set up and multi-points simultaneous observations were carried out. The time series of precipitation, discharge, and suspended sediment concentration were measured on several rainfall events and at proper intervals of time. Sediment runoff from each plot was calculated from observed data. From the results, 27% to 97% canopy and residue coverage ratio of sugarcane field reduced sediment runoff by 39% to 92% as compared with bare land. No-tillage farming reduced sediment runoff by 94% as compared with bare land. However, 0.6m length grass strip which is generally installed in Okinawa did not trap the sediment so much.

Key Words : *red-soil runoff, sediment runoff reduction methods, field observation, no-tillage farming, grass strips, sugarcane*

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。沖縄県は1994年に「赤土等流出防止条例」を制定し、各種土木事業に対して濃度による赤土流出規制を上限 $200\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ と定めた。その結果、開発工事現場において適切な対策を行うようになったため、開発工事に起因する土砂流出量は著しく減少した。一方、現在でも経常的な土砂流出発生源である農地は各種営農的対策の効果が定量的に把握されておらず、農業者の負担も大きいために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。その際の規制の方法としては、植生帯(グリーンベルト)、不耕起栽培、マルチングなど何らかの赤土流出抑制対策を講じることを義務付けることが検討されている。

そこで、本研究では沖縄県石垣島の実地に営農されて

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、サトウキビ春植え栽培(慣行耕起栽培)区、植生帯を有するサトウキビ春植え栽培区、そして不耕起状態でのサトウキビ株出し栽培区の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、作物の被覆による侵食抑制効果、不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。本研究における現地試験のように、実圃場での同一条件下における複数の侵食防止対策の同時計測を実施した研究事例は極めて少ない。また、本研究において定量的に把握した試験結果は流域一貫土砂管理法の策定のための基礎的資料となる。

2. 試験地の概要および計測方法

(1) 試験地の概要

試験地は沖縄県石垣市新川におけるサトウキビを栽培している畑地とした。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。図-1に試験地に設置した試験区の概要を示す。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(慣行耕起栽培)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を不耕起状態でのサトウキビ株出し栽培区とした。ここで、St-1の無耕作区は耕起および畝立てのみを行った状態とした。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。春植えまたは夏植え栽培では1回の栽

培周期の中で数回の耕起を行う。一方、株出し栽培は苗の植え付けが省略されるために、1回もしくは2回の畝間部分のみの耕起を行う。以上の3種類の栽培方法が沖縄における慣行的な栽培方法である。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(図-1参照)。0.6mの植生帯は、沖縄における植生帯対策圃場で一般的に設置されている長さである。なお、St-2およびSt-3において、時期によって試験区の位置が変わるのは、畝立てのために流路が変更されたためである。

各試験区における営農作業スケジュールを表-1に示す。サトウキビの慣行耕起栽培を行っているSt-2およびSt-3では5回の耕起を行っている。各試験区の作物および地

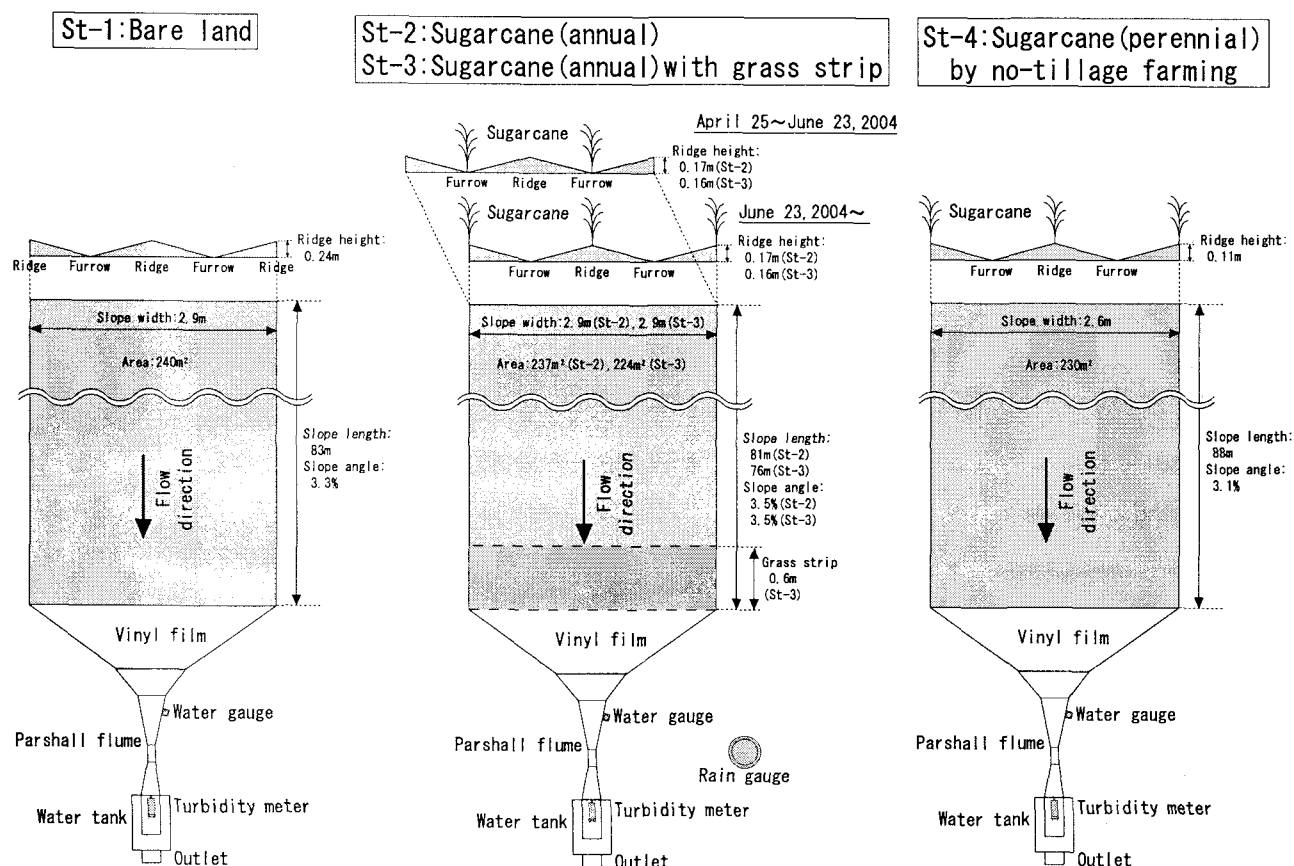


図-1 試験区の概要

表-1 各試験区における営農作業スケジュール

St-1		St-2 and St-3		St-4	
作業日(年/月/日)	内容	作業日(年/月/日)	内容	作業日(年/月/日)	内容
2004/ 4/26	耕起 (鋤き起し)	2003/12/15	耕起 (鋤き起し)	2004/ 3/10	作物刈り取り
2004/ 5/ 8	耕起 (砕土)	2004/ 1/15	耕起 (鋤き起し)	2004/ 5/31	除草 (薬剤散布)
2004/ 5/ 8	耕起 (畝立)	2004/ 2/15	耕起 (砕土)	2004/ 5/29	試験開始
2004/ 5/31	試験開始	2004/ 2/20	苗植え付け		
2004/ 8/ 8	除草 (薬剤散布)	2004/ 4/25	耕起 (中耕, 畝立)		
2004/ 8/ 29	除草 (薬剤散布)	2004/ 6/ 2	試験開始		
		2004/ 6/ 6	植生帯設置 (St-3)		
		2004/ 6/23	耕起 (培土, 畝立)		

*各記録は栽培準備時期から2004年9月まで

表面の残渣・雑草による被覆率を上空からの画像を用いて算定した。その結果を図-2に示す。測定日は2004年6月5日、6月24日、9月24日であり、その間は線形で補完して示した。St-1では7~8月に雑草が繁茂し、除草剤散布を行ったので、地表面の残渣による被覆率が徐々に増加している。St-2およびSt-3の被覆率の増加は主に作物の生長によるものである。St-4の被覆率が常時大きいのは、2004年3月の刈り取り直後から生長が始まったことと地表面の残渣・雑草による被覆が多かったことによる。

2004年6月6日に水準測量を各試験区で行った。測点は斜面長方向では約10m間隔、斜面幅方向では畝の山と谷とした。本論文ではSt-1の結果のみを図-3に示す。図より雨水は畝間を流路として流れることがわかる。なお、試験期間中においてリルやガリの発生は見られなかった。

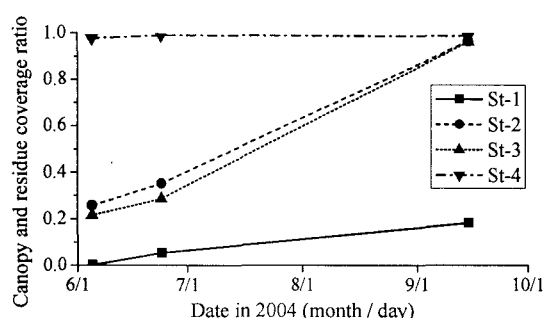


図-2 各試験区における被覆率

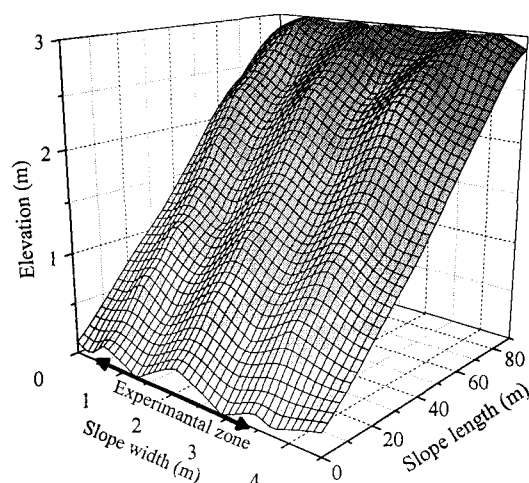


図-3 St-1における地形 (水準測量の結果)

(2) 計測方法

各試験区における測定項目を表-2に示す。各測器の設置場所は図-1に示してある。流量は検定済みのパーシャルフリュームを用いて水位を常時連続計測することによって換算される。浮遊土砂濃度は降雨流出時の流水を採取して吸引濾過法または直接炉乾することによって測定される。なお、浮遊土砂を流水中に存在する土粒子(粒度分布は後述の図-4を参照)と定義する。取水は手採水で行われた。採水時間間隔は流出規模に応じて、流量増加時では短く、ピーク後の流量が減少するにつれて

間隔を徐々に長くとした。採水の間の濃度を内挿するために濁度計を用いて常時連続計測した。計測によって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。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。試験は2004年6月から継続して行っており、2005年の作物の収穫時期まで行う予定としている。本論文では2004年6月から9月の雨天時における試験結果について論じる。

表-2 各試験区における測定項目

項目	時間間隔	測定機器
流量	—	パーシャルフリューム (3インチ型(株)ウイジン)
水位	1分	フロート式水位計 (UIZ-GY30,(株)ウイジン)
濁度	2~5分	後方錯乱光式濁度計 (COMPACT-CLW,(株)アレック電子)
採水	1~15分*	手採水
降水量	1分	転倒マス式雨量計 (MW-010,(株)栄弘精機)

*: 降雨による出水があった時のみ実施

3. 計測結果

(1) 流出土砂の粒度分布

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。本論文ではSt-1における6月8日のイベントのピーク部分の粒径加積曲線を図-4に示す。粒径は0.1 μ mから100 μ mの範囲内で存在し、図に示した以外の試験区およびイベントの試料もこの範囲内にあった。図の左上に示した流量と浮遊土砂濃度の経時変化と対応させて粒度分布の変化を見ると、流量または濃度の増大に伴って曲線は右にシフトし、組成が粗くなる。その後、流量または濃度の減少に伴って曲線は左へシフトし、組成はピーク前の状態へ近づく。

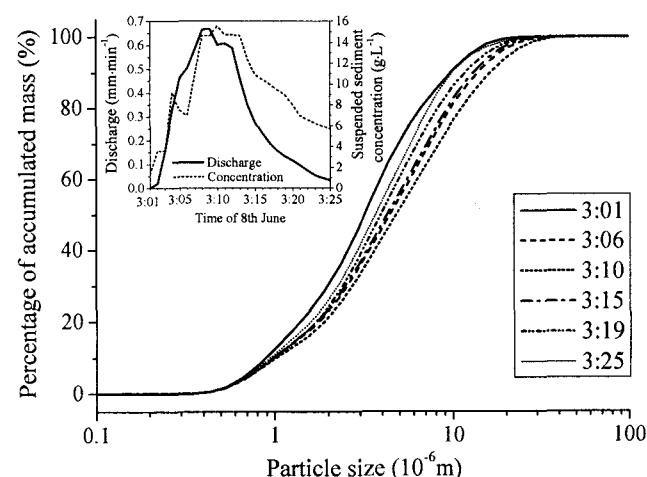


図-4 St-1の流出水に含まれる土砂の粒度分布(2004年6月8日)

(2) 降水量、流量、浮遊土砂濃度の経時変化

試験期間中における降水量、流出高、浮遊土砂濃度の経時変化を図-5に示す。図は降雨に伴うイベント部のみを抜き出して示してある。イベントの区分方法はUSLE(Universal Soil Loss Equation)で定義された侵食性の一連降雨(降水量が12.7mm以上または最大15分間降水量が6.4mm以上の降雨で、降雨後の無降雨期間が6時間以上)に基づいて決定した。それぞれの降雨における確率降雨年を鈴木・寺川の手法¹⁾で求めた結果、6月9~10日が2.6年、その他の降雨は1年以下と算定された。

流量は各試験区の単位面積あたりの流出高として示した。St-4では他の区画よりピーク時刻が遅く、ピーク後も緩やかに減少する傾向にあった。これは、作物の雨滴遮断および樹幹流および地表面の残渣および雑草による流路抵抗の増大が主要因と考えられる。一方、その他の試験区では降雨に対する流出の傾向はほぼ同様であった。

浮遊土砂濃度の経時変化は対策区によって明確に異なる結果となった。St-1では多くのピーク部で他の試験区より著しく大きいピーク濃度が計測された。これは、図-2で示したように被覆率が小さいことが主要因と考えられる。8月11~12日は試験区が雑草で覆われたため、濃度がSt-2やSt-3より低い結果となった。St-4では、他の試験区の値が大きいため、図において判別することが困難であるが、降雨に伴う濃度の増大が他の試験区と比較して著しく小さい。特に、試験期間中で最も確率降雨年が

大きかった6月9~10日のイベントの最大濃度は $1.8\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ と非常に低濃度であった。これは、被覆率が98%と非常に高いことと、耕起に伴う土壌の攪乱を全く行っていないことによるものであると考えられる。筆者らが以前行ったサトウキビの株出し栽培圃場における現地観測²⁾では、被覆率が90%以上の状態では台風に伴う大きな降雨強度時(最大1時間降水量:74mm)でも $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下であったことから、侵食は被覆率および耕起履歴に大きく影響されることがわかる。St-2およびSt-3における経時変化はほぼ同様であった。両試験区の被覆率はほぼ同じであることを考慮すると、St-3における植生帯の流出浮遊土砂の捕捉効果は小さいことが予想される。また、2004年9月以降におけるSt-2およびSt-3は、作物の生長によって被覆率が1近くまで増大したため、図では判別することが困難であるが、St-4と同等の値をとった。

(3) 浮遊土砂流出量の経時変化

計測によって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。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-6に示す。なお、浮遊土砂流出量の変動が非常に大きく、線形の軸では表記が困難であったため、対数軸を用いた。全体的な傾向として、St-1の値は、ほぼ全ての降雨イベントにおいて最も大きいことがわかる。特に6月9日13:40頃のピーク時に約 $52\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ と試験期間中で最大値を記録した。

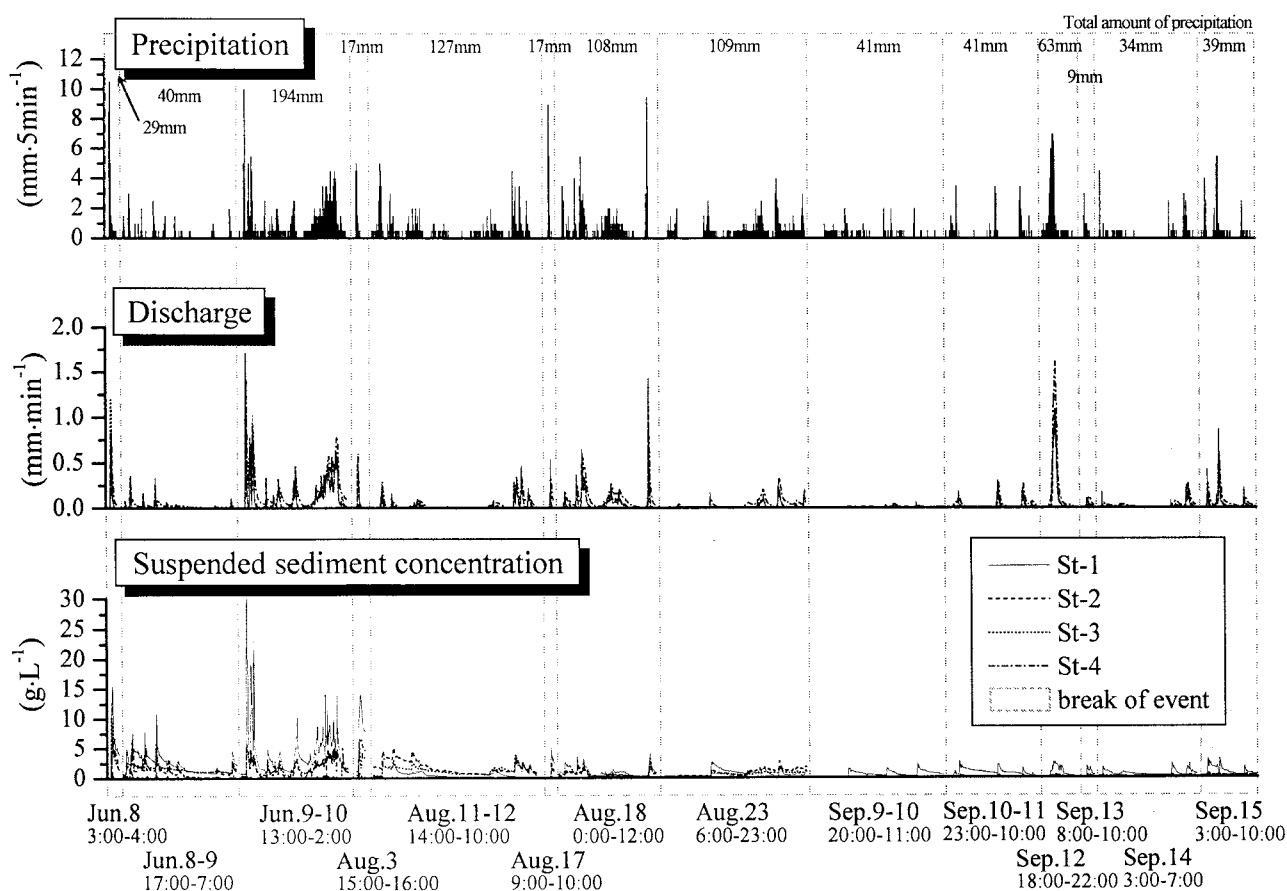


図-5 各試験区における降水量、流量、浮遊土砂濃度の経時変化

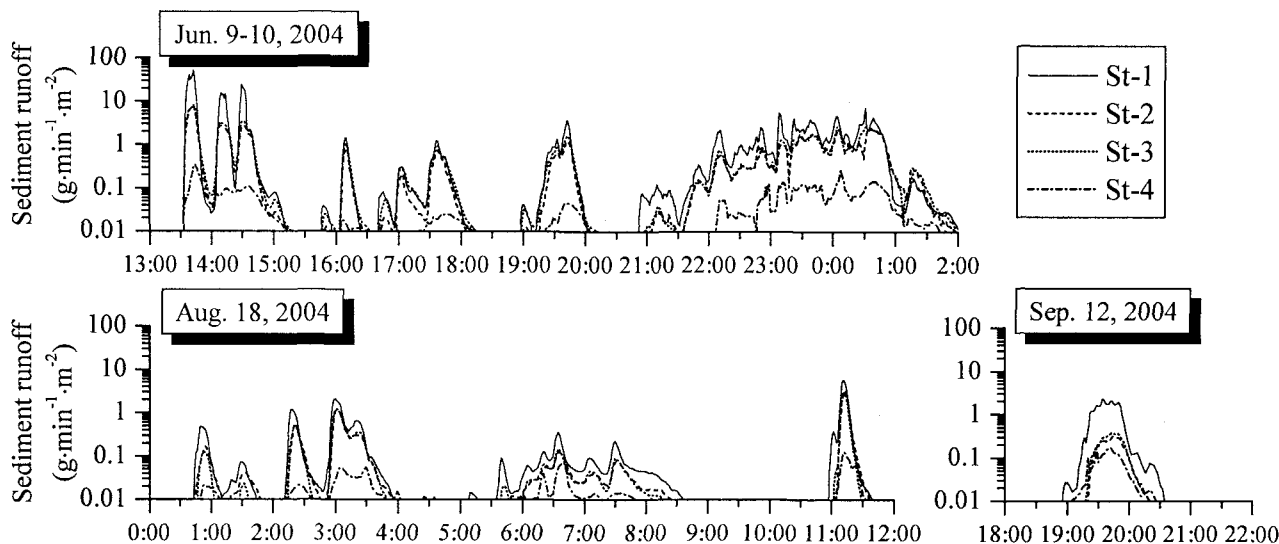


図-6 各試験区における浮遊土砂流出量の経時変化 (上：6月9～10日，左下：8月18日，右下：9月12日)

一方、St-4は全ての降雨に対して、顕著な浮遊土砂流出が起こっていない。前述の浮遊土砂濃度の経時変化における考察と同様であるが、作物の被覆によって雨滴衝撃による土粒子の剥離が抑えられ、地表面の被覆によって流水による土粒子の剥離が抑えられた複合的效果によると考えられる。なお、St-4における試験期間中での浮遊土砂流出量の最大値は約 $0.5 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ であり、St-1における最大値の1%以下であった。St-2およびSt-3の経時変化はほぼ同じであった。

4. 土砂流出抑制対策の検証

(1) 作物の被覆による侵食抑制効果

サトウキビの慣行耕起栽培方法である春植え栽培の試験区St-2と無耕作の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。連続計測によって得られた浮遊土砂流出量および集水部における堆積土砂量の和を土砂流出量と定義し、対策区毎および月毎またはイベント毎で総計した結果を図-7に示す。合計値で見るとSt-2はSt-1の41%であり、削減率は59%であったことがわかる。ここで、St-1またはSt-2の土砂流出量に対する各試験区における月別の削減率を図-8にまとめた。白丸印のSt-2の傾向を見ると、生長初期の6月では64%となり、8月は比較対象のSt-1で雑草が繁茂し、土砂流出量が小さかったために削減率が一時低下したが、被覆率が1近くになる9月では85%と高い削減率を示した。降雨イベント毎の削減率は、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。

以上のように、サトウキビの慣行耕起栽培方法では被覆率の増大(27%～97%)に伴って、土砂流出量を39%～92%の範囲で削減できることが明らかになった。ここで、沖縄県で指針とされている削減率³⁾を参照すると、この時期の削減率は50%～99%とされており、本研

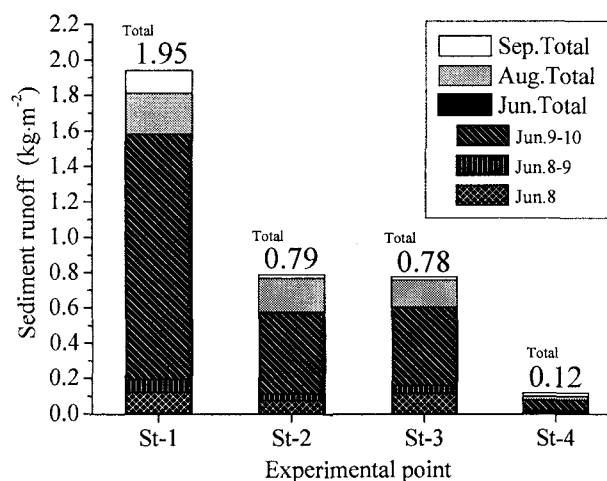


図-7 各試験区における土砂流出量

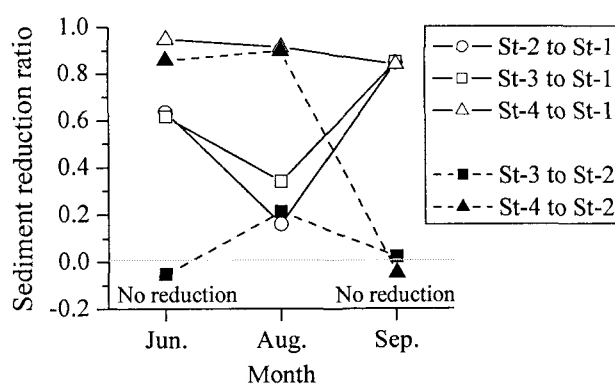


図-8 各試験区における土砂流出量の削減率

究における結果とほぼ同じであった。

(2) 不耕起状態で株出し栽培による侵食抑制効果

St-4の土砂流出量に対する無耕作のSt-1および春植え栽培のSt-2の土砂流出量を比較することによって、不耕起状態で株出し栽培による侵食抑制効果を検証する。

図-7における合計値を見ると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。図-8における月別の削減率で見ても、St-2の被覆率がSt-4と同程度になる9月の黒三角印を除く全てのイベントにおいて高い削減率であることがわかる。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、収穫後、耕起を行わないことにより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。

ここで、筆者らが沖縄県恩納村の実圃場で行った観測結果²⁾を参照すると、春植え栽培圃場(被覆率34%)と株出し栽培圃場(被覆率80%)で同時計測を行った結果、降水量82mmのイベントにおいて土砂流出量はそれぞれ約145g・m²、約24g・m²となり削減率は約83%となった。この値は本研究の結果である85%に近い値である。また、沖縄県で指針とされている裸地に対する株出し栽培の削減率³⁾を参照すると、この時期の削減率は90~99%とされており、本研究における結果はその範囲内にあった。

以上のように、不耕起状態での株出し栽培は非常に高い土砂流出抑制効果を有することが明らかになった。しかし、株出し栽培の収穫量は石垣島で主に行われている夏植え栽培の収穫量より低いこと、不耕起栽培は雑草防除の負担がかかるという営農上の問題点を有する。

(3) 植生帯による流出土砂の捕捉効果

植生帯を有する試験区St-3と植生帯の無い試験区St-2の土砂流出量の比較を行い、植生帯による流出土砂の捕捉効果を検証する。図-7の6月8日のイベントにおける土砂流出量に着目すると、St-3の土砂流出量がSt-2と比較して大きい。この降雨イベントは植生帯を設置してから最初の降雨であったために、植生帯部分の土壌の攪乱が影響したと考えられる。よって、今後、この降雨イベントは考察から除外する。図-6に示した浮遊土砂流出量の経時変化を見ると、St-2とSt-3では有意な差は見られない。図-7における6月8日のイベントを除いた試験期間全体の合計値で見ると、St-3(0.66kg・m²)はSt-2(0.72kg・m²)の92%で、削減率は8%となった。また、St-2とSt-3の土砂流出量の差を植生帯の捕捉量と考えると、6月9~10日のイベントが試験期間における最大値の3.7kgとなった。この値は、その時のSt-2における土砂流出量の109kgと比較すると少ない。

これらの結果から、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、上流から流出する土砂量に対して僅かであり、効果的な削減を行うためには適切でないことが言える。十分な量の土砂の捕捉を行うためには、土砂生産量に見合うだけの植生帯の長さが必要であると考えられる。既往の試験結果⁴⁾を参照すると、沖縄県名護市における斜面長31.5m、平均勾配2%の畑地において、下端部に長さ1.5mまたは3mの植生帯を設置した場合の

ある一雨(降水量:149mm)に対する土砂流出量の削減率は、それぞれ51%または63%であったと報告されている。なお、土砂の捕捉ではなく、大規模な侵食が起りやすい農地と排水路の接合部分の法面保護の目的のために植生帯を用いることは有効であると考えられる。

5. 結論

面源からの微細土砂の流出が社会的問題となっている沖縄において、農地における土砂流出抑制対策に着目し、実圃場を4つの区画に区切り、それぞれの試験区で各種対策を施し、同一条件下における土砂流出量の同時計測を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 作物の被覆によって土砂流出は抑制され、被覆率27%~97%のサトウキビの慣行耕起栽培試験区では、無耕作区に対して39%~92%の範囲で土砂流出量を削減した。
- (2) 不耕起状態でのサトウキビの株出し栽培方法は、地表面における残渣被覆や耕起による土壌攪乱が無いことなどによって、無耕作状態での土砂流出量の約94%を削減し、極めて効果的な対策法であった。
- (3) 沖縄で実際に設置されている長さ0.6mの植生帯による流出土砂の捕捉率は約8%となり、斜面長約80mの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。

本試験は2005年の作物の収穫時期まで行う予定としている。今後、これらのデータおよび既往の対策調査事例を一元的および体系的に整理し、流域一貫土砂管理法の策定に向けた最適な対策方法および対策箇所の合理的判断手法の開発のための基礎データとする。

謝辞：本研究の現地試験にあたり、様々な御支援を頂いた国際農林水産業研究センター沖縄支所の干川明氏および試験地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、この研究は文部科学省科学研究費基盤研究(A)(2)(課題番号：14205070、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) 鈴木 俊朗、寺川 陽：アメダスデータを用いた確率降雨量分布の作成、土木技術資料、Vol. 38, No. 12, pp.20-25, 1996。
- 2) 大澤 和敏、酒井 一人、田中 忠次、吉永 案俊：降雨毎の侵食予測におけるUSLEおよびWEPPの検証、農業土木学会論文集、No.255, pp.43-50, 2004。
- 3) 比嘉 榮三郎、大見謝 辰夫、仲宗根 一哉、満本 裕彰：沖縄県における各種作物の作物係数、沖縄県衛生環境研究所報、Vol.31, pp.147-151, 1997。
- 4) Shiono, T., K. Tamashiro, N. Haraguchi, T. Miyamoto: Use of Vegetation Filter Strips for Reducing Sediment Discharge during a Rainstorm, Participatory Strategy for Soil and Water Conservation, Mihara, M. and Yamaji, E. eds., Institute of Environmental Rehabilitation and Conservation, Japan, pp.55-58, 2004。

(2004. 9. 30 受付)