

降雨出水時の水田からの浮遊土砂流出とUSLE の適用可能性

SUSPENDED SEDIMENT RUNOFF FROM PADDY FIELDS IN RAINFALL-
RUNOFF EVENTS AND APPLICABILITY OF USLE

松井宏之¹・福永隆二²・清水智³・乃田啓吾⁴
MATSUI Hiroyuki, FUKUNAGA Ryuji, SHIMIZU Satoshi and NODA Keigo

¹正会員 博 (農) 宇都宮大学准教授 農学部 (〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350)

²非会員 修 (農) (株) シノザキ (〒321-0804 栃木県宇都宮市二荒町8-3)

³非会員 修 (農) (株) ニュージェック (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20)

⁴非会員 修 (農) 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)

We observed the suspended sediment budget of paddy fields in rainfall-runoff events on Ishigaki Island in southwestern Japan, and examined the applicability of Universal Soil Loss Equation, USLE, to the sediment runoff from the paddy fields.

The following facts are noted. 1) The paddy fields acted as a source of suspended sediment under the relatively-high runoff rate from the paddy fields, though that acted as a sedimentation pond under the low runoff rate; 2) the general USLE method estimated from the rainfall data is not suitable for the suspended sediment prediction from paddy fields which are capable of storing rainwater. Then, the combined modeling of a water budget model in paddy fields and a certain suspended sediment yield model should be needed.

Key Words : paddy field, sedimentation pond, soil erosion prevention, sediment source, Okinawa

1. はじめに

水田では、湛水栽培が行われているため雨滴侵食が生じないこと、および土壌面が均平であることから、土壌侵食は生じないものと考えられてきた。その上、水田内では灌漑水中の懸濁物質が沈降除去されることから、谷山¹⁾、長谷部²⁾は積極的な土壌侵食防止機能、いわば沈砂池的機能が期待できると述べている。

しかしながら、こうした土壌侵食防止機能を定量的に評価するために、水田における土砂の流入量、流出量を継続的に連続観測し、その収支を提示した報告はあまり多くない。水田からの土壌流出あるいは懸濁物質 (SS) 流出では、佐藤ら³⁾、山田ら⁴⁾のように比較的高濃度の栄養塩類を伴う代かき時期の濁水の流出、いわゆる代かき濁水の観測およびその対策が数多く報告されている。こうしたなか、金子ら⁵⁾は作期を通した観測によりSSの流出負荷量が流入負荷量を上回ったこと、園田ら⁶⁾は複数年の観測に基づき、多雨年にSSの差引流出負荷量が多くなったことを報告している。金木ら⁷⁾はSS流出負荷量

が上回ったことを示したうえで、その対策として無代かき・育苗箱全量施肥栽培が効果的であることを示している。谷山⁸⁾は各地の農業試験場による調査結果を整理し、水田からのSSの年間差引流出負荷量が $11 \text{ g/m}^2 \sim 420 \text{ g/m}^2$ と幅のある値となったことを示している。しかしながら、これらの調査では、代かき期には連日採水が行われているものの、その後は週に1回あるいは数回の採水頻度となっている。水田でのSSの収支については、沈砂池的機能が期待されている一方で、継続的な連続観測が行われておらず、観測に基づく知見の蓄積が求められている。

著者らは、畑地からの赤土流出対策の一環として(石垣市⁹⁾)、沈砂池的機能が期待されている沖縄県石垣島の水田を対象として、SS成分の収支の観測を行ってきた。これまでに、松井ら¹⁰⁾は6降雨出水イベントにおける手動採水の結果に基づき、水田に流入してくる土砂の多くは水田内で沈降し、より粒径の細かい土砂が水田内で多量に発生し流出していること、対象水田が浮遊土砂のソースとして機能している可能性が高いことを示した。本報では、同水田を対象として濁度計を用いた連続観測により得られた結果をもとに、降雨出水時における対象

水田からの浮遊土砂流出の実態を整理するとともに、土壌侵食量予測式として確立されているUSLE (Universal Soil Loss Equation) が水田からの浮遊土砂流出量の予測式として適用できるかどうかについて検討した。なお、SS成分の多くが有機物でなかったことから、本報ではSS成分を浮遊土砂として扱う。

2. 現地観測

(1) 対象水田

観測対象とした水田は、石垣島中央部に位置する総面積46 aの水田群 (図-1) である。この水田群 (以下、水田とする) は4筆の水田で構成され、水田間は田越し灌漑が行われている。水田間の高低差は10 cm以下であり、上流側水田の水尻部と下流側水田の水口部は緩やかな傾斜で繋がっている。水田P1の水口付近の田面と水田P4の水尻付近の田面の高低差は18 cmとなっている。水田の水源である宮良川水系アヤマシ川の集水域では、牧草地が多いものの、サトウキビ、パイナップルの栽培が行われており、出水時には赤土流出が発生している。アヤマシ川からの取水は河川を自然分する形で行われているため、出水時には赤土を含んだ濁水の一部がコンクリート水路に流入する。そして、対象水田では比較的粗放な水管理が行われ、雨天時にも水口が開いていることが多く、水路に流入した濁水の水田への流入が頻繁に確認できる。

観測水田では、概ね図-2に示す営農スケジュールで二期作が行われており、一期作目、二期作目ともに中干しまでは湛水を維持する水管理、中干し以降は間断灌漑が行われている。

(2) 観測方法

観測水田における浮遊土砂の収支を把握するため、

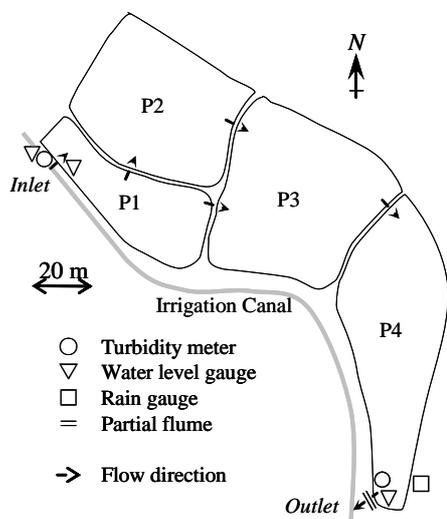


図-1 対象水田

図-1にて浮遊土砂濃度、流量、降雨量の観測を行った。

水田での土砂流入量、土砂流出量は、水口および水尻における浮遊土砂濃度と流量の積で求めた。浮遊土砂濃度の測定には濁度計 (TC-3000, オプテックス) を用い、10分間隔での測定値を別途求めた換算式により浮遊土砂濃度に換算した。なお、この換算式の導出に際し、浮遊土砂濃度はJIS K 0102に則り、ガラス繊維濾紙 (GS-25, 東洋濾紙) を用いて吸引濾過法により求めた。水口での水田への流入量 (分水量) は観測を通じて定めたH-Q曲線を用いて算出し、水尻にはパーシャルフリュームを設置し、水田からの流出量を測定した。流入量、流出量ともに水位の観測は10分間隔で行った。

(3) 観測期間

現地観測は2006年3月より2007年11月までの約1年半行った。

3. 観測結果

(1) 観測イベント

Wischmeier and Smith¹¹⁾ によるUSLEの降雨イベントの扱いに倣い、降雨開始から降雨終了後に6時間無降雨状態が継続した時点までを一雨とした。期間中、観測できた降雨イベントは2006年に52イベント、2007年は30イベントで、計82イベントであった。観測できたイベントの総降雨量を表-1にまとめる。観測期間中、台風や強雨により総降雨量が100 mmを超える降雨イベントが数回あったが、いずれも観測完了には至らなかった。観測できた降雨イベントのうち、水田への流入、水田からの流出がともにあったイベントは59イベント、流出のみあったが16イベント、流入のみが4イベント、ともに発生しなかったイベントは3イベントあった。また、82イベント中78イベントが灌漑期間中のイベントとなっている。

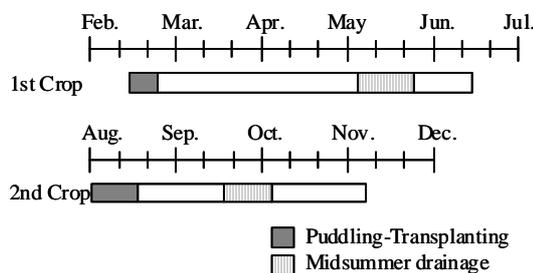


図-2 作期スケジュール

表-1 観測したイベントの総降雨量

RA (mm)	< 1	< 5	< 12.7	< 30
Number of event	23	30	10	11
RA (mm)	< 50	< 100	100 <	
Number of event	4	4	0	

RA: Rainfall Amount (mm)

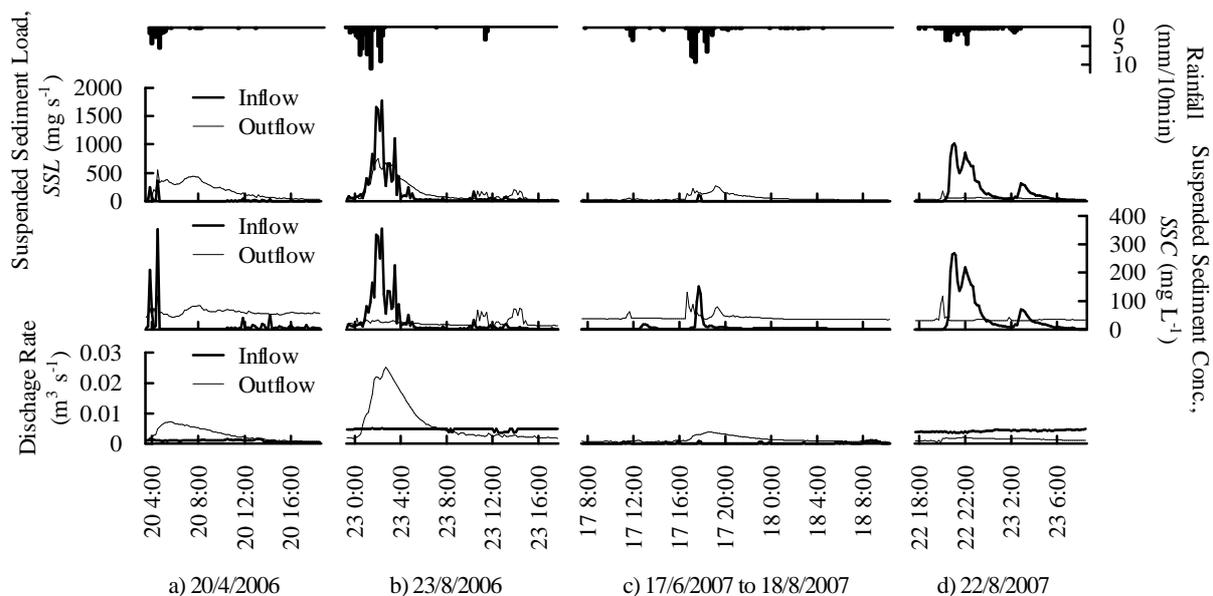


図-3 観測結果の一例

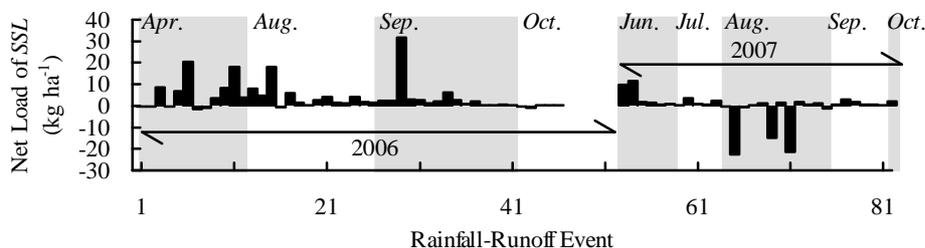


図-5 観測イベントにおける差引土砂量

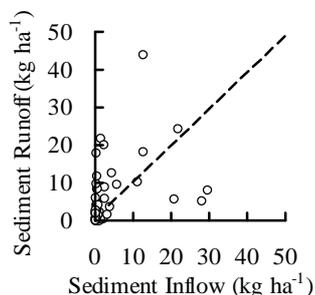


図-4 イベントごとの総土砂流入量と総土砂流出量

(2) 観測結果

観測結果の一例を図-3に示す。b)に示した降雨出水イベントの総降雨量72.4 mmに対して、d)に示したイベントの総降雨量は36.5 mmであった。両イベントでの流入水の浮遊土砂濃度SSCを比べると、ほぼ同様の濃度、変動傾向となっていることがわかる。水路からの取水はオリフィスで行われているため、流入水量もほぼ同量となっている。流入水量がほぼ同じで、濃度および濃度変動も類似していることから、b)、d)の両イベントでの土砂流入量SSLの総量は、それぞれ22.3 kg/ha、20.7 kg/haと類似した結果となっている。これに対して、両イベントでの総土砂流出量は、b)に示したイベントで24.9 kg/ha、d)のイベントで5.8 kg/haとなり、b)での流出量がd)の流出量を大きく上回っている。流出水の浮遊土砂濃度SSCは

両イベントともに概ね30 mg/L前後で推移していることから、総土砂流出量の相違は流出水量の差に起因している。b)のイベントでの流出率（流出水量を流入水量と降雨量の和で除し、得られた値）が69.5%であるのに対して、d)での流出率は14.8%であった。流出率の差が生じた原因として総降雨量の多寡を無視することはできないが、水田内で降雨を貯留することにより、降雨出水時の土砂流出を抑制できる可能性があることを示唆している。

イベントごとの浮遊土砂濃度SSCの平均を求め、さらに全イベントでの平均を求めたところ、流入水の浮遊土砂濃度が 9.2 ± 11.8 mg/L（平均±標準偏差）となるのに対して、流出水の平均は 55.4 ± 60.2 mg/Lと、流出水の方が高い値となった。流入水および流出水がともに発生していた59イベントのうち、平均濃度で流出水が流入水を上回っていたイベントも57回あった。なお、流入水および流出水の最大浮遊土砂濃度は、それぞれ1105.0 mg/L、993.6 mg/Lであった。

(3) 浮遊土砂収支

イベントごとの総土砂流入量と総土砂流出量の関係を図-4に、総土砂流出量から総土砂流入量を差し引き得られる差引土砂量を観測順に並べたものを図-5に示す。全イベントのうち、総浮遊土砂量で流出量が流入量を上回ったのが64イベント（流出のみ発生したイベントも含

む), 流入量が上回ったのが14イベント(流入のみ発生したイベントも含む), とともに発生しなかったのが4イベントであった. 2006年の52イベントでは, 総浮遊土砂量で流入量が流出量を上回ったイベントが8イベントあったものの, その差は僅かであり, 対象水田は概ね浮遊土砂流出のソースとして機能していた. これに対して, 2007年の30イベントでは, 流出量が上回ったのが24イベントあり, 流入量が上回ったのが6イベントあった. 流入量が上回ったイベントの発生割合としては, 両年で順に15%, 20%とほぼ変わらないものの, 図-5から2007年には3イベントで差引土砂量が-20kg/ha前後と大きなマイナスとなっていることがわかる. これら3イベントはいずれも2007年8月に発生していることから, 2006年, 2007年の両年8月で観測された26イベント(2006年: 14イベント, 2007年: 12イベント)における総降雨量と流出率の関係を図-6に示す. 総降雨量に多寡はあるものの, 2006年の平均流出率 $28 \pm 18\%$ (平均 \pm 標準偏差)に対して, 2007年の平均流出率は $11 \pm 5\%$ と低下している. 両年とも8月上旬に二作目の代かき田植えが行われたことから, 両年での水田の諸条件に大きな差があることは考えにくい. それにも関わらず平均流出率に乖離が生じたのは, 2007年には水尻(流出部)で高い湛水深を維持できるような管理が行われていたためと推測される.

4. USLEの適用可能性

松井ら¹⁰⁾は同水田における降雨イベント時の流入水, 流出水の粒径別土砂量を整理し, 粗粒子が多い流入土砂の多くは沈降し, 細粒子が多い流出土砂は水田内で新たに浮遊した可能性が高いことを示した. そこで, 流出土砂の多くは水田内で発生したものととして, 差引土砂量で

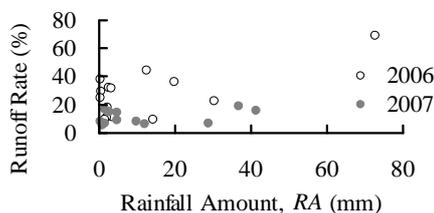


図-6 2006年8月と2007年8月の流出率

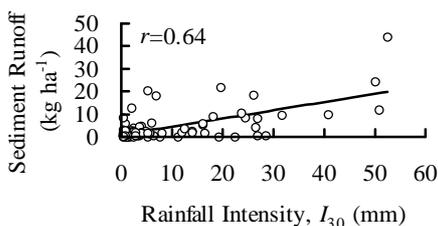


図-8 降雨強度と総土砂流出量

はなく, 水田からの総流出土砂量に対してUSLEの適用可能性を検討した.

(1) 降雨量と土砂流出量

土壌侵食量予測式として確立されているUSLEは式(1)により表され, 総降雨量が12.7 mm以上, もしくは15分間降雨強度が6.4 mm以上の降雨に対して適用される.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

A: 予測侵食量 (kg m^{-2}), R: 降雨係数 ($\text{J m h}^{-1} \text{m}^{-2}$), K: 土壌係数 ($\text{kg h J}^{-1} \text{m}^{-1}$), LS: 地形係数 (-), C: 作物・管理係数 (-), P: 保全係数 (-)

Kim *et al.*¹²⁾は, 作物・管理係数Cを稲の生育に応じて変化させる係数, 保全係数Pを代かきによる攪拌の影響を表す係数として, USLEの水田への適用を図っている. 吉迫ら¹³⁾は水田面積率がほぼ50%以上となる複数の小集水域での測定結果をもとに, 土砂流出量と流出水量, 降雨量, EI_{60} 値(一連降雨の運動エネルギーと60分ピーク降雨強度)の相関分析を行い, 土砂流出量が降雨量や EI_{60} 値との間に高い相関が得られたことを示している.

水田では代かき期に土壌が攪拌され, 侵食されやすくなるため, Kim *et al.*のように保全係数を変化させる扱いが望まれる. しかし, 詳細な検討に十分なデータを蓄積できていないことから, ここでは総降雨量, 降雨強度 I_{30} , 降雨係数Rと総土砂流出量の関係について重点的に検討した.

総降雨量と総土砂流出量の関係を図-7に示す. 総降雨量が12.7 mmを超えると, 土砂流出量が多くなる傾向がある. USLEの基準が畑地同様に水田における侵食発生の尺度としても適用できる可能性があることを示唆している. 次に, 降雨強度と総土砂流入量の関係を図-8に示

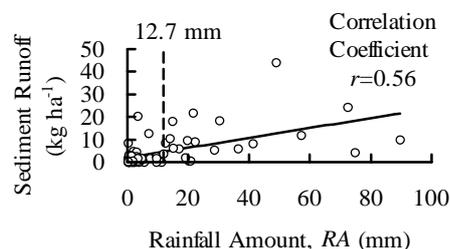


図-7 総降雨量と総土砂流出量

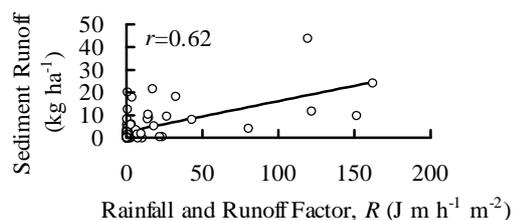


図-9 降雨係数と総土砂流出量

す。降雨強度 I_{30} と総土砂流入量の相関係数は0.64となり、総降雨量との相関係数0.56より高い相関を示した。しかし、降雨強度 I_{30} が20 mm/hr超でも、ほとんど土砂流出が発生しなかったイベントもある。こうしたイベントでは降雨の大部分もしくは全量が水田に貯留されたものと考えられる。最後に、降雨係数 R と総土砂流出量の関係を図-9に示す。総降雨量、降雨強度と同様に、降雨係数 R が大きくなるにつれ、総土砂流出量も多くなる傾向（相関係数0.62）が認められるものの、降雨強度より高い相関を示すには至っていない。

土砂流出があった75イベント中USLEの降雨の基準を満たした21イベントにおける、総土砂流出量と総降雨量、降雨強度 I_{30} 、降雨係数 R を表-2に示す。降雨を表すいずれの指標においても、USLEの降雨の基準を適用する前と比べて相関係数が低下している。

(2) 流出水量と土砂流出量

Gassman *et al.*¹⁴⁾が整理したSWAT (Soil and Water Assessment Tool) では、土壌侵食予測式にUSLEではなく、Williams *et al.*¹⁵⁾により開発されたMUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation, 式(2)) が採用されている。

$$A = 11.8 \cdot (R_f A \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

$R_f A$: 総流出水量 (mm) , q_p : ピーク流出水量 (m^3/s)

表-2 総降雨量・降雨強度と総流出土砂量の相関係数

	$R_f A$ (mm)	I_{30} ($mm h^{-1}$)	R ($J m h^{-1} m^{-2}$)
Erosive Rainfall			
Events* ($N=21$)	0.304	0.517	0.502
Whole Events ($N=75$)	0.563	0.642	0.619

*Erosive Events: $R_f A \geq 12.7$ mm or Rainfall Intensity ≥ 6.4 mm (15 min)⁻¹

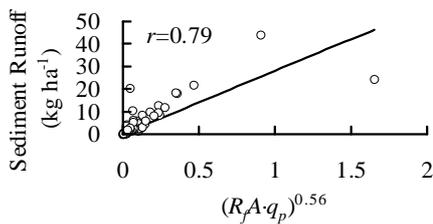


図-10 流量係数と総土砂流出量

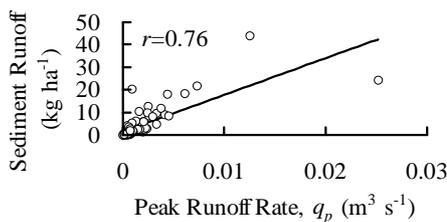


図-12 ピーク流出水量と総土砂流出量

MUSLEとUSLEの大きな違いとして、USLEの降雨係数に相当する項が流出高とピーク流出水量の積の0.56乗（本報では流量係数とする）となっている点が挙げられる。この流量係数と観測した総土砂流出量の関係を図-10に示す。相関係数が0.79となり、(1)で述べた降雨に関係するいずれの指標よりも高い値となっている。

流量係数と総土砂流出量に高い相関関係が得られたことから、流量の指標として総流出水量 $R_f A$ 、ピーク流出水量 q_p を設定し、総土砂流出量との関係を検討する。

総土砂流出量と総流出水量との関係を図-11に、ピーク流出水量との関係を図-12に示す。総流出水量との相関係数が0.85、ピーク流出水量との相関係数が0.76と高い相関関係を示している。なかでも、総流出水量との相関係数0.85はこれまでの指標と比べて、最も高い値となっている。さらに、(1)で述べたように、代かき田植期には土壌が人為的に攪拌され侵食されやすくなることが考えられる。そこで、8月上旬を代かき田植期として、代かき田植期とそれ以外の時期（普通期）に整理した結果が図-13である。観測した2年間で該当するイベントは2006年に7イベント、2007年に2イベントで計9イベントである。普通期と同様の流出傾向を示すこともあるが、代かき田植期に降雨イベントがあると、普通期に比して流出土砂量が大きくなる傾向があることがわかる。これら代かき田植期の9イベントをのぞくと、総土砂流出量と総流出水量の相関係数は0.89へと向上する。代かき田植期の9イベントでの相関係数は0.51と低くなるが、人為的に土壌が攪拌されていることを勘案すると、相関係数の低下はやむを得ないものと考えられる。

(3) USLEの適用可能性

USLEが適用されることが多い畑地では降雨が圃場内で貯留されることなく、圃場外に流出していく。これに対して、水田では水尻の管理状況と降雨開始時の湛水深

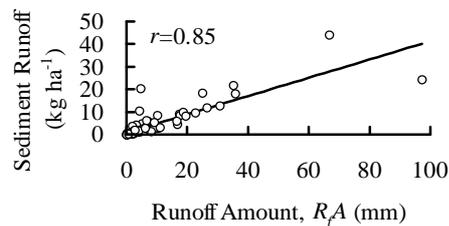


図-11 総流出水量と総土砂流出量（全期）

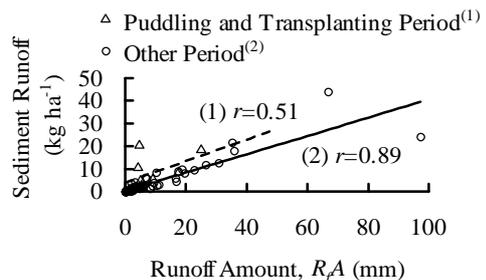


図-13 総流出水量と総土砂流出量（期別）

次第では、降雨が圃場外に流出せずに水田内で貯留されることがある。水田での土砂流出量の検討に際し、降水量の指標ではなく、流出水量の指標の方が総流出土砂量と高い相関関係を示したのは、こうした水の貯留・流出機構の違いを反映したものと考えられる。そのため、水田からの土砂流出量を予測するモデリングとしては、降雨量を入力するUSLEに水田での水の貯留・流出機構を反映させることも考えられるが、水収支モデルにより流出水量を計算した後に、その計算された流出水量を用いて浮遊土砂量を算出するモデリングが適していると考えられる。

5. おわりに

本研究では、石垣島に位置する水田を対象として、土砂流入量、土砂流出量の連続観測を行い、降雨出水イベントにおける水田での土砂収支および土砂流出量予測へのUSLEの適用可能性について検討した。本研究の結果は、以下のようにまとめることができる。

- 1) 降雨の流出率が高いと水田は土砂流出のソースとなることがある一方で、流出率を低く抑えることができれば、水田に沈砂池の機能を期待できる。
- 2) 降雨量を入力する従来型のUSLEでは水田からの土砂流出量を予測することが難しい。土砂流出量を予測するためには、水田での水の貯留機構を反映したモデルを用いて、総流出水量を求めた後に、総土砂流出量を求めるモデリングが望ましい。

本研究では、降雨出水時の土砂収支について整理したが、水田は無降雨時も灌漑され、水尻からの流出が確認されることがある。今後は、そうした点を勘案して灌漑期を通した土砂収支について検討していきたい。

謝辞：現地観測に際し、水田での観測を快諾して頂いた農業者兼松正純氏、現地観測に際し多大なご支援を頂いた干川明氏および国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点島嶼管理分野のスタッフの方々、宇都宮大学農学部大澤和敏准教授、宇都宮大学大学院松本佑介君に心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 谷山一郎: 農林地の持つ土壌侵食防止機能, 農業および園芸, 74(4), pp.445-451, 1999.
- 2) 長谷部均: 陸が変われば海も変わる—開発行為に伴うサンゴ礁環境の変化—, 季刊沖繩, 24, pp.1-11, 2003.
- 3) 佐藤紀男, 田口明広: 福島県の灰色低地土水田における代

かき後の田面水の水質変化, 日本土壌肥科学雑誌, 71(6), pp.866-873, 2000.

- 4) 山田佳裕, 井桁明丈, 中島沙知, 三戸勇吾, 小笠原貴子, 和田彩香, 大野智彦, 上田篤史, 兵藤不二夫, 今田美穂, 谷内茂雄, 陀安一郎, 福原昭一, 田中拓弥, 和田英太郎: しろかき期の強制落水による懸濁物, 窒素とリンの流出—圃場における流出実験—, 陸水学雑誌, 67(2), pp.105-112, 2006.
- 5) 金子文宣, 山本幸洋, 高橋 強: 大区画水田における排水特性および環境保全型水稲栽培の環境影響評価, 千葉県農業試験場研究報告, 40, pp.43-49, 1999.
- 6) 園田敬太郎, 徳田裕二, 岡本佐知子, 田中靖志, 北野亮, 大橋恭一: 水田群からの栄養塩類発生負荷量調査 (第1報) 水田作付期間の水田群栄養塩類発生負荷量について, 滋賀県農業試験場研究報告, 38, pp.57-65, 1997.
- 7) 金木亮一, 久馬一剛, 稲垣ちずる, 小谷廣通, 須戸幹: 無代かきおよび育苗箱全量施肥栽培水田における流出負荷量の削減, 日本土壌肥科学雑誌, 71(4), pp.502-511, 2000.
- 8) 谷山一郎: VIII 農林地からの土壌流出に伴うリン流出をモニタリングする, 環境負荷を予測する—モニタリングからモデリングへ— (日本土壌肥科学会監修), pp.127-142, 博友社, 2002.
- 9) 石垣市: 石垣市農村環境計画, pp.58-59, 2002.
- 10) 松井宏之, 福永隆二, 清水智: 石垣島の水田における降雨出水時の浮遊土砂収支, 農業農村工学会論文集, 252, pp.97-102, 2007.
- 11) Wischmeier, W.H. and Smith, D. D.: Predicting rainfall-erosion losses, Agricultural Handbook No. 537, USDA, 1978.
- 12) Kim, S. M., Im, S. J., Park S. W., Lee, J. J., Benham, B. L. and Jang, T. I.: Assessment of Wastewater Reuse Effects on Nutrient Loads from Paddy Field Using Field-Scale Water Quality Model, Environmental Modeling and Assessment, 13, pp.305-313, 2008.
- 13) 吉迫宏, 小川茂男, 島武雄, 塩野隆弘: 水田における土壌流出と降雨の関係, 平成20年度農業農村工学会大会講演要旨集, pp.572-573, 2008.
- 14) Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., and Arnold, J. G.: The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, And Future Research Directions, Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(4), pp.1211-1250, 2007.
- 15) Williams, J.R., Jones, C. A., and Dyke P. T.: A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity, Trans. ASAE, 27, pp.129-144, 1984.

(2008. 9. 30受付)