

# 降雨量と土壌流出量予測方法

比嘉榮三郎

## The Estimate method of Soil loss with relation to Rainfall

Eisaburo HIGA

要旨：パイン畑やサトウキビ畑など農地から流出する土壌量（実測量）と降雨量・濃度式（降雨量と濁水の濃度の積）で推算した土壌流出予測量を比較検討した。一連降雨の実測量に対し予測量にバラツキがみられるが、USLE式による予測量（全体量で実測量の約70～85%の範囲）よりも良好な結果が得られた。降雨時の一連降雨量や濁水濃度の測定から土壌流出量予測の可能性が示唆された。

**Key words**：降雨量，濁水濃度，土壌流出，農地，国頭マ - ジ，島尻マ - ジ

### はじめに

一般的に農地などから降雨時に流出する土壌量を把握するには、濁水の流量（表面流量）や濃度の測定が必要である。しかしながら、流量や濁水濃度（通常、濁度を測定）を測定するには機器、施設の設置だけでなく維持管理を必要とし、現地に対応するにはかなり難しくなっている。

農地や工事現場などで、降雨時の土壌流出量を把握することができれば、より効果的な濁水対策方法を検討する上で非常に有効であり、簡易な予測方法の開発が望まれる。これまでも筆者らは、農地や開発事業などから流出する濁水の濃度測定を実施しており、これらのデータと現地でも比較的観測が容易な降雨量を用いた土壌流出予測方法の検討を行っている。

今回は、平成12年度流域赤土流出防止対策調査報告書（沖縄県）<sup>1)</sup>のデータを用いて、一連降雨の土壌流出実測量と降雨量や濁水濃度との関連性について解析と検討を行ったので報告する。

### 方法

#### 1. 土壌流出量の予測方法

土壌流出量を予測する式として、一般的に用いられているUSLE式<sup>2)</sup>やLQ式<sup>3)4)</sup>がある。USLE式は降雨係数、土壌係数、地形係数、保全係数、作物係数の5係数の積で与えられている。

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot P \cdot C$$

A：土壌流出量（t/ha）

R：降雨係数    K：土壌係数    LS：地形係数

P：保全係数    C：作物係数

LQ式は流量との関係から一般的に次式のようになっている。

$$L = A Q^B$$

L：土壌流出量    Q：流量    A, B：係数

LQ式では流量から土壌流出量を予測することになっているが、現地などでは流量の測定自体が難しく、係数A, Bも現地状況などで変化し決定するのが容易ではない。そこで今回は、流量の代わりに一連降雨中の降雨量と濁水の最高濃度の積を用い、土壌流出実測量との関連性について比較検討した。

$$A = (R \cdot C)$$

A：土壌流出予測量（t/ha）

R：一連降雨の降雨量

一連降雨とは降雨開始後、無降雨の状態が6時間以上続くまでの降雨とした。

C：一連降雨中の濁水の最高濃度

，：土壌の種類などによって決まる係数

#### 2. 解析に用いたデータ

平成12年度流域赤土流出防止等対策調査（環境庁委託業務結果報告書）の測定データを用いた。この報告書では、主に農地での防止対策の有無による土壌流出量の違いを報告しており、USLE式などによる土壌流出予測は行っていない。測定データから、一連降雨の降雨量や土壌流出量を計算し解析した。

各地区の栽培状況などは、表1のとおりである。また、

測定期間内で、機器故障等による欠測値や報告書で収穫時の土壌かく乱による異常値として記載されているデータなどを除いた合計量を表2に示した。

表1. 各地区の栽培状況。

	作物	土壌	面積(m <sup>2</sup> )
東村	パイン	国頭マージ	21,100
恩納村	サトウキビ	国頭マージ	1,924
石垣市	サトウキビ	島尻マージ	3,986

表2. 各地区の測定データ。

	測定期間	降雨量(mm)	土壌流出量(t/ha)
東村	2000.7 ~ 2001.3	1,777	7.4
恩納村	1999.12 ~ 2001.3	1,647	4.0
石垣市	1999.12 ~ 2001.1	1,035	1.7

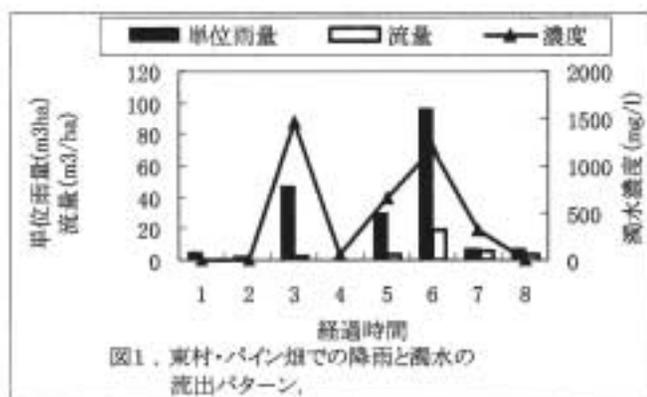
東村では、9ヶ月間の測定期間中に37回、恩納村では16ヶ月間に30回、石垣市では14ヶ月間に34回の一連降雨が観測されている。

## 結果と考察

### 1. 東村における土壌流出予測

#### a 降雨と濁水の流出パターン

雨滴が土壌表面に衝突し、土粒子が分散され表流水が発生すると土壌流出が始まる。降雨直後は表流水の発生はなく、降雨が続くと表流水が発生し始め、降雨強度の最高時か、すぐ後に流量（表面流量）の最大ピークが現れる（図1）。



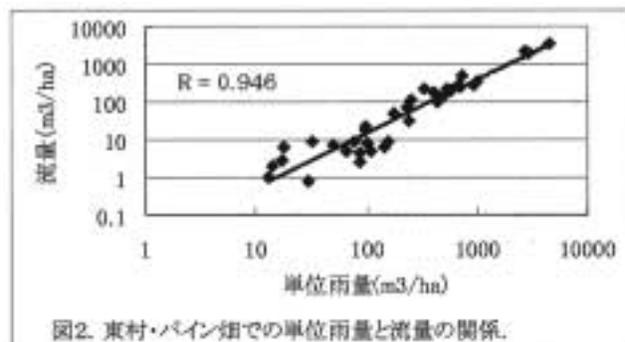
この図で単位雨量とは、1 haに降った雨の容積・k /haで、流量は1 haから流出した表面流量・k /haで示している。

濁水の濃度は、濁水発生時に最大ピーク（ファーストフラッシュ）を示す場合と、降雨強度（雨の強さで1時間あたりの降雨量）が最も高くなる時に最大ピークを示すパターンがある。一連降雨37回の測定のうち濁水発生時に濃度が高くなるのが18回（約50%）と最も多く、降雨強度の最高時が15回（約40%）、その他4回（約10%）

となっている。

#### s 単位雨量と流量の関係

一連降雨の単位雨量と流量（表面流量）の関係を示したのが図2である。

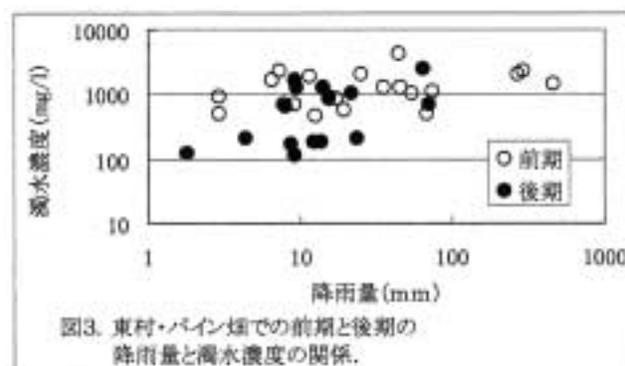


単位雨量が多くなると、流量も増加する。

単位雨量は10~4,670k /ha にあり、広範囲の単位雨量に対して相関性（R=0.946）が高くなっている。また、単位雨量が一定である場合、測定前期（7~12月）と後期（1~3月）の流量を比較してもその差はほとんどみられない。

#### d 降雨量と濁水濃度の関係

一連降雨の降雨量と濁水の最高濃度の関係を示したのが図3である。



濁水の最高濃度は、2000年11月の4,210mg/lで、この時の一連降雨量は45 mmとなっている。降雨量が多くなっても濁水濃度は増加せず相関性はみられない。濁水濃度は、降雨強度やファーストフラッシュなど他の要因の影響を強く受けるためだと考えられる。

測定前期（7~12月）の濁水の濃度範囲は463~4,210mg/lにあり幾何平均が1,120mg/lとなる。測定後期（1~3月）はそれぞれ113~2,410mg/l、457mg/lとなり全体的に後期は濃度が低くなっている。

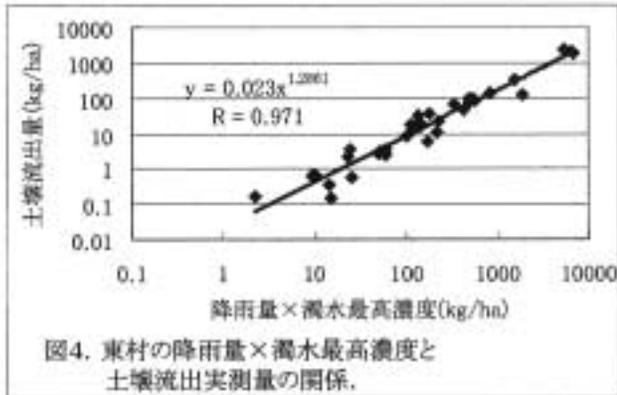
また、一連降雨量が等しい場合の測定前期と測定後期の濁水濃度を比較しても、測定後期の濃度が若干低くなる傾向にある。これは、測定後期には表土の被覆率が高くなり、降雨による土壌分散量が少なくなるためであ

る。

f 降雨量・濃度の積と土壌流出実測の関係

流量は、降雨量との相関が高く、逆に濃度は降雨量よりも作物の被覆率との関係が強くなっている。

そこで、一連降雨の降雨量と濁水の最高濃度の積と、土壌流出実測量との関係を示したのが図4である。



一連降雨の土壌流出実測量が0.1～3,000kg/haと広範囲にわたって、降雨量・最高濃度の積と相関性(R=0.971)が高く、次のような関係式が得られる。

$$Y = 0.023 X^{1.286}$$

Y：土壌流出予測量 X：降雨量と濁水濃度の積

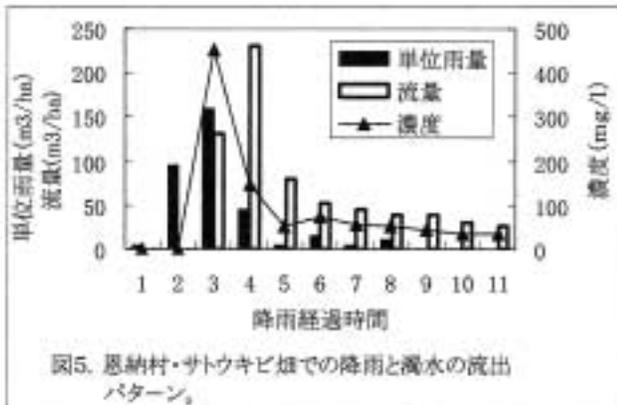
一連降雨中の降雨量と濁水濃度が測定できれば、この降雨量・濃度式を使って土壌流出量を予測することが可能となる。

実際に現場などで、降雨時に流出する濁水の最高濃度を捉えるためには、次のようなサンプリング方法が考えられる。通常、土粒子は図1のように降雨初期にファーストフラッシュを起こし濁水濃度が高くなるから、流出初期の段階での採水や、降雨強度が強くなった後の濁水採取が必要となる。

2. 恩納村における土壌流出予測

a 降雨と濁水の流出パターン

降雨時の濁水の流出パターンを示したのが図5である。栽培作物はサトウキビであるが、東村同様、降雨強度

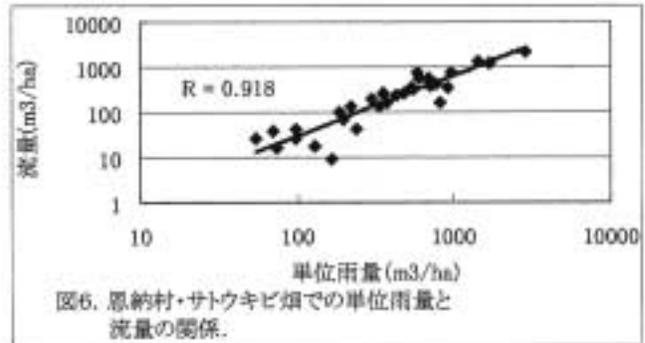


の最高時かすぐその後に流量の最大ピークが出現する。

濁水濃度は、発生時か最高降雨強度の後に最大ピークを示すのが多い。一連降雨30回のうち22回(約70%)が発生時で、8回(約30%)が最大降雨強度後になっている。

s 単位雨量と流量の関係

一連降雨の単位雨量と流量の関係を示したのが図6である。



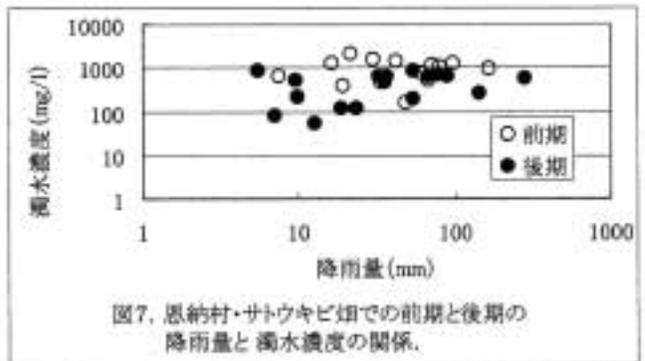
サトウキビ植付け3ヶ月後から収穫期までの栽培期間を通し、単位雨量が多くなると流量も増加する傾向にあり高い相関(R=0.918)がみられる。

栽培前期(1999年11月～2000年8月)と後期(2000年9月～2001年3月)の流量を比較した場合、作物の生長による流量の差はほとんどみられない。

流量は、作物による表土の被覆率にあまり影響を受けず、降雨量との相関性が高くなっている。

d 降雨量と濁水濃度の関係

一連降雨の降雨量と濁水の最高濃度の関係を示したのが図7である。



降雨量が多くなっても濁水濃度の上限値はほぼ同じような値を示し、相関性はみられない。

栽培前期の濁水の濃度範囲は162～1,960mg/lで幾何平均が811mg/lに対し、栽培後期のそれぞれの値は、50～857mg/l、325mg/lとなり全体的に濃度が低くなっている。また、同じ降雨量で栽培前期と後期の濁水濃度を比較した場合でも、後期の濁水濃度が低くなる傾向にある。こ

の栽培後期に濁水濃度が低くなるという現象は、東村と同様な傾向となっている。

f 降雨量・濃度の積と土壌流出実測の関係

一連降雨の降雨量と濁水の最高濃度の積と、土壌流出実測量との関係を示したのが図8である。

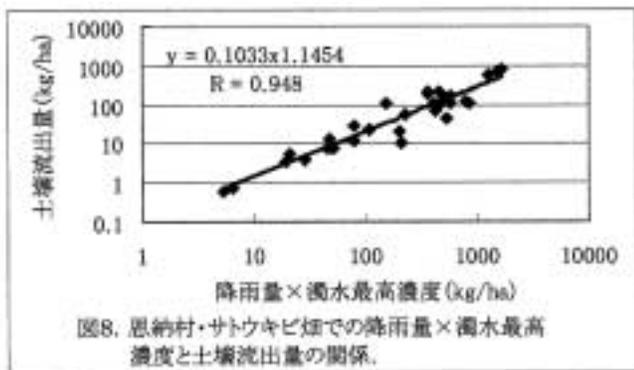


図8. 恩納村・サトウキビ畑での降雨量×濁水最高濃度と土壌流出量の関係。

東村とは栽培作物が異なるが、実測量が多くなると降雨量・最高濃度の積も同様に増加するため、実測量との相関性 (R=0.919) はかなり高くなっている。

3. 石垣市における土壌流出予測

a 降雨と濁水の流出パターン

降雨時の濁水の流出パターンを示したのが図9である。

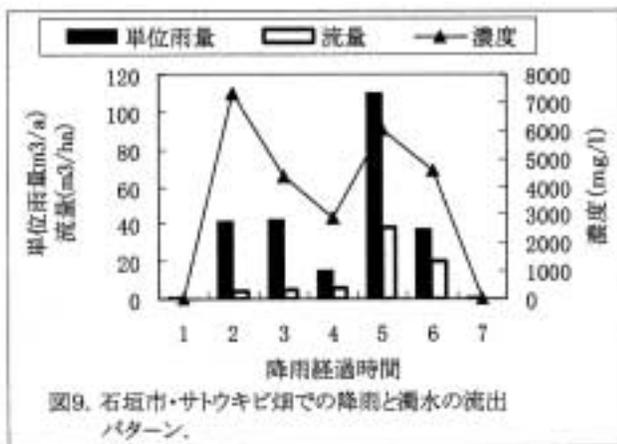


図9. 石垣市・サトウキビ畑での降雨と濁水の流出パターン。

土壌は浸透性の高い島尻マ - ジであるが、流量は降雨強度の最大時かその後に最大ピークを示し、国頭マ - ジと同じような流出パターンを示す。

濁水濃度に関しても、一連降雨34回のうち濁水発生時に26回 (約75%)、最大降雨強度の後に8回 (約25%) と東村、恩納村と同じようなパターンを示す。

(2) 単位雨量と流量の関係

一連降雨の単位雨量と流量の関係を示したのが図10である。

サトウキビ植付け3ヶ月後から収穫期までの栽培期間を通し、単位雨量が多くなると流量も多くなる傾向を示し相関 (R=0.783) も高くなっている。

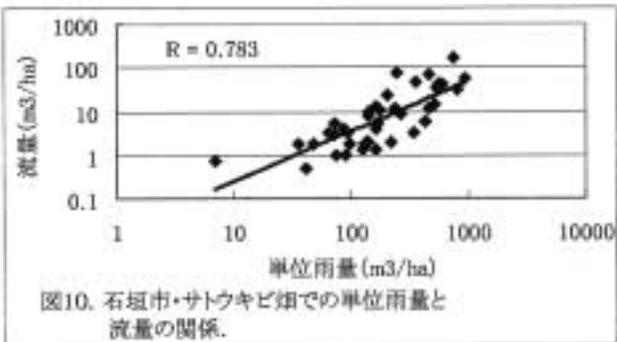


図10. 石垣市・サトウキビ畑での単位雨量と流量の関係。

単位雨量に対する流量の割合を流出率とした場合、流出率は0.8% ~ 30.4%の範囲内にあり加重平均は7.2%となるが、東村の55.5%や恩納村の64.6%に比べかなり低くなっている。

栽培前期 (1999年12月 ~ 2000年8月) と後期 (2000年8月 ~ 2001年1月) の流量を比較した場合、後期のデータ数は7個と少ないがその差はほとんどみられない。

s 降雨量と濁水濃度の関係

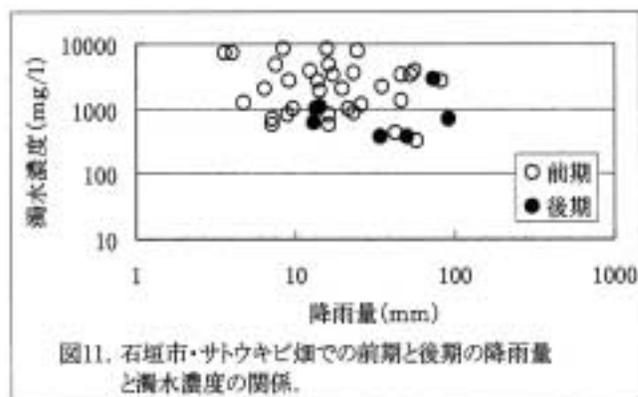


図11. 石垣市・サトウキビ畑での前期と後期の降雨量と濁水濃度の関係。

一連降雨の降雨量と濁水の最高濃度の関係を示したのが図11である。

栽培後期のデータ数が少ないが前期と後期の濁水濃度を比較した場合、同じ降雨量では前期が高くなる傾向にある。

特に、植付け後すぐの12月は、降雨量が10mm以下でも濁水濃度は7,000 ~ 8,000mg/lと栽培期間を通して最も高い値となっている。これはサトウキビの被覆率が低いことや、11 ~ 12月に行なわれるばい土 (サトウキビの根元に土を寄せる作業) などによる土壌のかく乱が原因だと考えられる。

d 降雨量・濃度の積と土壌流出実測の関係

一連降雨の降雨量と最高濃度の積と、土壌流出実測量の関係を示したのが図12である。

降雨量・濃度の積と土壌流出実測量との相関性 (R=0.882) は高く、島尻マ - ジ土壌でも濁水の最高濃度の測定から、土壌流出量を予測することが可能となる。

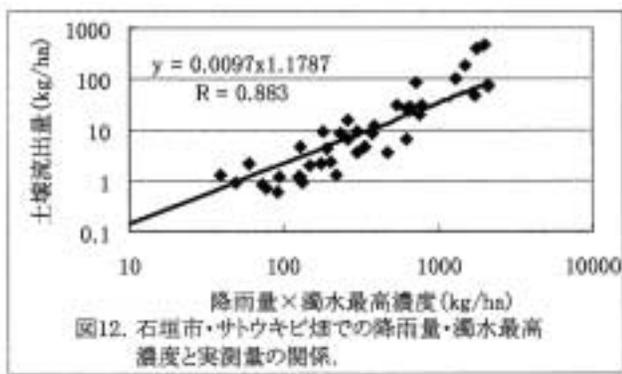


図12. 石垣市・サトウキビ畑での降雨量・濁水最高濃度と実測量の関係。

#### 4. 3地区の比較

##### a 濁水の流量

3地区の単位雨量と流量の関係を比較したのが図13である。

単位雨量が等しい場合、流量は恩納村と東村がほぼ同程度になるのに対し、石垣市は前2地区に比べかなり低くなっている。恩納村と東村の差異は、主に栽培作物の違いや被覆率が考えられ、石垣市は浸透性の高い島尻マ - ジであり土壌の違いが主な原因になっている。

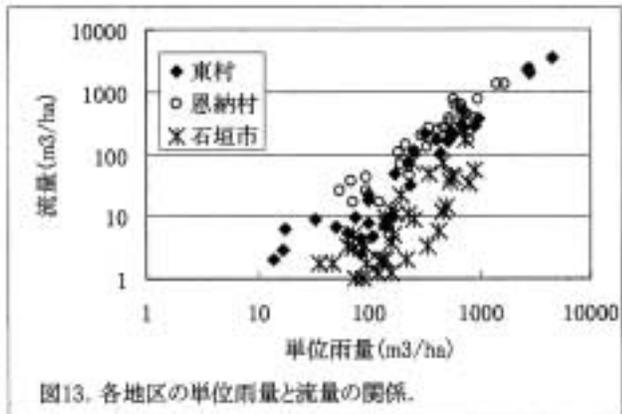


図13. 各地区の単位雨量と流量の関係。

##### s 降雨量と濁水濃度

3地区の一連降雨量と濁水濃度を比較したのが図14である。

濁水濃度は、石垣市のサトウキビ畑が最も高く、東村のパン畑、恩納村のサトウキビ畑の順に低くなっている。これまでの当研究室の調査<sup>5)6)</sup>では、降雨時に農地から流出する濁水の最高濃度は、国頭マ - ジが約1万 mg/l であるのに対し、島尻マ - ジでは約0.5万 mg/l と国頭マ - ジが高くなっている。これらの数値は畑が裸地の状態か、植付け後すぐに発生する濁水の測定データとなっている。

しかし今回のデータでは、島尻マ - ジ土壌の濁水濃度が高くなっているが、これは、サンプリング時期の違いに大きな原因がある。石垣市のサトウキビ畑では、植付け後3ヶ月までのデータ数(7回)が多く、この時期の濁水濃度が最も高くなっている。さらに、観測データは

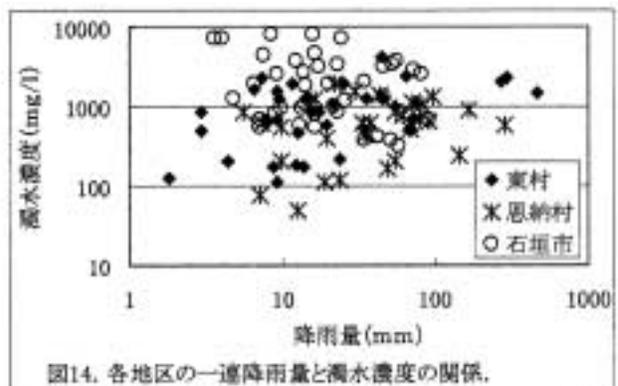


図14. 各地区の一連降雨量と濁水濃度の関係。

栽培前期に集中している。

これに対し国頭マ - ジ土壌である恩納村のサトウキビ畑では、植付け後半年間のデータは1度だけで植え付け初期のデータがほとんどない。また、パン畑は、植付け後3年前後であり濁水濃度が低くなる時期のデータとなっているためである。

このように裸地の部分が多い栽培初期には、10mm前後の降雨量でも濁水濃度が高くなるため、降雨量との相関性はほとんどみられない。

##### d 降雨量・濁水濃度と土壌流出量の関係

各地区の一連降雨の降雨量に濁水の最高濃度を乗じた値と、土壌流出量(実測量)を比較したのが図15である。

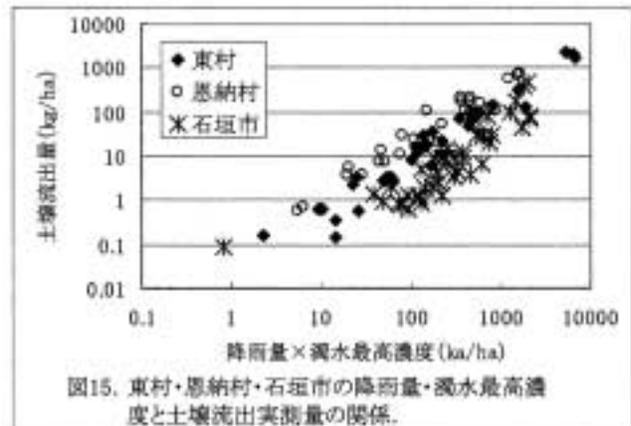


図15. 東村・恩納村・石垣市の降雨量・濁水最高濃度と土壌流出実測量の関係。

東村と恩納村が、ほぼ同じような傾向を示すのに対し、石垣市では東村、恩納村に比べ土壌流出量が低くなっている。石垣市は、浸透性の高い島尻マ - ジであり国頭マ - ジに比べ流量が少なくなるのが大きな原因である。土壌流出量は、土壌の種類や作物の被覆率に大きく左右され、作物の種類による影響は比較的少ない。そこで東村、恩納村のデータをまとめ降雨量・濁水濃度と土壌流出実測量の関係を示したのが図16になる。

土壌流出実測量と降雨量・濃度の積には、高い相関関係(R=0.948)があり東村、恩納村は次のような関連式となる。

$$Y = 0.0398 X^{1.2472}$$

1式

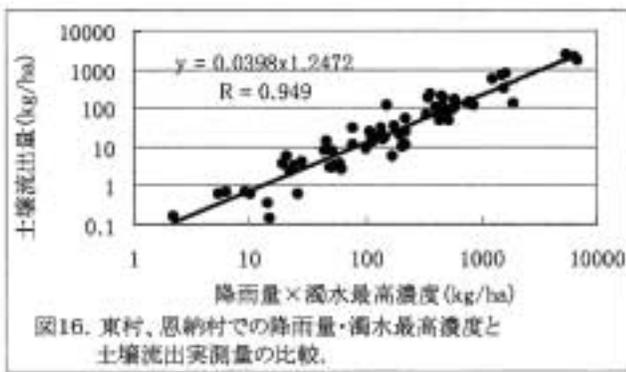


図16. 東村、恩納村での降雨量・濁水最高濃度と土壤流出実測量の比較。

このように同じ国頭マ - ジ土壤であれば、作物の種類に関係なく降雨量と濁水の最高濃度の測定値から、この式を用いて土壤流出量を予測することが可能である。

島尻マ - ジ土壤でも国頭マ - ジ土壤同様に、降雨量・濃度式を求めるためには、さらなるデータの蓄積が必要である。また、ジャ - ガル土壤やクチャ（ジャ - ガル土壤の母岩）についても同様な調査研究が必要である。

### 5. USLE式と降雨量・濃度式の比較

#### a 東村、恩納村、石垣市での土壤流出予測量

USLE式を用いて推算した各地区の土壤流出予測量と実測量の関係については、図17, 18, 19のようになっている（詳細については、沖縄県衛生環境研究所報第35号で報告）<sup>7)</sup>。

このUSLE式による予測結果と降雨量・濃度式から推算した予測量（図4, 8, 12）を比較した。東村では、

USLE式や降雨量・濃度式による予測量と実測量の相関がかなり高くなっている。恩納村では、降雨量・濃度式の方が実測量との相関がやや高くなっている。石垣市

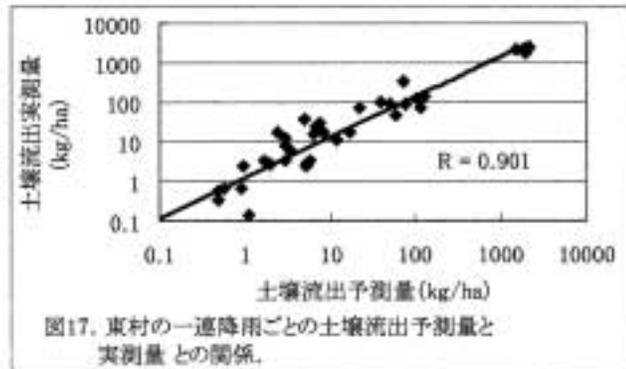


図17. 東村の一連降雨ごとの土壤流出予測量と実測量との関係。

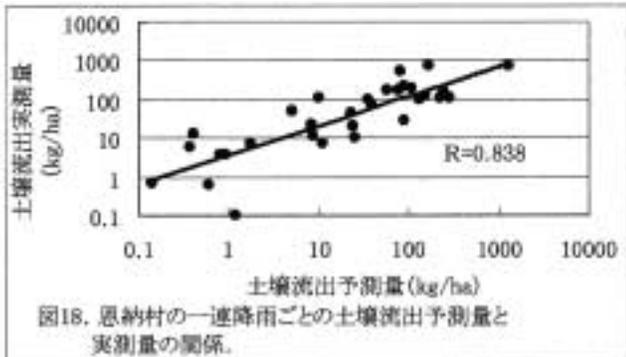


図18. 恩納村の一連降雨ごとの土壤流出予測量と実測量の関係。

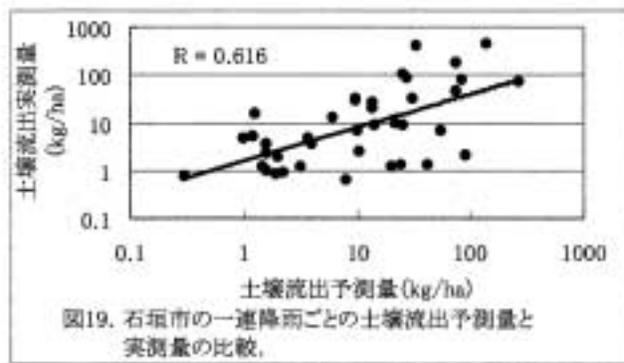


図19. 石垣市の一連降雨ごとの土壤流出予測量と実測量の比較。

では、実測量と予測量の差がやや大きくなっているが、降雨量・濃度式による予測量の方がUSLE式に比べかなり実測量に近くなっている。

石垣市においてUSLE式による予測量が大きくバラツク原因については、濁水濃度や流量の測定方法を含め土壤の違いなど、今後の検討が必要である。

3地区で比較しても降雨量・濃度式による予測量が、一連降雨のデータや合計量でも実測量に近く、予測式としてUSLE式よりも精度が高くなることを示している。

USLE式では、降雨量のデータがあれば作物の栽培状況や畑の形状などから土壤流出量を予測することができる。しかし保全係数や作物係数を設定するのは容易ではなく、まだまだ問題点も多い。

これに対し降雨量・濃度式では、降雨量と濁水濃度を測定することができれば土壤流出量の予測が可能となる。

濁水濃度は比較的簡易に測定が可能であり、現場などでは、この式を利用した土壤流出量の予測方法が有効だと考えられる。

#### s モデル農地での土壤流出予測量の適合性

工事現場などで土地造成を実施している期間は、裸地の状態が長く続きこの時の土壤流出量を把握することが、防止対策を実施する上で特に重要である。

そこで恩納村をモデルとして、裸地からの土壤流出量をUSLE式と降雨量・濃度式により予測し比較した。

USLE式では、畑が裸地の場合、作物係数と保全係数が1.0となる。恩納村の土壤は国頭マ - ジであるから土壤係数を国頭マ - ジの0.3、地形係数は斜面長35m、傾斜1度として0.25とした。

1式の降雨量・濃度式では、土壤流出量を予測するために濁水の濃度が必要である。これまでの降雨時の濁水測定から国頭マ - ジの農地での最高濃度は10,000 mg/lでありこの数値を用いて、土壤流出量を予測し結果を表3に示した。

表2に示したように、サトウキビを栽培した場合の土

表3. 恩納村・畑が裸地の場合のUSLE式と降雨量・濃度式による土壌流出予測値。

年月日	雨量 (mm)	降雨 係数	USLE (kg/ha)	降雨量・濃度 (kg/ha)
1999/12/1	34	11	825	1010
2000/3/2	48.3	5.6	420	1565
2000/4/30	30	6.7	503	864
2000/6/16	7.4	1.1	83	151
2000/6/17	42.7	24.5	1838	1342
2000/7/9	81.1	28	2100	2987
2000/7/28	71.2	15.3	1148	2539
2000/7/30	21.8	3.9	293	580
2000/7/30	167.8	128.8	9660	7397
2000/8/1	68.2	21.9	1643	2406
2000/8/3	19.6	2.2	162	508
2000/8/7	97.5	20.5	1538	3758
2000/8/29	16.6	6.3	473	413
2000/8/29	60.7	14.3	1073	2081
2000/9/8	90	66.7	5003	3401
2000/9/9	6.2	0.6	45	121
2000/9/11	191	84.1	6308	8693
2000/9/14	5.5	0.2	15	104
2000/10/26	33.3	11.9	893	984
2000/11/1	9.7	1.7	128	211
2000/11/5	7.1	0.6	45	143
2000/11/9	144.2	76.5	5738	6123
2000/11/20	54.4	34.6	2595	1815
2000/12/14	77.9	22.5	1688	2841
2000/12/18	9.8	0.8	60	214
2000/12/20	35.5	16.6	1245	1066
2000/12/30	54.6	8.4	630	1824
2001/1/7	37.2	25.2	1890	1130
2001/1/25	68.3	49.5	3713	2411
2001/3/17	23.8	4.7	353	647
2001/3/21	12.8	0.7	53	299
2001/3/24	18.7	1.8	135	479
合計	1646.9	697.2	52287	60108

壤流出量（実測量）が4.0 t/haであるのに対し、畑を裸地の状態で放置すると、USLE式では13倍の52 t/ha、降雨量・濃度式では15倍の60 t/haもの土壌の流出が予測されることになる。

また、USLE式と降雨量・濃度式から算出した土壌流出予測値を比較したのが図20である。

降雨量・濃度式による予測値が若干高くなる傾向にあるが、10～10,000kg/haの広い範囲で両数値間の相関性（ $R=0.943$ ）は高くなっている。

恩納村の現地試験では、実際の土壌流出量（実測量）に比べUSLE式による土壌流出予測値が約80%と低い結果が得られている。今回の降雨量・濃度式では、USLE式に比べ予測値が高く、より実測量に近い数値になると考えられる。

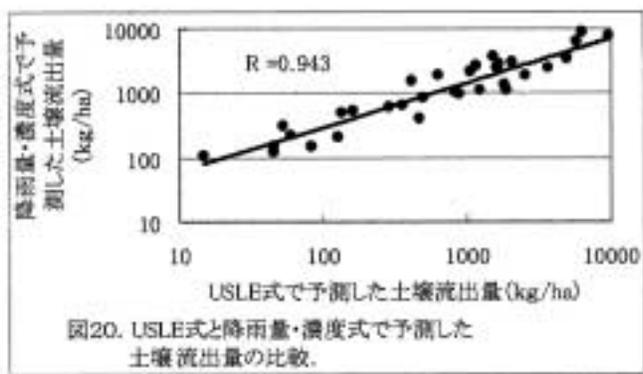


図20. USLE式と降雨量・濃度式で予測した土壌流出量の比較。

#### d 予測方法の適用性

USLE式に関しては、もともとが農地から土壌流出量を予測する式として開発されたものであり、ほ場試験でも実測量との相関性が高く十分適用できることが実証されている。また、降雨量・濃度式からの予測値もかなり実測量に近いデータになり農地での適用性が高いことから、農地においては、これら両式による予測値を推算しクロスチェックするなど、より実測量に近い数値を出すことが可能となる。

これまで、開発事業においてもUSLE式を用いて土壌流出予測値を算出しているが、斜面長や勾配は工事期間中の変動が激しいため地形係数の設定を難しくしている。これに対し降雨量と濁水濃度の測定は、工事現場においても実施可能であり、これらの数値を用いて降雨量・濃度式から土壌流出量の予測が容易となる。

今後、開発事業におけるUSLE式の妥当性や降雨量・濃度式による土壌流出量の予測に関しさらなる調査研究が必要である。

### まとめ

今回、農地からの土壌流出量（実測量）と降雨量・濃度式から推算した土壌流出予測値を比較検討し次のような結果が得られた。

#### 1. 降雨量・濃度式による土壌流出量予測

現地で比較的簡易に測定できる、降雨量や濁水濃度を使った降雨量・濃度式から推算した土壌流出予測値と実測量には正の高い相関があり、降雨量・濃度式を用いて容易に土壌流出量を予測することが可能であることが示唆された。

#### 2. USLE式との比較

国頭マ - ジ土壌のパイン畑、サトウキビ畑及び島尻マ - ジ土壌のサトウキビ畑からのUSLE式による土壌流出予測値に比べ、降雨量・濃度式から推算した予測値の方が予測精度は高くなるという結果が得られた。

#### 3. 今後の検討課題

島尻マ - ジ土壤やジャ - ガル土壤及びクチャ ( ジャ - ガル土壤の母岩 ) における土壤流出量の測定と降雨量・濃度式との整合性の検討がさらに必要である。

また、開発現場での適合性に関しても調査研究が必要である。

### 参考文献

- 1 ) 沖縄県文化環境部(2001)平成12年度流域赤土流出防止等対策調査。
- 2 ) 農林水産省構造改善局計画部(1992)土地改良事業計画指針, 158 - 171。
- 3 ) 目下達郎, 深田三夫, ロイ・キンシュック(1994)降雨型を考慮した土壤流亡推算式。農業土木学会誌, 62 : 327 - 333。
- 4 ) 大澤和敏, 酒井一人(2001)沖縄における赤土流出に対応した浮遊流出解析モデルの構築及び適用。農業土木学会大会講演会講演要旨集, 382 - 383。
- 5 ) 満元裕影・大見謝辰男・比嘉榮三郎・仲宗根一哉(1997)流出源濁水のSS濃度について。沖縄県衛生環境研究所報, 34 : 125 - 128。
- 6 ) 比嘉榮三郎・大見謝辰男・仲宗根一哉・満元裕影(1995)沖縄県の土砂流出源と濁水濃度について。沖縄県衛生環境研究所報, 29 : 89 - 98。
- 7 ) 比嘉榮三郎・満元裕影(2001)農地からの土壌流出予測方法。沖縄県衛生環境研究所報, 35 : 110 - 116。