

土 木 研 究 所 資 料

南西諸島の赤土砂流出に係る既往の知見と 最近の研究動向

平成13年11月

独立行政法人土木研究所
土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

南西諸島の赤土砂流出に係る既往の知見と 最近の研究動向

国土交通省河川局砂防部砂防計画課	砂防計画調整官	南 哲行*
土木研究所土砂管理研究グループ	グループ長	仲野 公章
〃	〃 火山・土石流チーム	主任研究員 桜井 亘
北海道大学大学院農学研究科	助教授	山田 孝**

要 旨

沖縄地方では、強酸性土壌の国頭マージに起因する赤色土壌（赤土砂）等の流出による海域の生態系、観光、漁業への影響が深刻となっている。

赤土砂の主要な生産源は、パイナップル圃場を中心とした既存農地が大きな割合を占めており、パイナップル圃場からの赤土砂流出対策が重要である。そこで、パイナップル圃場において現地観測を実施し、赤土砂の流出実態を把握するとともに、赤土砂に関する既往知見の概観を行った。その結果、①耕作初期の段階で大量の赤土砂流出が見られる、②降雨により、圃場表層の含水比が著しく高い状態になり、限界掃流力に影響を及ぼしている可能性が考えられる、③既存の土壌侵食・流出モデルは、降雨時における圃場表層の変化や、圃場レベルでの対策工の効果を表現できない、④流出土砂の経時変化を表現できるモデルの開発が必要である、等が明らかとなった。

キーワード：赤土砂流出、パイナップル圃場、土壌侵食・流出モデル

*元：建設省土木研究所砂防部砂防研究室長

**前：国土交通省土木研究所砂防部砂防研究室主任研究員

— 目次 —

1	はじめに	1
2	赤土砂流出問題の概要	1
3	赤土砂流出に係る既往の研究	4
4	圃場における赤土砂生産特性	6
5	赤土砂流出のモデル化	10

参考資料（赤土砂関連資料リスト）

1 はじめに

南西諸島においては、陸域からの流出土砂が海域に流入し、島嶼^{とうしょ}周囲に分布するリーフ内に堆積することにより、リーフ内の生態系に悪影響を及ぼすとともに、漁業、観光などの産業に影響を与える、いわゆる「赤土砂流出問題」が大きな環境問題となっている。

そこで、土木研究所土砂管理研究グループでは、旧土木研究所から引き続き、作物による被覆の時系列的変化や地表面状態の変化が圃場からの赤土砂流出に大きく関与するという観点に基づき、圃場からの赤土砂流出モデルに係る研究を実施している。赤土砂流出問題に関しては、現象面や対策についてはこれまでにさまざまな討論や研究がなされてきたが、それらに物理的な意味づけを与えたものは少ない。一方土壌侵食問題は、世界的には北緯 40°～南緯 40° の多降雨地域、具体的には南北アメリカ、砂漠を除くアフリカ、オーストラリア中央部の乾燥地帯を除くアジアの同緯度地域において激しいとされ (Hudson 1995)¹⁾、熱帯・亜熱帯域の多くに共通した問題として認識される。赤土砂流出も、このような土壌侵食問題としてとらえることができる。

本稿では、南西諸島の赤土砂問題及び土壌侵食に係る既往知見を概観するとともに、現地観測等により得られた新たな知見について報告する。

2 赤土砂流出問題の概要

2.1 赤土砂流出問題の歴史的経緯

沖縄県において赤土砂流出が顕著になったのは、1950 年代後半のパイナップル導入に伴う開畑が始まってから (翁長 1994)²⁾とされるが、大きな社会問題として新聞等に取り上げられるようになったのは、主に 1972 年の本土復帰後である。1980 年代には漁業に加えて生態系への影響が指摘され、また 1989、1990 年に地元紙が赤土流出に関する特集を行ったこともあって、赤土砂流出に関する社会的関心が一気に高まり、1995 年の「沖縄県赤土等流出防止条例」(以下条例)の施行に至っている。

条例では、大規模開発における対策実施を義務づけ、開発区域から流出する濁水の濃度を、当面の実質上の目標として 200mg/l に規制している。

また、鹿児島県奄美諸島においても沖縄県と同様の赤土砂流出が 1980 年代より環境問題となっている。

2.2 赤土砂流出による被害

赤土砂流出による被害は主として海域におけるものであり、養殖業を中心とした漁業被害、ビーチや景観などの観光に対する影響などの経済的被害の他、沿岸の生態系にも大きな影響を与えている。(例えば大見謝 1996)³⁾

赤土砂流出による生態系への影響は、表 1 のようにまとめられる。

表 1 赤土砂流出による生態系への影響

影響の区分	河川域	海域
堆積による 影響	魚類等の産卵場所の消失	
	水生生物の生息環境の埋没	
濃度による 影響	魚類等の呼吸障害	
	—	海草藻類・サンゴ等の 光合成阻害
継続時間の 影響	水生生物の減少・消滅	

2.3 行政による取り組み

沖縄県における赤土砂流出に関する行政の取り組みは、古くは復帰直後にさかのぼり（沖縄総合事務局 1975）⁴⁾、その後沖縄総合事務局や沖縄県をはじめとする行政機関による調査研究が実施され、現在に至っている。最近では、1995 年の条例施行を契機に、対策マニュアルの整備などが行われている。（例えば沖縄総合事務局 1996）⁵⁾

2.4 赤土砂問題の現状

前述の赤土等流出防止条例の施行に伴い、大規模な開発事業ではマニュアル等に基づく対策が実施されているため、開発事業からの赤土砂流出は減少しつつある。一方相対的に既存農地からの流出の占める割合が大きくなっており、仲宗根ら（1998）⁶⁾は、条例施行後において既存農地からの流出量が約 176 千 t/年と、県内全体の約 7 割を占めるとしている。また、沖縄島北部の代表的な作物であるパイナップルは、同様に代表的な作物であるサトウキビに比較して単位面積当り平均約 40 倍の土砂流出を発生させる（比嘉ら 1996）⁷⁾（ただし USLE による計算値）とされている。平成 7 年 9 月から平成 8 年 8 月にかけて、旧土木研究所砂防研究室が沖縄県北東部東村の平良川を対象として実施した調査においても、表 2 に示すように、パイナップル畑の多い流域においては、最大で 1 降雨イベント当り約 90t/km²の赤土砂が流出するなど、流域内の土地利用のうちパイナップル畑が主要な赤土砂の生産源になっていることが示された。したがって、今後の赤土砂流出対策においては、特にパイナップル畑における対策の重要性が高まっているといえる。

2.5 圃場における赤土砂流出対策

前述したとおり赤土砂の主要発生源の一つと考えられる圃場においては、マルチング、圃場末端の侵食防止工などの対策が考案・実施されているが、経済的、労働的に農家の負担となること、対策効果が明らかではないことなどから、必ずしも十分に普及してはならず、また全ての圃場に全面的にマルチングなどの対策を実施することは現実的には困難である。したがって、圃場における対策を進めるにあたっては、最も効果的な対策箇所、対策時期等を明らかにしてゆく必要がある。このためには、赤土砂流出の現象面に係る研究を進めるとともに、対策工の効果を定量的に評価できるような赤土砂流出モデルの作成が急務であると考えられる。

表 2 観測結果の概要

Event	Station	SS-max	unit discharge -max	unit weight of sediment	Rain	
		mg/l	m ³ /sec/km ²	t/km ²	Total mm	Hourly -max mm/h
No. 1 (95/9/22)	St. A	3,300	1.04	14.1	16.0	7.0
	St. B	273	0.42	0.5	16.0	
	St. C	23	0.33	0.1	14.0	
	St. D	18	0.13	0.02	16.0	
No. 2 (96/3/13)	St. A	1,100	1.14	3.9	21.2	11.1
	St. B	59	0.12	0.04	19.7	
	St. C	111	0.26	0.1	15.4	
No. 3 (96/3/20)	St. A	5,600	3.12	23.6	32.8	18.9
	St. B	880	1.65	4.2	32.8	
	St. C	22	2.05	0.3	32.8	
	St. D	123	0.50	0.3	32.8	
No. 4 (96/3/30)	St. A	4,200	1.47	20.6	29.7	24.8
	St. B	436	0.44	0.9	29.7	
	St. C	341	0.62	0.7	29.7	
	St. D	20	0.07	0.01	29.7	
No. 5 (96/5/1)	St. A	4,726	0.55	5.0	13.8	13.6
	St. C	143	0.09	0.03	13.8	
No. 6 (96/5/23)	St. A	1,421	1.09	26.1	57.4	5.8
	St. C	40	0.29	0.1	50.7	
No. 7 (96/5/29)	St. A	4,983	2.70	89.7	47.6	5.9
	St. C	202	1.08	1.2	38.6	
No. 8 (96/8/12)	St. A	6,837	2.92	87.2	113.9	31.4
	St. C	299	2.72	2.5	110.7	

3 赤土砂流出に係る既往の研究

南西諸島の赤土砂流出問題は、沖縄の復帰直後から環境問題として認識され、早くから琉球大学や沖縄総合事務局による調査研究が行われ、これらの調査研究の結果として、赤土砂流出の現象面に係る知見の集積が進められた。

3.1 土壌

南西諸島の土壌は、図1に示すように、古生層、第三紀の諸岩石及び国頭礫層より生成する強酸性土壌の国頭マーヅ、石灰岩に由来する島尻マーヅ、及び島尻層泥岩を母材とするジャーガルが分布している（小林ら 1969、松坂ら 1971）⁸⁾⁹⁾。

このうち沖縄島北部や八重山諸島を中心に沖縄県域の46%の分布面積を占める（国土庁 1977）¹⁰⁾ 国頭マーヅは赤色を呈しているために、海域に流出した際に海面が赤く染まることから赤土砂流出問題の中心として捉えられてきた。また翁長（1986）¹¹⁾は土壌の分散率、団粒化率から、国頭マーヅを最も受食性の高い土壌としている。一方大見謝ら（1995）¹²⁾は開発事業現場における実測から、沖縄島南部を中心に分布するジャーガルの母材である島尻泥岩（クチャ）は灰色を呈するため目立たないものの、その流出濃度は高く、最高値では国頭マーヅの8倍に達するとしている。

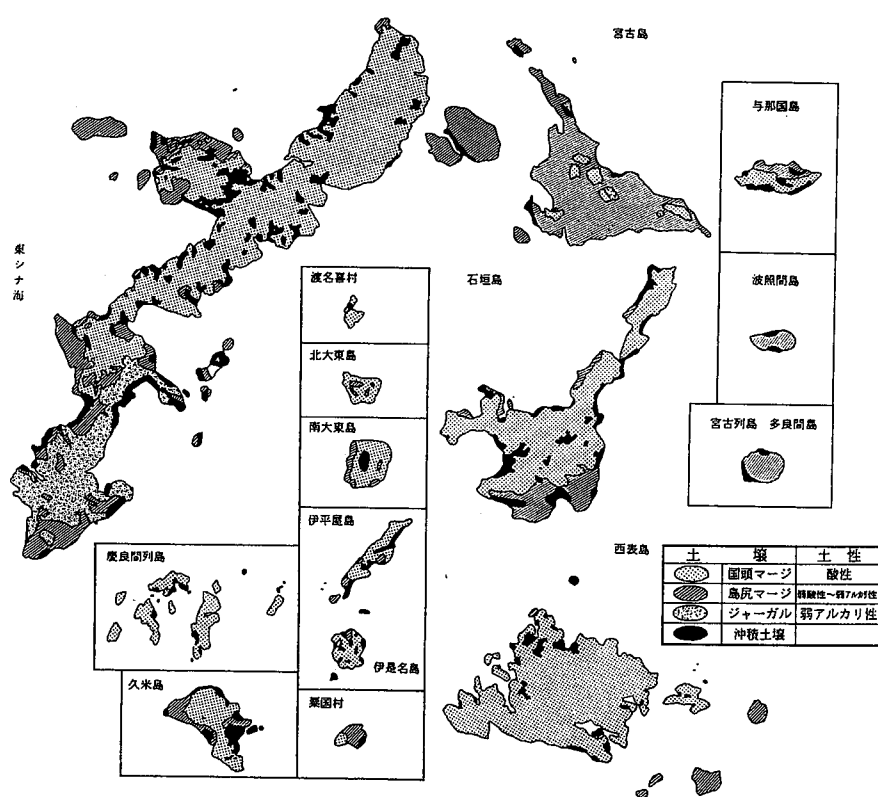


図1 沖縄県内における土壌分布（沖縄県環境保健部 赤土砂流出防止対策の手引き 1991 より抜粋）

3.2 降雨

土壌侵食量と降雨の関係については古くから多くの検討がなされており、降雨強度、連続雨量、降雨エネルギーなどが侵食量との関係を示す因子として用いられている。(例えば Quansah 1981) ¹³⁾

種田 (1976) ¹⁴⁾によると、沖縄(那覇)の年間総降雨エネルギーは $774 \times 10^3 \text{mm} \cdot \text{m} \cdot \text{t/ha} \cdot \text{hr}$ であり、これは全国 57 カ所の算出値のうち 3 番目に大きい。また翁長 (1986) ¹¹⁾は、沖縄の降雨エネルギーはアメリカのものより降雨強度の影響が強く、高強度の雨のエネルギーが高いこと、一雨雨量と降雨強度の間に明確な相関関係がないことを示し、さらに降雨には土壌侵食を発生させる限界降雨エネルギーがあり、限界降雨エネルギーはほぼ侵入能(定常状態におけるインテークレート)と等しい 9mm/h に相当することを明らかにした。

3.3 赤土砂の生産実態

これまでに、圃場や流域単位における赤土砂の流出量の観測や、侵食速度などに関する調査研究例は見られるが(例えば山本 1986) ¹⁵⁾、赤土砂が生産される圃場表面に着目した研究は見られず、降雨時に赤土砂がどのような状態で生産されるのかについての知見はほとんどない。マルチングなどの圃場表面对策は赤土砂の生産機構と密接に関連しており、現地観察や実験に基づく生産機構の把握が急務であると考えられる。

4 圃場における赤土砂生産特性

4.1 圃場表面の状態変化

現在、沖縄総合事務局開発建設部、土木研究所土砂管理研究グループでは、主要な赤土砂生産の場であると考えられるパイナップル畑からの赤土砂流出について、沖縄県東村の古島川流域において現地観察・観測を実施している。この観察において、圃場の表面は晴天時には乾燥固結しており、土粒子は容易には剥離しない状態にあるが（写真1）、降雨時には表層部の含水比が著しく高くなり、軟弱となった表層部から、わずかな外力により土粒子の剥離・流出が生じる現象が見られた（写真2）。

さらに試験圃場において、降雨時に圃場から流出する水量と土砂量の計測を行った結果、図2に示すとおり表面流が発生して圃場より流水が流出してから、土砂が流出するまでには、多くの場合に若干の時間差が生じることが明らかとなった。

この時間差の原因としては、表面流による土砂搬送が流水より遅れること、土砂の移動には一定以上の降雨衝撃や掃流力が必要となることなどが考えられるが、上に示したような含水比変化に伴う土壌の状態変化が影響している可能性がある。

国頭マージのような粘性土の侵食に関する主な既往研究には、粘土を含む砂層の限界掃流力について、砂粒子の周囲に付着した粘土層の粘着面積により粘着力を評価する芦田ら（1980）¹⁶⁾の研究、粗面形状、粘土比、乾燥密度と限界掃流力の関係について考察した日下ら（1980）¹⁷⁾の研究、粘着性流路内での横断形状変化に関する澤井ら（1977）¹⁸⁾の研究などがあるが、このような降雨時の時系列的な土壌変化に着目した例は見られない。

この表層の変化を強度変化として捉えるため、水浸により軟弱化した国頭マージ表層のコーン貫入試験を実施した。降雨時に形成される軟弱な層は表層わずか数cmと想定されるため、コーンは直径0.9cmのごく小型のものを製作して用いた。実験結果は図3に示すとおりであり、水浸した国頭マージの表層約4cmの貫入抵抗は、自然含水比状態に比較して著しく低くなっていることが確認された。降雨によるこのような浸潤は、土壌を剥離・移動させる限界掃流力に影響を及ぼし、土壌侵食の重要な一過程となっている可能性が考えられる。



写真1 乾燥した圃場表面

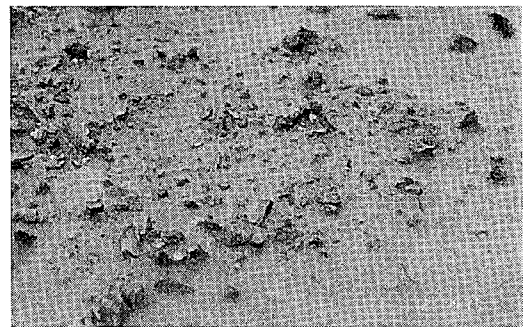


写真2 降雨時の圃場表面

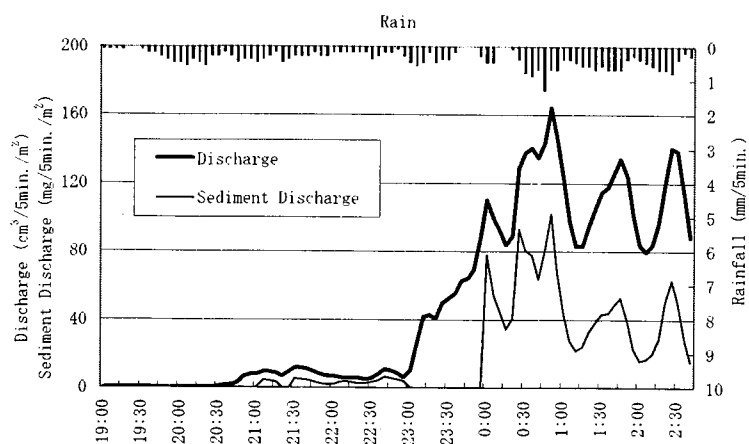


図2 圃場からの流出水量と土砂量

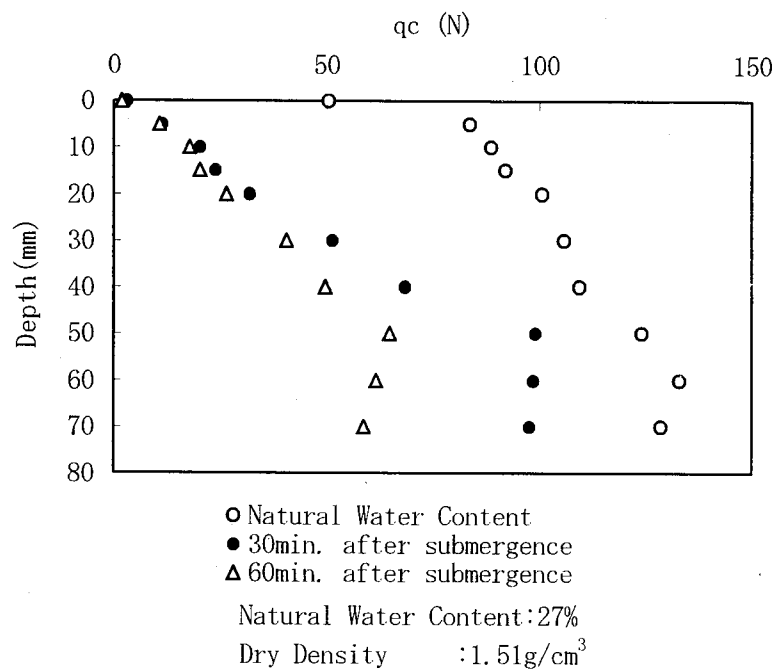


図3 コーン貫入試験の結果

4.2 耕作ステージによる侵食要因の変化

パイナップルの栽培は、通常 4～5 年のサイクルで行われるが、便宜上そのサイクルを、ステージ1(天地返し後約6ヶ月放置)、ステージ2(鋤込み・植付け後約1年の育成期間)、ステージ3(植付け後約2年)およびステージ 4(植付け後約3年)の収穫期間に大別し、前述の圃場において各ステージ毎の流出土砂量を測定した。2000 年3月の4回の降雨における測定結果は図4に示すとおりであり、一雨雨量が 15mm より大きい場合にはステージ1における流出量が著しく大きい傾向が見られる。この原因としては、①パイナップルによる被覆率の差異、②圃場表面の状態変化、③ステージ3、4で顕著に見られる圃場表面へのコケや菌類の繁茂による影響などが考えられる。

①のパイナップルによる被覆については、旧土木研究所砂防研究室が平成 10 年、11 年に実施した調査によると、図5で示すように、植付後 16 ヶ月で被覆率が 85%に達していることが確認されており、翁長(1980)¹⁹⁾も植付後 24 ヶ月で被覆率が 88%に達するとしている。また比嘉ら(1996)⁷⁾は、被覆率の変化からパイナップル圃場における USLE 式の作物係数を1年目の 0.8 から4年目の 0.05 まで変化させており、植付後の被覆率の変化が土壌侵食量に影響を及ぼしていると考えられる。

一方②の圃場表面の状態変化について、翁長(1986)¹¹⁾は新植に比較して古株畑は乾燥密度が大きく透水性が低いとしており、植付後の年数を経た圃場においては、強度の増大と表面流の増大という、土壌侵食において相反する二つの要素が進行していることが考えられる。

そこで、植付後のステージの違いによる表層の強度変化を捉えるため、各ステージに対応する密度に締固めた試料を水浸した上でコーン貫入試験を行った結果が図6である。

図に示されるとおり、ステージによる強度は著しく異なり、この強度差が侵食に影響を及ぼしている可能性が示唆された。しかしながら、侵食に最も強く関与すると考えられる表層部数 mm の強度はいずれのステージにおいても著しく小さく、かつそれほど違いはないことが明らかとなった。

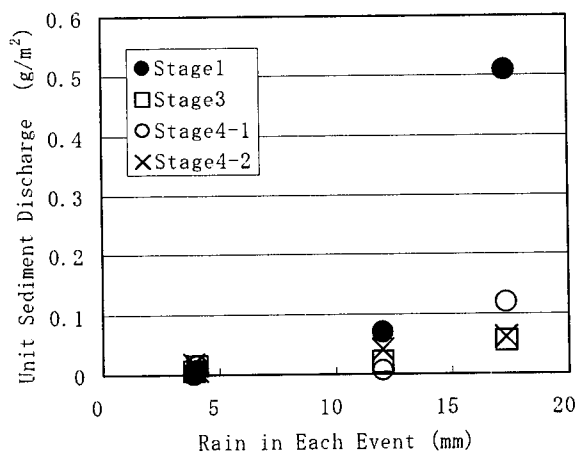


図4 耕作ステージ毎の土砂流出量

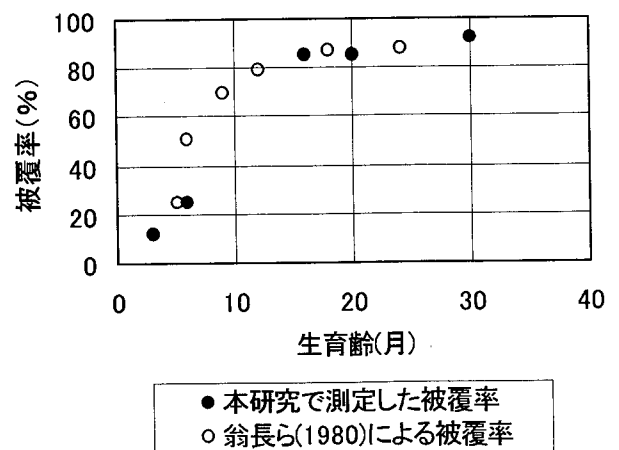


図5 株の植付けからの経過時間と被覆率

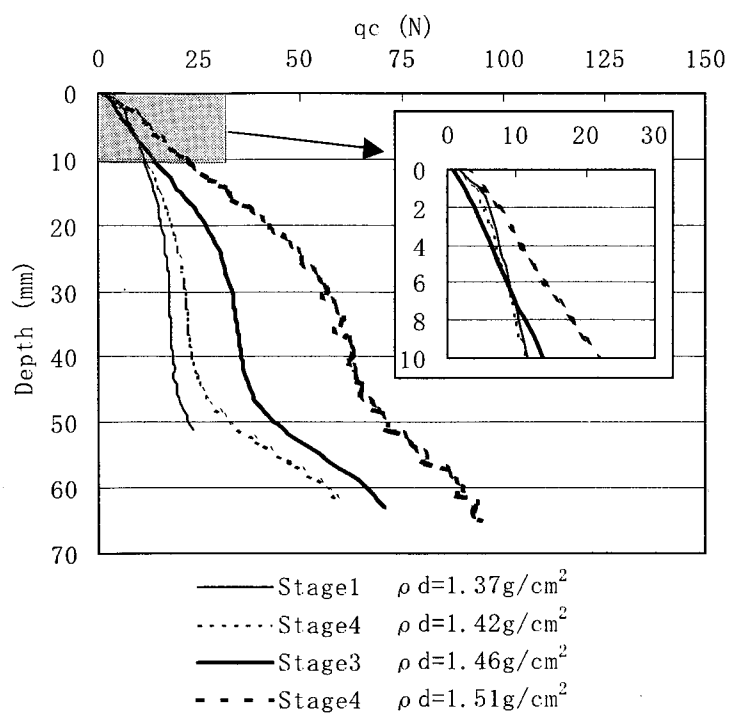


図6 耕作ステージ毎の水浸試料のコーン貫入試験結果

5 赤土砂流出のモデル化

5.1 赤土砂流出モデル

赤土砂の流出量をモデルにより表現しようとする試みは、後述する USLE 式の適用により県内全域からの赤土砂流出量を推計した例（仲宗根ら 1998）⁶⁾のほか、河村式を基に現地調査による係数設定を行った例（長谷川ら 1987）²⁰⁾、流域単位での赤土砂流出をメッシュタンクモデルと流量－濃度の関係式によりイベント単位でシミュレートした例（酒井ら 1995）²¹⁾、流域条件に基づく経験モデルによりピーク濃度を表現する試み（森田ら 1994）²²⁾などがあるが、いずれも圃場レベルの対策工の効果を表現できるスケールのモデルではなく、また個別流域における評価に留まっており、普遍的な評価には至っていない。

5.2 土壌侵食に係る既往モデル

赤土砂流出を土壌侵食として捉えると、特に米国を中心として発達してきた土壌侵食モデルを赤土砂流出に適用することが考えられる。このため、既往の主な土壌侵食モデルについて以下のとおりレビューを行った。

5.2.1 経験モデル

経験モデルは、侵食に係る要因について、観測を基にした係数を与えるもので、米国の USLE (Universal Soil Loss Equation) に代表される。

USLE は、Musgrave (1947) ²³⁾らによる式形に若干の修正やパラメータ値を与えられて現在の形となり、ガイドブック (USDA 1978) ²⁴⁾が出版されている。USLE の基礎式は、以下で与えられる。

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \cdots \cdots (1)$$

ここに E : 年間土壌侵食量、R : 降雨係数、K : 土壌係数、L : 斜面長係数、S : 傾斜係数、C : 作物係数、P : 保全係数である。

USLE 式は米国のみならず、全世界で広く使われている土壌侵食モデルであり、各侵食因子のパラメータは、土壌の受食性や降雨の激しさ等を示すためのインデックスとして独立して用いられるほか、物理モデルのパラメータとして用いられている場合も多い。

経験モデルには、この他に標準侵食量に地形係数、作物管理係数を乗じる SLEMSA(The Soil Loss Estimator for Southern Africa)、侵食過程と運搬過程を別個に扱った手法 (Morgan ら 1984) ²⁵⁾などがある。

5.2.2 物理モデル

物理モデルは、侵食～運搬の過程を個別の物理現象としてとらえ、それら（あるいはその一部）を物理式により記述するものであり、主な既往モデルには以下のようなものがある。

・CREAMS

CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System) モデルは、日

単位での流出量、ピーク流出量を基に農地からの土壌流出、化学物質等のノンポイント負荷を推計するモデルであり、リル、インタリル各々の領域における侵食量は降雨エネルギー、傾斜、流量及び USLE の K.C.P. の各要素によって表現され、運搬力とのバランスにより圃場からの流出土量が算出される。

(Morgan 1995) ²⁶⁾

・ WEPP

WEPP (Water Erosion Prediction Project) は、USLE に替わる土壌侵食式として開発されたモデルで、260ha 程度までの一斜面において気象、土壌、地形、管理、保全対策、蒸発や浸透等の要素から土壌侵食量を最下流端からの流出量として算出するプロファイルモデルと、それを拡張し流路や一時貯水を考慮した流域モデルがある。(USDA 1995) ²⁷⁾

・ EUROSEM

EUROSEM (The European Soil Erosion Model) は、Kinematic Wave による流出解析を元に土壌の剥離・運搬を計算するモデルであり、作物被覆及び表流水による衝撃緩和を考慮した雨滴侵食、及び流水侵食による侵食量と、流水による運搬力を考慮して侵食量を算出する。(Morgan ら 1998) ²⁸⁾

・ AGNPS

AGNPS (AGricultural Non-Point Source Pollution Model) は、土壌侵食による濁水を含む農地からのノンポイント負荷による流域からの汚濁流出を、一降雨イベント単位で解析する。流域はグリッドにより表現され、グリッド毎にパラメータを与えるため、流域内の土地利用を反映させることができるが、土壌侵食モデルは USLE を改良した RUSLE (Revised USLE) を用いている。

・ その他の物理モデル

作物の生長に伴う被覆率増加による侵食特性の変化を組み込んだモデルとしては、SLEMSEP (Soil Loss Estimation Model for Slope Erosion Process) (Duan ら 2000) ²⁹⁾があるが、特定流域における検証に留まっており、現段階では汎用性のあるモデルとはいえない。

5.3 既往モデルの赤土砂流出問題への適用

赤土砂流出のモデル化においては、冒頭に述べたように主にパイナップル畑における流出と対策工の効果を表現することが必要になる。さらにパイナップル畑は植え付け直後約 1 年間に最も土壌侵食量が多いとされる (比嘉ら 1996) ⁷⁾こと、明確な畝を形成せずに植え付けられること、農家の実力に応じた対策が行われることも考慮して、圃場内の一部に対策が実施された場合の効果も表現できる必要があること、さらに降雨時の圃場表面における軟弱層の形成が侵食に大きく関与していると考えられることなどから、パイナップルの耕作ステージ毎の被覆率や表面強度変化に伴う侵食強度変化、また圃場内の二次元的な広がり、さらに降雨時の軟弱層の形成を表現することが必要であると考えられる。

しかし、USLE に代表される経験モデルや、その係数を用いたモデル (CREAMS など) は、作物や対策工の影響を一定の係数で表現しており、影響そのものをモデルにより検証することはできない。また、WEPP に代表される物理モデルにおいては、対策工による効果を被覆や土壌に関するパラメータとして表現することは可能であるが、一計算対象区について 1 つのパラメータ値を与えるため、例えば

圃場内に部分的に対策を施した場合の効果などを検証することはできない。

したがって、パイナップル畑からの流出土量と圃場内における対策工の評価を流域レベルで行うためには、流域を二次元的に表現するとともに、流出土砂の経時変化を織り込んだモデルの開発が必要であるといえる。

参考文献

- 1)Hudson N (1995): Soil Conservation Third Edition. Batsford, p.28~31
- 2)翁長謙良・吉永安俊・渡嘉敷義浩(1994):国頭マージ地帯の土壤侵食と防災. 農業土木学会誌, Vol.33, No.4, pp.307~313
- 3)大見謝辰男(1996):赤土堆積がサンゴに及ぼす影響. 沖縄県公衆衛生学会誌, 30, pp.79~86
- 4)沖縄総合事務局(1975):特定開発プロジェクト報告書
- 5)沖縄総合事務局開発建設部(1996):赤土等流出防止対策マニュアル(案)
- 6)仲宗根一哉・比嘉榮三郎・滝本裕彰・大見謝辰男(1998):沖縄県における赤土等年間流出量(第2報)ー赤土等流出防止条例施行後の年間流出量の推算ー. 沖縄県衛生環境研究所報, Vol.32, pp.67~72
- 7)比嘉榮三郎・大見謝辰男・花城可英・滝本裕彰(1996):パイナップル畑からの土砂流出量について. 沖縄県衛生環境研究所報, Vol.30, pp.87~92
- 8)小林嵩・品川昭夫・宮内信文(1969):南西諸島の土壤に関する研究 6.奄美群島の古生層の諸岩石、火成岩および国頭礫層に由来する土壤の粘土鉱物について. 鹿児島大学農学部学術報告, 第19号, pp.121~133
- 9)松坂泰明・音羽道三・山田裕・浜崎忠雄(1971):沖縄本島・久米島の土壤の分類について. 農業技術研究所報告B(土壤・肥料), Vol.22, pp.305~397
- 10)国土庁(1977):土地分類図付属資料 沖縄県
- 11)翁長謙良(1986):沖縄北部地方における土壤侵食の実証的研究, 琉球大学農学部学術報告, 第33号, pp.111~209
- 12)大見謝辰男・比嘉榮三郎・花城可英・滝本裕彰(1995):クチャ(島尻層群泥岩)の流出についての調査研究. 沖縄県衛生環境研究所報, 第29号, pp.131~134
- 13)Quansah C. (1981): The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport. Journal of Soil Science, Vol.32, pp.215~224
- 14)種田行男(1976):降雨侵食の可能性を示す降雨係数の算定. 農業土木学会論文集, Vol.65, pp.15~19
- 15)山本博(1986):沖縄島の赤色土からなる裸地におけるリルとリル間地の侵食. 地理学評論, 59(Ser.A)-8, pp.470~479

- 16) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀 (1980) : 斜面侵食による濁度物質の生産・流出機構に関する研究.
第 24 回水理講演集, pp.135~141
- 17) 日下達朗・田中宏平・藤田則之・四ヶ所四男美 (1980) : 粘着性のある土壌の剥離・移動限界について—雨水流による土壌の侵食特性 (1) —. 農業土木学会論文集, 第 90 号, pp.9~16
- 18) 澤井健二・芦田和男 (1977) : 粘着性流路の侵食と横断形状に関する研究. 土木学会論文報告集, 第 266 号, pp.73~86
- 19) 翁長謙良・宮城武治 (1980) : 沖縄における農地保全の基礎的研究 XII—パイナップルの土壌侵食抑制効果について(2)—, 琉球大学農学部学術報告. 第 27 号, pp.265~273
- 20) 長谷川修・中原誠 (1987) : 赤土砂流出調査と抑制対策. 新砂防, Vol.40, No.4, pp.23~28
- 21) 酒井一人・吉永安俊・翁長謙良 (1995) : 浮遊土砂濃度解析モデルの構築—沖縄県における赤土流出のモデル化に関する研究—. 農業土木学会論文集, 第 180 号, Vol.63, No.6
- 22) 森田真一・松村和樹・渡部文人・金城保 (1994) : 赤土砂の流出とその要因に関する考察. 平成 6 年度砂防学会研究発表会概要集, 砂防学会, pp.147~150
- 23) Musgrave G.W. (1947) : Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion - a First Approximation. Journal of Soil and Water Conservation, 2, pp.133~138
- 24) USDA (1978) : Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. USDA Agriculture Handbook, No.537
- 25) Morgan R.P.C.・D.D.V.Morgan・H.J.Finney (1984) : A predictive model for the assessment of soil erosion risk. Journal of Agricultural Engineering Research, 30, pp.245~253
- 26) Morgan R.P.C. (1995) : Soil Erosion and Conservation Second Edition. Longman. pp.76~77
- 27) USDA (1995) : Technical Documentation USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP). NSERL Report No.10
- 28) Morgan R.P.C・Quinton J.N.・Smith R.E.・Govers G.・Poesen J.W.A.・Auerswald K.・Chisci G・Torri D.・Styczen M.E.・Folly A.J.V. (1998) : The European Soil Erosion Model (EUROSEM) documentation and user guide Version 3.6. Silsoe College, Cranfield University
- 29) Duan Jiannan・Li Baoguo・Shi Yuanchun・Yan Tailai・Zhu Dehai (2000) : Modeling of Slope Erosion Process for Soil Change. Soil Erosion and Dryland Farming. Soil and Water Conservation Society, pp.529~537

参 考 資 料

赤土砂関連資料リスト

比留川総合開発事業（倉敷ダム（旧瑞穂山ダム））	1986 月刊建設 40	沖瀬川総合事務所	沖瀬川総合事務所
沖瀬川の赤土砂流出について	1976 建設省技術研究会報告 29	土井功、渡辺地政、伊藤時男	土井功、渡辺地政、伊藤時男
瑞穂山ダムにおける赤土流出対策について	1991 建設省技術研究会報告 44	名渡泰陽、栗河、安里司（沖瀬川総合事務所）	名渡泰陽、栗河、安里司（沖瀬川総合事務所）
南西諸島における海洋への土砂流出の発生機序の解明と防止技術に関する研究	1991 公害防止等プロジェクト研究 平成3年度研究推進会議資料（赤土流出）		
南西諸島における海洋への土砂流出の発生機序の解明と防止技術に関する研究（赤土）	1995 公害防止等プロジェクト研究 平成6年度研究推進会議資料		
草類の根の表面侵食防止効果に関する実験	1985 砂防学会誌 138	渡藤淳郎、齋島重男、生田繁	渡藤淳郎、齋島重男、生田繁
ブラジル・サンパウロ州にみられるガリー侵食の概況	1997 砂防学会誌 210	阿部和時、北原隆、工藤哲也、MARQUES, Arthur F., MARTINS, Maria E., HONDA, Elio A., FRANCISCO, Alberto	阿部和時、北原隆、工藤哲也、MARQUES, Arthur F., MARTINS, Maria E., HONDA, Elio A., FRANCISCO, Alberto
中国南部荒廃山地における表面侵食過程に関する原位観測実験	1998 砂防学会誌 215	田中義郎（九州農試）	田中義郎（九州農試）
南西諸島における海洋への土砂流出の発生機序の解明と防止技術に関する研究（環境庁企画調査報告S）	1994 自然環境の管理及び保全に関する総合研究 平成5年度	内田太郎、大寺信人、水山高久、李昌華	内田太郎、大寺信人、水山高久、李昌華
南西諸島における海洋への土砂流出の発生機序の解明と防止技術に関する研究（環境庁企画調査報告S）	1995 自然環境の管理及び保全に関する総合研究 平成6年度	田中義郎、中嶋敏一、猪田秀之、小泉豊（九州農試）、吉野秀雄（農工研）、中野寛（国際農林水産業研七）、大貫靖浩（森林総研）、（土木研）	田中義郎、中嶋敏一、猪田秀之、小泉豊（九州農試）、吉野秀雄（農工研）、中野寛（国際農林水産業研七）、大貫靖浩（森林総研）、（土木研）
国頭マシの圃場における土壌流出について	1980 自然災害特別研究	翁長謙良	翁長謙良
南西諸島の土壌に関する研究 第1報 琉球列島の土壌について	1986 鹿児島大学農学部学術報告 16	小林敏、品川昭夫	小林敏、品川昭夫
南西諸島の土壌に関する研究 4. 喜界島の島尻丘陵に由来する土壌と徳之島のジャヤガレの粘土鉱物について	1989 鹿児島大学農学部学術報告 19	小林敏、品川昭夫、宮内信文、市来征勝	小林敏、品川昭夫、宮内信文、市来征勝
南西諸島の土壌に関する研究 5. 奄美群島の琉球石灰岩に由来する土壌の粘土鉱物について	1989 鹿児島大学農学部学術報告 19	小林敏、品川昭夫、宮内信文、中野寛浩	小林敏、品川昭夫、宮内信文、中野寛浩
南西諸島の土壌に関する研究 6. 奄美群島の古生層の諸岩石、火成岩および国頭礫層に由来する土壌の粘土鉱物について	1989 鹿児島大学農学部学術報告 19	小林敏、品川昭夫、宮内信文	小林敏、品川昭夫、宮内信文
ジャヤガレとマシの化学性と粘土鉱物について	1976 昭和51年度農薬土木学会九州支部シンポジウム－沖瀬の特殊土壌－	大屋一弘	大屋一弘
沖瀬本島土壌の侵食性について	1976 昭和51年度農薬土木学会九州支部シンポジウム－沖瀬の特殊土壌－	翁長謙良	翁長謙良
ジャヤガレ土壌の物理性改良について	1976 昭和51年度農薬土木学会九州支部シンポジウム－沖瀬の特殊土壌－	宮城調勝	宮城調勝
土地からの土砂流出防止技術の実証[第1報]	1992 新砂防 15	長谷川修、中原誠	長谷川修、中原誠
赤土砂流出調査と抑制対策	1987 新砂防 127	水山高久	水山高久
ロッキーマー山脈東部のガリー侵食防止施設	1983 新砂防 133	松村和樹、鈴木宏、上島隆雄	松村和樹、鈴木宏、上島隆雄
Wash loadの生産・流出機構と底層流出土砂量	1984 新砂防 137	谷口義信、高橋正佑	谷口義信、高橋正佑
火山灰の土砂流出発生に果たす役割 - 主としてガリーの形成と土砂生産についての実験的研究 -	1985 新砂防 142	村井宏、井上克弘	村井宏、井上克弘
ギリシヤにおける山地荒廃と土壌の侵食性について	1986 新砂防 149	下川俊郎、地頭園隆	下川俊郎、地頭園隆
浸島における表面侵食による土砂生産	1987 新砂防 150	下川俊郎、地頭園隆	下川俊郎、地頭園隆
浸島におけるリル・ガリー侵食による土砂生産	1989 新砂防 161	小川紀一、松村和樹、菊井裕宏、井良沢道也	小川紀一、松村和樹、菊井裕宏、井良沢道也
山地流域における土砂生産・流出の実態と解析	1989 新砂防 162	水山高久、中野敏子、鈴木浩之	水山高久、中野敏子、鈴木浩之
樹林の流出土砂抑制効果に関する実験	1989 新砂防 165	水山高久、天田高白、栗原淳一、小林裕男	水山高久、天田高白、栗原淳一、小林裕男
森林帯の抵抗特性と土砂堆積促進効果	1993 新砂防 166	水内正信	水内正信
VAN83公式を使用した急勾配河川での流出土砂量算定方法	1995 新砂防 170	塚本良則	塚本良則
熱帯急傾斜地における侵食と土砂堆積軽減のための研究の必要性と現地適用に関する国際シンポジウムに出席して	1992 新砂防 180	井良沢道也、石川芳治、小泉豊	井良沢道也、石川芳治、小泉豊
濁水対策に関する実験的研究	1992 新砂防 194	水山高久	水山高久
流水の濁度による粘土山事業の評価	1987 新砂防 Vol. 40	長谷川修、中原誠（沖瀬川総合事務所）	長谷川修、中原誠（沖瀬川総合事務所）
赤土流出調査と抑制対策	1978 水 20	大城清吉	大城清吉
沖瀬川における水質管理・規制の現状と今後の課題	1998 水環境学会誌 21(10)	鈴木祥治、北山俊郎、高見徹、三浦昭雄	鈴木祥治、北山俊郎、高見徹、三浦昭雄
海水中懸濁粒子の沈降・堆積がワカメ遊走子の着生とその生長に及ぼす阻害作用	1992 水工学会文集 36	江本哲郎、北村恵紀	江本哲郎、北村恵紀
潮位に因って植生帯のある流路での水面変動を伴う樹断混合	1996 水工学会文集 40	村上正吉、中川博次、S.Makhanu、奥田昇久	村上正吉、中川博次、S.Makhanu、奥田昇久
降雨による裸地斜面の粗粒化と新発別土砂流出量	水質汚濁学会講演集 22	大目黒長男、下地和樹夫（沖瀬川公害衛生研）	大目黒長男、下地和樹夫（沖瀬川公害衛生研）
沖瀬における流域の赤土汚染の現状	1996 水質報告 16	吉野幸一（桑もぐりダイビング協）	吉野幸一（桑もぐりダイビング協）
赤土でサンゴの稚が死んでいく	1996 水質報告 16	宇井航（沖瀬川）	宇井航（沖瀬川）
沖瀬の水環境と赤土問題	1996 水利科学 40	吉永安俊、翁長謙良、酒井一人（琉球大 農）	吉永安俊、翁長謙良、酒井一人（琉球大 農）
沖瀬島の島地における赤土流出防止対策と赤土等流出防止条例	1993 鹿児島大学農学部学術報告 13	永田武雄、村松記久夫	永田武雄、村松記久夫
沖瀬・久米島の土壌	1995 鹿児島大学農学部学術報告 42	山本隆、富岡福幸	山本隆、富岡福幸
沖瀬本島、力蔵ビーチ沿岸地域における赤土懸濁粒子の堆積作用	1990 第3回沖瀬土質工学会発表会 講演概要集	松嶋吉明、伊田和男、松本治男	松嶋吉明、伊田和男、松本治男
国頭マシにおける切土法面内配について	1990 第3回沖瀬土質工学会発表会 講演概要集	徳元秀光、重村将、上原方成、原久夫	徳元秀光、重村将、上原方成、原久夫
国頭マシにおける切土法面内配について	1993 地球環境研究 27	渡嘉敷泰浩（琉球大 農）	渡嘉敷泰浩（琉球大 農）
海洋汚染赤土群の土壌コロイドに関する基礎的研究	1994 地球環境研究 30	渡嘉敷泰浩（琉球大 農）	渡嘉敷泰浩（琉球大 農）
海陸汚染赤土群の土壌コロイドに関する基礎的研究 造成地土壌及び流出土の水分散	1995 地球環境研究 30	山本博	山本博
土壌の挙動特性	1985 地理学評論	田嶋勝利（島取大 農）	田嶋勝利（島取大 農）
沖瀬島の赤色土からなる裸地におけるリルとリル間地の侵食	1993 島取大学農学部学術報告 46	小川和夫	小川和夫
土壌流出に伴う濁水の離集利による効果	1981 土壌の物理性 43	太田弘毅	太田弘毅
巨瀬山麓土壌の理工学的性質	1981 土壌の物理性 44	内田勝利	内田勝利
粗した土の初期水食性	1981 土壌の物理性 46	登川伸、寺沢四郎	登川伸、寺沢四郎
沖瀬本島の主要土壌の物理性について	1991 土壌の物理性 63	翁長謙良、呉盛昭（琉球大 農）、村松剛一（道路公団）	翁長謙良、呉盛昭（琉球大 農）、村松剛一（道路公団）
沖瀬島北部赤褐色土の土壌侵食の評価と対策	1994 土木学会第48回年次学術講演会	Celso Santos、鈴木幸一、渡辺政広	Celso Santos、鈴木幸一、渡辺政広
SP法による土砂流出モデル定数の最適化	1994 土木学会第49回年次学術講演会	Celso Santos、鈴木幸一、渡辺政広	Celso Santos、鈴木幸一、渡辺政広
土砂流出モデルと流域モデリング	1995 土木学会第50回年次学術講演会	梅村順、森芳信、原勝重	梅村順、森芳信、原勝重
表面流によるしるしおよび赤土斜面の侵食模倣実験	1995 土木学会第50回年次学術講演会	村嶋勉、泉典洋、池田誠介	村嶋勉、泉典洋、池田誠介
地下水湧出によって形成されるガリーについて			

表層流に対する粘性・土壌の抵抗条件と侵食量	1981	農業土木学会論文集 92	日下達明, 田中宏平, 藤田則之, 他
表層流による土壌流失量の推定について	1981	農業土木学会論文集 94	日下達明, 四ヶ所四男美, 田中宏平
水滴の衝撃に対する破砕の影響について	1982	農業土木学会論文集 101	福松盛一
水滴の衝撃に対する硬さの影響について	1982	農業土木学会論文集 102	福松盛一
農地の流亡土壌の予測における土壌係数および傾斜・斜面長係数に関する基礎的研究 (I)	1982	農業土木学会論文集 102	種田行男
農地の流亡土壌の予測における土壌係数および傾斜・斜面長係数に関する基礎的研究 (II)	1982	農業土木学会論文集 102	福松盛一
農地の流亡土壌の予測における土壌係数および傾斜・斜面長係数に関する基礎的研究 (III)	1982	農業土木学会論文集 102	種田行男 (滋賀県短大農業)
水滴の硬さによる飛沫生成の違いについて	1983	農業土木学会論文集 105	福松盛一
水滴の直径・表面張力・運動エネルギーと土壌飛散の関係について	1983	農業土木学会論文集 106	福松盛一
土壌飛散に関する基礎的研究 (IV) — RILL FORMATION AND SOIL LOSS BY SURFACE WATER FLOW —Characteristics of soil erosion caused by rain water flow (IV) —	1984	農業土木学会論文集 110	T. Kusata, N. Fujita, T. Fujiwara
DISCUSSIONS ON SOIL CONSERVATION PRACTICES FOR ESTABLISHING SUSTAINED UPLAND FARMING —Field studies on erosion control in shifting cultivation and its sustained upland farming in the monsoon tropics in Northeast Thailand (II) —	1984	農業土木学会論文集 111	T. Takahashi, K. Nagahori, C. Mongkolsawat, M. Losirikul
RUN-OFF AND SOIL LOSS IN THE FIRST YEAR AFTER CLEARING AND BURNING —Filed studies on erosion control in shifting cultivation and its sustained upland farming in the monsoon tropics in Northeast Thailand (I) —	1984	農業土木学会論文集 111	K. Nagahori, T. Takahashi, C. Mongkolsawat, M. Losirikul
降雨エネルギーの算定式に関する研究	1984	農業土木学会論文集 114	藤原朝男, 坂月善明, 南信弘, 他
時間雨量時系列の確率発生と土壌侵食予測への適用	1986	農業土木学会論文集 122	藤原朝男, 久井守
高度計による河川流水砂量の推定	1986	農業土木学会論文集 125	長沢徹明, 片岡隆四, 梅田安治, 稲田純司
雨後からの土砂流出に関する解析	1986	農業土木学会論文集 126	高木重夫, 中野政詩
マサ土間地における侵食・土砂災害と土砂収容	1986	農業土木学会論文集 128	松本康夫
マサ土間地におけるガリ侵食の発達形態	1986	農業土木学会論文集 128	五十崎恒, 松本康夫, 児玉雄輝
土壌流亡量推定法の現地調査への適用性について	1987	農業土木学会論文集 128	日下達明, 藤田則之
造成農地におけるリルの生成および発達 —農地侵食におけるリル生成ならびに発達機構に関する実証的研究 (I) —	1988	農業土木学会論文集 135	高文煥, 佐藤光一
リル生成ならびに発達機構の研究 (II) —	1988	農業土木学会論文集 136	高文煥, 佐藤光一
マサ土間地における土壌侵食に及ぼす軟・水水路の配置の影響	1988	農業土木学会論文集 138	鄭榮吉, 山路永治, 小田進, 富田正彦
新第三系磨砂質土からなる畑畑地の斜面長と流亡土砂量の関係	1989	農業土木学会論文集 139	松本康夫
リルにおける侵食量と流出土砂量の予測	1989	農業土木学会論文集 141	高木重夫, 堤郷, 中野政詩
湛水土壌面における雨漏れ作用の再解析	1989	農業土木学会論文集 143	深田三夫, 藤原朝男
湛水面への水漏れ・土壌侵食の基礎的研究 (I) —	1990	農業土木学会論文集 146	深田三夫, 藤原朝男
室内人工降雨装置による土壌クラスタの形成と侵食との関連性	1991	農業土木学会論文集 146	西村耕, 中野政詩, 宮崎毅
国産マージンの物理的性質について —国産マージンの理工学的性質に関する研究 (I) —	1990	農業土木学会論文集 149	宮崎調勝, 近藤武
マサ土間地における土壌侵食の物理性	1990	農業土木学会論文集 150	坂西研一, 早瀬吉雄
希薄なベントナイト土壌溶液の浸透性について	1991	農業土木学会論文集 156	藤井克己, 大塚第一郎, 中野政詩
土壌侵食による正圧積と土壌侵食の基礎的研究	1992	農業土木学会論文集 159	深田三夫, 藤原朝男, 日下達明
土壌侵食による正圧積と土壌侵食の基礎的研究 (II) —	1992	農業土木学会論文集 161	中澤雄, 大瀬真, 黒塚宏太郎, 島崎昌彦
土壌侵食の基礎的研究 (III) —	1993	農業土木学会論文集 163	深田三夫, 藤原朝男, 日下達明
USLEにおける降雨係数の評価について —北海道における土壌侵食抑制に関する研究 (I) —	1993	農業土木学会論文集 165	長沢徹明, 梅田安治, 李星漫
土壌侵食抑制に関する研究 (II) —	1993	農業土木学会論文集 165	深田三夫, 藤原朝男, 日下達明
高砂土系土壌侵食による土壌侵食の抑制に関する研究 (III) —	1993	農業土木学会論文集 166	新成俊也, 小宮康明, 宮城調勝, 赤坂秀司
沖積扇マージンの造成農地における浸透土砂流出について	1993	農業土木学会論文集 168	吉永安俊, 倉長謙良 (琉球大 農)
土壌侵食の抑制に関する研究 (IV) —	1994	農業土木学会論文集 173	坂西研一, 早瀬吉雄
土壌侵食の抑制に関する研究 (V) —	1994	農業土木学会論文集 173	張科利, 細山田健三
土壌侵食の抑制に関する研究 (VI) —	1995	農業土木学会論文集 176	長沢徹明, 梅田安治, 大西崎隆
Measurement of Turbidity Distribution in the Interior Part of the Ariake Sea Using Landsat-5 TM Data	1995	農業土木学会論文集 179	Masahito SEGUCHI, Osamu KATO, Jong-Hwa PARK
土壌侵食の抑制に関する研究 (VII) —	1995	農業土木学会論文集 180	酒井一人, 吉永安俊, 倉長謙良 (琉球大 農)
土壌侵食の抑制に関する研究 (VIII) —	1996	農業土木学会論文集 181	高木重夫, 中尾誠司, 友正達美
土壌侵食の抑制に関する研究 (IX) —	1996	農業土木学会論文集 184	中尾誠司, 高木重夫, 友正達美, 細川雅敏
土壌侵食の抑制に関する研究 (X) —	1996	農業土木学会論文集 185	近藤文義, 國武昌人, 高山晶照, 野木芳幸
土壌侵食の抑制に関する研究 (XI) —	1996	農業土木学会論文集 186	高橋孝志, 藤井克己, 藤崎浩幸
土壌侵食の抑制に関する研究 (XII) —	1996	農業土木学会論文集 186	辻修, 松田豊, 王富士夫

南西諸島における海洋への土砂流出発生機構の解明と防止技術に関する研究 土砂流出防範林の造成技術の開発			
土地改良事業の赤土流出防止対策とSS濃度の関係について			
南西諸島における赤土流出の発生機構の解明と防止技術に関する研究			
九州・沖縄の特殊土	1983	山内豊隆、土壌工学会九州支部	
土木研究所資料第3011号 潮水対策に関する基礎実験報告書	1996	石川芳治、井良沢道也、小泉豊	
南西諸島における赤土砂問題と対策の方向性について	1997	南哲行、小山内信智、小泉豊、佐藤一幸、安仁屋勉、善倉昌正秀	
南西諸島における赤土砂流出実験と微細粒土砂流出実験	1997	小泉豊、石川芳治、小山内信智	
ろ過スリットを活用した砂防ダムによる効果的な赤土砂捕捉手法に関する実験	1997	小泉豊、南哲行、小山内信智	
潮水対策に関する基礎実験	1997	小泉豊、石川芳治、井良沢道也	
ろ過施設を有した砂防ダムによる微細粒土砂捕捉実験	1997	小泉豊、石川芳治、小山内信智	
南西諸島における微細粒土砂の発生・流下実験調査	1997	小泉豊、小山内信智、石川芳治	
沈降型施設による潮水対策に関する基礎実験	1997	小泉豊、石川芳治、井良沢道也	
ろ過施設による微細粒子の捕捉効果	1997	小泉豊、石川芳治、原義文	
赤土砂の生産機構	1998	小泉豊、南哲行、山田孝、山口真司、宮野敬介	
農村地帯における河川環境の再生に関する研究 VI. 由仁町の小豆畑における土壌流出抑制効果の検証		北海道立林業試験場、北海道立孵化場、北海道立中央農業試験場	
農村地帯における河川環境の再生に関する研究 VII. 貫気別川流域における土砂流出抑制効果の検証	1998	北海道立林業試験場、北海道立孵化場、北海道立中央農業試験場	
2次元室内流水実験による不織布シートの透水性に関する実験的研究	1998	宮城おお早、上原芳成、原久夫、和字盛ミツ子	
不織布を用いた砂ろ過装置の透過量に関する検証実験とその応用		具奈田義安、中村栄秀	
多機能フィルターを用いた斜面体構造物に対する降雨実験		藤原東雄	
開放型フィルターを用いた斜面体構造物に対する降雨実験		藤原東雄、上俊三、福田靖、常村常生	
表面排水型マルチングシートを用いた斜面体構造物に対する降雨実験		藤原東雄、上俊三、細山田健三、常村常生	