

南西諸島における赤土砂の生産・流出機構と その対策に関する研究

南 哲行*、山田 孝**、仲野公章***、桜井 亘****

Study on Mechanism of the Red-soil Yield and Discharge and its Mitigation
Measures in the Southwestern Subtropical Islands, JAPAN
Noriyuki MINAMI, Takashi YAMADA, Masaaki NAKANO, and Wataru SAKURAI

要旨

南西諸島においては、降雨のたびに「赤土砂」と呼ばれる浮遊土砂が生産・流出し、河川域では水生生物の生息環境の激変や利水阻害、海域ではサンゴ礁内の生態系や漁業、観光などに深刻な影響を及ぼしている。

現在、沖縄県では、開発行為に関しては条例の施行により具体的な基準等に基づいた対策が実施され、その流出は減少してきているが、相対的に既存農地からの流出の割合が大きくなってきている。

本報は、赤土砂の発生源が既存農地のうち特にパイナップル圃場であることに着目し、そこでの対策を効率的に進めるため、赤土砂の生産・流出のメカニズムの解明とそれらを踏まえた現地で広く適用可能な対策手法の提案、その効果を定量的に評価できる赤土砂流出予測モデルの作成と実流域における検証結果をまとめたものである。

キーワード：赤土砂、土砂生産、土砂流出、土砂流出抑制対策

Synopsis

In Okinawa islands, suspended red-soil discharge occurred every time it rained and was giving serious impacts not only in the fluvial part but also in the coastal part, such as the damage to ecological system in coral reef. Recently, the sediment discharge decreases because regulations have been issued. However, since the sediment discharge from agricultural land is not targeted by the regulations, it increasingly constitutes relatively major part.

In this report, mechanisms of the red-soil yield and discharge from agricultural lands, pineapple field especially, are clarified. Depending on the mechanisms, mitigation measures broadly applicable to the pineapple field are proposed. Finally, the red-soil discharge prediction model, which enables the quantitative evaluation of the effect of the mitigation measures, is developed and verified by the actual data.

Keywords : red-soil, sediment yield, sediment discharge, sediment discharge mitigation measures

*元建設省土木研究所砂防部砂防研究室（現奈良県土木部）

**元国土交通省土木研究所砂防部砂防研究室（現北海道大学大学院農学研究科）

***元独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ

****元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（現フィリピン国派遣 JICA 専門家）

目 次

第1章	はじめに	1
1.1	概説	1
1.2	既往の研究と課題	3
1.3	本研究の位置付け	5
1.4	研究の方法	5
第2章	パインアップル圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂生産機構	9
2.1	概説	9
2.2	実験に用いた試料および物理特性	9
2.2.1	調査対象圃場の耕作ステージ区分	9
2.2.2	耕作ステージの異なる圃場土壌の物理特性	10
2.3	含水比の増大に伴う過飽和層の形成過程	10
2.3.1	土質試験供試体の作成方法	10
2.3.2	降雨・水浸の再現方法	10
2.3.3	過飽和層の形成と飽和度変化の特徴	11
2.3.4	水浸後の膨張および過飽和層の形成深さ	11
2.3.5	過飽和層のせん断強さ	12
2.4	地盤侵食抵抗試験等による過飽和層の限界掃流力評価	13
2.4.1	試験方法	13
2.4.2	侵食速度と回転数ならびに表層粘着力の関係	13
2.4.3	限界掃流力の評価	14
2.5	過飽和層での赤土砂生産限界降雨量評価	14
2.6	結論	15
第3章	圃場地表面での過飽和層形成を考慮した赤土砂生産予測手法とそれに基づく流域単位での赤土砂流出予測手法	17
3.1	概説	17
3.2	パインアップル圃場地表面の過飽和層形成を考慮した赤土砂生産予測手法	18
3.2.1	過飽和層形成を考慮した生産モデルの考え方	18
3.2.2	パインアップル圃場地表面での赤土砂生産計算手法と計算結果	22
3.3	流域単位での赤土砂流出予測手法	25
3.3.1	耕作年代の異なる圃場, その他の土地要素を踏まえた流域分布モデルの考え方	25
3.3.2	流域単位での計算結果	27
3.4	結論	28
第4章	現地圃場での適用度の高い赤土砂生産軽減法と流域単位での効果評価	29
4.1	概説	29
4.2	圃場地表面での過飽和層の侵食軽減を目的とした対策の考え方	29
4.3	圃場での試験施工による赤土砂軽減効果の評価	30
4.4	流域単位での赤土砂流出予測手法に基づく赤土砂生産軽減効果の評価	32
4.5	現地適用度の高い赤土砂生産軽減手法の計画のあり方	34
4.6	結論	35
第5章	おわりに	36

第1章 はじめに

1.1 概説

南西諸島においては、降雨のたびに土壌侵食により生産された「赤土砂」と呼ばれる浮遊土砂（写真-1.1, 写真-1.2）が流出し、河口域や島嶼周囲に分布するリーフ内において生態系や漁業、観光に深刻な影響を与える問題が生じている。南西諸島の土壌は、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、石灰岩に由来する土壌、及び島尻層泥岩を母材とする土壌に大別され、これらは沖縄県においてそれぞれ国頭マージ、島尻マージ、ジャーガルと呼称される^{1),2)}。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³⁾国頭マージは赤色を呈し、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。

沖縄県において赤土砂流出が顕著になったのは、1950年代後半のパインアップル導入に伴う開畑が始まってから⁴⁾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年に地元紙が赤土砂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った。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。また、東南アジアにおいてラテライト化した赤色褐色土によるダム堆砂や濁水問題も顕在化してきている。

赤土砂の流出は、河川においては魚類・底生生物等の消滅や利水阻害（浄水処理における影響）、海域においてはサンゴ礁内の生態系や水産業（沿岸漁業、養殖業）、観光資源としての価値等に影響を及ぼす（写真-1.3）。特に、海域に流出してサンゴ礁内に沈殿・堆積した赤土砂等は、静穏なサンゴ礁内から流れ出ず、晴天時もしばしば季節風等による波浪に攪乱され、水面まで巻き上がるという動きを繰り返す。また、赤土砂の流出による影響は、堆積による影響と、水が濁ることによる影響とに大別される。特に堆積による影響は、生物の生息環境そのものを改変してしまうため、生態系への影響（表-1.1）が大きく、沿岸域における漁獲や養殖等へも波及する。また、赤土砂等の

表-1.1 赤土砂流出による生態系への影響

（赤土等流出対策技術資料（案）より引用）

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	

サンゴ礁内への流出・拡散による景観阻害等は、ビーチ利用客や観光客の減少、ホテルのキャンセル等、観光産業にも影響を与えると考えられる（出典：赤土等流出対策技術資料（案）より引用）。

沖縄県における赤土砂流出に関する取り組みは、古くは復帰直後にさかのぼり⁵⁾、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、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。条例の特徴は、同条例施行規則において、開発工事に関して具体的な基準等に基づき対策を行うよう規定している点である。また、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⁶⁾）

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（写真-1.4）の占める割合が大きくなっており、仲宗根ら⁷⁾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ンアップルは、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たり平均約40倍の土砂流出を発生させる⁸⁾（ただしUSLEによる計算値）とされている。圃場においては、沈砂枴や沈砂池（写真-1.5, 写真-1.6）の設置などの土木的対策や、ススキ等を用いたマルチング（写真-1.7）などの営農対策が一部で行われているものの、経済的、労働的に農家の負担となること、対策効果が十分でない（例えば、沈砂地等では、赤土砂の粘性分は除かれず、流出してしまう場合が多い）ことなどから、必ずしも広く普及していないのが現状である。したがって今後は、特に圃場における対策の進展が課題と考えられている。



写真-1.1 河口における赤土砂流出状況
(平成 12 年 5 月 国頭郡東村古島川)

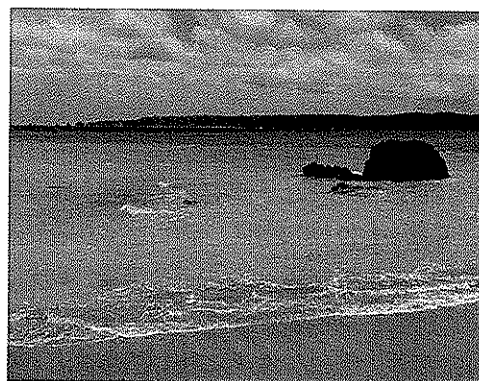


写真-1.2 リーフ内における赤土砂滞留状況
(平成 13 年 4 月 国頭郡東村平良湾)

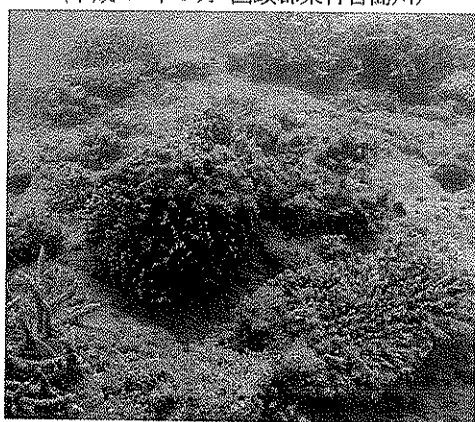


写真-1.3 赤土砂の堆積により死滅したサンゴの状況
(平成 11 年 7 月 名護市)



写真-1.4 耕作地からの赤土砂の流出状況
(平成 11 年 2 月 国頭郡東村)

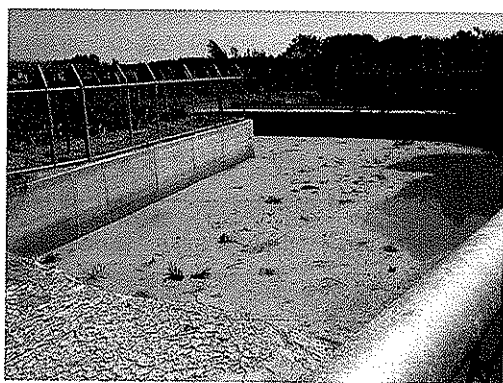


写真-1.5 沈砂地と赤土砂の堆積状況
(平成 12 年 9 月 国頭郡東村)

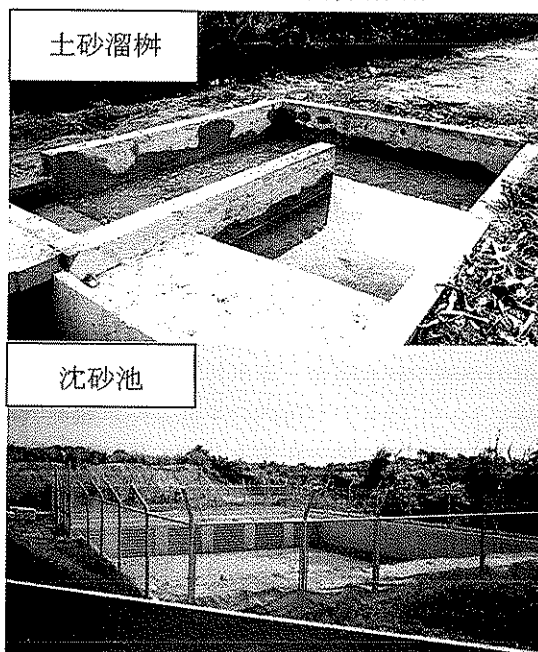


写真-1.6 沈砂槽の設置状況
(平成 12 年 9 月 国頭郡東村)



写真-1.7 ススキを用いたマルチの実施状況
(平成 12 年 2 月 国頭郡東村)

対策工の進展には、赤土砂生産・流出の特性、機構を踏まえた効果的かつ経済的な対策工の開発が必要となる。そのためには赤土砂の流出予測を精度良く行い、対策効果を定量的に把握することが可能な侵食モデルを作成する必要がある。

土木研究所では、これまでの研究でパインアップル圃場が赤土砂の主要な生産源であることを流域単位の観測から確認した⁹⁾。また、沖縄県国頭郡東村に分布するパインアップル圃場を例にとり、株の植付けからの時間経過と赤土砂流出量との関係を現地調査・観測を行った結果、パインアップル葉の繁茂による降雨遮断量は極めて少ないにもかかわらず、株の植付け後に葉による地表面の被覆率の増大とともに耕作面の侵食量は減少し、株間のうっ閉が進んだ植付け後 20 ヶ月程度以降も枯葉の堆積やコケの生育などにより侵食量はさらに減少することを明らかにした¹⁰⁾。また、降雨後の圃場から表面土壌を切りだし、水を含ませた状態で断面を観察した結果、土壌表面に土粒子密度が低く軟弱に見える薄層（過飽和層）が形成されている様子を確認した。さらに人工降雨実験を行った結果、圃場地表面での過飽和層の形成を確認するとともに、雨水の浸透によって圃場地表面がほぼ飽和に達する時点から水溜まりの面積および表面流量が増大し、凹部に沈積した細粒土砂や圃場地表面の過飽和における侵食が顕著となる赤土砂生産機構を観察した。

本研究では赤土砂生産機構を実験的に明らかにし、その生産機構を踏まえた赤土砂生産予測手法を提案した。次に赤土砂生産低減のための対策工法を提案し、その効果を赤土砂生産予測モデルにより評価した。

1.2 既往の研究と課題

本研究が対象とする南西諸島における赤土砂問題を軽減するためには、その主要な赤土砂生産場であるパインアップル圃場での土砂侵食メカニズムを解明し、株の植付けからの時間経過に伴い変化する土砂流出の流域スケールでの予測手法を構築するとともに、現地に適用可能な効果的、経済的かつ省力的な対策手法を検討し、先の土砂流出予測手法を用いてその効果を定量的に評価する必要がある。このような目的を踏まえ、既往の研究を概観するとともに、課題を抽出した。

赤土砂に関する既往の研究を、土砂流出メカニ

ズムに関する基礎的研究、土砂流出メカニズムのモデル化による土砂移動予測手法に関する研究、流域スケールでの土砂流出予測に関する研究、微細土砂流出対策手法に関する研究に大別し、それぞれについてレビューを行った。

まず、土砂流出メカニズムに関する基礎的研究としては、以下の研究が挙げられる。澤井らは、粘土分を含有する砂レキ床の侵食ならびに流砂機構に基づいて、平坦な流路床にリルが形成されていく過程と、リルが形成された流路横断面が平衡形状に移行していく過程を理論的に考察し、実験によって含水比一定の場合は侵食速度が摩擦速度に比例することなどを明らかにした¹¹⁾。また、芦田らは、斜面でのガリ侵食を対象として水理模型実験を行い、粗粒成分と微細成分の混合物の侵食速度と摩擦速度の比が一定であることなどを確かめた¹²⁾。西村らは斜面における降雨時のクラスト形成が表面流の発生に大きな影響を与えると考え、クラストの形成過程とその形成による侵食量変化を室内人工降雨実験によって調べ、傾斜が大きい場合は、表面流の発生が促進され侵食量も増加することを示した¹³⁾。宮城らは国頭マージの理工学的性質を明らかにすることが侵食機構を明らかにするための基礎と考え、土粒子比重、自然含水比、粘土分含有量、コンシステンシー、比表面積と液性限界との関係を明らかにした¹⁴⁾。このうち、澤井ら¹¹⁾、芦田ら¹²⁾が研究対象とした侵食材料は、砂成分が多く、赤土砂のような膨潤性粘土鉱物を高濃度に含むものとはかなり材料特性が異なるため、彼らの成果はそのまま本研究には適用できないと考えられた。また、土壌の物理特性等に関する既往の研究は、時間の経過に伴う土壌状態の変化が考慮されたものではないことから、主要な赤土砂生産場であるパインアップル圃場の株の植付けからの時間経過に伴う地表面の状態変化や、降雨に伴う地表面の強度特性の変化については、本研究で明らかにすべき課題として位置づけられる。

土砂流出メカニズムのモデル化による土砂移動予測手法に関する研究としては、以下の研究が挙げられる。澤井らは、沖縄県の国頭マージを対象として、内筒回転式土壌侵食実験を行い、侵食速度と摩擦速度の比が一定に近似することを明らかにした¹⁵⁾。高木らは、多数のリルの合流によって大きなリル網が形成された現地圃場斜面を対象として流出土砂量の予測式を提案した¹⁶⁾。関根ら

は、粘着性土の侵食機構について一連の研究を進め、侵食要因として、粘土含有率、流速、水含有率、水温、非粘着性材料（砂）の粒径に着目してそれらの要因が侵食速度に与える影響を実験的に考察し、水含有率、摩擦速度、粘着力からなる侵食速度式を提案した^{17),18),19),20),21)}。日下らは、雨水流による粘性土壌の限界掃流特性を水理実験によって調べ、土壌母材ごとに無次元侵食量は無次元掃流力の関数として表現できることを示し^{22),23)}、それらの結果をもとに、粘性土の侵食式と斜面流の基礎式を連立させて表面流による傾斜農地の土壌流亡量を推算する手法を提案した²⁴⁾。またさらに、実験圃場での観測によって 10 分間最大雨量と 10 分間最大流出水量を解析し流出関数を求め、それを室内実験の結果に当てはめることによって侵食係数、斜面長、斜面勾配、10 分間最大降水量をパラメーターとする実用的な土壌流亡推算式を提案した²⁵⁾。また、藤川らは、降雨と地表薄層流による初期水食時の乱した土の水食性を明らかにするために各種土壌を用いて水理実験を行い、その結果から多変量解析によって水食性の要因を検討し、粘土比が最も重要な因子であることを示した²⁶⁾。高らは造成農地におけるリルの生成と発達の機構を明らかにするために、現地観測を実施し、リル網の発達は Horton 則に相当する規則性があること、粘着性土壌では粘着力がリル生成に大きく関わっていることなどを示した^{27),28)}。KHAN らも人工降雨実験装置を用いて不等流条件下での砂地盤におけるリル生成機構を検討し、リル侵食が開始される限界の流量は土壌特性が一定であればいずれの勾配においても同じであることを示した²⁹⁾。深田らは、雨滴衝撃の加わる流れの水理学的特性と流砂特性について、高速度撮影による雨滴の衝突現象観察、人工降雨実験を用いた室内水路実験により調べ、雨滴の水面への衝突による負圧力積のある限界以上で砂粒の剥離が生じ、負圧力積の累積値によって全剥離量がきまり、それが水量に応じて輸送されるというモデルを提案した³⁰⁾。坂西らは裸地斜面からの表面流出、流出土砂量を水理学的に解析し、砂土のような受食性の高い土壌で明瞭な斜面流が発生する急勾配斜面では流砂量式として掃流砂量式の適合性が高いことを示した³¹⁾。中尾らは、自然降雨を対象としたマサ土圃場での土砂流出観測を実施し、傾斜畝立て圃場からの土砂流出予測のための数学モデルを提案した

³²⁾。これらのうち、例えば澤井らの研究¹⁵⁾では、侵食速度と摩擦速度との関係は議論されているものの、赤土砂の土質強度と侵食速度との関係については調べられていない。また、関根らの一連の研究^{17)~21)}では、粘着性土の粘着力低下について検討されているものの、実際の土砂流出との関係（例えば、侵食限界降雨、限界掃流力）は十分議論されていない。また、高木らの研究³³⁾では、リル内の流水が流路の至るところで流砂に対して十分な輸送能力を有していることが前提となっており、土砂の堆積過程も含めた土砂輸送能力の評価を組み込んだモデルにはなっていない。また他の既往研究を概観しても、赤土砂のような膨潤性粘土鉱物を含んだ土壌の降雨時の膨潤による強度変化機構と侵食との関係、赤土砂地盤の限界掃流力評価などは研究されていないことが指摘される。

流域スケールでの土砂流出予測に関する研究としては、以下の研究が挙げられる。細山田らは、一連続降雨ごとの侵食流亡量と USLE 式で用いられる降雨係数との間には高い相関性が認められるとし、本来は年間土壌侵食量を推算するためのものである USLE 式によって、短期間の侵食量を推算することが可能であるとした³⁴⁾。友正らは従来から物理的根拠が不明確であった USLE 式の降雨係数について、降雨データの統計解析から流砂量式の水理量に係わる係数との関係を検討し、降雨係数の近似計算手法を示した³⁵⁾。松村らは、流域スケールでのウォッシュロード流出予測のために、土砂生産源を裸地、崩壊地、0 次谷、1 次谷以上の側岸を考え、ウォッシュロードをパラメーターとして侵食速度と比流量の関係から侵食速度式を導いた³⁶⁾。酒井らは、雨水流モデルによって表面流出量を計算し、LQ 式で求められる浮遊土砂量と単位面積当たりの残存負荷量から求まる土砂量、降雨による土壌分散量を加算する方法を考案し、浮遊土砂濃度の時系列変化を表現し³⁷⁾、流域内土地利用変化による降雨流出特性や土壌侵食特性の変化を表現するために分布型メッシュタンクモデルに着目し、土地利用の違いを等価粗度の違いとして与えるモデルを提案した³⁸⁾。さらに、流出イベント単位での浮遊土砂濃度の経時変化を再現するために、LQ 式を基本に降雨によるインパクトや時変パラメータを導入して浮遊土砂濃度の経時変化を表現した³⁹⁾。大澤らは、流域スケールでの複数の流出イベントを含む長期の浮遊土砂

濃度の経時変化を表現できる浮遊土砂流出モデルの構築を目指して、従来のLQ式を平水時と洪水時に分けて用いる、雨滴による土粒子の分散項を導入するなどの改良を施した⁴⁰⁾。これらのうち、USLE式による土砂流出予測手法は経験的予測手法であるため、時系列的な赤土砂流出予測や対策効果の定量的把握を行う本研究には適さないと考えられる。また、松村らの研究³⁶⁾では、流域内のウォッシュロード生産場の時空間分布変化を考慮して流出予測できる手法とはなっていないことが指摘される。酒井らの研究^{37)~39)}では、粘性土における土砂輸送能力評価に対する土壌の代表粒径の考え方が整理されていないこと、モデルで用いる係数、例えば土壌に関する係数 a_r, a_c の値(流路潤辺の土壌の物理性や流路横断形状などに支配される係数)を先見的に決定する方法がなく、計算値と実測値とを比較しながら最適な係数を同定するという試行的な方法で係数決定を行わざるを得ないこと、その他の各種パラメーターについても客観的な決定方法がないこと、が指摘される。大澤らの研究⁴⁰⁾では、流域スケールでの土砂流出予測のためには、土砂発生源の位置や土地利用のような分布要素をモデルに組み込んで計算を行う必要があること、などの課題が残されている。

微細土砂流出対策手法に関する研究としては、中らによる畑面から水路内に流入した土砂を排除するための渦動排砂管の排砂効果⁴¹⁾や新城らによる高分子系被覆材による国頭マージ地帯での畑地からの赤土流出軽減効果⁴²⁾、浮遊土砂の重力沈降を促進するための浸透性沈砂池工法⁴³⁾⁴⁴⁾がある。これらの提案された工法^{42)~44)}は、現地への普及に当たり、経済性、省力性の面で課題が残ること、中らの提案した渦動排砂管による対策⁴¹⁾は主に掃流砂が対象で、粘土やシルトといった微細土砂には対応できないこと、圃場での対策の流域レベルでの効果評価がなされていないこと、等の課題が残されている。

1.3 本研究の位置付け

前節で整理した既往研究における課題を踏まえ、本研究では、パインアップル圃場での赤土砂生産、河道への流入、河道での運搬を統一的に計算できる赤土砂生産流出モデルの作成、それに基づく圃場・流域スケールでの土地利用分布を考慮した土砂流出の影響評価手法、および対策工の効

果評価手法の構築を行った。

1.4 研究の方法

本研究は、以上の既往関連研究の問題点や土木研究所による研究成果を踏まえ、パインアップル畑の耕作段階に応じた地表面の状態変化、特に粘着性土壌の土質強度変化機構を模型実験によって明らかにし、侵食による主要な要因等について考察⁴⁵⁾し、その特徴を反映できる赤土砂流出モデルを提案し⁴⁶⁾、さらに、現地定用度の高い経済的、省力的、効果的赤土砂生産抑制対策を提案しその効果評価を行ったものであり、次の5章から構成される。

第1章では、本研究の背景、研究方法と流れについて示した。

第2章では、過飽和層の形成メカニズムと侵食速度を明らかにするために土質試験ならびに地盤侵食試験機、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価によって、過飽和層での赤土砂侵食過程について考察する。

第3章では、第2章の検討で得られた赤土砂侵食機構をもとに、圃場の耕作段階による赤土砂生産・流出特性の違いを表現でき、かつ土壌侵食・流下過程を一貫して再現できる赤土砂の侵食・流出計算モデルを提案する。

第4章では、現地での試験施工をもとに現地適用度の高い経済的、省力的、効果的赤土砂生産抑制対策工を提案するとともに、第3章で作成した赤土砂生産・流出計算モデルを用いて対策工の効果を評価する。

第5章は、本論文の研究成果を要約して結論としている。

本研究のフローを図-1.1に示す。

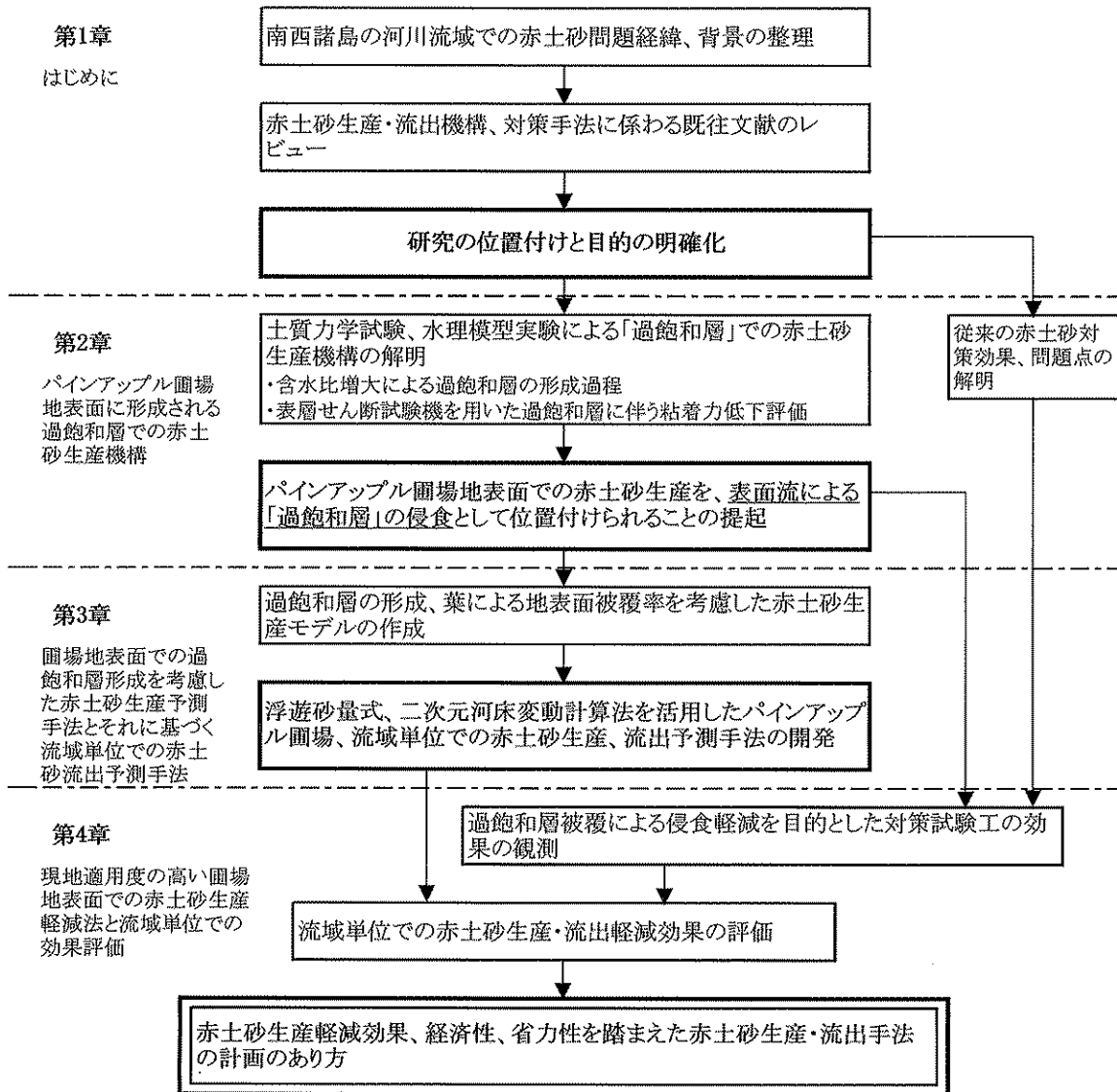


図-1.1 南西諸島における赤土砂の生産・流出機構とその対策に関する研究フロー

参考文献

- 1) 小林嵩・品川昭夫・宮内信文：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。鹿児島大学農学部学術報告, 第19号, pp.121~133, 1969
- 2) 松坂泰明・音羽道三・山田裕・浜崎忠雄：沖縄本島・久米島の土壌の分類について。農業技術研究所報告 B (土壌・肥料), Vol.22, pp.305~397
- 3) 国土庁 (1977)：土地分類図付属資料 沖縄県, 1971
- 4) 翁長謙良・吉永安俊・渡嘉敷義浩：国頭マージ地帯の土壌侵食と防災。農業土木学会誌, Vol.33, No.4, pp.307~313, 1994
- 5) 沖縄総合事務局：特定開発プロジェクト報告書, 1975
- 6) 沖縄総合事務局開発建設部：赤土等流出防止対策マニュアル (案), 1996
- 7) 仲宗根一哉・比嘉榮三郎・滝本裕彰・大見謝辰男：沖縄県における赤土等年間流出量 (第2報) - 赤土等流出防止条例施行後の年間流出量の推算 -。沖縄県衛生環境研究所報, Vol.32, pp.67~72, 1998
- 8) 比嘉榮三郎・大見謝辰男・花城可英・滝本裕彰：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, 1996
- 9) 南哲行・小山内信智・山田孝・黒崎靖介・中村勝正・与那嶺淳：沖縄県における流域単位での赤土砂の流出特性について。砂防学会誌, Vol.54, No.3, p.39-46, 2001.
- 10) 南哲行・山田孝・溝口昌晴：赤土砂の生産実態と要因に関する基礎調査。砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.77-81, 2000.
- 11) 澤井健二・芦田和男：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, p.73-86, 1977
- 12) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：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回水理講演会論文集, pp.135-141, 1980
- 13) 西村拓・中野政詩・宮崎毅：室内人工降雨実験装置による土壌クラストの形成と侵食との関連性。農業土木学会論文集第146号, pp.101-107, 1990
- 14) 宮城調勝・近藤武：国頭マージの物理的性質について - 国頭マージの理工学的性質に関する研究 (I) -。農業土木学会論文集第149号, p.39-44, 1990
- 15) 澤井健二：粘性土の侵食と堆積に関する一考察 - 沖縄県国頭マージを事例として -。京都大学防災研究所年報, 第33号 B-2, pp.571-577, 1990
- 16) 高木東・堤聰・中野政詩：リルにおける侵食量と流出土砂量の予測。農業土木学会論文集第141号, pp.89-98, 1989
- 17) 関根正人・熊谷利彦・尾藤文人：粘着性土の侵食機構に関する基礎的研究。水工学論文集, 第43巻, p.659-664, 1999
- 18) 関根正人・飯塚暢明・高部一彦：粘着性土の侵食特性に係わる諸要因の影響。水工学論文集, 第44巻, p.747-752, 2000
- 19) 関根正人・飯塚暢明・藤尾健太：粘着性土の侵食速度予測に向けた実験的研究。水工学論文集, 第45巻, p.667-672, 2001
- 20) 関根正人・藤尾健太・片桐康博・西森研一郎：粘着性土の侵食速度に及ぼす粘着力の影響。水工学論文集, 第45巻, p.641-646, 2002
- 21) 関根正人・西森研一郎・藤尾健太・片桐康博：粘着性土の侵食進行過程と侵食速度式に関する研究。水工学論文集, 第47巻, p.541-546, 2003
- 22) 日下達朗・田中宏平・藤田則之・四ヶ所四男美：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 (I) -。農業土木学会論文集第90号, pp.9-16, 1980
- 23) 日下達朗・田中宏平・藤田則之・四ヶ所四男美：表層流に対する粘性土壌の抵抗条件と侵食量 - 雨水流による土壌の侵食特性 (II) -。農業土木学会論文集第92号, pp.1-7, 1980
- 24) 日下達朗・田中宏平・四ヶ所四男美：表面流による土壌流出量の推算について - 雨水流による土壌の侵食特性 (III) -。農業土木学会論文集第94号, pp.1-6, 1981
- 25) 日下達朗・深田三夫・ロイ・キンシュック：降雨型を考慮した土壌流出推算式。農業土木学会誌 第62巻第4号, pp.327-333, 1994
- 26) 藤川武信・内田勝利：乱した土の初期水食の判定要因 - 土の初期水食に関する土質理工学的研究 (II) -。農業土木学会論文集第91号, pp.1-7, 1981
- 27) 高文煥・佐藤晃一：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) -。農業土木学会論文集第135号, pp.25-32, 1988
- 28) 高文煥・佐藤晃一：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 (II) -。農業土木学会論文集第135号, pp.1-6, 1988
- 29) KHAN Farmanullah, SATO Koichi and TAKASE Keiji : Experimental Study of Rill Initiation under Rainfall Conditions, 農業土木学会論文集第194号 (第66巻第2号), pp.261-267, 1998
- 30) 深田三夫・藤原輝男・日下達朗：雨滴衝撃の加わる流れによる流出土砂量の測定。農業土木学会論文集第165号, pp.23-32, 1993
- 31) 坂西研二・早瀬吉雄：ライシメータ裸地斜面を用いた降雨流出と侵食に関する研究 - 掃流砂式を応用した流出土砂量の解析 -。農業土木学会論文集第173号, pp.11-20, 1994
- 32) 中尾誠司・高木東・友正達美・細川雅敏：傾斜ウネ立て圃場からの土砂流出量予測モデルの提案とその検証。農業土木学会論文集第184号 (第64巻第4号), pp.11-2, 1996
- 33) 高木東・中尾誠司・友正達美：流砂モデルによるリル侵食量および流砂量の解析。農業土木学会論文集第181号 (第64巻第1号), pp.541-552, 1996.
- 34) 細山田得三・藤原輝男：侵食流出土量の予測に関する USLE の適用について (II) - USLE における土

- 壤係数、傾斜斜面長係数、作物管理係数および保全係数—農業土木学会誌第 52 巻 6 号、pp.497-502,1984
- 35)友正達美、高木東、中尾誠司：土壤流亡式 USLE における降雨係数の近似計算法、農業土木学会誌 第 58 巻、第 12 号、pp.1189-1192,1990
- 36)松村和樹、鈴木宏、上島隆雄：Wash load の生産・流出機構と長期流出土砂量、新砂防、Vol.37, No.2(133), pp.28-34, 1984
- 37)酒井一人、吉永安俊、翁長謙良：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(第 63 巻第 6 号)、pp.757-765,1995
- 38)酒井一人、吉永安俊、翁長謙良：濁水濃度解析モデルの開発の現状とその可能性、農業土木学会誌 第 65 巻第 3 号、pp.247-253,1997
- 39)酒井一人、吉永安俊、島田正志、翁長謙良：浮遊土砂流出解析モデルにおける時変パラメーターの検討—沖縄県における赤土流出のモデル化に関する研究—、農業土木学会誌第 201 号、pp.43-51,1999
- 40)大澤和敏、酒井一人：降雨・土砂流出解析のための浮遊土砂流出モデルの構築、---沖縄県における赤土流出モデル化に関する研究---、農業土木学会論文集第 217 号(第 70 巻第 1 号)、pp.65-70,2002
- 41)中達雄、穴瀬真、鬼塚宏太郎、島崎昌彦：渦動排砂管を用いた造成地内の流出土砂制御工法の実用化、農業土木学会論文集第 161 号、pp.91-97,1992
- 42)新城俊也、小宮康明、宮城調勝、赤嶺充司：高分子系被膜材による国頭マージ地帯における赤土流出防止、農業土木学会論文集第 166 号、pp.97-104,1993.
- 43)翁長謙良、吉永安俊、渡嘉敷義浩：国頭マージ地帯の土壤侵食と防災、農業土木学会誌 第 62 巻第 4 号、pp.307-314,1994.
- 44)中達雄、島崎昌彦、常住直人、桐博英、臼杵宜春：浸透性沈砂池工法による浮遊土砂制御---濁水制御のための浸透性沈砂池工法の室内水理実験（Ⅰ）,農業土木学会論文集第 190 号 第 65 巻第 4 号、pp.113-119,1997.
- 45)南哲行・仲野公章・山田孝・下村幸男、小野寺勝：沖縄島の圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂侵食機構、砂防学会誌, Vol.55, No.3, p.3-11,2002..
- 46)南哲行・桜井亘・山田孝・菊池英明・武蔵由育：沖縄地方で発生する赤土砂の流出モデルの開発とシミュレーション,砂防学会誌, Vol.56, No.3, p.22-30,2003.

第2章 パインアップル圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂生産機構

2.1 概説

主要なパインアップル産地である沖縄島北部は、国頭マージと呼ばれる千枚岩の強風化を主体とし、膨潤性粘土鉱物を含む赤黄色の粘性土で覆われている。膨潤性粘土鉱物を含む粘性土は乾燥すると収縮して固結化するが、吸水により軟弱化するため、侵食抵抗は含水状況によって大きく低減すると考えられる。

しかしながら、このような土質変化に着目して赤土砂の侵食機構を検討した研究には前田らの研究⁴⁷⁾以外にはみられない。表面侵食に関するこれまでの多くの研究によると、侵食形態は一般的に以下の3つのタイプに大別できる。

①雨滴の地表面への衝突による土粒子の飛散（表面流が無い場合）

②雨滴の表面流への衝突による水面下の乱れと土粒子の離脱、巻き上げ（表面流がある場合）

③表面流の掃流力による圃場地表面の侵食（飛散粒子の取り込みも含む）

①の侵食形態に関して、例えば翁長ら⁴⁸⁾は人工降雨実験によって赤土砂の供試体の含水比が20～40%では崩壊度（雨滴衝撃により崩壊した土の絶乾重量と供試体の絶乾重量との比率）は5%以下と小さくなることを報告している。ただし、そのメカニズムについては明らかにされていない。

②については、粘性土を対象とした雨滴侵食機構を物理的な観点からアプローチした研究は少ないが、以下にあげる報告がある。砂質土を対象とした深田の実験結果⁴⁹⁾によれば、雨滴が水表面に衝突すると同時に水面下に半球状の空気球（水中ドーム）が形成され、その拡大時に砂粒を押し除け、縮小時には砂粒を水中に巻き上げて浮遊させること、このときに表面水が流速成分をもつと砂粒は水中を沈降しつつ下方に移動すること、表面流の流れが速くなると（水路床勾配は1～5%であり本研究の対象とする圃場の勾配に近い）雨滴の衝撃が加えられても流砂量はMeyer-Peter・Müller式、Brown式により算出した値に近くなることが報告されている。EUROSEM式⁵⁰⁾においても土粒子離脱量を雨滴の運動エネルギーと表面流の水深の関数で表現している。また、Moss⁵¹⁾

は、砂質土での表面流がある場合の雨滴衝撃実験により、表面流の水深が2mmもあれば雨滴衝撃による侵食は無視し得る量であること、雨滴の衝撃による局所的なせん断変形作用が侵食に大きな影響を与えることを明らかにしている。

③については、粘土を含む砂層の限界掃流力に関し、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の研究⁵²⁾、粗面形状、粘土比、乾燥密度と限界掃流力との関係について考察した日下らの研究⁵³⁾、粘着性流路内での横断形状変化に関する澤井らの研究⁵⁴⁾など、これまでもいくつかなされてきた。前田ら⁴⁷⁾はコーン指数により数量化した地盤の締固め度と侵食強度との関係について検討し、試験土（国頭マージ）の含水比が45～50%になると締固め度によらず侵食抵抗がほとんどなくなることを示した。

これまで土木研究所で行った圃場での観察によると雨滴が直接当たらないようにススキで地表面が被覆された箇所でもススキの葉の大部分が地表面に密着しておらず、雨滴を直接受けるマルチングされていない箇所と同程度のリルが明瞭に形成されていることが判っている。その要因としては、雨滴が直接当たらなくても圃場地表面には降雨による含水比の上昇とともに過飽和層が形成され、粘着力が低下し、表面流の掃流力によって侵食が進むといった過程が考えられる。このことから、本章では、赤土砂の主要な生産場であるパインアップル圃場地表面で起こる侵食形態を③に起因するものと仮定し、それによる赤土砂の流出を「赤土砂の流出」と定義することにする。そして、この侵食メカニズムを明らかにするために土質試験ならびに地盤侵食試験機、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価によって過飽和層で生じる赤土砂の侵食過程を考察する。

2.2 実験に用いた試料および物理特性

2.2.1 調査対象圃場の耕作ステージ区分

対象にした試料は、土砂流出が多いとされている国頭マージとし、沖縄県東村古島川上流の宮城土地改良区内のパインアップル圃場とした。パインアップルの栽培は4～5年のサイクルで行われる。本章ではそのサイクルをステージ1（古株の除去から新しい株の植え付けまでの放置期間：約6ヶ月）、ステージ2（鋤き込み・植え付け後約1年の育成期

表-2.1 東村の圃場における採取試料の物理特性

地点	比重 ρ_s	液性限界 LL	塑性限界 PL	塑性指数 IP	砂礫分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
E圃場 (天地返し後)	2.72	37.7	22.2	15.5	42	29	29
F圃場 (植付後1年)	2.72	42.4	24.8	17.6	39	28	33
B圃場 (植付後2年)	2.72	37	21.4	15.6	36	27	37
C圃場 (植付後3年)	2.73	38.3	22.8	15.5	45	21	34
東村圃場土取り場	2.70	50.3	24.2	26.1	29	26	45

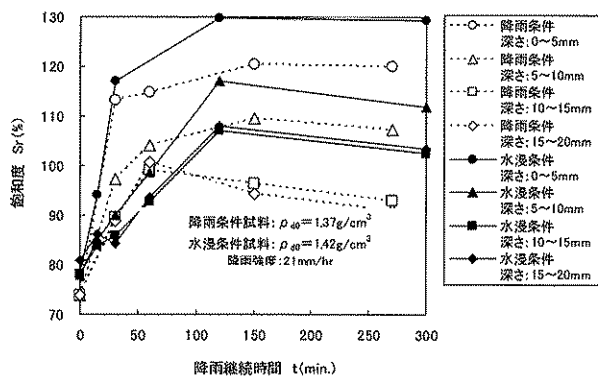


図-2.1 降雨時間と飽和度の関係

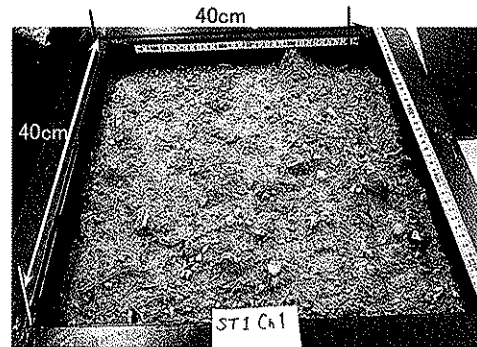


写真-2.1 不攪乱試料の採取 (ステージ1凸部)

間の育成期間、ステージ3(植え付け後約2年)及びステージ4(植え付け後約3年)の収穫期間に区分する。その一連のサイクルの間、地表面は雨滴衝撃、降雨浸透、農作業時の転圧の影響を受け、また、ステージ2以降では葉の生長繁茂に伴った地表面被覆率増大による表面流の畝間への集中化などの影響も受ける。調査は上記1~4ステージを対象とし、不攪乱試料は該当するステージの圃場から各5供試体を、攪乱試料(約5t)は同地区の圃場土壌の土取場で採取した。

2.2.2 耕作ステージの異なる圃場土壌の物理特性

各ステージの圃場から採取した試料の物理特性を表-2.1に示す。物理特性はステージによらずほぼ同じである。また細粒分を50~70%含み、国頭マーグとしては概ね平均的なものとして位置付けられる。ただし、ステージ1と3において表層を5mm間隔で詳細に粒度分析した結果によると、鋤き込みから2~3年の経過により表層10mm以浅で粘土分が約40%から25~30%に減少している現象が見られた。

2.3 含水比の増大に伴う過飽和層の形成過程

2.3.1 土質試験供試体の作成方法

供試体は、「不攪乱試料」と「締固め試料」を

用いた。不攪乱試料(例えば写真-2.1)は、締固め試料と実際の圃場とでは土壌生成過程が異なるために、各ステージの圃場から採取したものである。締固め試料は、最大粒径を9.5mmとして均一混合した後に不攪乱試料の乾燥密度にあわせて締固めて作製した。

2.3.2 降雨・水浸の再現方法

降雨時に地表面には凹部の水溜り(水浸部)と凸部(非水浸部)が形成される。ここでは降雨条件(非水浸)と水浸条件を変化させたときの飽和度の経時変化を調べた。図-2.1に1年確率程度の通常降雨のやや強い降雨強度として20mm/hの人工降雨(降雨量制御の関係で実験では21mm/hとなった)下と水浸条件下での締固め資料の飽和度を示す。降雨条件下における表層10mm以浅の含水比状態は、降雨後20~30分(降雨量7~11mm相当)でほぼ飽和状態(飽和度97~100%)に至り、水浸条件下での含水比状態にほぼ等しくなる。この結果は現地観測結果⁴⁹⁾により確認された赤土砂流出が始まる降雨量約10mmに近い値である。

以上から、次節に示す実験において土壌を飽和状態とするために、現地での降雨時の水溜りの水深を約1cmと仮定し、それと同じ水深を供試体上部に保持した状態で下部から空気を抜き水浸状態

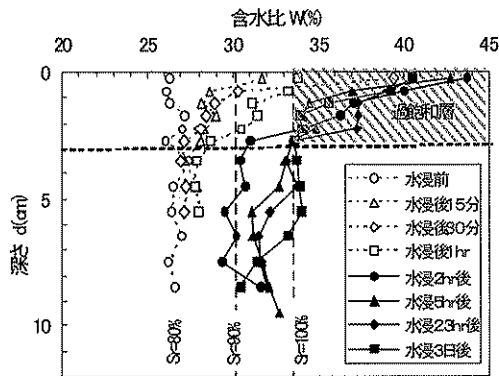


図-2.2 水浸後の含水比分布(締固め：ステージ2)

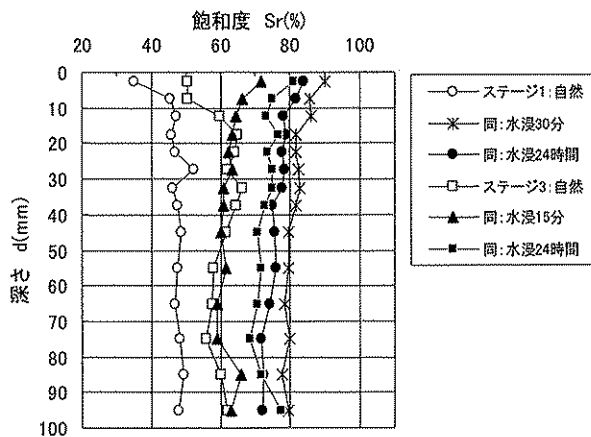


図-2.3 水浸後の飽和度の分布(不攪乱試料)

とする方法を用いた。

2.3.3 過飽和層の形成と飽和度変化の特徴

図-2.2 に締固め試料の水浸後の深さごとの含水比分布を示す。時間経過とともに表層から下方に含水比が増加する様子がみられ、30 分内に見かけ飽和度 $Sr' \geq 100\%$ ($w \geq 34\%$) の層が 0.5cm 程度の厚さで形成された。ここで、 $Sr' > 100\%$ となるのは水浸前の密度を用いた計算による見かけ飽和度として求めたことによる。実際には、締固め試料は吸水膨張により密度が低下するため飽和度は 100% の状態となる(以下この層を「過飽和層」と定義する。また、見かけ飽和度 $Sr' \leq 100\%$ の場合を「非過飽和層」と定義する)。

図-2.3 に不攪乱試料の水浸後の飽和度分布をステージ1及び3を代表として示す。ステージ2では水浸後 15 分で $Sr' \geq 100\%$ ($w = 43 \sim 45\%$) に至っているが、ステージ3の不攪乱試料は水浸後 24 時間でも $Sr' \approx 80\%$ ($w = 26 \sim 30\%$) にとどまり過飽和層は形成されなかった(ステージ4試料も同様)。ステージ3の不攪乱試料はごく薄く藻類が表面を

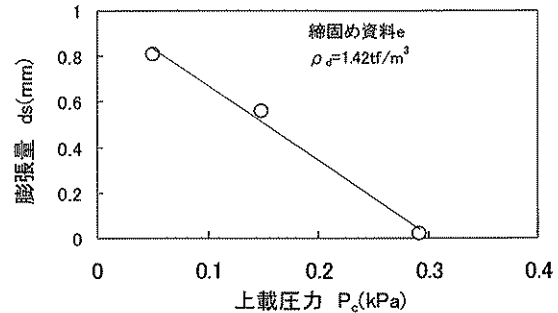


図-2.4 膨張圧力除荷後の上載圧力とリバウンド量の関係

覆った状況、ステージ4の不攪乱試料は約 5mm 厚の苔類が全体を覆っている状況であった。ステージ4の不攪乱試料の苔を含む表層 1.5cm 部分を削除すると、水浸後 15 分後に表層 5mm が $Sr' \approx 100\%$ ($w \approx 35\%$) に至る現象がみられた。ステージ3、4の不攪乱試料が過飽和層を形成しない理由として、藻類や苔類による地表面被覆などの効果が考えられる。ただし、前述のようにステージの経過により表層約 1cm 以浅の粘土分が約 40% から 25~30% に減少したことが原因になっていることも考えられるが、現時点ではこれ以上の議論は難しい。また、図-2.3 によると、含水比が大きく増加する表層 2~3cm 以深の部分では飽和度の深さ方向の差はなく全体に $Sr' \approx 80\%$ まで 15 分~30 分程度内に上昇し、その後の上昇は遅い特徴がみられる。

既往研究⁵⁵⁾によると、国頭マージの粘土鉱物はカオリン鉱物、バーミキュライト、イライトおよびバーミキュライトとイライトの不規則混層型からなり、ギブサイトやゲータイトを伴う場合が多いとされている。このうちバーミキュライトは膨潤性を持っている⁵⁶⁾。スレーキング試験による限界含水比は約 10% であり、今回の実験では水浸前の含水比を全て約 27% としているため、図-2.2 に示す過飽和層の形成はスレーキングではなく膨潤性粘土鉱物に起因すると考えられる。

2.3.4 水浸後の膨張および過飽和層の形成深さ

粘性土の吸水膨張がその強度低下をもたらす重要な要因であると考えられるため、膨潤圧試験を行った。降雨時と同様に試料上面を給水面とした水浸後の膨潤圧は概ね 1 時間で約 2.5kPa (26gf/cm²) に収束した。水浸後に膨張する深さは膨張圧が土被り圧と等しくなる深さまでと

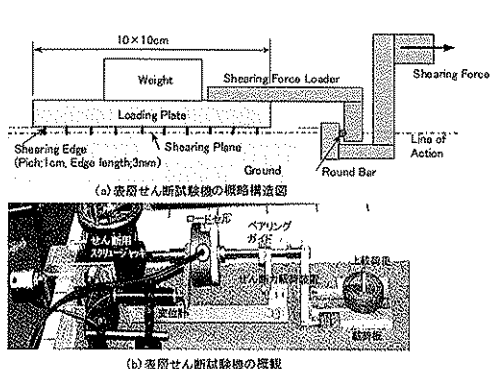


図-2.5 試験装置の概要

すると、約 2.5kPa (26gf/cm^2) の膨張圧は湿潤密度が 1.8g/cm^3 で土層厚が 14cm の土被り圧に相当する。図-2.4 に膨張を拘束したまま計 2 時間水浸させたうえで拘束を解放した後の上載圧と膨張量の関係を示す。この膨張現象は深い所の膨張が収束した後、地表面から更に吸水膨張するものであり、地表面近傍の過飽和層の形成過程とみなせる。図-2.4 によると膨張限界となる圧力は約 0.3kPa (3gf/cm^2) である。この膨張の限界圧力と土の水中重量 (約 $8\text{kN/m}^3 \approx 0.8\text{gf/cm}^3$) が釣り合う深さを膨張圧力による限界の深さとして解釈すると計算上 $3\sim 4\text{cm}$ が得られ、図-2.2 によると $S_r > 100\%$ の深さは水浸後 5hr 以降の増加はなく 3 日水浸でも約 3cm となっており概ね計算と現象が符合している。

2.3.5 過飽和層のせん断強さ

既往の土質試験装置では水浸時における表層せん断強度の低下を計測することができないため、図-2.5(a)(b)に示す表層せん断試験装置を新たに作製して試験を行った。

図-2.6 に表層せん断試験から求めた過飽和層における粘着力 (c_{0s}) とその時の含水比を対比して示す。締固め試料、不攪乱試料ともに、含水比が増加するにつれて粘着力はほぼ直線関係で低下する。この結果は、液性限界付近で強度が大きく低下するとして前田ら⁵⁰⁾の試験結果と符合してい

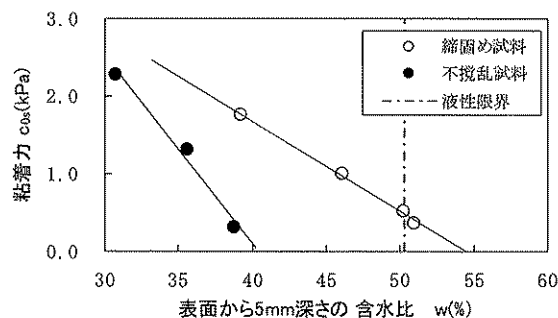


図-2.6 表層せん断試験による粘着力と含水比の関係

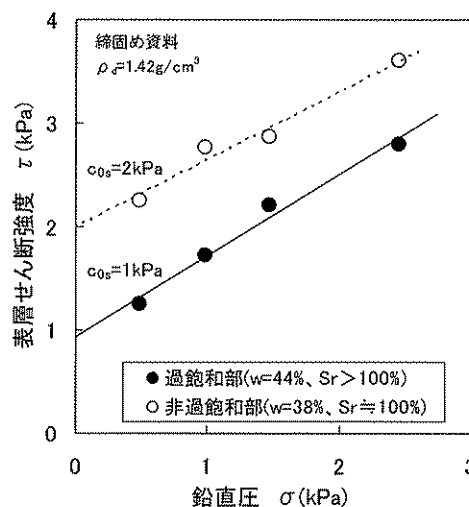


図-2.7 過飽和部・非過飽和部の表層せん断強度

る。ただし、含水比がほぼ液性限界を呈する締固め試料の方が大きい粘着力を示すのは、締固め作用により土塊が潰され試料表層の密度が均一化したためと考えられる。

図-2.7 に締固め試料において形成された過飽和層とその 1.5cm 下の非過飽和層のせん断強度を示す。過飽和層のせん断強度 C_{0s} は約 1kPa (10gf/cm^2)、非過飽和層は $C_{0s} = 2\text{kPa}$ (20gf/cm^2) である。なお、表層せん断試験により、過飽和層、非過飽和層の内部摩擦角は、おのおの、約 38° 、約 33° という大きい値が得られている。実験時のせん断速度は 1mm/s という急速せん断であるが、せん断面が表層 3mm と排水距離が短いため圧密排水条件に近いせん断条件となったことが影響したと考えられる。また、本章では表層の強度を対象としているので、せん断時の拘束圧は無視できるとし、せん断強度を粘着力とみなした。

2.4 地盤侵食抵抗試験等による過飽和層の限界掃流力評価

2.4.1 試験方法

侵食試験には図-2.5(c)に示す地盤侵食抵抗試験機⁵⁷⁾を用いた。この装置は上部に設けた回転羽により、内外の円筒間の水に回転流を起こしてせん断流を発生させることが可能である特徴を持つ。この装置には構造上の特徴として、水流にテイラー渦の発生と流れ方向の流速に半径方向に分布をもつという欠点があるが、ここでは粘性土の侵食メカニズムの概要を把握することを主眼とし、試験方法として簡便であること、また観察によると、土砂移動の初期には場所の偏りもあまりなかったことから土砂移動の初動時の流速を概略評価するには問題ないとした。そのため、平均流速は水路の中央位置で評価した。なお、この平均流速は粘性底層との境界位置（地表面から約 8mm）の流速にはほぼ一致していた。侵食土砂量の計測手法は次のとおりである。まず地盤侵食抵抗試験機を供試土層（作成方法は土質試験に用いた方法と同じ）の上に据え付けて水を一定の高さを保持するように注ぎ入れる。つぎに、所定の回転速度で 15 分間にわたり回転流を起こし、供試土層表面を侵食させる。侵食された土砂は地盤侵食抵抗試験機から排出した水とともに外部のタンクに貯留される。その土砂と地盤侵食抵抗試験機の中に残留している移動土砂を測定し、それらを加算することによって侵食土砂重量が求まる。侵食速度 $E(\text{cm}/\text{min})$ は、侵食土砂重量を密度で除することによって換算した土砂体積を供試土層の侵食を受ける面積及び地盤侵食抵抗試験の回転時間で除することによって求めた。

2.4.2 侵食速度と回転数ならびに表層粘着力の関係

図-2.8 に侵食試験機における回転羽の回転数 (N) と測定値からキャリブレーションした深度平均流速 (U) の関係を示す。両者の間には $U(\text{cm}/\text{s}) = 0.76N(\text{rpm})$ の関係が認められる。

図-2.9(a) に過飽和層が形成された不攪乱試料における回転数と侵食速度の関係を示す。ステージ 1 の凹部とステージ 2 の侵食が生ずるための限界回転数 N_c はほぼ同じで $N_c = 10\text{rpm}$ ($U = 7.6\text{cm}/\text{s}$) である。ステージ 1 の凸部は若干大きく $N_c = 20\text{rpm}$ ($U = 15\text{cm}/\text{s}$) である。また、これらの限界回転数以上の回転数域では、侵食速度 (E) は回転数に

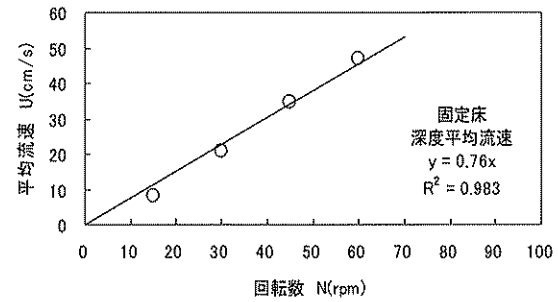
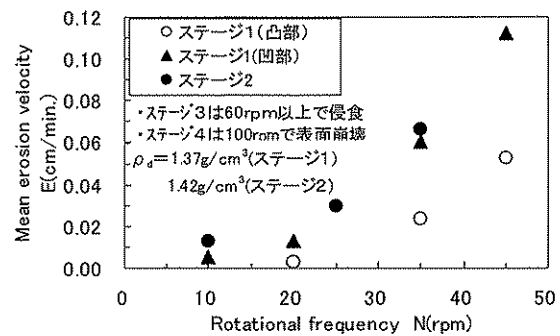
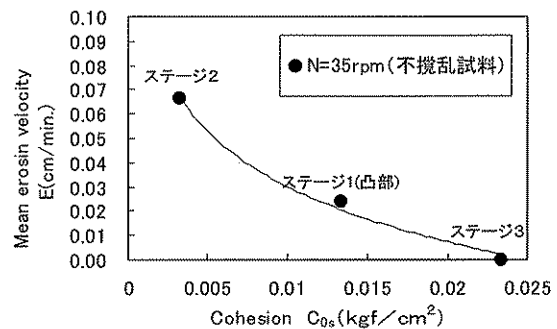


図-2.8 回転数と流速の関係



(a) 回転数と平均侵食速度の関係



(b) 表面粘着力と平均侵食速度の関係

図-2.9 侵食試験による平均侵食速度(不攪乱試料)

対して直線状に大きくなる傾向がみられる。ステージ 3, 4 においては $N = 60\text{rpm}$ ($U = 46\text{cm}/\text{s}$) まで土砂流出がなく、ステージ 1, 2 よりはるかに強い耐侵食性をもっているとみなせる。この原因には前述した地表面の藻類や苔類の被覆作用の影響も考えられる。

図-2.9(b) に不攪乱試料における回転数 $N = 35\text{rpm}$ の場合の侵食速度と各ステージの表層の粘着力との関係を示す。これによれば、粘着力が小さくなると侵食速度は大きくなる。締固め試料における粘着力と侵食速度との関係においても同様の傾向が認められた。以上のことから、圃場

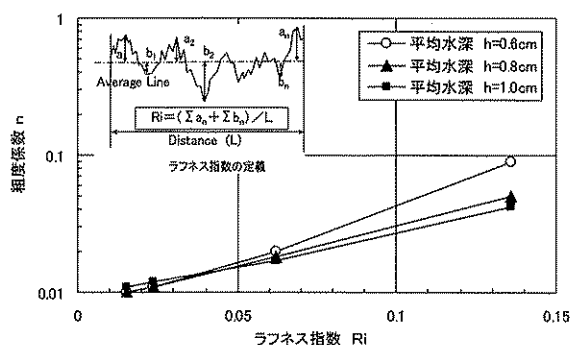


図-2.10 粗度係数とラフネス指数の関係

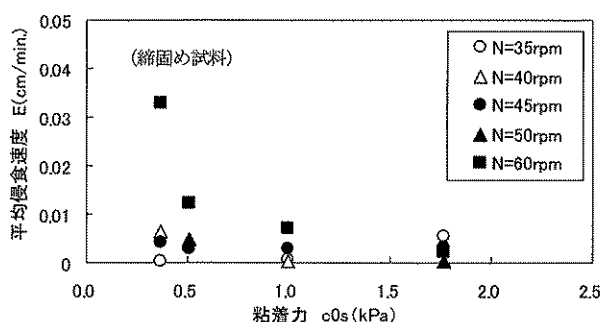


図-2.11 粘着力と平均侵食速度の関係

地表面での表面流による侵食では、吸水膨張によって形成された過飽和層の粘着力低下が赤土砂侵食の重要な要因となっていると考えられる。

2.4.3 限界掃流力の評価

表面流の掃流力を評価するにあたり、抵抗則は流れのスケールに対する表面形状抵抗により異なるため、水深が粘性底層より浅い領域では薄層流の抵抗則を考慮するのが妥当であると思われる。しかしながら、ここでは既往研究での事例⁵⁸⁾と取り扱いの容易さからマンニングの粗度係数により評価するものとした。粗度係数は、実際の圃場表面に近似した供試土層（赤土砂にセメントを乾燥重量比 7%混合した固定床）を作製し、二次元流路実験により求めた。

限界回転数に対応した流速からマンニング式により以下の方法で限界掃流力 (τ_c) を算定した。地盤侵食抵抗試験機内の回転流の深さ方向の流速分布は、供試土層の地表面より約 1cm 上の位置に乱流境界を呈する状態を示した。また、乱流境界付近の流速と深度方向の平均流速はほぼ同じであった。これらのことと、表面流の水深は最大でも 10mm 程度であるという現地圃場での観察結果⁵⁹⁾ から、限界掃流力の算定に用いた流速は、乱流

境界における流速とした。

次に、圃場地表面の粗度係数(n)の評価を行った。地表面の凹凸度はレーザ変位計を用いて不攪乱試料 (40×40cm) 表面を測定し、ラフネス指数(R_i)⁶⁰⁾ (図-2.10 参照) を算出した。図-2.10 に二次元流路実験によって求めた粗度係数 n とラフネス指数 R_i との関係を示す。粗度係数 n は R_i に概ね比例して大きくなる傾向が見られる。

摩擦速度の算定に用いる粗度係数は、ステージ 1, 2 の試料に相当するラフネス指数および過飽和層での限界回転数 $N_c=10\sim20\text{rpm}$ に対応した n の平均値として $n=0.035$ (作物がない耕作地の一般値(0.02~0.04)⁶¹⁾ とほぼ同じ) とした。さらに、限界摩擦速度を算出するにあたり、地盤侵食抵抗試験機内の流れが狭い壁に挟まれた回転流であることを考慮し、壁面 (アクリル: $n=0.013$) との合成粗度を求めた。

以上により求められた限界摩擦速度及び限界掃流力は各々、 $U_*=1.3\sim2.5\text{cm/s}$ 、 $\tau_c=0.15\sim0.65\text{Pa}$ である。また、限界平均流速は $U_c=7.6\sim15\text{cm/s}$ である。

澤井らの研究⁶²⁾ によると、試験方法が若干異なるものの赤土砂の限界摩擦速度は約 4cm/s と評価されており、上記の結果に概ね符合している。

一方、非過飽和層の限界回転数(N_c)については実験中に過飽和層が形成されてしまうため直接求めることはできず次のように推定した。非過飽和層の粘着力は図-2.7 より約 2kPa である。図-2.11 に締固め試料の粘着力と平均侵食速度との関係を示す。これによると、侵食抵抗の限界 CO_s は 2kPa 程度であり、そのときの限界回転数は 50~60rpm であるとみなせる。また過飽和層が形成されていないステージ3の不攪乱試料(粘着力 $c_{0s}=2.3\text{kPa}$) を用いた場合には $N_c=60\text{rpm}$ が得られている。これらの結果から非過飽和層の限界回転数を $N_c=60\text{rpm}$ とし、上記同様に限界掃流力を求めると $\tau_c=5.8\text{Pa}$ となる。この時の平均流速は図-2.8 より $U_c\approx 46\text{cm/s}$ である。

2.5 過飽和層での赤土砂生産限界降雨量評価

上記の方法で求めた過飽和層の限界掃流力の値の妥当性を検討するため、水深、流速および赤土砂生産限界の降雨量などを指標として、現場での観測・観察結果と実験結果を比較した。

まず、現地の観測圃場と同じ程度の規模・条件

の圃場（100m×40m、勾配3%）を想定し、次に想定した降雨強度毎に発生する表面流の流れを、圃場末端の水深で代表させた等流とみなした。ついで、粗度係数(n)をパラメータにした掃流力および流速をマンニング則により求めた。計算条件として、流路幅は畝間に等しく圃場幅の1/3、流出率(f)は近傍の圃場における観測結果⁶³⁾により $f=0.25$ とした。図-2.12 に降雨強度と掃流力との関係を示す。これによると、過飽和層の侵食限界の下限と推算される限界掃流力 ($\tau_c=0.15\text{Pa}$) を越える降雨強度は2mm/h以下となる。ただし、この程度の降雨は圃場の浸透能以下である。また $n=0.02\sim 0.03$ に相当するステージ3,4は、藻類や苔類の被覆などの影響により過飽和層が形成されないことが確認されており、赤土砂流出量は無視できるほど小さい。そのため、赤土砂の流出はステージ1,2において掃流力が過飽和層の侵食限界の上限と推算された限界掃流力 ($\tau_c=0.65\text{Pa}$) を越えた時から起こると考えられる。このときの水深(h)、流速(U)および摩擦速度(U_*)の計算値は、それぞれ $h\approx 3\text{mm}$ 、 $U\approx 6\text{cm/s}$ 、 $U_*\approx 2.5\text{cm/s}$ である。各ステージの不攪乱試料のラフネス指数は、図-2.13 に示すように耕作ステージを経るにしたがって小さくなり地表面の凹凸は平坦化している。図-2.10 及び図-2.13 より、ステージ1,2のラフネス指数が0.11~0.13であることから、その粗度係数は $n=0.03\sim 0.08$ の範囲とみなせる。図-2.12によると、限界掃流力の上限 τ_c に対する降雨強度はマンニングの粗度係数によって異なるが、概ね3~10mm/hの範囲である。この時の表面流の水深は約3mm、流速 (=流量/断面積) は約6cm/sである。現地観測⁶⁹⁾によると、地表流が発生しかつ地表面が軟弱化した状況において赤土砂が流出するのは概ね10mm/h以上の降雨強度の時に発生するという結果が得られており、ここで得た計算値に近似している。また非過飽和層において赤土砂が流出する限界となる降雨強度は約130mm/hに相当する。この時の水深は10~18mm以上、流速15~26cm/s以上（侵食試験では46cm/s）であり、勾配3%程度の圃場地表面ではこれまで観察されていない水理量である。

2.6 結論

本章では、赤土砂の主要な生産場であるパインアップル圃場地表面で起こる侵食形態を表面流の

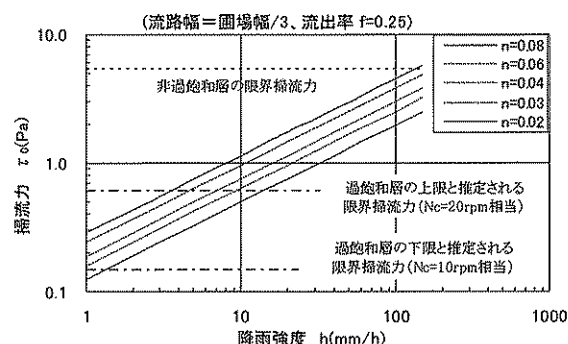


図-2.12 降雨強度と掃流力の関係

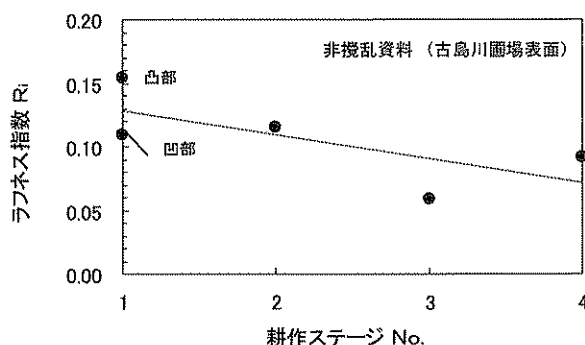


図-2.13 ラフネス指数と耕作ステージの関係

掃流力による圃場地表面の侵食に起因するものと仮定し、それによる赤土砂の流出を「赤土砂の流出」と定義した。そして、この侵食メカニズムを明らかにするために土質試験ならびに地盤侵食試験機、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価によって過飽和層で生じる赤土砂の侵食過程を考察した。その結果得られた知見を以下に示す。

- 1) 作製した表層せん断試験機を用いて、締固め試料、不攪乱試料の強度特性を調べた結果、両者とも粘着力は含水比の増加とともにほぼ直線関係で低下することが分かった。また、締固め試料に形成された過飽和層のせん断強度を計測した結果、1kPa(10gf/cm²)という値が得られた。この値は、過飽和層の1.5cm下に形成された非過飽和層（見かけ飽和度が100%以下）の強度の約半分である。
- 2) 地盤侵食抵抗試験により、過飽和層が形成されたステージ1,2の不攪乱試料の侵食速度と回転数との関係を検討した結果、侵食速度は回転数が10~20rpmを超えると回転数に比例し

て大きくなる傾向が認められた。また、不撓乱試料、締固め試料とも、表層の粘着力が小さくなると侵食速度は大きくなる傾向が認められた。

- 3) 地盤侵食抵抗試験から求めたステージ 1、2 の不撓乱試料の侵食限界回転数である 10～20rpm に対応した流速、ならびに二次元流路実験から求めたマンギの粗度係数と地表面の凹凸度を示すラフネス指数との関係をもとに、マンギの抵抗則によって限界摩擦速度を求め、限界掃流力を算出した。過飽和層が形成された圃場地表面の限界掃流力は 0.65Pa、この時想定される限界降雨強度約 10mm/h、表面流の水深約 3mm、流速約 6cm/s は実際の圃場での水理量に近似している。
- 4) 非過飽和層の限界掃流力は、地盤侵食抵抗試験から侵食限界回転数を約 60rpm としたうえで過飽和層のそれと同様の手法で求めると 5Pa 程度と推定される。この値は、降雨強度 130mm/h、表面流の水深 10～18mm、流速 15～26cm/s (侵食試験では 46cm/s) という状況に相当するが、このような水理量は現地の圃場では観察されていない。

以上より、膨潤性物質を含む粘着性土壌の一種である赤土砂の流出は、雨滴およびガリーなどの影響もあるが、地表面に形成された過飽和層の表面流による侵食による影響が大きいことが明らかとなった。

参考文献

- 47) 前田勝弘・天田高白・石川芳治・小山内信智・欧国強・渡辺文人：沖縄本島における赤土の侵食特性，平成 6 年度砂防学会研究発表会概要集，p.159～160，1994。
- 48) 翁長謙良・照喜名良達：沖縄における農地保全の基礎研究 X 水滴による土塊の崩壊に関する研究(1)，琉球大学農学部学術報告，第 26 号，p.345，1979
- 49) 深田三夫：雨水流による土壌侵食機構に関する研究，山口大学学位論文，1993 年
- 50) Morgan R.P.C.: The European soil erosion model: an update on its structure and research base. In :Richson RJ(ed)Conserving soil resources: European perspectives. CAB International, Cambridge, pp.286-299,1994
- 51) Moss .A.J.: Effects of Flow-velocity Variation on Rain-driven Transportation and the Role of Rain Impact in the Movement of Solids, Aust. J. Soil Res.,26, pp.443-450,1988
- 52) 芦田和男・江頭進治・金屋敷忠儀：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，p.135-141,1980。
- 53) 日下達朗・田中宏平・藤田則之・四ヶ所四男美：粘着性のある土壌の剥離・移動限界について一雨水流による土壌の侵食特性(Ⅰ)一，農業土木学会論文集，第 90 号，p.9-16,1980
- 54) 澤井健二・芦田和男：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，p.73-86,1977
- 55) 松阪泰明・音羽道三・山田裕・浜崎雄雄：沖縄本島・久米島の土壌の分類について，農林省農業技術研究所報告，B(土壌・肥料)，第 22 号，p.384,1971
- 56) 岩田進午：土壌の物理性と土壌粘土，日本粘土学会，粘土ハンドブック第二版，Ⅱ応用編，6. 農業における粘土，p.1163-1177,1987
- 57) 欧国強・石川芳治・前田昭浩・草野慎一：Ground-erosion Resistance Property of Kanto Loam,砂防学会誌，Vol.47, No.3(194), p.11-17,1994
- 58) 高文喚・佐藤晃一(1988)：リル生成ならびに発達メカニズムについて，一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(Ⅱ)一，農業土木学会論文集，第 136 号，p.1-7
- 59) 南哲行・仲野公章・山田孝・富坂峰人：耕作年代の異なるパインアップル圃場での赤土砂流出特性，砂防学会誌，Vol.54, No.5, p.30-38,2002。
- 60) 藤原武：道路建設講座 7，道路舗装の維持修繕，1.2 舗装の維持修繕の計画，(6)凹凸調査，p.12-15,1970
- 61) 土木学会：水理公式集(平成 11 年版)，第 2 編 河川編，第 2 章，p.89
- 62) 澤井健二(1990)：粘性土の侵食と堆積に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第 33 号，B-2, p.1-7
- 63) 南哲行，山田孝，仲野公章，富坂峰人，徳永俊朗，山城修：耕作年代が異なるパインアップル圃場での赤土砂流出特性，砂防学会誌，Vol.54, No.5, p.30-38, 2000

第3章 圃場地表面での過飽和層形成を考慮した赤土砂生産予測手法とそれに基づく流域単位での赤土砂流出予測手法

3.1 概説

赤土砂の生産源であるパインアップル圃場等での効果的な対策工を提案するためには、圃場における赤土砂の生産・流出予測手法と対策工の評価手法を構築することが必要となる。そのためには、これまでに明らかにしたパインアップル圃場での赤土砂生産・流出の特性、即ち圃場地表面での過飽和層の形成とそこでの侵食特性を踏まえた侵食モデルを作成する必要がある。

これまでに、土壌侵食モデルとして、USLE⁶⁴⁾、RUSLE⁶⁵⁾、MUSLE⁶⁶⁾などの経験モデルが提案されてきたが、これらは年間単位の長期間にわたる大まかな流出土砂量を予測するものであり、出水ごとの予測はできない。また、流域内の様々な土砂生産場の空間分布とそれによる土砂流出特性の経時変化を考慮した流域単位での土砂流出過程をモデル化したものではない。物理モデルとしては、流域単位の土砂流出過程を考慮した WEPP モデル⁶⁷⁾や EUROSEM⁶⁸⁾、AGNPS モデル⁶⁹⁾、SMODERP モデル⁷⁰⁾があげられ、これらについては、土砂流出の程度を被覆や土壌の受食性をパラメータとしてある程度表現することができる。

次に、これまでに提案された赤土砂の流出予測モデルとして、流出解析と雨滴侵食による土砂生産や表流水による土砂輸送とを連結させた物理則に基づく研究がいくつか存在する。たとえば、酒井ら⁷¹⁾は、圃場から流出する赤土砂濃度を予測するために、キネマティックウェーブ法による流出解析を行い、LQ 式、Meyer 式によって浮遊土砂量を計算した。その後、流出過程にタンクモデル法を用いて表流水を評価し、LQ 式により浮遊土砂を計算したモデルも提案されている⁷²⁾。これらの予測結果はある程度の再現性が得られているが、流域の諸条件が変わればパラメータをその都度試行的に設定しなければならないといった問題がある。

一方、これまでの土木研究所の研究成果により南ら⁷³⁾はパインアップルの耕作段階に伴う赤土砂流出量の変化を調べ、パインアップル株の植付け後、葉による地表面の被覆率の増大とともにパ

インアップル圃場からの赤土砂流出量が減少することを明らかにした。その中でパインアップルの葉による被覆率の増大が地表面における苔の繁茂や枯葉の堆積を進展させ、それらが侵食抑制の効果を発揮していることを推察した。さらに、前章では苔や枯葉がない状態の圃場地表面において表面流が発生する段階での赤土砂侵食のメカニズムとして、パインアップル圃場地表面での過飽和層(見かけ飽和度が約 100%以上となった地表面)の形成とそこでの顕著な侵食現象に着目し、土質試験ならびに地盤侵食試験機、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価を行った。その結果、パインアップル圃場での赤土砂の侵食現象は、過飽和層の形成とそこを流下する表面流による侵食として説明できることが判った⁷⁴⁾。

しかしながら、沖縄に代表される赤土砂のように膨潤性粘土鉱物を含む粘性土の降雨時の過飽和層形成とこれによる土質強度変化を考慮した土砂流出予測手法は未だに提案されていない。

そのため、本章では、圃場の耕作段階によるパインアップルの葉の被覆率ならびに過飽和層における表面流による赤土砂侵食機構を考慮した二次元河床変動計算法により、圃場毎の赤土砂生産モデルを作成するとともに、これを流域単位の流出土砂予測に拡張できる手法を提案した。

そこで、まず、沖縄県国頭郡東村サーン川流域をモデル流域として、パインアップル圃場が主要な赤土砂生産場であることを粒度分布の比較から明らかにした。次いで、耕作開始から時間経過の異なるパインアップル圃場において侵食量調査を行うとともに、既往の観測結果^{73),75)}を整理して、耕作期間と侵食量との関係、耕作開始以降の流出率、単位面積あたりの流出土砂量、圃場地表面、圃場末端部急崖部での侵食量、パインアップルの葉による地表面被覆率と侵食量との関係について検討した。これらの現地における観測や調査結果と、前章で示した圃場地表面の過飽和化に伴う粘着力低下と表面流による侵食という赤土砂生産機構に関する成果⁷⁴⁾をもとに、過飽和層における流出しやすくなった土粒子が表面流の輸送能力によって浮遊砂形態で流出する場合の赤土砂流出予測手法を検討した。そして、運動方程式、連続式、土砂の連続式、浮遊砂量式を連立させて、圃場の耕作開始からの赤土砂流出量の経時変化を予測で

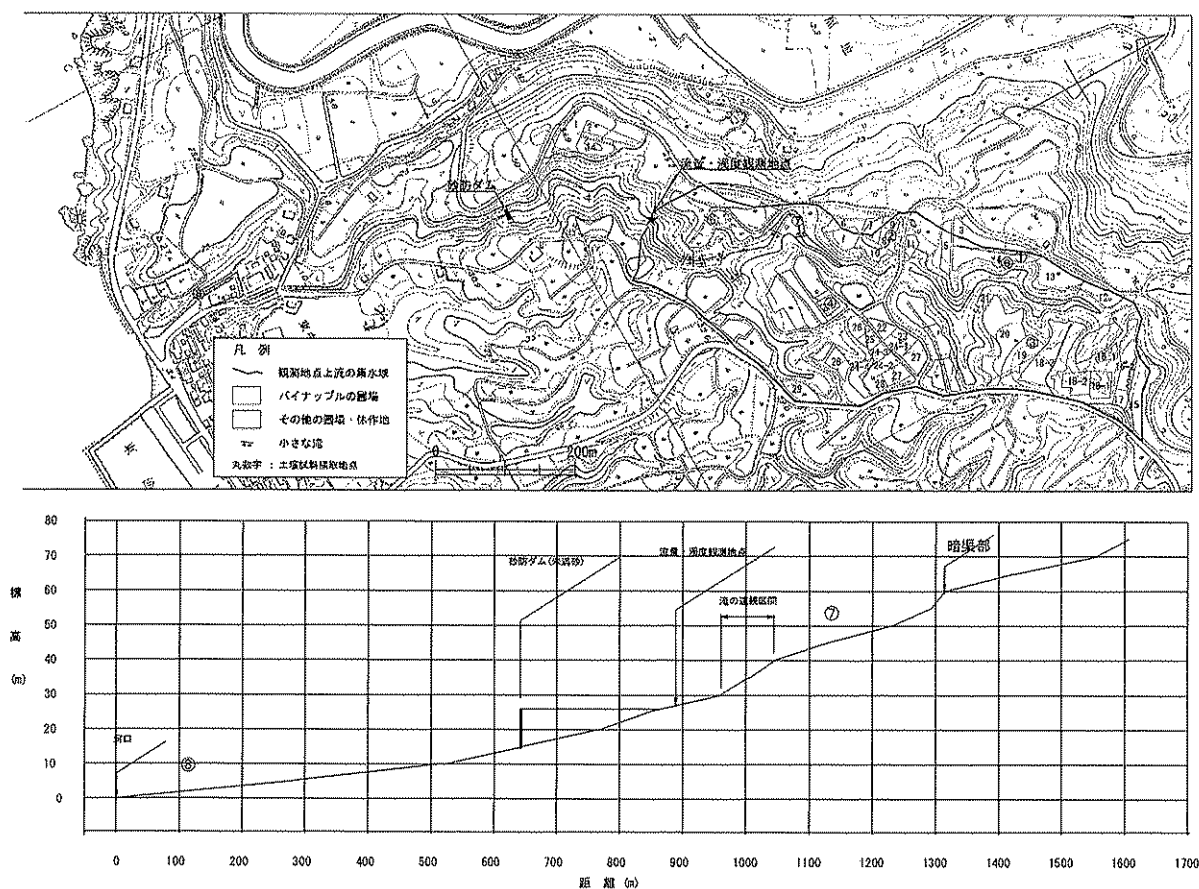


図-3.1 サーン川の土砂生産場の分布

きる赤土砂流出シミュレーション手法として圃場での観測結果の再現性を検討した。

さらにここで用いた圃場単位での赤土砂流出シミュレーション手法を、パインアップル圃場以外の河道や森林などの土地利用形態、地形の面的な変化を考慮した流域単位のシミュレーション手法へと拡張し、サーン川流域を対象として、再現シミュレーション計算を行い、その再現性と予測手法としての妥当性を検討した。

3.2 パインアップル圃場地表面の過飽和層形成を考慮した赤土砂生産予測手法

3.2.1 過飽和層形成を考慮した生産モデルの考 え方

(1) 赤土砂生産場の分布と侵食実態

沖縄県国頭郡東村に位置するサーン川流域は、パインアップル等の耕作地が広がる台地と、樹木が密生するサーン川の開析谷からなる。流域面積は 0.20km^2 、平均溪床勾配は $1/21$ で急流を呈している。観測地点上流の集水面積は 0.15km^2 である。土地利用区分は、パインアップル圃場が約

0.04km^2 (約 27%)、パパイヤや花卉等の圃場、休耕地が約 0.02km^2 (約 13%)、開析谷の斜面に分布する森林及び河道、道路等が 0.09km^2 (約 60%) となっており、沖縄本島北部における典型的な土地利用を呈している (図-3.1)。

出水時に海まで到達する浮遊土砂の粒径は 0.1mm 以下が大半を占めている⁷⁶⁾ことから、海洋環境に悪影響を与えるいわゆる「赤土砂」は 0.1mm 未満の粘土、シルト分を主成分とした微細粒土砂であると言える。

また、東村内の平良川流域でのパインアップル耕作地の開発が進んだ支川流域と無開発の支川流域での、出水の SS 濃度観測結果から、降雨時にはパインアップル耕作地の開発が進んだ支川流域では無開発の支川流域に比べて比流砂量として 30～200 倍の流出量があること⁷⁷⁾等から、パインアップル耕作地が赤土砂の主要な生産源であることが推定される。

図-3.2 は、サーン川流域において赤土砂の生産源を推定するため、図-3.1 に示した流域内の①～⑧の各地点で地表面から深さ 20cm 程度までの土

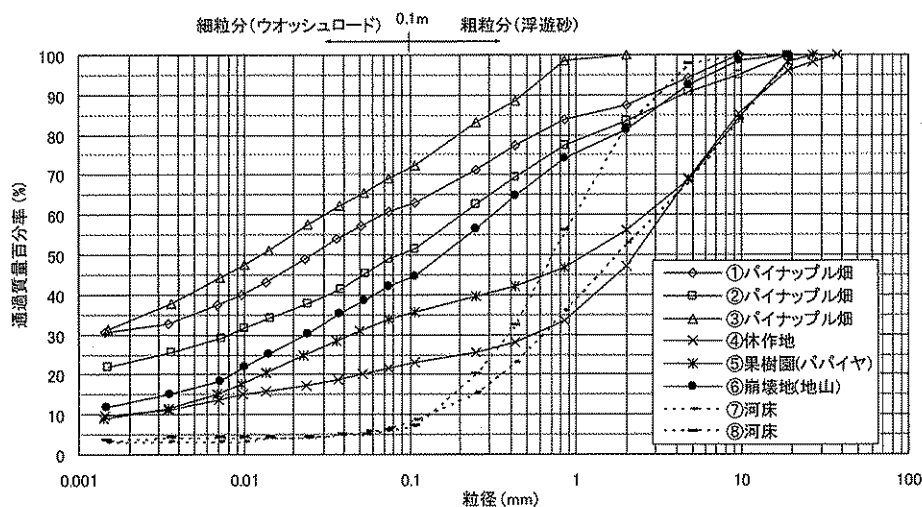


図-3.2 サーン川流域で採取した土砂の粒度分布

表-3.1 観測圃場の諸元及び観測された流出率

観測場所	圃場 A	圃場 B	圃場 C	圃場 D
面積	180m ²	3,842m ²	3,811m ²	3,870m ²
耕作開始からの期間	天地返し直後	2年 以上	3年 以上	3年 以上
流出率	0.19	0.24	0.22	0.18

壤試料による粒度分布を示したものである。台地上の耕作地等で採取した試料には粒径 0.1mm 未満の細粒分としての粘土、シルト分が 50～70%程度含まれるが、溪床から採取した試料には 6%程度しか含まれていない。また、4年周期で鋤き込みが施されるパイナップル圃場に比べて表土の攪乱がなされにくい果樹園及び休作地では 0.1mm 以下の粒径は 20～30%程度であることがわかる。以上のことから、サーン川においても赤土砂の主要な生産源は耕作地、特にパイナップル畑であると考えられる。

また、土木研究所では耕作開始（パイナップル株の植付け）からの時間経過にともなってどのように侵食量が増加するかを定量的に把握するため、東村内における耕作開始からの経過期間（月）が異なる侵食の著しい圃場3ヶ所について、耕作地表面とその下流縁辺の急崖部を対象に侵食痕跡を計測し、各圃場の耕作開始からの累計侵食量を算定した⁷⁵⁾。これより、耕作地表面と急崖部を比較すると耕作地の方が約5倍（30ヶ月経過時点）大きな侵食量を示しており、耕作地表面における侵食が赤土砂生産の主要な部分を占めていることがわかった。

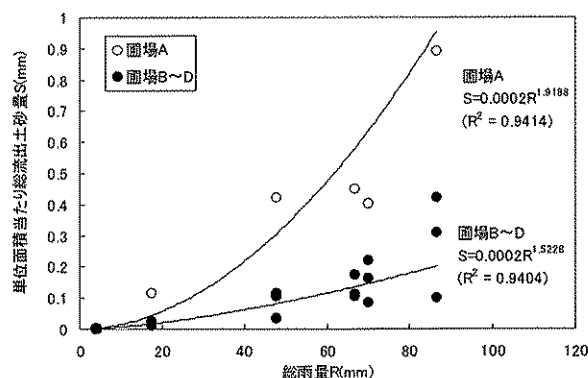


図-3.3 総雨量と総流出量の関係

(2) 耕作開始以降の流出率、単位面積あたりの流出土砂量

土木研究所では沖縄県東村古島川流域において、平成12年3月から同年8月にかけて耕作開始からの経過時間の異なる4圃場（圃場A～圃場D）において赤土砂流出観測を実施した⁷³⁾。表-3.1にはこれに基づいて整理した各圃場の面積、観測開始時点での耕作開始からの期間ならびに流出率（一連の降雨における総雨量に対するその総流出量の割合）の平均値を示す。また図-3.3には総雨量に対する単位面積当たりの総流出土砂量（侵食深）を示す。流出率については天地返し直後の圃場Aと耕作から2年以上経過している圃場B～Dに顕著な違いは認められないが、単位面積あたりの流出土砂量は明らかに天地返し直後の圃場Aのほうが多い。また、既往の研究から、降雨遮断量（圃場に降った雨のうちパイナップルの葉や茎の表面に付着し、地表に達せずに再び大気中に蒸発する雨量）は 0.6mm 程度⁷⁵⁾であると確認され

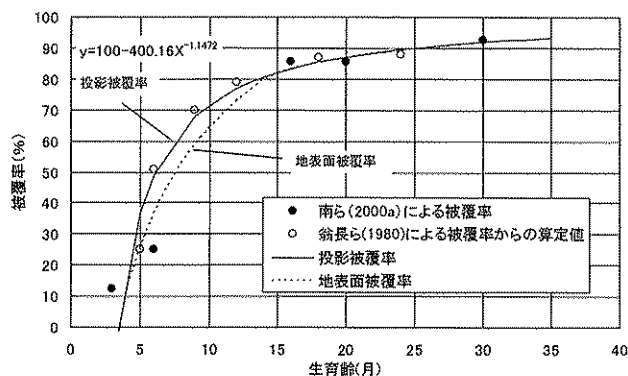


図-3.4 耕作開始からの経過時間と圃場地表面の被覆率の変化

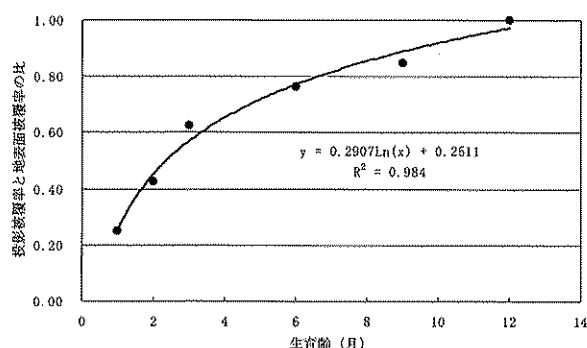


図-3.5 パインアップルの葉による被覆率と実質被覆率の関係

ていることから、たとえ圃場が完全にパインアップルの葉に覆われ被覆率が増加しても、降雨時の流出にはほとんど影響しないことがわかる。すなわち、土砂流出量の変化は、地表面における苔等の繁茂、枯葉による地表面被覆などにより土砂移動が阻害されたことによると判断される。

(3) 耕作開始からの経過時間ともなうパインアップルの葉の地表面被覆率

東村内の圃場において、パインアップルの株の列を上方からデジタルカメラで撮影し、地表面がパインアップルの葉の影となる部分と地表面が露出している部分の画像のピクセル数を数えることによって各々の面積を計測し、耕作開始からの生育齢が異なるパインアップル葉による地表面の被覆率（単位面積当たりのパインアップルが地表を覆う部分の面積）を把握した⁷⁵⁾。図-3.4にはその結果と、翁長ら⁷⁸⁾による同一のポット栽培のパインアップルにおける葉の投影面積より推算された葉の被覆率を整理し、実線に示すように生育齢と被覆率の近似式（近似曲線）を作成した⁷⁵⁾。この葉による被覆率を本章では、後述する地表面被覆率に対して、投影被覆率と呼ぶ。

図-3.4によればパインアップルの葉による投影被覆率は、耕作開始からの時間経過とともに増加し、耕作開始から約2年半で90%以上となることがわかる。これに伴い、雨滴が直接地面に到達することが少なくなるとともに、地表面を枯葉が覆うようになり、侵食を受ける部分が減少すると考えられる。

図-3.5には、生育齢が異なるパインアップル圃場において調査した葉の投影被覆率と実際の地表面の被覆率（地表面被覆率）の関係を示す。生育齢が12ヶ月となると投影被覆率と地表面被覆率がほぼ等しくなることがわかる。図-3.5の関係をを用い投影被覆率から実際の地表面被覆率を推定したものが図-3.4の破線である。このことから、地表面被覆率の増加により侵食を受ける面積が減少するとした。

(4) 過飽和層形成を考慮した赤土砂流出シミュレーション手法の考え方

流域単位での赤土砂シミュレーション手法を作成するには、流域内での赤土砂の主要な生産場であるパインアップル圃場の空間分布、パインアップル圃場の耕作段階による赤土砂の流出実態の違い、パインアップル圃場以外の河道や森林などの各種土地要素の空間分布、流域内の地形の面的変化など、を数量的に表現する必要がある。そのため、本研究では、パインアップル圃場、その他の土地要素での面的な土壌侵食過程と河道での流下過程を統一的に扱えること、流域のモデル化がメッシュにより作成可能であることといった解析上の特長を考慮して二次元河床変動計算法を適用することとした。すなわち、メッシュ間の流水の移動は浅水流の運動方程式により追跡し、雨量は連続式の中で「わき出し」として与えることにする。

一般に地表面では、出水終了後には細粒分が流出し、粗粒分が残存してアーモークコートが形成されることが考えられる。しかし圃場では約4年ごとに天地返しが行われ、定期的に表層の土砂と下層の土砂が混合される。また、写真-3.1の圃場の断面構造が示すように赤土粒子の分布は粗粒分と細粒分がおおむね均等に分布している。図-3.2に示すように圃場地表面において0.1mm以下の細粒分は50～70%を占めており、細粒分と粗粒分の移動量の差が粒度分布の変化に与える影響は小さい。また、1mm以下の粒径が80～100%を占め

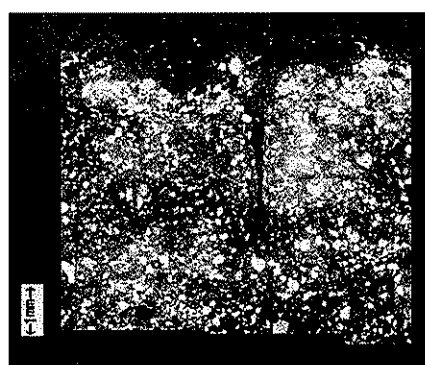


写真-3.1 パインアップル圃場地表面の断面図

表-3.2 ウォッシュロードの粒径

著名	d_{max} (mm)	備考
Einstein, Anderson, Johnson ¹⁾	0.351	Enoree 川
村本・道上・下島 ¹⁾	0.2	大戸川
金屋敷・芦田・江頭 ¹⁾	0.1	十津川
Einstein, Ning ¹⁾	0.06~0.1	実験水路
Rendon-Herrero ¹⁾	0.1	Bixer Run 流域
Heidel ¹⁾	0.062	Bighorn
Jansen 他 ¹⁾	0.05~0.07	—

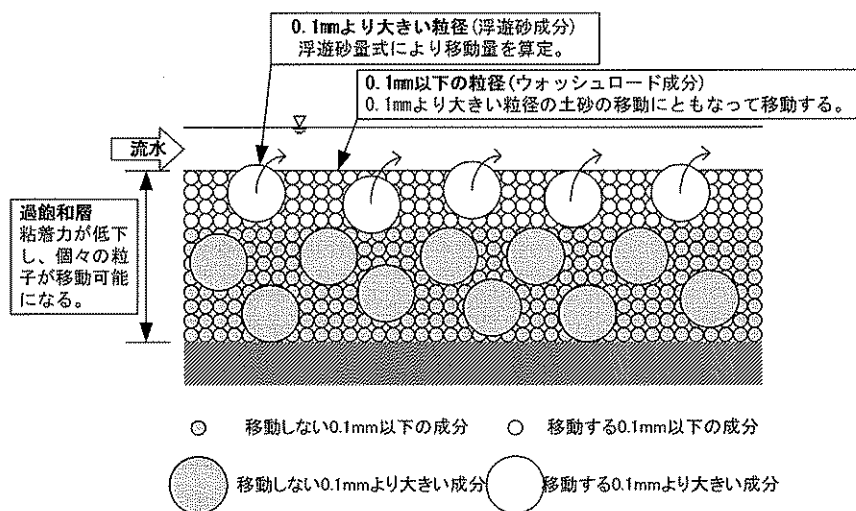


図-3.6 圃場における土砂移動の概念

ており、移動せずに圃場地表面に留まるような大粒径の土砂はごく僅かであると考えられることから、降雨ごとの粒径の変化は考慮しないこととした。

一方、図-3.3に示すように圃場A~Dの単位面積当たりの流出土砂量(平均侵食深)は1mm以下であることから、赤土砂の生産量は主に流水の輸送能力によって規定されていると考えられる。また、圃場地表面の粒径の殆どが1mm以下(図-3.2)であること、降雨により圃場地表面の約1cmの部分において過飽和層が形成され、そこでは粘着力が低下する⁷⁴⁾ため、赤土砂を構成している個々の土粒子が流出し易くなることを考慮して、土砂流出形態は主に浮遊砂状態であると仮定し、その土砂量は浮遊砂量式を用いるものとした。

土砂の流下形態については、一般に次のように分類される。

Bed material load	Bed load	掃流砂
	Suended load	浮遊砂
Wash load		ウォッシュロード

ここで、Bed material loadとは圃場地表面又は河床砂礫と交換しながら移動するものであり、主として流れ方向の抗力による作用のもとで揚力の効果が加わって河床上を転動あるいは底面付近で小跳躍を繰り返しながら移動する掃流砂と、乱れによる上昇流のもとで流水中に保持されながら移動する浮遊砂からなる。ウォッシュロードは生産源から供給されるものがそのまま河床材料と交換せず流下するものである。

ウォッシュロードの粒径範囲としては、表-3.2に示すような研究結果があり一般的に0.1~0.2mm以下であると考えられている。このことから、圃場地表面の60%近くを占める0.1mm以下の細粒分はウォッシュロードであると考えられる。図-3.2における粒度分布では、河床中における粒径0.1mm以下の含有率は僅かであり、河床と交換しないウォッシュロードの性質を示している。従って、圃場地表面における0.1mm以下の粒径はウォッシュロードとして流下し、図-3.6に示すように0.1mmより大きな粗粒成分の移動に伴って移動するものとする。

3.2.2 パインアップル圃場地表面での赤土砂生産計算手法と計算結果

(1) シミュレーション計算に用いる基礎式

本研究で用いた二次元河床変動計算の基礎方程式を以下に示す。運動方程式は (3.1)、(3.2) 式、連続式は (3.3) 式、土砂の連続式は (3.4) 式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \beta \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \tau_{bx} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \beta \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \tau_{by} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r * f \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.4)$$

ここに、 $M=uh$, $N=vh$, $H=h+z_b$, u, v : x 及び y 方向の平均流速, h : 水深, z_b : 流動層底面の地盤標高, g : 重力加速度, β : 運動量補正係数 ($\beta=1$ とした。), ρ : 流体の密度, q_{sx} : x 方向流砂量, q_{sy} : y 方向流砂量, z : 地盤高, λ : 空隙率, r : 単位時間当たり雨量, f : 流出率である。

τ_{bx} , τ_{by} は x 及び y 方向のせん断抵抗力であり、マニングの粗度係数 n を用いて式 (3.5)、式 (3.6) で表される。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 u \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1/3}}} \quad (3.5)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 v \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{h^{1/3}}} \quad (3.6)$$

前節で示したように、圃場地表面の粒径の殆どが 1mm 以下であり、浮遊形態で流下するものと考えられる。浮遊砂量の式は、自由に移動できる土砂の粒子に対して適用されるものであり、粘着力などにより移動が妨げられている土砂の粒子に対しては適用できない。ここでは、赤土砂の表面が過飽和状態となることで粘着力が弱くなり土粒子が流出しやすくなるため、浮遊砂量式が適用可能と考え、流砂量式には式 (3.7) の浮遊砂量の芦田・道上式を用いる⁷⁰⁾。

$$\frac{q_{si}}{q \cdot f(d_i)} = C_B \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \right) \Lambda_1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \Lambda_2 \right] \quad (3.7)$$

$$\Lambda_1 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^2 \int_{\frac{a}{h}}^1 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) z d\eta \quad \Lambda_2 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^2 \int_{\frac{a}{h}}^1 \ln \eta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) z d\eta$$

$$Z = \frac{w_0}{1.2 \kappa u_{*c}}$$

ここに、 q_{si} : 粒径 d_i の単位幅当たりの流砂量、 κ : カルマン定数、 C_B : 底面濃度、 h : 水深、 a : 浮遊砂と掃流砂を区分する河床からの高さ、 w_0 : 粒子の沈降速度、 $\eta = z/h$ 、 u_{*c} : 摩擦速度、 $f(d_i)$: 粒径 d_i の粒子の割合である。

ここで、0.1mm 以下の粒径は既述のようにウォッシュロードとして流下し、0.1mm より大きな粗粒成分の移動に伴って移動するものと考え (図-3.6 参照)。従って、式 (3.8) のように地表面の粒度分布における 0.1mm より大きな粒径成分 (粗粒分) の移動に伴って移動するものと考え、式

(3.8) のように地表面の粒度分布における 0.1mm より大きな粒径の割合 (p_s) と 0.1mm 以下の粒径の占める割合 (p_w) の比を用いて 0.1mm より大きな成分の流砂量から 0.1mm 以下の細粒分の移動量 (ウォッシュロード量) を算出するものとした。

$$q_w = q_s \cdot p_w / p_s \quad (3.8)$$

但し、 q_w : 0.1mm 以下の粒径の流砂量、 q_s : 0.1mm より大きな粒径の流砂量、 p_w : 圃場における 0.1mm 以下の粒径が占める割合、 p_s : 圃場における 0.1mm より大きな粒径が占める割合である。

粒径 d_i の粒子の割合 $f(d_i)$ は、式 (3.9) のように地表面に厚さ δ の交換層を想定し、交換層内における粒径 d が占める割合として求めた。

$$\frac{\partial f(d_i)}{\partial t} = -\frac{1}{\delta(1-\lambda)} \left(\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} - f(d_i) \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} - f(d_i) \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) \quad (3.9)$$

ここに、 q_x, q_y は x 及び y 方向の全流砂量、 q_{sx}, q_{sy} : 粒径 d の x 及び y 方向の流砂量である。計算では、地表面被覆率の減少をその分だけ各粒径

粒度区分			累加百分率				含有率 (%)	土砂移動 形態
粒径階 (mm)	代表粒径 (mm)		圃場① (%)	圃場② (%)	圃場③ (%)	平均値 (%)		
9.50 ~ 19.0	14.250			100.0		100.0	2.5	浮遊砂
4.75 ~ 9.50	7.125		100.0	95.1		97.5	5.1	
2.00 ~ 4.75	3.375		94.4	90.5		92.4	2.2	
0.85 ~ 2.00	1.425		87.4	83.4	100.0	90.2	3.8	
0.425 ~ 0.85	0.638		83.8	77.2	98.5	86.4	8.0	
0.250 ~ 0.425	0.338		77.3	69.6	88.5	78.4	6.1	
0.106 ~ 0.250	0.178		71.4	62.6	83.0	72.3	10.1	ウォッシュ ロード
0.075 ~ 0.106	0.091		63.0	51.4	72.4	62.2	2.6	
~ 0.075	0.038		60.9	49.0	69.1	59.6	59.6	

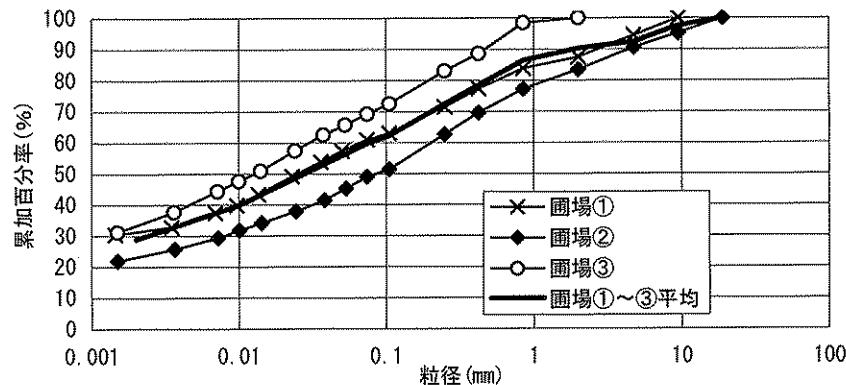


図-3.7 粒度分布の設定

の地表面における割合が減少するものとし、図-3.4に示した破線の地表面被覆率 ε を用いて $f_{s,i} = (1 - \varepsilon)f(d_i)$ を計算し、式(3.7)において $f(d_i)$ を $f_{s,i}$ に置換した。地表面被覆率の減少に伴い、x, y方向の流砂量が低減することとなる。

(2) シミュレーション条件の整理

シミュレーションの対象圃場は、天地返し直後の圃場Aと耕作開始から2年経過している圃場Bとした。圃場の地表面被覆率は、現地での測定値(図-3.4)を参考にして、圃場A:0%、圃場B:80%とした。また、シミュレーションの対象とした出水は、現地観測結果より、データ欠測が無く、古島川流域の年平均出水規模(赤土砂発生限界雨量である連続雨量10mmを上回る降雨で、かつ台風や豪雨などの特異な降雨ではない降雨による出水規模)である3出水(平成12年4月1日~2日、4日~5日、14日~15日)とした。

デジタルマップの作成にあたっては、現地測量によって地盤高を測量し、圃場の大きさの違いを考慮して、圃場Aは1m×1m、圃場Bは5m×5mのメッシュデータを作成した。また、粒度分布については、現地試料から求めた粒度分布を用い既往のシミュレーション条件としての粒径分布の考え方をもとに図-3.7に示す5圃場①~③の平

均値で代表させることとした。

その他の条件として、マンニングの粗度係数は、2.5節で示した実験結果⁷⁴⁾から得られた $n=0.03 \sim 0.08$ 程度という値の中間値として $n=0.06$ を用いた。交換層厚は過飽和層の厚さをもとに1cmとした。砂粒、水の密度は各々、2.6 g/cm³、1.0 g/cm³とし、土砂の空隙率は $\lambda=0.4$ とした。

(3) 流出率の検討

式(3.3)で用いる流出率(f)として、沖縄での現地観測により行われた吉永・翁長・山城の検討⁸⁰⁾を用いると式(3.10)のようになる。

$$f = 1 - a/R^b \quad (3.10)$$

ここで、 a, b は定数、 R は降雨開始からの累積降雨量である。式(3.10)による損失雨量 R_f は、以下のように表される。

$$Rf_f = aR^{(1-b)} \quad (3.11)$$

圃場A及びBでの対象出水時の累積降雨量(R)と損失雨量(R_f)の関係を図-3.8に示す。最小自乗法により式(3.11)の a, b を求めた結果を以下に示す。

$$a=0.9954, b=0.0645 \quad (R^2=0.990)$$

流出率を上記の 2 通りに設定した場合の流量観測結果 q_{OBS} (m^3/s) と計算結果 q_{CAL} (m^3/s) から式 (3.12) のように誤差 E を計算した結果は表-3.3 に示すように 0.026~0.063 であり、十分な適合性が確認された。

$$E = \sqrt{\sum (q_{OBS} - q_{CAL})^2} / \sum q_{OBS} \quad (3.12)$$

$$f = 1 - 0.9954/R^{0.0645} \quad (3.13)$$

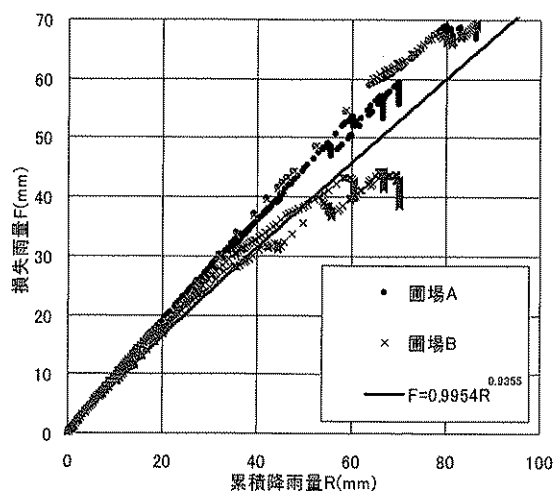


図-3.8 対象出水の累積雨量と損失雨量

表-3.3 E の値

検証出水		E の値
圃場 A	H12. 4. 1	0.026
	H12. 4. 4	0.043
	H12. 4. 14	0.035
圃場 B	H12. 4. 1	0.063
	H12. 4. 4	0.040
	H12. 4. 14	0.061

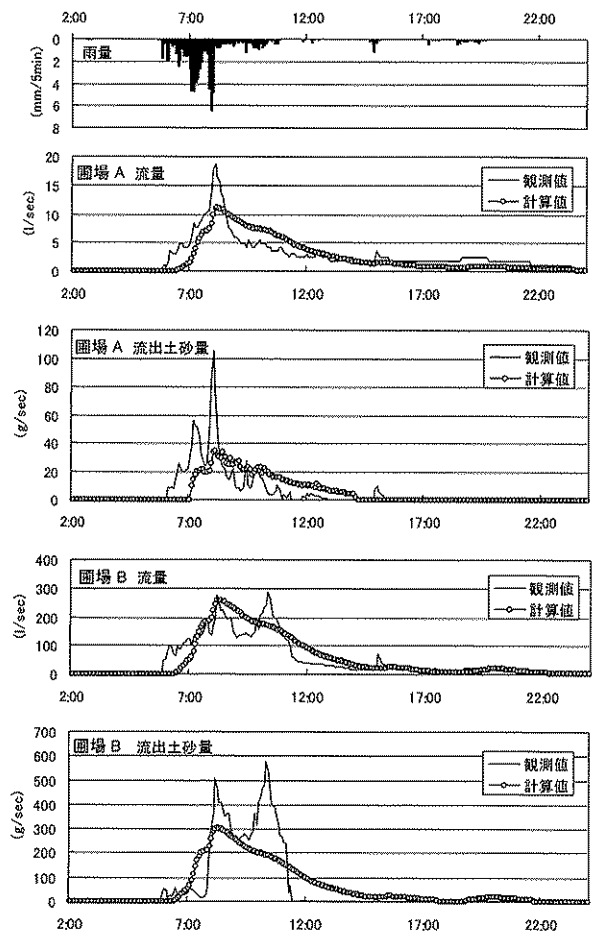
(4) 流出土砂再現シミュレーション結果

圃場 A、圃場 B のそれぞれについて対象 3 出水に対して式 (3.13) による流出率を適用し、赤土砂流出再現シミュレーション計算を行った。図-3.9 に再現結果を示す。

観測結果と計算結果の流量波形に異なる部分があり、特に圃場 B における観測流量の波形が 2 山になっているのに対して、計算結果の波形は 1 山になっている。圃場 B の波形が 2 山になっているのは降雨波形からは説明が出来ないため、計算で用いているメッシュでは反映出来ないような、圃

場内の微地形の影響を受けているものと考えられる。

流量波形が完全には再現出来ていないため、流出土砂量の観測結果と計算結果にも異なる部分があるが、降雨開始から流出の終了までの流出土砂量はほぼ一致しており、観測結果、計算結果ともに天地返し直後の圃場 A の単位面積当りの流出土砂量が大きくなっている（例えば、平成 12 年 4 月 1 日の出水に対しては、圃場 A の観測値、計算値は各々、0.45mm, 0.44mm, 圃場 B の観測値、計算値は各々、0.1mm, 0.09mm*）。従って、圃場地表面被覆率の違いによる、単位面積当りの流出土砂量の変化については再現出来ていると考えられる。



※注：観測値＝流量観測値×SS 濃度観測値（濁度換算）、
（自記流量計及び自記濁度計の 5 分間隔計測データに基づく）

図-3.9 観測圃場でのシミュレーション結果の一例

* 単位面積当りの流出土砂量 1mm は $0.001m^3/m^2$ であり、計算対象圃場において平均 1mm 侵食していることを意味する。

3.3 流域単位での赤土砂流出予測手法

3.3.1 耕作年代の異なる圃場、その他の土地要素を踏まえた流域分布モデルの考え方

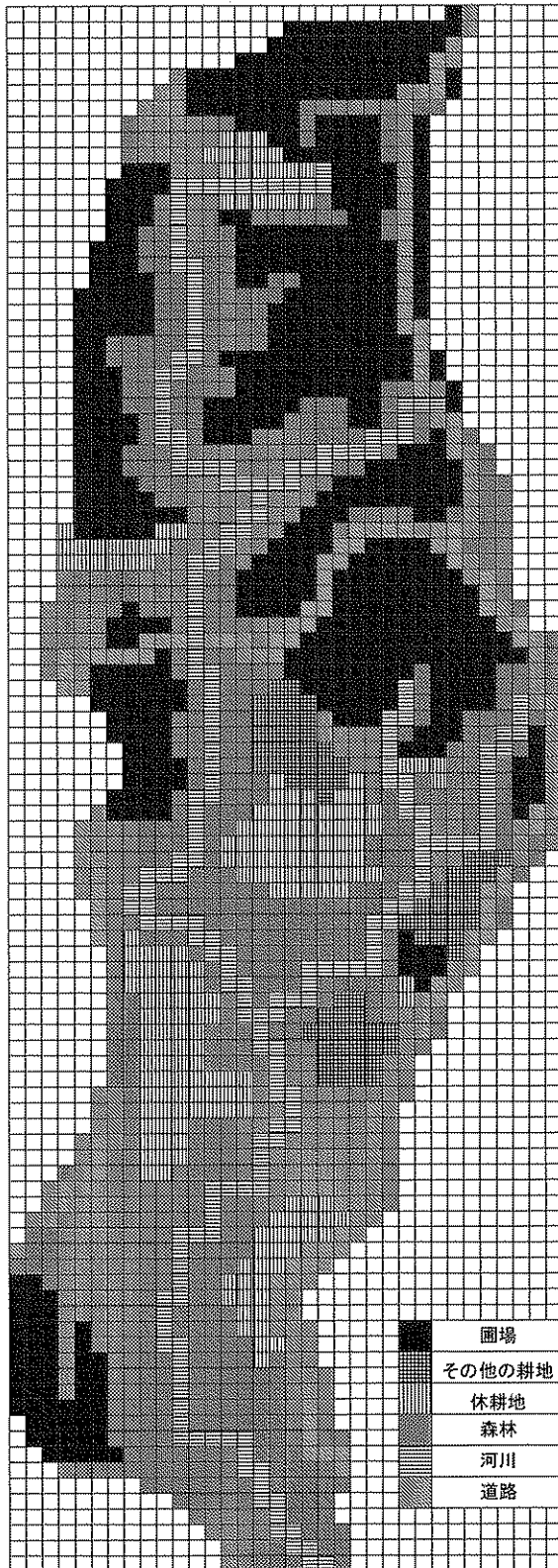


図-3.10 サーン川メッシュ分割図

(1) 流域のモデル化

本研究では図-3.1 に示したサーン川流域の流量・濁度観測地点上流を図-3.10 に示すようにメッシュ分割し、2次元河床変動計算の手法を基にした解析モデルを作成した。このモデルを用いるのは、圃場で生産された土砂の流下過程について一貫して解析でき、さらに現段階では明らかとなっていない条件を追加する余地があり、将来的な拡張性が高いためである。メッシュは細かいほど精度は向上するがデータ作成および計算が難しくなる。本研究では現在得られる地形データが1:5,000 地形図に限られていることと、計算対象の流域スケールと計算の能力を考慮して、圃場の平面形状が捉えられる範囲で10m×10mにメッシュ分割し各メッシュに標高を与えた。

さらに現地調査及び航空写真判読により、メッシュ毎に圃場、河川、その他の耕地又は休耕地、森林、道路に土地利用区分し、その区分ごとに粒度分布、粗度係数の条件を与えた。計算結果の検証対象地点は流域末端に設けられた砂防堰堤とした。

(2) 河道における土砂の流下形態

土木研究所の研究成果でまとめられた平良川における観測結果⁷⁾では、河道に流出した赤土砂の粒径については0.1mm以下であり、河道における赤土砂の流下形態はウォッシュロードであると考えられる。また、図-3.2 に示したサーン川における河床材料の粒度分布調査結果では、0.1mm以下の土砂の含有率が非常に小さく0.1mm以下の粒径は河床材料と交換せずに流出しているものと考えられる。したがって河道上では0.1mmより大きい粒径については式(3.7)で示した浮遊砂量式により流砂量を算定し、0.1mm以下の赤土砂の流下形態はウォッシュロードであると考えられる。

ウォッシュロード量を表すものにLQ式が広く用いられているが、2次元河床変動計算においては各格子点上における流砂能力としてのウォッシュロード量を評価する必要がある。LQ式によるウォッシュロード量算定方法は、ある評価地点から上流における土砂生産・流出の現象全てを含んだものであり、その流域内部の任意の地点で成立するものではないため2次元河床変動解析に用いることが出来ない。また、ある時点の観測で得られたLQ式はその時点の流域内の土砂生産状況に

において成立するものであり、土砂生産状況が変化した場合のウォッシュロード量を同一の式では表現出来ない。

現段階では流砂能力としてのウォッシュロード量を算定する方法が確立されていないことから、河床材料と交換することなく流下する成分というウォッシュロードの定義により、式(3.14)で示すように河道のメッシュにおけるウォッシュロードは全て通過するものとして計算する。

$$\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \quad (3.14)$$

但し、 q_{sx} : x 方向のウォッシュロード単位幅流砂量、 q_{sy} : y 方向のウォッシュロード単位幅流砂量である。式(3.14)は各河道メッシュにおいてどの方向のメッシュに流下するかによって場合分けし、式(3.15)のように差分化される。流砂量の定義は図-3.11 に示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{sx}(i+1, j) = q_{sx}(i, j) + \frac{\Delta x}{\Delta y} \{ q_{sy}(i, j) - q_{sy}(i, j+1) \} \\ \quad \text{(x 正方向に流下する場合)} \\ q_{sy}(i, j) = -\frac{\Delta y}{\Delta x} \{ q_{sx}(i, j) - q_{sx}(i+1, j) \} + q_{sy}(i, j+1) \\ \quad \text{(y 負方向に流下する場合)} \\ q_{sx}(i, j) = q_{sx}(i+1, j) - \frac{\Delta x}{\Delta y} \{ q_{sy}(i, j) - q_{sy}(i, j+1) \} \\ \quad \text{(x 正方向に流下する場合)} \\ q_{sy}(i, j+1) = \frac{\Delta y}{\Delta x} \{ q_{sx}(i, j) - q_{sx}(i+1, j) \} + q_{sy}(i, j) \\ \quad \text{(y 負方向に流下する場合)} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

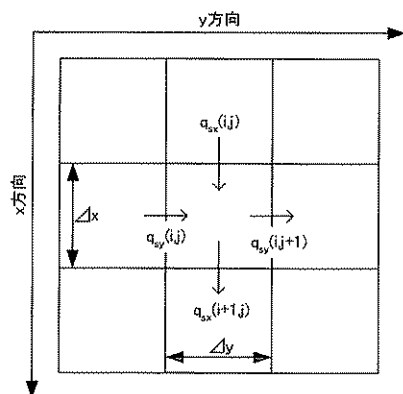


図-3.11 X, Y 方向の流砂量の定義

(3) シミュレーション条件

サーン川流域では、流域末端の既設砂防ダム直上流において 1993 年～1998 年に雨量、流量及び濁度の観測データを得ている。本研究では、これらの中から流量、流出土砂量データの欠測が少く、データ異常のないサーン川流域の日常的な降雨の中から表-3.4 に示す 2 出水を再現対象とした。

表-3.4 検証出水

出水名	ピーク流量 (m³/s)	総雨量 (mm)	総流出量 (m³)	総流出土砂量 (m³)	備考
H10.2.1	0.55	28	1,212	1.17	1 山出水
H5.7.29	0.70	61	3,756	2.46	2 山出水

先に述べたように流域全体において最大の土砂生産の場合はパインアップル圃場であることから、土砂生産の場合はパインアップル圃場に限定し、その他の土地利用の範囲については圃場から生産された土砂の流下区間として考慮した。

圃場の粒度分布については、図-3.7 の粒度分布を用いた。その他の土地利用については、図-3.2 に示す土地利用毎の粒度分布を用いた。粗度係数は、圃場（パインアップル圃場以外の耕地、休耕地も含む）については、2.5 節で示した実験結果⁷⁴⁾から得られた 0.03～0.08 程度という値と土木学会による値⁸¹⁾をもとに 0.06 とした。河川については、河床における雑草、淵や浅瀬の分布、蛇行状況から 0.04 とした⁸¹⁾。道路は 0.03 とした。圃場の流出率は前章の検討結果より式(3.13)により与えた。他の土地利用については流出率 $f = 0.3$ とした。

(4) 流域内の圃場の耕作開始からの期間の変遷と地表面被覆率

パインアップル葉の成長に伴い変化する侵食可能面積の違いを地表面被覆率の違い（図-3.4 の破線）として流域全体の圃場に平均化して与えた。サーン川流域の圃場ごとに耕作開始からの経過月を与え被覆率を算定することが出来るが、シミュレーションモデルに反映させるためには、流域モデルのメッシュ毎に地表面被覆率を割り当てる必要があり、作業が非常に煩雑となること、本研究ではまず流域全体での赤土砂生産流出モデルの適用可能性の検討を主目的としていることから、流域平均の地表面被覆率は、流域内の各圃場の耕作

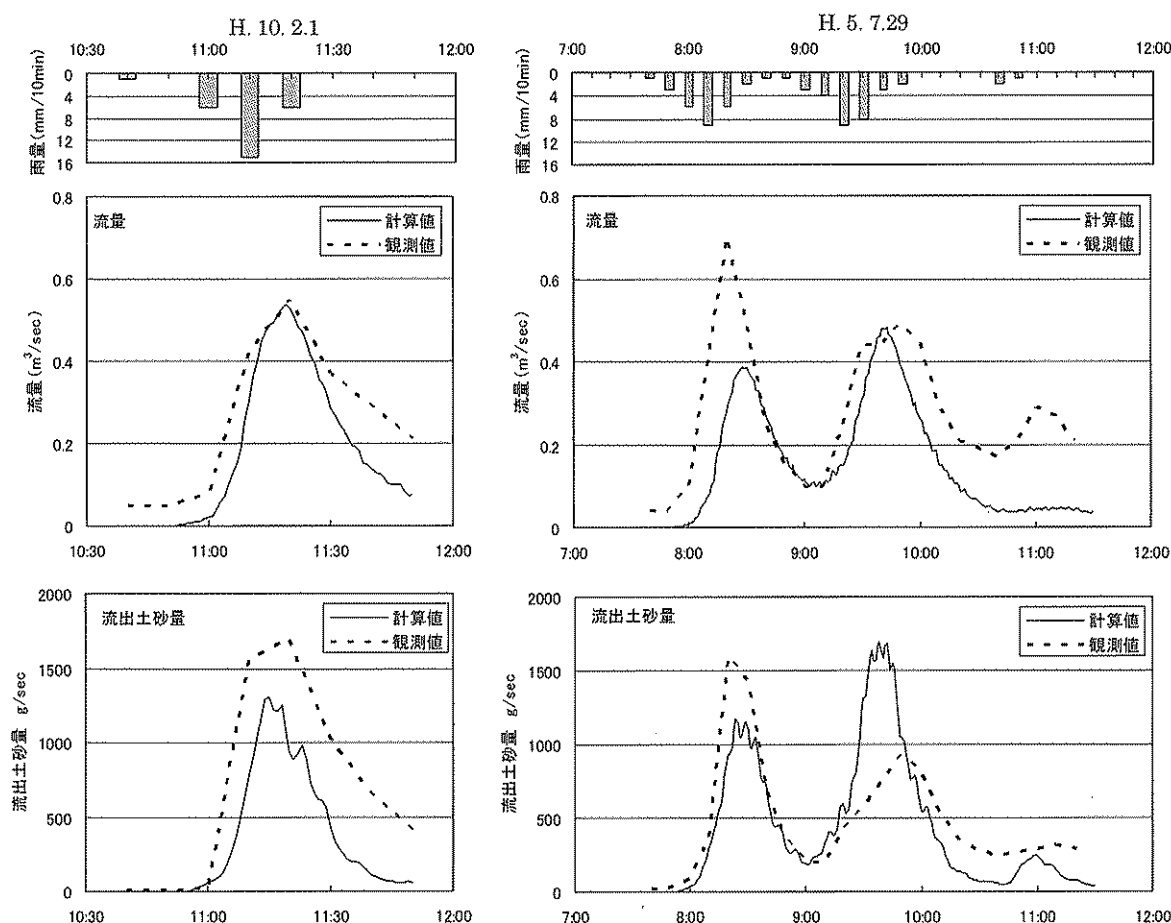


図-3.12 サーン川における流出土砂シミュレーション結果

開始からの経過月数に面積を乗じた値の和を全圃場面積で除して平均の耕作期間(生育齢)を求め、図-3.4 より地表面被覆率を算出した。その結果、H10.2.1 出水では65%、H5.7.29 出水では50%の地表面被覆率を用いることとした。

3.3.2 流域単位での計算結果

図-3.12 に雨量、流量、流出土砂量の観測結果およびシミュレーション結果を示す。流量については、1 山出水では流出波形がある程度の精度で再現されており、2 山出水については1 回目のピークの再現性がやや悪いものの流出波形の傾向については再現性が高い。ただし、H10.2.1(1 山出水)出水では、流量のピークは一致しているが、ピーク以外の部分では流量の計算値が観測値をやや下回っている。一方H5.7.29 出水(2 山出水)では、2 山目のピーク流量はほぼ一致しているが、それ以外の部分では流量の計算値が観測値をやや下回っている。流出土砂量ではH5.7.29 出水の2 山目で計算値が観測値を上回る結果となっているが、そ

他の部分では計算値が観測値を下回る結果となった。

流量が観測値を下回る部分については、基底流量や地下水流出等が考慮されていないことと、圃場以外の部分における流出率について仮定値の0.3を与えていることが要因として考えられる。

H5.7.29 出水の2 山目で計算値の流出土砂量が観測値を上回っている部分では、観測値の流量の増加に土砂量の増加が伴っていないことから、10m メッシュでは捉えきれない微地形などによる土砂流出阻害などが要因として考えられる。流出土砂量の計算値が観測値を下回る部分については、流量が観測値を下回っていることに加え、侵食可能部分が過小評価されていること(実験圃場では取り扱う領域が狭いため、地表面の被覆率の推定にあたっては、畝間の耕作通路等の隙間を侵食域として考慮し地表面被覆率を減少させたが、流域全体では、各圃場で作付け状況が異なるためこのようなことを考慮していないこと、地表面が被覆された状態でも地表面に枯葉等が密着してい

ないと実際には侵食が抑制されないこと⁷⁴⁾、急崖部の侵食量が考慮されていないことなど) が考えられる。

3.4 結論

本章では、沖縄地方における赤土生産・流出の耕作段階における違いを土壌の流出・流下過程を一貫したモデルで取り扱い予測することを目的とし、二次元河床変動計算法に圃場の耕作期間の違い及び過飽和層の形成を考慮したシミュレーション手法を提案し、赤土砂の流出再現計算を行った。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 流出計算過程で用いる流出率は、吉永・翁長らの検討手法に準じて算定された式(3.12)を適用することで、観測結果との適合性の高い流出波形が得られた。
- 2) パインアップルの耕作期間の違いによる赤土砂生産流出特性の違いをパインアップルの生育齢による地表面被覆率の違いとして取り入れ、地表面被覆率の増加にともない地表面の流出可能土砂量が減少すると設定した。
その結果、実験圃場においては、本研究で提案した二次元河床変動計算法を用いたシミュレーション手法により、天地返し直後の圃場と耕作開始後2年あまり経過した圃場の流出土砂量の違いを表現できた。
- 3) シミュレーション手法をサーン川全流域に拡張し適用した結果、流出土砂量の計算値は観測値と異なる部分もあったが、流出土砂の波形については比較的良好に再現できた。流域内の個々の要因を網羅的に包含したモデルには達していないが、地表面被覆率を増大させるような対策工の効果を流域単位で数量的に把握する目的では適応可能であることが分かった。

参考文献

- 64) Wischmeier WH, smith DD: Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation, 1978
- 65) Renard KG, Foster GR, Weesies GA, Porter JP: RUSLE: Revised universal soil loss. 1991
- 66) Williams JR, Berndt HD: Sediment yield prediction and utilization of rangelands, 1977
- 67) Lane L J, Nearing MA, Laflen JM, Foster GR, Nichols MH: Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction project(WEPP) model. In: Parsons AJ, Abrahams AD(eds) Overland Flow, UCL Press, London, UK, p.377-391. 1992
- 68) Morgan R.P.C. Quinnton J.N. Smith R.E. Govers G. Poesen J.W.A. Auerswarld K. Chisci, G. Torri D. Styczen M.E. Folly A.J.V: The European Soil Erosion Model (EUROSEM) documentation and user guide Version 3.6. Silsoe College, Granfield University. 1998
- 69) Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP: AGNPS :Agricultural Non-Point-Source Pollution Model—A watershed analysis tool, United States Department of Agriculture, Conservation Research Report, p.35-80. 1987
- 70) Holy M, Vaska J, Vrana K.: SMODERP: A Simulation Model for Determination of Surface Runoff and Prediction of Erosion Processes. Technical papers of the Faculty of Civil Engineering, CTU Prague, Series V8, p.5-42, (1988)
- 71) 酒井一人, 吉永安俊, 翁長謙良: 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 Vol.63, No.6, p.65-73, 1995
- 72) 大澤和敏, 酒井一人: 降雨—土砂流出解析のための浮遊土砂流出モデルの構築—沖縄県における赤土流出モデル化に関する研究—, 農業土木学会論文集, No.217, p.65-70, 2002
- 73) 南哲行, 山田孝, 仲野公章, 富坂峰人, 徳永俊朗, 山城修: 耕作年代が異なるパインアップル圃場での赤土砂流出特性, 砂防学会誌, Vol.54, No.5, p.30-38, 2000
- 74) 南哲行・仲野公章・山田孝・下村幸男・小野寺勝: 沖縄島の圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂侵食機構, 砂防学会誌, Vol.55, No.3, p.3-11, 2002..
- 75) 南哲行・山田孝・溝口昌晴: 赤土砂の生産実態と要因に関する基礎調査, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, p.77-81, 2000.
- 76) 吉永安俊, 翁長謙良, 酒井一人: 沖縄県の農地における赤土流出防止対策と土等流出防止条例, 水利科学, Vol.40, No.1(228), p.9, 1996
- 77) 南哲行, 小山内信智, 山田孝, 黒崎靖介, 中村勝正, 与那嶺淳: 沖縄島における流域単位での赤土砂の流出特性について, 砂防学会誌, Vol.54, No.3, p.39-46, 2001
- 78) 翁長謙良, 宮城武治: 沖縄における農地保全の基礎的研究—パインアップルの土壌侵食抑制効果について(2)—, 琉球大農学報, No.27, p.265-273, 1980
- 79) 道上正規: 流砂と河床変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, p.91-105, 1972
- 80) 吉永安俊, 翁長謙良, 山城三郎: 沖縄の畑地帯における降雨の浸入および流出特性, 農業土木学会誌, Vol.58, No.5, p.39-46, 1990
- 81) 土木学会: 水理公式集, p.89, 1999

第4章 現地圃場での適用度の高い赤土砂生産軽減法と流域単位での効果評価

4.1 概説

前章で述べたように①赤土砂の流出が顕著な時期は、更新・植え付け（鋤き込み後～耕耘・植え付け）後から1年目であり、植え付け後2年目以降は赤土砂の流出が少なくなること、②その要因としては、葉が成長することによる被覆面積の増加や、畝間の藻類等（3章ではコケ類としていたが、藻類が優占していることが判明したため、藻類等とする）による被覆や土粒子の緊縛効果が考えられること、③従って、対策の実施が重要な時期は更新・植え付け直後から1年目であることを示した⁸²⁾。また、④赤土砂が発生する主要な部分は地表面露出部（畝間）の表層であり、降雨時の含水比増加（飽和度の上昇）による地表面の強度低下層（過飽和層）の形成が土砂流出に関係していることを示した。^{83),84),85)}

第1章で述べたように、沖縄県においては、圃場や開発工事、米軍基地等から海域へ流出した土砂がサンゴ礁域に浮遊・堆積することにより、リーフ内の生態系や漁業、観光業等に影響を与え、環境上はもとより社会的にも大きな問題となっている。現在、公共事業による開発工事に対しては赤土砂等流出防止条例によって対策工の実施等が義務付けられ所定の効果をあげているが、農家による圃場等での対策は必ずしも十分ではない⁸⁶⁾。

また、赤土砂の主要な発生源はパインアップル畑であることが明らかになっており⁸⁷⁾、赤土砂流出問題の解決のためにはパインアップル畑での効果的かつ経済的、省力的な対策手法の開発が必要と考えられる。

そこで、これまでに明らかにしたパインアップル圃場での赤土砂生産・流出の実態とメカニズムをもとに、パインアップル圃場において農家が実施可能な対策手法について検討した。次に、この対策手法について、試験施工によってその効果を評価するとともに、前章で構築した赤土砂生産・流出予測手法により、その対策を実施した場合の流域単位での赤土砂生産軽減の評価を行った。

そして、以上の結果をもとに、現地適用度の高い赤土砂生産軽減手法の計画のあり方を提案した。

4.2 圃場地表面での過飽和層の侵食軽減を目的とした対策の考え方

第2章での赤土砂生産機構検討から、赤土砂流出は、圃場地表面に形成される過飽和層の表面流による侵食であることから、過飽和層の形成を抑制する対策が有効であると考えられる。

圃場における赤土砂流出対策の実際と問題点の整理、把握の結果から⁸⁸⁾、コスト・労力等の観点からパインアップル栽培に適用性がある対策手法は、古株還元方式による圃場更新、通常の営農作業の範囲内で行えるような表面被覆工（マルチング等）及び減耕起更新であると考えられる。また、既述のように赤土砂生産特性の観点から地表面に密着して被覆するマルチ資材が有効であること等を考慮し、効果的かつ実現可能性が高い対策手法として、図-4.1に示す内容を考案した。

現在実施されている古株還元方式での圃場更新は、有機物の投入による団粒化の促進や、耕起作業による透水性の改善効果に加え、古株碎断物による被覆効果があると考えられる。赤土砂の生産特性から考えると、古株碎断物は地表面に密着し、過飽和層の表面流による侵食を軽減するため、マルチ資材としてより適当である。従って、鋤き込みを植え付け（9～10月）間近まで遅らせ、梅雨～夏季に圃場面が裸地化しないようにすれば、農家が実施出来る簡易かつ効果的な対策になる。土木研究所におけるこれまでの研究では、古株還元方式の場合、古株の碎断物を圃場に鋤き込むまでは圃場全体が碎断物で覆われるため、裸地と比較して赤土砂流出量が少ないことを明らかにした⁸⁸⁾。これは、古株碎断物が後述するマルチング（被覆工）の効果を発揮することを示している。従って、古株還元方式の場合、特に新たなコスト・労力をかけずに圃場更新時は全面にマルチングが実施されることになる。沖縄県農業試験場によると、古株碎断物は病虫害防止の観点から1ヶ月以上放置する必要があるが、それ以上であれば長期間放置しても特に営農上の問題はないだろうとのことであった。更に、減耕起更新として、畝間の藻類等による被覆を維持し、地表面露出区域の面積を減じれば、より効果的である。

なお、古株還元方式の場合、碎断物の鋤き込み以降、積算雨量で約150mm程度までは赤土砂の流出が少ないことを確認しているが、それ以降は

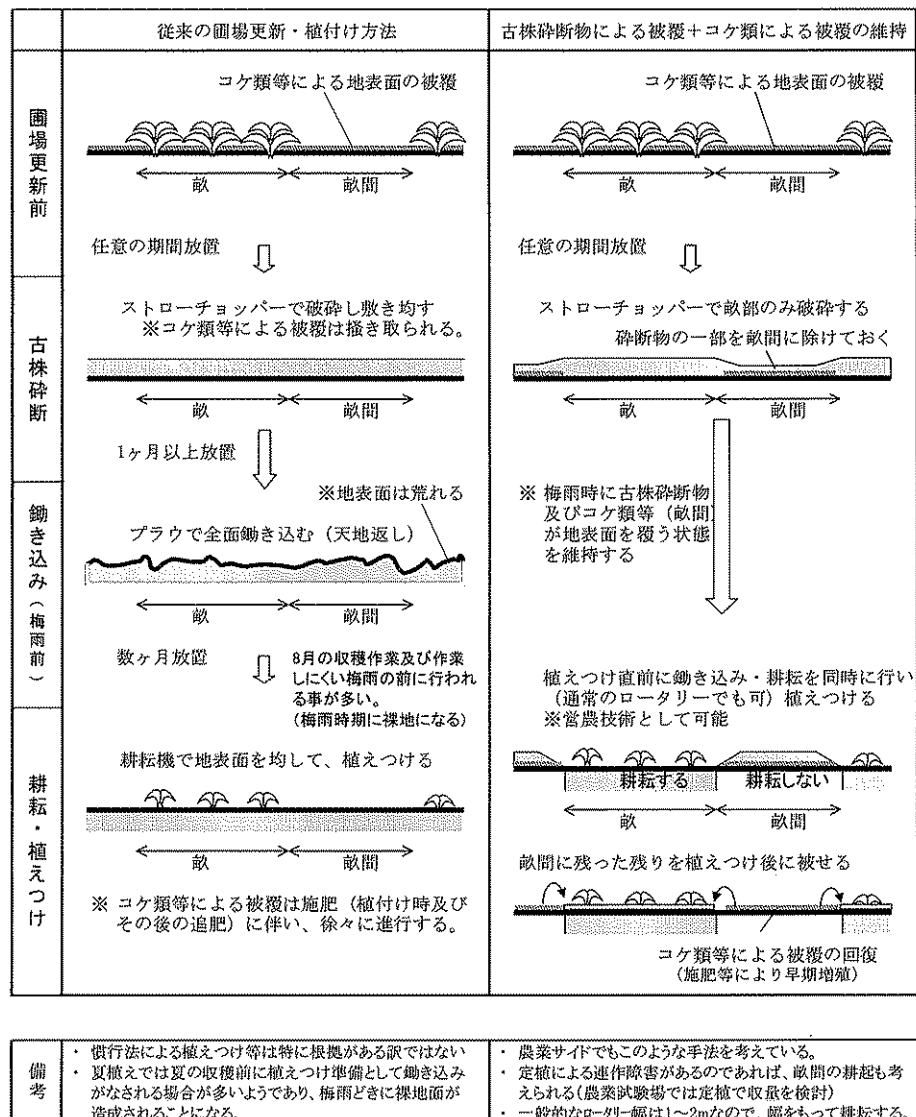


図-4.1 パインアップ圃場における対策手法案

過飽和層が形成されるため赤土砂の流出が増加する⁸²⁾。従って、植付け以降の対策として降雨時における地表面の過飽和層の侵食を軽減する対策が重要である。よって、コスト・労力の観点から考慮して、古株碎断物の一部を残しマルチ資材として利用する方法、及び、畝間等を被覆する藻類等の早期導入等を考えた。地元農家によると、藻類等は施肥に伴って自然に繁茂するとのことであり、圃場更新時に畝間の被覆を維持すれば、労力・コストを掛けずに早期導入を実現できると考えられる。

4.3 圃場での試験施工による赤土砂軽減効果の評価

(1) 赤土砂生産特性からみた評価

本章では敷草（ススキ）マルチ及び減耕起栽培の効果について、観測圃場を設けて比較試験を行った⁸⁸⁾（図-4.2：全面耕起圃場、減耕起+ススキマルチ圃場、減耕起圃場）。その結果、ススキマルチや減耕起を行った圃場の方が、全面耕起圃場よりも流出濃度が高く、赤土砂流出量も多くなるという結果が得られた（表-4.1）。

このような結果になった理由として、全面耕起圃場では、これまでの土木研究所の研究成果でも明らかになったように、地表面に表面流が流れる水道が形成されるまでは、表土流出が生じにくいことが考えられる⁸⁴⁾。更に、減耕起を行った圃場

では、造成作業により畝間が転圧裸地となったこと、マルチングを通常の営農方法と同様に畝部のみに実施したこと等により、畝間の過飽和層が表面流等により侵食され易かったこと等も考えられる。

第2章において藻類等が密着して被覆している地表面では水浸後 24 時間経過しても過飽和層が形成されないことを確認している⁸⁵⁾。従って、減耕起については、単に耕起面積を減じるだけでなく、畝間の藻類等の被覆を維持する等により、降雨時の過飽和層の侵食軽減を図らなければ、十分な効果を発揮しないと考えられる。

また、ススキマルチの下地表面を調べると、リルが形成されており、マルチ実施箇所からも赤土砂が流出したと考えられる。今回実施したススキマルチの場合、ススキの茎や葉が硬く地表面から浮き上がった状態となっていたため、雨滴の衝撃は緩和したものの、地表面の過飽和層上を表面流が流下したため侵食されたと考えられる。

従って、過飽和層の侵食軽減のためには、より地表面に広範に密着するマルチング資材のほうが、効果が高くなると考えられる。

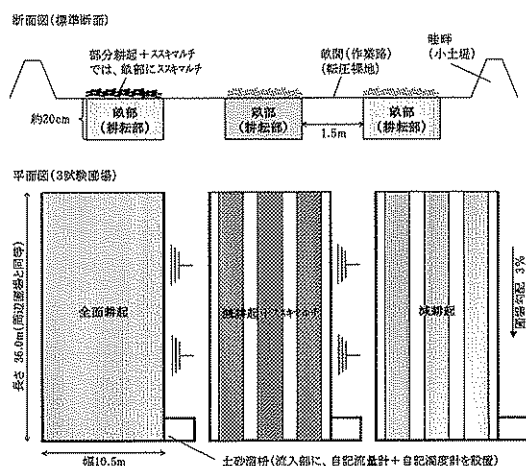


図-4.2 試験圃場概要

(2) コスト面から見た対策の適用性

マルチングはパインアップルの栽培上必ずしも必要な作業ではなく、調査地域周辺でも、畝間の流末等のごく一部にススキ等を敷き均している例があるものの、広く実施している圃場はほとんど見られない。そこで、その労力等について現地試験を行った。農業者4名が、最寄りの草地からススキを刈り取り、軽トラック1台で約150m離れた試験圃場(378 m²)に運搬して厚さ約10cm

で敷き均した。なお、地温調節や水分保持、泥はね防止等のマルチングの営農上の意味を考慮して、畝部のみとした。その結果は、以下のとおりである。

<マルチング試験結果>

- 敷設面積 216 m²
(畝部：圃場面積の57%)
- ススキ 524kg
- トラック 2.7台
- 刈り取り・運搬 2.0時間×4人
- 敷き均し 0.45時間×4人

表-4.1 マルチング等試験圃場観測結果

試験圃場区分	期間雨量(mm)	流出高(mm)	流出率	赤土砂流出量(kg/m ²)	期間平均濁水濃度(mg/L)
全面耕起(無対策)	478.3	162.4	0.34	0.24	1,467
減耕起+ススキマルチ		188.8	0.39	0.26	1,390
減耕起		225.5	0.47	0.42	1,865

注：観測結果(H12.9.1～12.31)中の22降雨について集計

従って、試験圃場にススキマルチを施すのに9.8人・時間要したことになる。これは、標準的な自家労働評価額1,000円/人・時間⁸⁶⁾として換算すると単位面積当たり約25.9円(9,800円/378m²)ということになり、栽培コストを28%上げることになる。実際にススキによるマルチングを実施する場合は、刈り取り場の地主との交渉等の手間や、軽トラックや草刈り機等の燃料費等も発生することを考えると、敷草マルチのパインアップル栽培における実施は、それ以上の品質・販売価格の向上等が無い限り、経済的な観点から難しいと考えられた。従って、マルチングに関しては、古株碎断物のようにコスト・手間のかからない資材・方法を検討することが必要であると考えられる。

減耕起栽培については、藻類被覆等が進んだ畝間を維持し畝部のみ更新すれば、通常の更新と比較して赤土砂生産量が軽減されると考えられる。畝部のみを耕起する場合、調査地域周辺の畝の面積比57%のみ耕起すると考えると、全面耕起している現況と比較してトラクター作業委託料金4.5円/m²⁸⁸⁾を、単純計算で2.6円/m²に引き下げ、栽培コストを約2%削減することになり、労力・コストの観点からも比較的实施しやすい対策と考えられる。

表-4.2 慣行法と対策手法案の耕作ステージごとの赤土砂流出量の比

耕作ステージ	期間 (月)	①慣行法		②提案手法	
		圃場状況	現地観測結果 による裸地との 赤土砂総流出量比	圃場状況	現地観測結果 による①と②の 赤土砂総流出量比 (対策効果)
古株碎断～ 天地返し	2	碎断物マルチ (全面)	0.36	碎断物マルチ (全面)	1.00
天地返し～ 耕耘(植付準備)	4	裸地	1.00	碎断物マルチ (全面)	0.36
耕耘(植付準備) ～植付け	1	裸地	1.00	減耕起＋ 碎断物マルチ	0.21
植付け ～1年目(前半)	6	ほぼ裸地	1.00	減耕起＋碎断物 マルチ(藻類被覆)	0.21～0.12 (中間値0.17)
1年目(後半)	6	パインが生育	0.12	パインが生育	1.00
2年目	12		0.15		
3年目	17		0.19		
耕作ステージ(4年間)を通じた①と②との赤土砂総流出量の比 (期間及び耕作ステージ毎の裸地との流出比による加重平均値)					0.48

注1:①では、裸地状態(天地返し～1年目(前半))の圃場での観測量を1.0とした場合の、同一期間における他の耕作ステージでの観測量の比を示した。

注2:②の植付け～1年目(半年)の値は、植付け直後は圃場Hの観測結果とし、半年後には畝間に藻類等が回復し圃場と同等の効果を発揮するとして面積加重平均した値(集計では中間値0.17を採用)

4.4 流域単位での赤土砂流出予測手法に基づく 赤土砂生産軽減効果の評価

前節までに、現地実験により対策工による圃場からの赤土砂流出抑制効果を評価した。流域内の個々の圃場が対策工を実施することによる、流域全体からの流出土砂量の変化については、対象となる圃場が多く実験は困難であることから、第3章で提案したモデルを用いて評価する。

第3章で示したモデルは、流域内の圃場からの流出土砂が流域内を移動し流域末端まで到達する過程を解析したものであり、このモデルを用いることで流域内の個々の圃場で流出土砂量を減少させた場合の流域末端からの土砂流出の減少がどの程度になるかを算出する。

(1) 圃場からの赤土砂軽減効果

土木研究所では沖縄県東村古島川流域内に対策工に係る試験圃場を設置し、平成13年6月25日～10月31日にかけて、雨量・流出水量、SS濃度を計測して、その効果を確認している⁸⁸⁾。その結果得られた主要な対策期間である圃場更新～植付け直後の時期における従来のパインアップル栽培法(慣行法)と対策手法(案)との赤土砂流出量の比率を表-4.2に示す。表-4.2に示す①慣行法における裸地との赤土砂総流出量比は裸地に対する各耕作ステージ期間中の赤土砂流出量観測結果の比を示し、②提案手法による赤土砂総流出量比、すなわち対策効果は次式により算出した。

対策効果 = $\frac{\text{試験圃場(②提案手法)からの流出土砂量}}{\text{①慣行法の圃場からの流出土砂量}}$

慣行法では古株碎断後の2ヶ月間は碎断物マルチにより裸地の状態に比べ0.36まで軽減するが、その後はパインアップルが生育するまでの期間(天地返しから約1年間)の圃場状況は裸地に相当し、赤土砂流出量が增大すると推測される。この期間において提案手法では慣行法に比べ0.36～0.17に赤土砂流出量が軽減しており対策効果が得られていることが分かる。また、4年間の耕作ステージ全期間での対策効果は0.48であった。

(2) 流域単位での赤土砂流出軽減効果

表-4.2に示したような圃場における対策効果が流域全体からの赤土砂流出をどの程度軽減させるか明らかにするため、サーン川流域を対象として数値計算による評価を行った。数値計算手法は第3章において検討した赤土砂生産・流出予測手法を用いた。このモデルでは赤土砂生産場を圃場地表面とし、圃場地表面の0.1mmより大きな粗粒分に対して式(4.1)に示す浮遊砂量の芦田・道上式により流砂量を算出している。

$$\frac{q_{si}}{q \cdot f(d_i)} = C_B \left[\left(1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \right) \Lambda_1 + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{n\sqrt{g}}{h^{1/6}} \Lambda_2 \right] \quad (4.1)$$

$$\Lambda_1 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^Z \int_{\frac{a}{h}}^1 \left(\frac{1}{\eta} \right)^Z d\eta \quad \Lambda_2 = \left(\frac{a}{h-a} \right)^Z \int_{\frac{a}{h}}^1 \ln \eta \left(\frac{1}{\eta} \right)^Z d\eta$$

$$Z = \frac{w_0}{1.2\kappa u_{*c}}$$

ここに、 q_{si} : 粒径 d_i の単位幅当たりの流砂量、 κ : カルマン定数、 C_B : 底面濃度、 h : 水深、 a : 浮遊砂と掃流砂を区分する河床からの高さ、 w_0 : 粒子の沈降速度、 $\eta = z/h$ 、 u_{*c} : 摩擦速度、 $f(d_i)$:

粒径 d_i の粒子の割合である。

第3章に示したモデルでは、地表面被覆による土砂流出の軽減を考慮し、地表面被覆率を ε として $f_{si} = (1 - \varepsilon) \cdot f(d_i)$ を算出し、式(4.1)において $f(d_i)$ を f_{si} に置換して流砂量を計算している。すなわち地表面上における移動可能な土砂の割合を $f(d_i)$ に乗じている。

対策工の圃場における効果を赤土砂流出予測手法に取り入れる考え方もこれと同様にした。すなわち圃場における対策効果 E を移動可能な土砂の割合として、 $f_{si} = E \cdot (1 - \varepsilon) f(d_i)$ を算出し、式(4.1)において $f(d_i)$ を f_{si} に置換して流砂量を計算することにより、圃場における対策効果を計算に反映した。

なお、0.1mm 以下の細粒分(ウォッシュロード)については圃場では、式(3.8)に示した様に 0.1mm より大きな粗粒分(浮遊砂)の移動に伴って移動するものとし、河道内では全て通過するものとした(3.3.1参照)。

対策効果は、表-4.2 の圃場における観測結果をもとに表-4.3 の4通りに設定した。

計算対象洪水は第3章における検証出水を用いて表-4.4 に示すように設定した。

表-4.3 対策工効果計算ケース

対策種類	圃場の状況	対策効果の値 (裸地に対する 流出率)
対策なし	対策なし	1.00
4年間平均	耕作ステージ4年間の荷重平均値	0.48
耕転期	耕転(植付準備)～植付け	0.21
効果最大	天地返し後1年以内における最大の効果	0.17

表-4.4 検証出水

出水名	ピーク 流量 (m^3/s)	総雨量 (mm)	総流出 量 (m^3)	総流出 土砂量 (m^3)	備考
H10.2.1	0.55	28	1212	1.17	1山出水
H5.7.29	0.70	61	3756	2.46	2山出水

表-4.5 対策効果の計算結果

ケース		対策なし	4年間平均	耕転期	対策効果最大
圃場における対策効果*1		1.00	0.48	0.21	0.17
H10.2.1 一山出水 被覆率 (65%)	総流出土砂量 (m³)	0.56	0.27	0.12	0.10
	対策効果*2		0.48	0.21	0.17
	流出土砂量 ピーク値 (g/sec)	1,305	628	275	223
	対策効果*2		0.48	0.21	0.17
H5.7.29 二山出水 被覆率 (50%)	総流出土砂量 (m³)	2.30	1.14	0.51	0.41
	対策効果*2		0.49	0.22	0.18
	流出土砂量 ピーク値 (g/sec)	1,691	838	374	304
	対策効果*2		0.5	0.22	0.18

*1 表-4.2 による対策なしにおける流出土砂量の観測結果に対する、それぞれのケースにおける観測結果の比として表した。

*2 対策なしにおける計算結果に対する、それぞれのケースにおける計算結果の比として表した。

表中の総流出土砂量および流出土砂量ピーク値は全て流域末端部における計算結果である。

計算結果を図-4.2、図-4.3に示す。各図より対策効果により圃場からの流出土砂量が少なくなるにつれて、流域からの流出土砂量が減少する様子が計算によって表されていることが確認できる。

各計算ケースについて総流出土砂量、流出土砂量ピーク値を表-4.5に示す。また、それぞれの対策なしの計算結果の値との比を対策効果として併せて示す。対策後の圃場からの赤土砂流出率を対策無の1.0に対して0.17とした場合、流域からの対策効果を総流出土砂量で見ると対策無しの場合に比べてH10.2.1出水で0.17、H5.7.23出水で0.18となった。流域からの総流出土砂量およびピーク値の対策効果が圃場における対策効果とほぼ同等の効果となったのは、現在、土砂流出メカニズムが明らかとなっていない流域内の他の土地利用からの土砂流出を考慮していないためである。すなわち、対策効果は、対策なしの場合の流出土砂量に対する対策後の流出土砂量の比で示しており、土砂の発生しない土地からは対策なし、対策後の

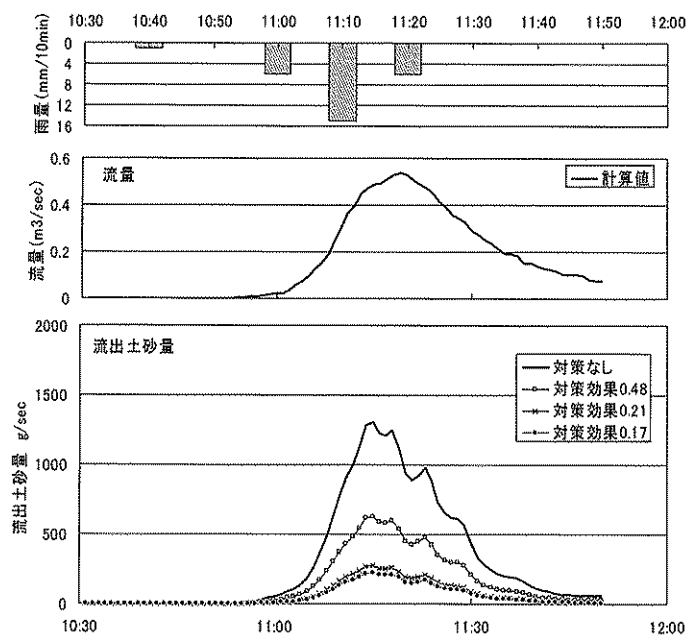


図-4.2 計算結果(H10/2/1 一山出水)

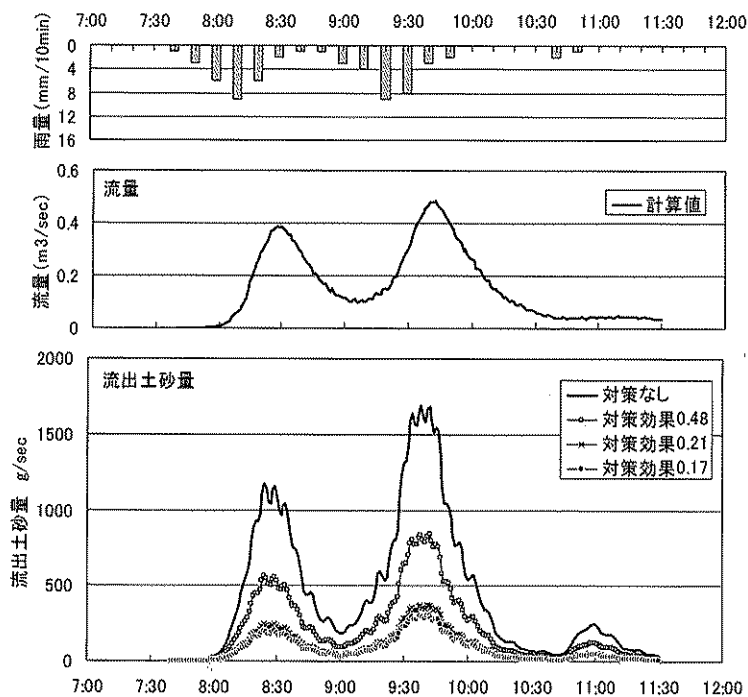


図-4.3 計算結果(H5/7/29 二山出水)

双方において流出土砂量に合わさる量は0であるため、対策効果には影響を及ぼさない結果となっている。この点については、今後の調査で圃場以外の土地利用からの土砂流出について明らかにし、モデルに反映する必要があるが、圃場から流出した土砂が流域末端に達するまでの他の土地利用部分における堆積および再侵食による影響が小さく、赤土砂の主な生産場である圃場における対策によ

り流域からの赤土砂流出を減少させられることが確認できた。

4.5 現地適用度の高い赤土砂生産軽減手法の計画のあり方

主要な流出時期が更新・植え付け直後から1年目までであるというパインアップル栽培における特性、及び、降雨中の圃場地表面における過飽和

層の形成とその侵食により発生するという赤土砂の生産特性を考慮した対策手法について検討した。

その結果、パインアップル圃場において実現可能性が高い対策手法として、労力・コストを掛けずに調達・敷設できる古株碎断物・自然発生する藻類等を地表面に密着する被覆資材として活用する対策手法（古株還元方式と減耕起による圃場更新）を考案した。

4.6 結論

本章では、パインアップル圃場において赤土砂生産を軽減するための、実際に農家が実施可能である手法について検討した。さらに試験施工による圃場における対策効果の評価を行い、数値計算による赤土砂流出予測により流域単位での赤土砂流出に対する効果を評価した。

実際に農家が実施可能である対策法としては、古株碎断物やススキ等を資材としたマルチング（被覆工）と、作物を植える畝部のみを耕起し畝間の藻類等を維持する減耕起法を併せて用いることが考えられる。

ススキによるマルチングと減耕起について圃場における試験施工を行った結果、ススキマルチでは地表面から浮き上がった状態となり十分な効果が得られなかった。また、ススキマルチを用いると単位面積当り約 25.9 円のコストが必要となり栽培コストが 28.9%上昇する結果となった。このことからマルチ資材としては、より地表面に密着し、コストが抑えられる古株碎断物の方が適切であると考えられる。

古株碎断物によるマルチングと減耕起について圃場における試験施工を行った結果は、効果最大時で赤土砂流出を 17%に抑えることができ、耕転～植付の期間で 21%、全ての耕作ステージを通した 4 年間で想定した場合 48%の効果が発揮されることが明らかとなった。

数値計算による赤土砂流出予測により流域単位での赤土砂流出に対する効果を評価した結果は、圃場からの流出土砂量を効果最大の 0.17 とした場合、流域からの流出土砂量の対策効果は H10.2.1 出水で 0.17、H5.7.23 出水で 0.18 となり、現在明らかとなっていない流域内の他の土地利用からの土砂流出形態については考慮されていないが、主な赤土砂の生産場である圃場における対策により流域からの赤土砂流出を減少させられるこ

とが確認できた。

参考文献

- 82) 南哲行・山田孝・仲野公章・富坂峰人・徳永敏朗・山城修：耕作ステージの異なるパインアップル圃場での赤土砂流出特性，砂防学会誌，Vol.54，No.5，p.30-38，2002
- 83) 南哲行・山田孝・溝口昌晴：赤土砂の生産実態とその要因に関する基礎調査，砂防学会誌，Vol.54，No.4，p.77-81，2001
- 84) 南哲行・山田孝・下村幸男・黒崎靖介：鋤き込み圃場の飽和化に伴う赤土砂流出過程に関する実験的考察，砂防学会誌，Vol.55，No.1，p.47-51，2002
- 85) 南哲行・仲野公章・山田孝・下村幸男・小野寺勝：沖縄島の圃場地表面に形成される過飽和層での赤土砂侵食機構，砂防学会誌，Vol.55，No.3，p.3-11，2002
- 86) 赤土等流出防止対策検討会：技術者のための赤土等対策入門書，p.63-66，2001
- 87) 南哲行・小山内信智・山田孝・黒崎靖介・中村勝正・与那嶺淳：沖縄島における流域単位での赤土砂の流出特性について，砂防学会誌，Vol.54，No.3，p.39-46，2001
- 88) 南哲行・桜井亘・山田孝・徳永敏朗・富坂峰人：パインアップル圃場における赤土砂対策手法について，砂防学会誌，Vol.56，No.1，p.31-36，2003

第5章 おわりに

圃場や流域単位における赤土砂の流出量の観測や、圃場地表面の侵食速度などに関する調査研究例は数多く存在するが（例えば山本⁶⁹⁾）、赤土砂が生産される圃場表面の土質特性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。

圃場における対策を進めるにあたっては、パインアップル株の植付けからの時間経過に伴う侵食箇所および侵食量の変化を定量的に評価することで、侵食抑制対策を重点的に実施すべき時期や対策箇所を明らかにして、現地で実際に広く適用可能な経済的、省力的、効果的な対策手法を構築する必要がある。そのためには、赤土砂の生産・流出のメカニズムを明らかにし、パインアップル畑の耕作段階に応じた地表面等の状態変化と、対策工の効果を定量的に評価できるような、流域内の圃場等の二次元的な分布を考慮した赤土砂流出モデルの作成と実流域における検証を行う必要がある。

そのため本研究では、パインアップル圃場が赤土砂の主要な生産源であることから、パインアップル圃場を例として、これまでの土木研究所による現地調査・観測結果及び本研究による模型実験によって赤土砂侵食機構について考察し、さらにその特徴を反映できる赤土砂流出モデルを提案するとともに、今回提案した対策工の赤土砂流出抑制効果を定量的に把握した。

本報告書の結論を列記する。

第1章では、本研究の背景、研究方法と流れについて示した。

第2章では赤土砂の侵食過程において土壌表面に土粒子密度が低く軟弱に見える薄層（約 0.3～0.5mm）（過飽和層）が形成されている様子が確認され、雨水浸透によって圃場地表面がほぼ飽和に達する時点から水溜まりの面積および表面流量が増大し、凹部に沈積した細粒土砂や圃場地表面の過飽和における侵食が顕著となる様子が観察されたことから、その過飽和層の形成メカニズムと侵食速度を明らかにするために土質試験ならびに地盤侵食試験機、二次元水路を用いた模型実験を行い、圃場地表面の限界掃流力などの評価によって、過飽和層での赤土砂侵食過程について考察した。

沖縄島北部のパインアップル圃場から採取した締固め試料を用いて人工降雨実験を行った結果、降雨後 30 分内、現地観測で確認されている赤土砂流出限界降雨値と同じ程度の降雨量 11mm 相当で表層 10mm 程度がほぼ飽和状態となった。また締固め試料ならびに圃場から採取した不攪乱試料を水浸させた場合も 30 分内に見かけ飽和度が 100%を超過する「過飽和層」が試料の表面から 5mm 程度の厚さに形成された。

締固め試料、不攪乱試料の強度特性を調べた結果、両者とも粘着力は含水比の増加とともにほぼ直線関係で低下することが分かった。また、締固め試料に形成された過飽和層のせん断強度を計測した結果、1kPa(10gf/cm²)という値が得られた。この値は、過飽和層の 1.5cm 下にある非過飽和層の強度の約半分であった。

過飽和層が形成された不攪乱試料では、限界掃流力は 0.65Pa と推定され、限界降雨強度約 10mm/h、表面流の水深約 3mm、流速約 6cm/s に相当し、実際の圃場での水理量に近似している。これに対して非過飽和層の限界掃流力は、5Pa 程度と推定され、降雨強度 130mm/h、表面流の水深 10～18mm、流速 15～26cm/s という状況に相当するが、このような水理量は現地の圃場では観察されていない。このことから、膨潤性物質を含む粘性土壌の一種である赤土砂の流出は、地表面に形成された過飽和層の表面流により侵食するというメカニズムが明らかとなった。

第3章では、第2章までの検討により得られた知見をもとに圃場の耕作段階による赤土砂生産・流出特性の違いを表現でき、かつ土壌侵食・流下過程を一貫して再現できる赤土砂の生産・流出計算モデルを提案した。

赤土砂生産・流出計算手法は二次元河床変動計算法を基本とし赤土砂生産源である圃場地表面では過飽和層形成により土粒子が浮遊状態になり流出することから、0.1mm より大きな粗粒分に対して芦田・道上の浮遊砂量式を適用し土砂量を計算し、0.1mm 以下の細粒分（ウォッシュロード）については、0.1mm より大きな粒径成分（粗粒分）の移動に伴って移動するものと考え、粒度分布における 0.1mm より大きな粒径の割合と 0.1mm 以下の粒径の占める割合の比により算定した。次に、計算手法をサーン川流域に拡張する際には、サー

ン川河道内の粒土分布を見ると 0.1mm 以下の含有率が非常に小さいことから 0.1mm 以下の土粒子は河床材料と交換せずに全量流下するとした。

流出計算過程で用いる流出率 f は、吉永・翁長らの検討手法に準じて算定された次式を適用することで、観測結果との適合性の高い流出波形が得られた。

$$f = 1 - 0.9954R^{0.0645}$$

但し、 R は累加雨量である。

パインアップルの耕作期間の違いによる赤土砂生産流出特性の違いは、パインアップルの生育齢による地表面被覆率 ε の違いとして取り入れ、各粒径の土砂の含有率に $1 - \varepsilon$ すなわち露出率を乗じることで、天地返直後の圃場と耕作開始後 2 年あまり経過した圃場の流出土砂量の違いを表現できた。

シミュレーション手法をサーン川全流域に拡張し適用した結果、流出土砂量の計算値は観測値よりも全般的に少な目となったが、流出土砂の波形については比較的良好に再現できた。流域内の個々の要因を網羅的に包含したモデルには達していないが、地表面被覆率を増大させるような対策工の効果を流域単位で数量的に把握する目的では適応可能でことが分かった。

第 4 章では、現地での試験施工をもとに、現地適用度の高い経済的、省力的、効果的赤土砂生産抑制対策工を提案するとともに、第 3 章で作成した赤土砂侵食・流出計算モデルを用いて対策工の効果を評価した。

ススキによるマルチングと減耕起について圃場における試験施工を行った結果、ススキマルチでは地表面から浮き上がった状態となり十分な効果が得られなかった。また、ススキマルチを用いると単位面積当り約 25.9 円のコストが必要となり栽培コストが 28.9% 上昇する結果となった。これに対して古株碎断物によるマルチングと減耕起について圃場における試験施工を行った結果は、効果最大時で赤土砂流出を 17% に抑えることができ、耕耘～植付の期間で 21%、全ての耕作ステージを通した 4 年間で想定した場合 48% の効果が発揮された。このことから、実際に農家が実施可能である対策法としては、古株碎断物を資材としたマルチング(被覆工)と作物を植える畝部のみを

耕起し畝間の藻類等を維持する減耕起法を併せて用いるのが適切である。

流域での赤土砂対策は、主たる赤土砂の生産源であるパインアップル圃場で実施することが有効であり、数値計算による流域単位での赤土砂流出対策効果を評価した結果、圃場からの流出土砂量が既存対策の最大効果である対策をしない場合の 17% まで低減としたとした場合、流域からの赤土砂流出量も 17% まで低減し、圃場での対策工の有効性が確認された。

参考文献

-
- 89) 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