

圃場試験とモデル解析に基づいた土壌侵食防止技術の評価
ーモザンビーク国ナカラ回廊地域への適用ー

2019, 3

東京農工大学 連合大学院 農学研究科

農業環境工学専攻

成尾 和浩

目 次

要 旨.....	1
第 1 章 緒論.....	3
1.1 土壌侵食とは.....	3
1.2 研究対象地域の概要.....	4
1.3 研究対象地域における土壌侵食.....	6
1.4 土壌侵食に関する既往の研究.....	9
1.5 研究対象地域における土壌侵食対策の現状.....	11
1.6 本研究の目的.....	12
1.7 論文の構成.....	12
第 2 章 圃場試験による土壌侵食対策技術の評価.....	13
2.1 緒言.....	13
2.2 材料および方法.....	14
2.2.1 試験地.....	14
2.2.2 供試作物.....	16
2.2.3 処理区.....	17
2.2.4 調査項目および方法.....	25
2.3 結果および考察.....	27
2.3.1 最小耕起.....	29
2.3.2 作物残渣マルチ.....	33
2.3.3 ベチベル草植生帯.....	35
2.3.4 キマメのアレイクロッピング.....	37
2.4 小括.....	37
第 3 章 土壌侵食予測モデルの現地適合性の検証.....	39
3.1 緒言.....	39
3.1.1 土壌侵食予測モデルとは.....	39
3.1.2 モザンビークにおける土壌侵食予測モデル活用の現状.....	40
3.2 SLEMSA モデルの検証.....	41
3.2.1 SLEMSA モデルの概要.....	41
3.2.2 SLEMSA モデルの適用方法.....	44
3.2.3 SLEMSA モデルの検証結果および考察.....	46
3.3 WEPP モデルの検証.....	51
3.3.1 WEPP モデルの概要.....	51
3.3.2 WEPP モデルの適用方法.....	59

3.3.3 WEPP モデルの検証結果および考察	75
3.4 WEPP モデルと SLEMSA モデルの比較.....	84
3.5 小括.....	85
第 4 章 土壌侵食対策技術導入指針の作成.....	87
4.1 緒言.....	87
4.2 土壌侵食対策技術導入指針の作成方法.....	88
4.3 結果および考察.....	97
4.3.1 耕起および最小耕起.....	97
4.3.2 作物残渣マルチおよびキマメのアレイクロッピング.....	104
4.3.3 ベチベル草植生帯.....	105
4.3.4 各土壌侵食対策技術の効果の比較.....	106
4.3.5 土壌侵食対策技術の組み合わせ効果.....	107
4.4 小括.....	114
第 5 章 総括.....	116
5.1 研究の背景.....	116
5.2 圃場試験による土壌侵食対策技術の評価.....	117
5.3 SLEMSA モデルおよび WEPP モデルの現地適合用性の評価.....	119
5.4 土壌侵食対策技術導入指針の策定.....	120
5.5 研究結果の意義とその展望.....	121
謝辞.....	124
引用文献.....	126

表目次

表 1-1 SLEMSA モデルによる 土壌侵食量のカテゴリー分け	7
表 1-2 代表的な既往の土壌侵食予測モデルの特徴.....	10
表 2-1 モザンビークにおける農業生態ゾーン R7, R10 の特徴.....	15
表 2-2 Nampula, Lichinga の位置情報および主な気象条件	15
表 2-3 Nampula, Lichinga の試験地の土壌条件.....	15
表 2-4 供試験作物の播種間隔および施肥量.....	16
表 2-5 試験実施場所と年毎の処理の組み合わせ.....	17
表 2-6 作物・圃場管理記録.....	18
表 2-7 残渣マルチを行った処理区の残渣使用量および地表面被覆率.....	21
表 2-8 処理毎の土壌侵食量と作物収量.....	27
表 2-9 Nampula における降雨係数：R が同程度の降雨時における 土壌侵食量の比較.....	31
表 2-10 耕起，畝立て，除草に必要な 1 ヘクタール当たりの労働時間.....	32
表 2-11 播種/植付に必要な 1 ヘクタール当たりの労働時間.....	32
表 3-1 代表的な既往のモデルの特徴.....	40

表 3-2	SLEMSA モデルの土壌受食性インデックス : F.....	43
表 3-3	5 つの土地利用ごとの降雨エネルギー遮断率.....	44
表 3-4	各試験期間のサブモデル K の値.....	45
表 3-5	各試験地のサブモデル C の値.....	45
表 3-6	各試験地のサブモデル X の値.....	46
表 3-7	WEPP モデルの入力データ.....	59
表 3-8	WEPP モデルの適用に用いた斜面データ.....	59
表 3-9	Nampula, Lichinga の試験地の土壌条件.....	60
表 3-10	WEPP に入力した Nampula における各処理区の作物・圃場管理スケジュール.....	62
表 3-11	WEPP に入力した Lichinga における各処理区の作物・圃場管理スケジュール.....	67
表 3-12	WEPP に入力した Nampula における作物に関するパラメータ.....	73
表 3-13	WEPP に入力した Lichinga における作物に関するパラメータ.....	74
表 3-14	WEPP に入力した耕起に関するパラメータ.....	75
表 4-1	農業生態ゾーン R7 および R10 に属する地域.....	90
表 4-2	土質ごとの代表値 (平均値).....	91
表 4-3	触感による土性の判定方法.....	92
表 4-4	粘土との回帰式から求めた土質ごとの CEC と有機物含量.....	93
表 4-5	WEPP に入力したゾーン R7 における各処理区の作物・圃場管理スケジュール.....	94
表 4-6	耕起および最小耕起によって土壌侵食量を 10t ha-1 以下に抑えることの出来る傾斜.....	104
表 4-7	残渣マルチによって土壌侵食量を 10t ha-1 以下に抑えることの出来る傾斜.....	105
表 4-8	ベチベル草植生帯の有無による土壌侵食量を 10t ha-1 以下に抑えることの出来る傾斜の差.....	106
表 4-9	土壌侵食対策技術なしの区と各対策技術を適用した区の土壌侵食量を 10t ha-1 以下に抑えることの出来る傾斜の差.....	106
表 4-10	評価項目の重要性尺度.....	108
表 4-11	評価項目ごとの重み.....	108
表 4-12	評価項目の基準.....	108
表 4-13	土壌侵食抑制効果による一対比較.....	109
表 4-14	導入の難易による一対比較.....	109
表 4-15	収益性による一対比較.....	111
表 4-16	技術の総合評価と優先順位.....	111
表 4-17	農業生態ゾーン, 土質, 傾斜による各条件において土壌侵食量を 10t ha-1 以下に抑えることの出来る技術の組み合わせ.....	113

図目次

図 1-1	World Soil Erosion Map.....	4
図 1-2	研究対象地域位置図.....	5

図 1-3	モザンビーク国の土壌侵食ハザードマップ	7
図 1-4	ガリ侵食によって分断された キャッサバ畑 (ナカラ回廊中部地域)	8
図 1-5	面状侵食によって種子が洗い流された ダイズ畑 (Nampula)	8
図 1-6	衛星画像で見た Nampula の土壌侵食	8
図 2-1	焼畑後の農地 (ナカラ回廊中部地域)	22
図 2-2	火災に対するベチベル草の耐性	22
図 2-3	Nampula におけるベチベル草植生帯区のレイアウト	23
図 2-4	試験圃場でのベチベル草の写真	24
図 2-5	キマメのアレイクロッピング区において剪定されたキマメと残渣マルチとして 用いられているキマメの茎葉	25
図 2-6	土壌侵食測定区画のレイアウトおよび写真	26
図 2-7	Nampula における土壌侵食の積算値の推移	28
図 2-8	Lichinga における土壌侵食の積算値の推移	29
図 2-9	Nampula の 3 年目の試験における耕起区および最小耕起区での地表面被覆率の 推移	30
図 2-10	Nampula の最小耕起区における地表面被覆率の推移と除草作業実施時期	31
図 2-11	除草作業によって土壌中に鋤き込まれたダイズ残渣マルチ	35
図 2-12	シロアリによるゴマ残渣とベチベル草への食害の程度の違い	37
図 3-1	SLEMSA モデルの構成	42
図 3-2	土壌侵食量の実測値と SLEMSA モデルによる予測値の比較	48
図 3-3	Lichinga における最小耕起区の土壌侵食量の実測値と耕起区換算値, SLEMSA モデルによる予測値の比較	49
図 3-4	オリジナルの SLEMSA モデルとモザンビーク版 SLEMSA モデルによる 降雨エネルギー : E の計算式の比較	49
図 3-5	モザンビークにおける雨期 (11 月-4 月) の雨量マップ	50
図 3-6	WEPP による土壌侵食予測の概要	52
図 3-7	耕起区と最小耕起区の 1 作期ごとの土壌侵食実測値と予測値	76
図 3-8	Nampula の耕起区における 1 日ごとの土壌侵食実測値と予測値の関係	77
図 3-9	最小耕起区の土壌侵食実測値と予測値の関係	77
図 3-10	Nampula の 3 年目の試験における 1 日ごとの最小耕起区の土壌侵食実測値と 予測値の関係	78
図 3-11	Nampula における作物残渣マルチ区の 1 作期ごとの土壌侵食実測値と予測値	79
図 3-12	Lichinga における作物残渣マルチ区の 1 作期ごとの土壌侵食実測値と予測値	79
図 3-13	作物残渣マルチ区の土壌侵食実測値と予測値の関係	80
図 3-14	実測値と WEPP による予測値が一致しなかった処理区	80
図 3-15	Lichinga におけるベチベル草植生帯区の土壌侵食実測値と予測値	81
図 3-16	ベチベル草植生帯区の土壌侵食実測値と予測値の関係	82
図 3-17	キマメのアレイクロッピング区の土壌侵食実測値と予測値	83
図 3-18	キマメのアレイクロッピング区における土壌侵食実測値と予測値の関係	83

図 3-19	全ての処理区の作期ごとの土壌侵食の実測値と WEPP モデルによる予測値の 関係.....	84
図 3-20	全ての降雨イベント毎の土壌侵食の実測値と WEPP による予測値の関係.....	84
図 3-21	WEPP モデルと SLEMSA モデルの予測値の比較.....	85
図 4-1	土壌侵食予測値が 10t ha-1 となる傾斜の算定方法の例.....	88
図 4-2	モザンビークの農業生態ゾーニングマップ.....	90
図 4-3	土壌サンプル採取位置図.....	92
図 4-4	粘土含量と CEC の関係.....	93
図 4-5	粘土含量と有機物含有量の関係.....	93
図 4-6	R7 の耕起区における土質ごとの 土壌侵食予測値と傾斜の関係.....	98
図 4-7	R7 の最小耕起区における土質ごとの 土壌侵食予測値と傾斜の関係.....	98
図 4-8	R10 の耕起区における土質ごとの 土壌侵食予測値と傾斜の関係.....	98
図 4-9	R10 の最小耕起区における土質ごとの.....	98
図 4-10	R10 の耕起区における有機物含量ゼロ条件での土質ごとの土壌侵食量と傾斜の 関係.....	99
図 4-11	R10 の最小耕起区における有機物含量ゼロ条件での土質ごとの土壌侵食量と 傾斜の関係.....	99
図 4-12	R7 における傾斜 15%条件での畝斜面受食性.....	99
図 4-13	R7 における傾斜 15%条件での畝間受食性.....	100
図 4-14	R7 における傾斜と流出水量の関係.....	100
図 4-15	R7 における傾斜とトウモロコシの最大植被率の関係.....	101
図 4-16	R10 における傾斜と流出水量の関係.....	101
図 4-17	R10 における傾斜とトウモロコシの最大植被率の関係.....	102
図 4-18	R10 における傾斜 15%条件での畝斜面受食性.....	102
図 4-19	R10 における傾斜 15%条件での畝間受食性.....	103
図 4-20	R7 における最小耕起+ベチベル草植生帯+アレイクロッピングの 予測土壌侵食量と傾斜の関係.....	113

要 旨

モザンビーク北部に位置するナカラ回廊地域では、雨期の土壌侵食が農業生産における大きな問題の1つとなっている。モザンビークの既存の土壌侵食ハザードマップの作成には、ジンバブエで開発された土壌侵食予測モデルである Soil Loss Estimation Model for South Africa (SLEMSA) が用いられているが、その現地適合性は検証されていない。土壌侵食予測モデルの現地適合性を検証するためには、圃場試験による土壌侵食の実測値と土壌侵食予測モデルによる予測値の比較が必要であるが、モザンビークにおいて圃場レベルで土壌侵食量を実測した事例は見当たらない。モザンビークでは土壌侵食防止のための行動計画 (2008-2018) が策定されており、普及員マニュアルに一般的な土壌侵食対策技術も紹介されているが、農家が自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を簡便に選択できる実用的な指針は作成されておらず、土壌侵食対策技術の普及は進んでいない。SLEMSA は土壌侵食対策技術の効果を評価することには不向きであるため、対策指針を作成するためには、Water Erosion Prediction Project (WEPP) の様な土壌侵食対策技術の効果の評価が可能なモデルの適用可能性について検証する必要がある。そこで本研究では、モザンビーク国ナカラ回廊周辺地域を対象として、圃場試験とモデル解析に基づいた土壌侵食防止技術の評価を目的とした。具体的には以下の目標を掲げて研究を遂行した。1) 対象地域で現実的に実施可能と考えられる土壌侵食対策技術を選定し、その効果を圃場試験によって定量的に比較・評価する。2) 圃場試験で得られた土壌侵食量の実測値を用いて SLEMSA および WEPP の現地適合性を検証する。3) 土壌侵食対策技術の導入指針を作成するために、WEPP による解析によって、任意の地域、土性、傾斜の条件下で必要となる対策の種類や組み合わせについて検討する。

圃場試験を実施し、土壌侵食対策なし (耕起)、最小耕起、作物残渣マルチ、ベチベル草植生帯、キマメのアレイクロッピングの各処理区における土壌侵食量を実測し、土壌侵食削減効果を評価したところ、それぞれの技術による土壌侵食削減率は、最小耕起：57%、作物残渣マルチ：51-95%、ベチベル草植生帯：77%、キマメのアレイクロッピング：87%であった。特に、最小耕起については耕起と比べ収量が低下せず、1ha 当たり 200 時間 (人件費換算：40US\$ ha⁻¹) の労働時間/人件費削減効果が見

込まれた。また、作物残渣マルチについては、被覆率が高い程、土壤侵食削減効果が高くなる一方、効果の増加幅は頭打ちになる傾向が認められた。キマメのアレイクロッピングについては、その土壤侵食削減効果は、キマメ残渣マルチと同程度であった。ベチベル草植生帯については、剪定した葉を植生帯の根元に敷詰めることで植付1年目から高い土壤侵食削減効果が得られた。

圃場試験で得られた土壤侵食の実測値とジンバブエで開発されたオリジナルの SLEMSA、モザンビークの既存の土壤侵食ハザードマップの作成に使用されたモザンビーク版 SLEMSA 及び WEPP による土壤侵食予測値を比較した結果、モザンビーク版 SLEMSA は、全体的に土壤侵食量を過大評価する結果となった。オリジナルの SLEMSA は、雨量が 1,250mm 以下の条件であれば予測値が実測値と概ね一致したため、この雨量の範囲であれば、モザンビークにおける土壤侵食の危険度評価に活用可能であると考えられた。一方、WEPP による予測精度は SLEMSA より高く、予測値は全ての処理区の実測値と概ね一致した。特に、耕起の程度や頻度、マルチの有無や投入量、植生帯の有無などの効果を的確に表現可能であり、土壤侵食対策技術の効果の予測にも利用可能と判断された。

現地適合性が確認された WEPP を用いてシミュレーションを行ったところ、対象地域の条件では、傾斜が約 6.0% を超えると土壤侵食量が持続的な作物生産を維持出来るレベルである年間 10 t ha^{-1} を超える結果となったことから、傾斜がそれ以上大きい圃場では何らかの土壤侵食対策技術の導入が必要と考えられた。また、各技術を単独で導入した際の効果を検証した結果、最小耕起では 7.3%、作物残渣マルチ/キマメのアレイクロッピングでは 10.1%、ベチベル草植生帯では 10.0% の傾斜まで土壤侵食量を年間 10 t ha^{-1} 以下に抑えることが出来る結果となった。さらに、全ての技術を組み合わせた際の効果を検討した結果、およそ 20% を超える急傾斜まで土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑制することが出来るという結果が得られた。そしてこれらの結果を基に、農家が自ら簡易な方法で土質の判定と傾斜の測定を行うことで、自身の農地に必要な土壤侵食対策技術を簡便に選択できる実用的な指針を WEPP による解析結果を活用することによって作成できることを例示した。

現状では、ナカラ回廊地域において土壤侵食対策技術はほとんど普及していないことから、本研究の測定結果や解析手法が現地のマニュアルや土壤侵食防止のための行動計画に反映され、土壤侵食対策技術の普及に資することが期待される。

第1章 緒論

1.1 土壌侵食とは

土壌侵食とは水や風等の作用により土地から表土が失われる現象である。このうち、水の作用によって引き起こされるものを水食、風の作用によって引き起こされるものを風食という。また、水食については、水の流れによって地表面が広く面上に削られることを面状侵食、細い溝の様に削られることをリル侵食、リル侵食が進行し細溝が沢状に発達することをガリ侵食と呼ぶ。土壌侵食は自然現象の一つであり、自然条件下でも起こりうるが、自然条件下では一般的に地表面が植生やその残渣等によって保護されているため、その進行は極端な降雨や突風等が起こらない限り極めて緩やかである。土壌侵食は人間活動による影響が大きく、森林伐採や過放牧、野焼き等の不適切な土地管理によって元の植生が破壊されると加速度的に助長される。特に農地は自然状態に比べ植物や残渣による被覆率が低く、収穫後には農地がしばらく裸地状態となることが多いことから土壌侵食が起こり易い。土壌侵食が進行し、肥沃な表土が失われると農地の生産力は低下し、母材が露出する程に侵食が進むと耕作が不可能となる。土壌は非常に長い時間をかけて生成されるため、土壌侵食によって劣化した土壌を回復することは極めて困難である。米国農務省（2006）は土壌生成の速度を考慮した場合、土壌の種類にもよるが、持続的な作物生産を維持するためには土壌侵食を $4.9\text{-}12.4\text{ t ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ に抑える必要があるとしている。人類はカロリーベースで食料の約 99.7%を土地から得ていることから、土壌を保全し、その生産性を維持することは人類の生存にとって極めて重要な課題である（Daved Prerenial, 2006）。そのため、土壌侵食は農牧林業の生産性に悪影響を及ぼす世界的な問題の一つとなっており（Lal and Stewart, 1990; Plimentel, 1993; Pimentel et al., 1995; Pimentel and Kounang, 1998）、世界中で多くの研究が為され対策が講じられているが、その成果は必ずしも十分ではない。FAO（2016）によると北アメリカ、ヨーロッパ、ユーラシア、太平洋南西部の土壌侵食の状況は中程度（Fair）と評価されており、その状況は改善（Improving）傾向にあるとされている。一方、東部・北部アフリカについては、非常に悪い（Very Poor）、サブサハラアフリカ、中南米、アジアは悪い（Poor）と評価されており、その状況はこれらのいずれの地域において

も悪化（Decreasing）傾向にあるとされている（図 1-1）。また、水食および風食による土壤損失量はそれぞれ年間 20-30 億トン、2 億トンと試算されており、特に水食による影響が大きい。現在の土壤侵食の傾向が続けば 2050 年には食料生産量が 10%減少すると予測されている（FAO, 2016）。

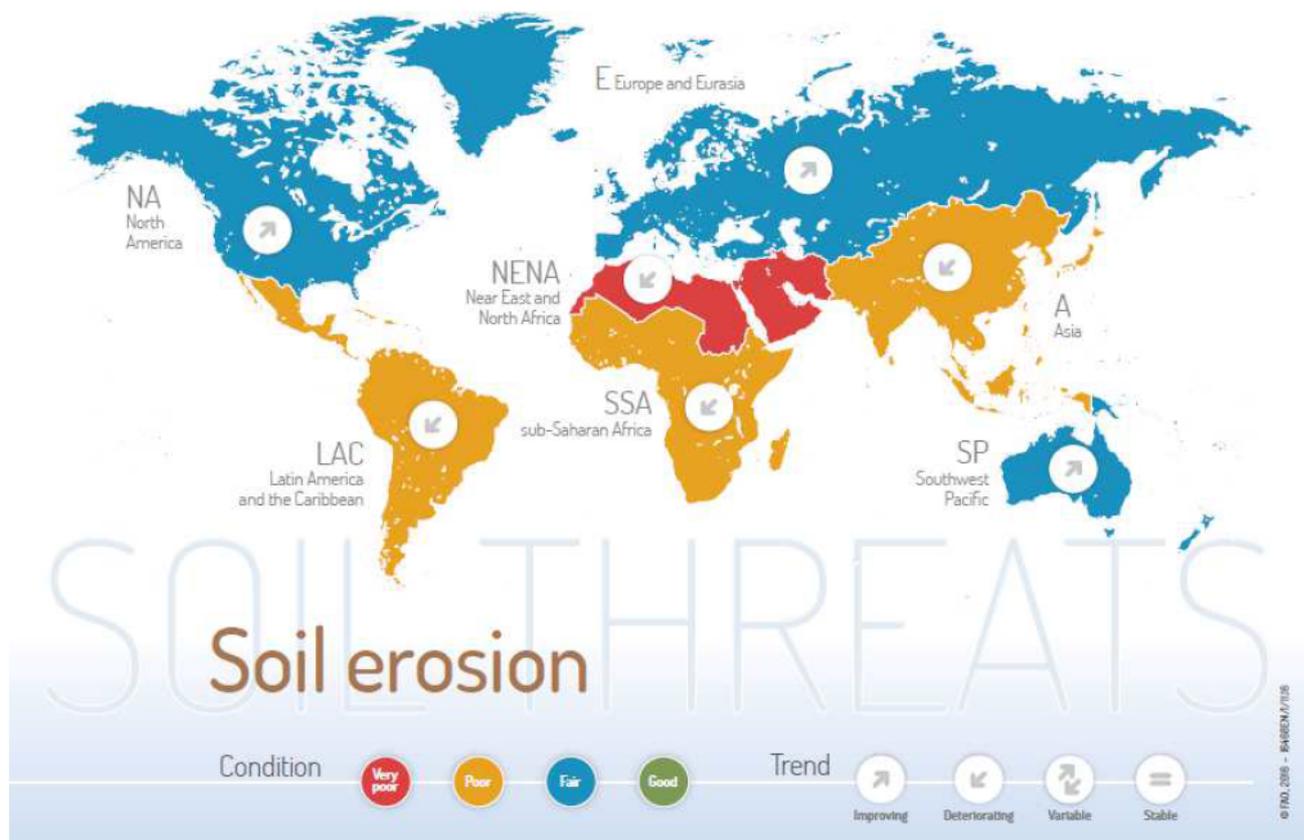


図 1-1 World Soil Erosion Map
(Source: FAO, 2016)

1.2 研究対象地域の概要

本研究では、モザンビーク国北部に位置するナカラ回廊地域を対象に土壤侵食防止技術の評価のための研究を行った。ナカラ回廊とは、図 1-2 に赤線で示した幹線道路で、本研究において定義するナカラ回廊地域とは、図 1-2 に示す緑の線で囲われたナカラ回廊近隣の地域である。ナカラ回廊地域の位置するモザンビーク北部は、中部・南部地域に比べ一定の雨量に恵まれ、土壌も肥沃なモザンビークにおける農業生産の適地である。モザンビークは食料の 14.99%を海外から輸入している（World Bank, 2016）。

特に首都 Maputo を含む南部地域は食料の多くを南アフリカ共和国からの輸入に頼っているため、北部地域の農業開発によって南部地域への食料供給の増加が期待されている。同地域では労働人口の約8割が農業に従事しており、農業生産者の99%以上が小規模農家である(INE, 2011)。また、同地域の貧困率は、52.4%(MOP, 2010)と高い。そのため、同地域はモザンビークの食料安全保障にとって極めて重要な地域であると共に貧困削減のための対策が求められている地域である。

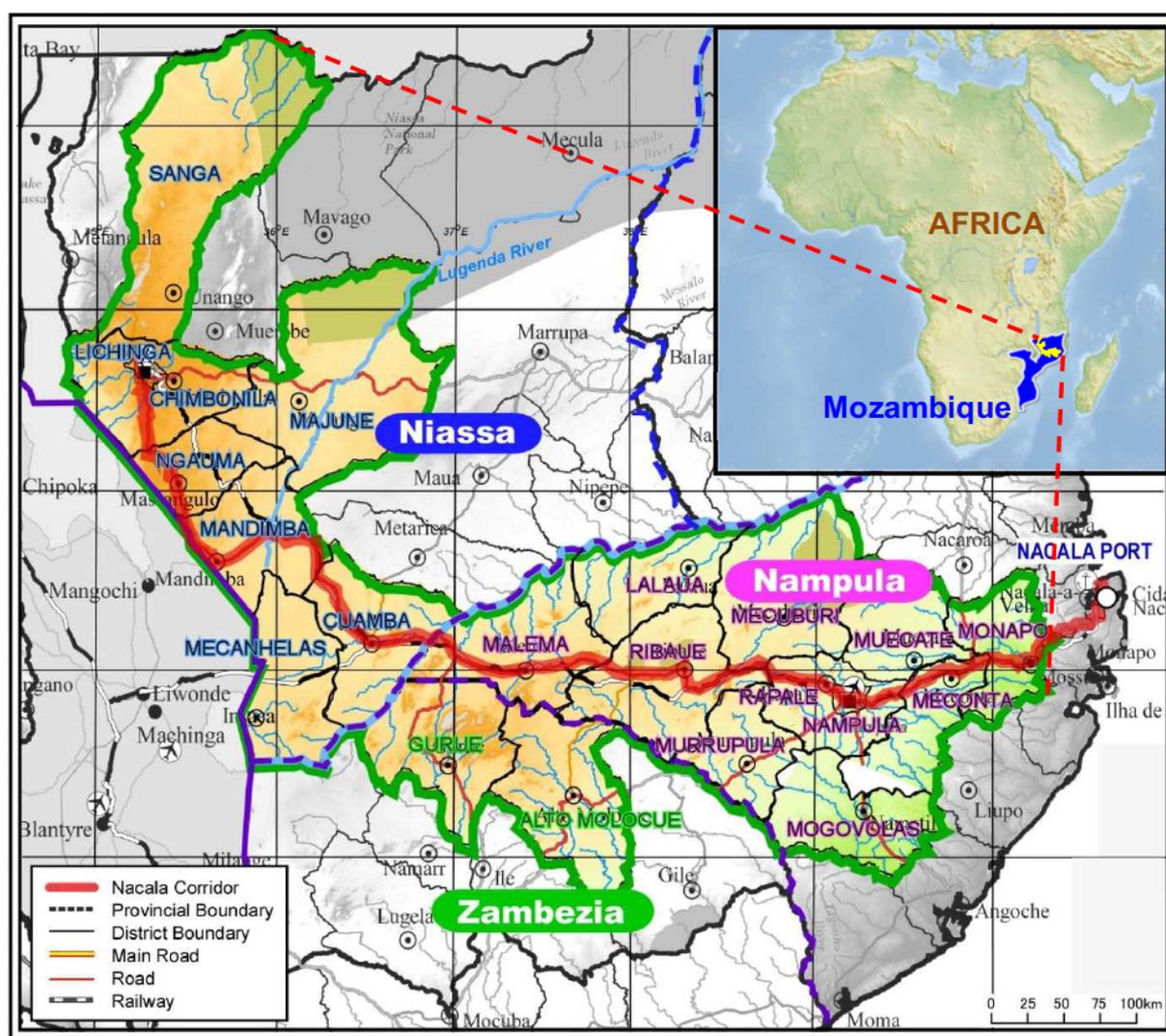


図 1-2 研究対象地域位置図

(Source: JICA, 2016)

1.3 研究対象地域における土壌侵食

土壌侵食は、水の作用に起因する水食と風の作用に起因する風食に分けられるが、モザンビーク環境省によって、2007年に策定された土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）によると、研究対象地域の農業において問題となっているのは、雨期の降雨による水食とされている。世界的な気候変動の影響を受け、近年、モザンビークでは、洪水や干ばつのリスクが高まっている（Ehrhart 2006）。極端な降雨は、土壌侵食を引き起こし土壌劣化の原因となる。モザンビークにおける降雨による土壌侵食の危険度を示した既存の土壌侵食危険度マップ（Wambege 1986）によると、モザンビーク北部に位置するナカラ回廊地域では、面積の約7割が土壌侵食の危険度“中”から“高”に分類されている（図1-3）。この評価をこの土壌侵食危険度マップの作製に用いられた SLEMSA モデルの土壌侵食量の 카테고리表（表1-1）に照らしてみると年間土壌侵食量 $11-30\text{ t ha}^{-1}$ に相当し、この値は米国農務省（2006）が試算した持続的な作物生産を維持するために抑えるべき土壌侵食の範囲 $4.9-12.4\text{ t ha}^{-1}$ を上回っている。実際に対象地域の農地では、ガリ侵食がところどころで見受けられ、農地の耕作を困難にしている（図1-4）。面状侵食やリル侵食の跡は土壌表面が耕起されるとほとんど消失してしまうが、雨期のはじめには農地の傾斜に関わらず平地においても広く認められる（図1-5, 1-6）。特に面状侵食は広い範囲で表土が流されてしまうため、表土と共に種子や肥料が流され、播種や施肥がやり直しになると、種子代や肥料代、人件費の増加に繋がる。この様に、対象地域においては、雨期の土壌侵食が農業生産における大きな問題の一つとなっている。

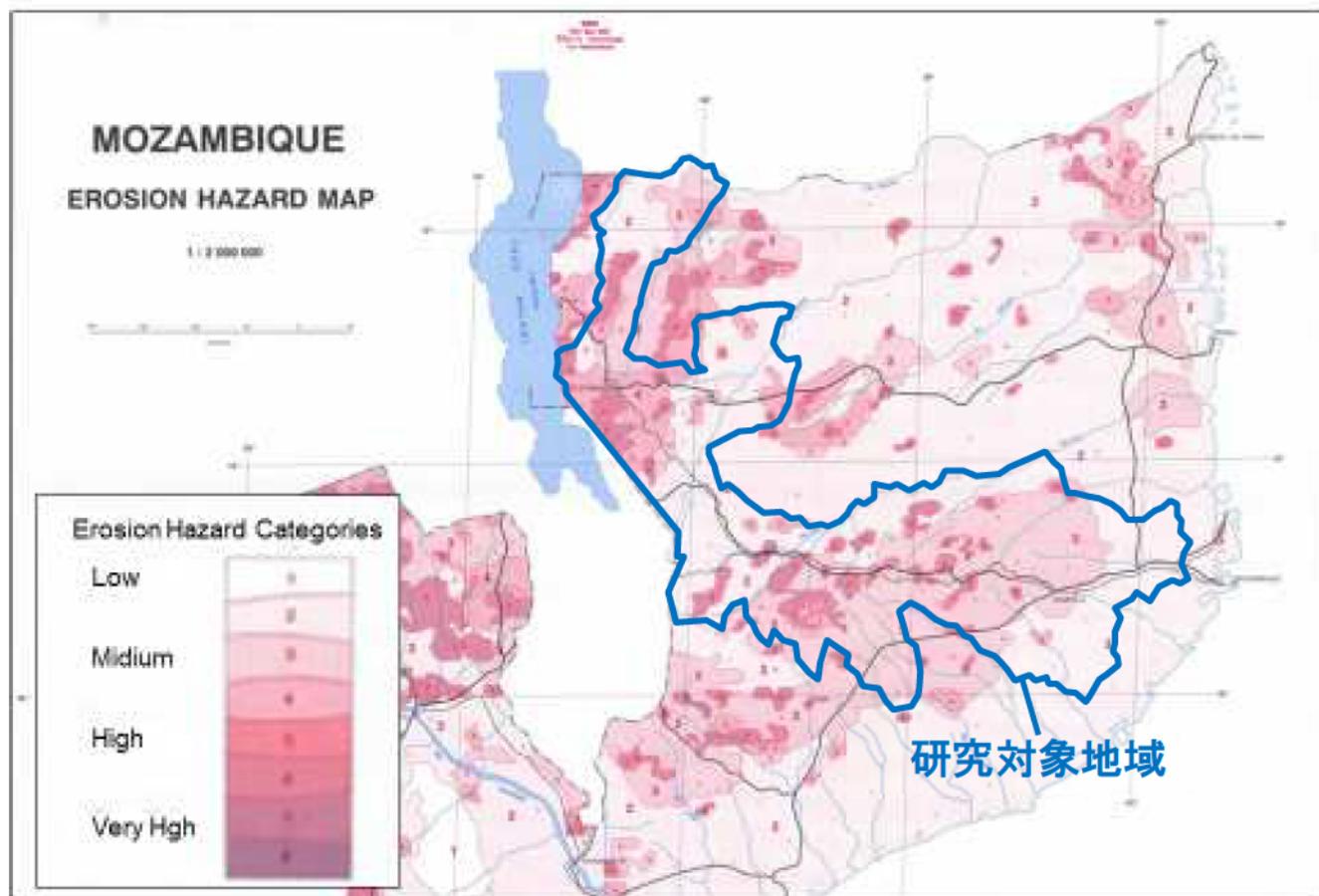


図 1-3 モザンビーク国の土壌侵食ハザードマップ
(Source: INIA, 1986)

表 1-1 SLEMSA モデルによる
土壌侵食量の 카테고리分け

Erosion Hazard Categories		Soil Loss (t ha ⁻¹ year ⁻¹)
Low	1	0-5
	2	6-10
Midium	3	11-15
	4	16-20
High	5	21-30
	6	31-40
Very High	7	41-50
	8	>50

Source: Khonje and Machiru, 1987



図 1-4 ガリ侵食によって分断された
キャッサバ畑（ナカラ回廊中部地域）



図 1-5 面状侵食によって種子が洗い流された
ダイズ畑（Nampula）

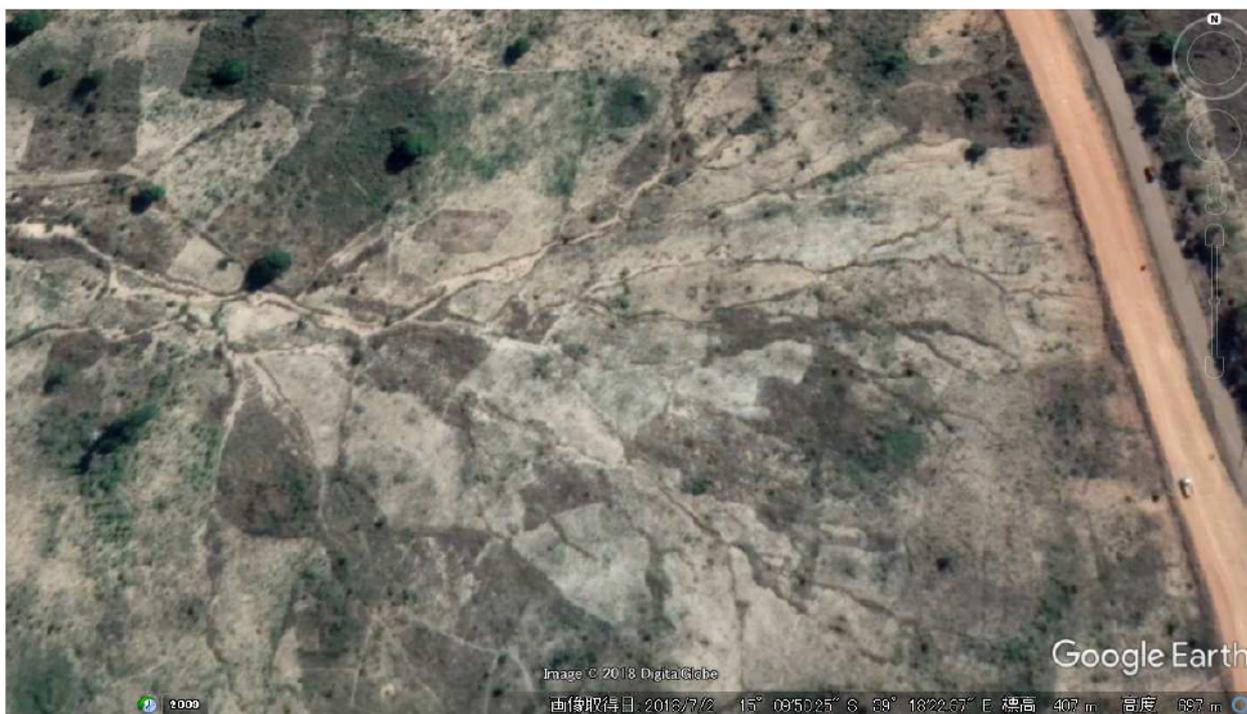


図 1-6 衛星画像で見た Nampula の土壌侵食

1.4 土壌侵食に関する既往の研究

土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）では、モザンビーク国内において土壌侵食に関する科学的根拠に基づいた情報が不足していることが指摘されており、農業研究機関に対し、土壌侵食に関する研究を推し進めるよう求めている。これを受け、モザンビーク国立農業試験場は、作物残渣マルチを用いた土壌保全試験等を実施しているが、土壌侵食量の測定は行われておらず、モザンビーク国内において各土壌侵食対策技術による土壌侵食削減効果を圃場レベルで定量的に比較検証した事例は見当たらない。

モザンビークにおける既存の土壌侵食ハザードマップが作成された 1986 年時点では、土壌侵食の危険度評価に必要な情報が限られていたため、その様な条件下でも土壌侵食量の予測が可能な Soil Loss Estimation Model for South Africa (SLEMSA) (Elwell, 1978) が用いられた。SLEMSA モデルは、ジンバブエで開発された土壌侵食予測モデルであるが、モザンビークにおける適合性を検証するための圃場試験は行われていない (Wambege, 1986)。そのため、既存の土壌侵食ハザードマップは土壌侵食の危険度を適切に表現できていない可能性が考えられる。

土壌侵食予測モデルは、SLEMSA モデルを含め、これまでに数多くのモデルが開発されている。その中で利用が認められ、公開されているいくつかの代表的なモデルについての特徴を表 1-2 に示した。土壌侵食の予測には、Wischmeier・Smith (1978) によって開発された Universal Soil Loss Equation (USLE) モデルが世界的に広く用いられてきた。SLEMSA モデルはこの USLE モデルを参考に、限られた情報のみでも土壌侵食量の予測が可能なよう簡易化されたモデルである。USLE モデル開発後、同モデルについて数多くの研究が行われ、USLE モデルを改良した Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) モデルが Renard ら (1997) によって開発された。これらのモデルは全て圃場試験で実測された土壌侵食の結果を統計的に解析して得られた経験式によって構成されていることから、経験的モデルと呼ばれる。USLE モデルの開発以降行われた多くの研究によって、経験的モデルは、モデルが開発された地域では精度良く土壌侵食量を予測できるものの、モデルが開発された地域と自然条件が大きく異なる地域では予測精度が低くなる危険性があることや土壌の侵食や堆積過程が考慮されていないことから適用出来る空間スケールが圃場レベルに留まり、流域規模への拡張が困難といった点が指摘されてきた。このよ

うな問題点から、土壌の侵食や堆積過程の理論に則った土壌侵食予測モデルの開発が進められるようになり、**Agricultural Non-Point-Source Pollution Model (AGNPS)** (Young et al., 1989) や **Water Erosion Prediction Project (WEPP)** (Lane and Nearing, 1989) , **Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS)** (Woolhiser et al., 1989) , **European Soil Erosion Model (EuroSEM)** (Morgan et al., 1992) 等、多くのモデルが開発された。これらのモデルはプロセスベースモデルと呼ばれ、上述の様な経験的モデルの弱点を克服している代わりに多くのパラメータの入力が求められ、経験的モデルと比べ構造が複雑になっている。しかし、多くのプロセスベースモデルはソフトウェア化されることによって操作が簡便化され実用的なものとなっている。これらの土壌侵食予測モデルの中で実用的かつ土壌侵食対策技術の効果を予測することが可能なプロセスベースモデルは、WEPP モデルのみであるが、モザンビークにおいて WEPP モデルの現地適合性を検証した事例は見当たらない。

表 1-2 代表的な既往の土壌侵食予測モデルの特徴

モデル	種類	空間 スケール	時間的 解像度	侵食対策 技術の効果	実用性 (簡便性)
SLEMSA	経験的	圃場	年単位	評価不可能	非常に シンプル
USLE / RUSLE	経験的	圃場	年単位	部分的に 評価可能	シンプル
AGNPS	半経験的 半プロセスベース	大流域	分単位 ~年単位	評価可能	複雑だがガリ 侵食も計算可能
WEPP	プロセスベース	小流域	降雨単位 ~日単位	評価可能	複雑だが ソフトウェア化
KINEROS	プロセスベース	小流域	分単位 ~降雨単位	評価不可能	複雑
EuroSEM	プロセスベース	小流域	分単位 ~降雨単位	評価不可能	複雑だが ソフトウェア化

1.5 研究対象地域における土壌侵食対策の現状

農地の水食対策については、土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）に郡ごとに推奨される対策が示されているが、その内容はどの郡においてもほぼ同一で、等高線栽培、ベチベル草の植栽、蛇籠や古タイヤ、土嚢等を使用した工法、雨水の排水路の設置等となっている。また、農業普及員マニュアルには水食対策として、等高線栽培や不耕起、有機物残渣マルチ、ベチベル草植生帯が紹介されている。しかし、2016年時点において現場で普及していることが確認出来るのは等高線畝立て栽培と排水路の設置だけである。この技術は Niassa 州および Zambzia 州で広く採用されているが、Nampula 州ではあまり一般的ではない。また、排水路は土水路であるため、洗掘が進んでしまってる例も多々見受けられる。不耕起栽培や有機物残渣マルチについては複数のドナーや NGO が普及活動を行っているが、有機物残渣マルチが乾期の野菜栽培において実施されているのみで、雨期の作物栽培ではどちらの技術も採用している農家は限定的である。また、耕種的な対策に比べてコストの高い農業土木的な対策については全くといってよいほど普及していない。

WEPP モデル等の土壌侵食対策技術の効果が評価可能な土壌侵食予測モデルは、農地開発時の土壌侵食対策工法の決定や土壌侵食防止計画の策定に有用なツールであるが、モザンビークにおける現地適合性については検証が為されていない。そのため、土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）の策定には使用されておらず、同計画で推奨されている技術で十分な土壌侵食防止効果が得られるかは検討されていない。また、土壌侵食予測モデルが個別農家や普及員向けの土壌侵食対策マニュアルの作成に応用されている事例は、モザンビークに限らず世界的にみても見当たらず、一般的に農家や普及員向けのマニュアルには、各技術の土壌侵食防止効果の程度やどのような技術をどのような条件の農地に導入すれば十分な土壌侵食防止効果が得られるかといった目安を数値で示した土壌侵食対策技術の導入指針は記載されていない。

1.6 本研究の目的

以上の状況を踏まえ、本研究における大目的を「圃場試験とモデル解析に基づいた土壌侵食防止技術の評価」とし、その大目的を達成するための具体的な内容として以下に示す3つの小目的を設定して、モザンビーク国ナカラ回廊周辺地域における土壌侵食の問題解決の一助となるために研究を行った。

1. 対象地域で現実的に実施可能と考えられる土壌侵食対策技術を選定し、その効果を圃場レベルで定量的に比較・評価する。
2. 圃場試験を通じて得られた気象および土壌のデータ、土壌侵食量の実測値を用いて対象地域における SLEMSA 及び WEPP モデルの適合性を評価する。
3. 農家が自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を簡便に選択できる実用的な土壌侵食対策技術の導入指針を作成するために、WEPP モデルによる解析によって、任意の地域、土性、傾斜の条件下で必要となる対策の種類や組み合わせについて検討する。

1.7 論文の構成

本論文は5つの章で構成されている。第1章では、土壌侵食の定義やその影響、研究対象地域における土壌侵食と対策の現状および研究の意義・目的の概要を述べた。第2章では、対象地域で実施可能と考えられる土壌侵食対策技術について圃場試験でその効果を定量的に測定した結果から、各対策技術の効果について評価した。第3章では、第2章の圃場試験で得られた土壌侵食の実測値と SLEMSA 及び WEPP モデルによって算出された予測値を比較し、各モデルの現地適合性について検証した。第4章では、WEPP モデルおよび圃場試験と調査を通じて得られた気象・土壌等のデータを使用し、土壌侵食対策技術の導入指針を作成するために、任意の地域、土性、傾斜の条件下で必要となる対策の種類や組み合わせについて検討した。最後に第5章では、全体の内容を総括し、本研究の成果をまとめるとともに、今後の展望を述べた。

第2章 圃場試験による土壌侵食対策技術の評価

2.1 緒言

ナカラ回廊地域では、政府機関や複数のドナー・NGO等が土壌侵食防止のための活動を実施しているが、本地域において各土壌侵食対策技術の効果を定量的に検証した文献は見当たらない。しかし、土壌侵食は世界的な問題の1つとなっていることから、他国において今日までに既に多くの土壌侵食対策技術が開発されている。米国農務省を中心に開発され、世界的に広く活用されている土壌侵食予測モデルである USLE (Wischmeier and Smith, 1978) は、以下の様な5つの係数の積で表されている。

$$A = R K L S C P$$

A : 予測土壌侵食量 (kg m^{-2})

R : 降雨係数 ($\text{J m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$)

1 イベントの降水量（無効雨時間6時間以内）が12.7mm以上、または15分当たりの降雨強度が6.4mm以上と定義される侵食性降雨の運動エネルギー E とその降雨の30分間降雨強度 I_{30} の積 I_{30} の年間合計値。

K : 土壌係数 ($\text{kg h}^{-1} \text{j}^{-1} \text{m}^{-1}$)

単位降雨当たりの流亡土壌量を与える係数。その土地の土壌の受食性を示す指標。

LS : 地形係数 (-)

傾斜勾配と斜面長の影響を表す係数。

C : 作物・管理係数 (-)

作物被覆と営農管理の影響を表す係数で、裸地に対する土壌流亡の比。

P : 保全係数 (-)

畝立て、等高線栽培等の保全耕作の効果を示す係数で、平畝、上下耕起に対する流亡土壌の比

このことから、土壌侵食を防止するためには上記の各係数を下げるような対策を行えばよいこととなる。これら係数の内 R は自然条件であるため、変化させることは不可能である。 K については、堆肥等の有機物の施用によって土壌の団粒化を図る等の対策によって削減が可能である。 LS については、斜面をテラス化する等して傾斜と斜面長を改善することで削減出来る。 C を削減する方法については、施肥によって作物の生育を早め植覆率の上昇を早める、樹木や永年作物との組み合わせにより高い植被率を維持する、有機物残渣等により地表面被覆率を高める、耕起を最小限に抑える等の方法がある。 P については、記載の様に畝立てや等高線栽培を導入することによって削減することが出来る。

基本的にはこの様な対策によって土壌侵食を削減することが可能であるが、それぞれの技術はその地域で実施可能なものを選択し、地域の条件によって組み合わせや実施方法の細部を最適化する必要がある。また、対象地域の農業生産者は 99%以上が小規模農家であり政府の予算も限られていることから、技術が生産者に受け入れられるためには、極力低予算で実施出来る内容であることが求められる。また、土壌侵食の削減効果だけではなく、収益の向上や労働力/人件費の削減、収量低下のリスク回避等に繋がり、長期的な効果だけでなく、短期的な効果も期待できる技術であることが望ましい。本研究では、上記の様な観点から検証する土壌侵食対策技術を選択し、その評価を行った。

2.2 材料および方法

2.2.1 試験地

試験はナカラ回廊地域に位置する Nampula および Lichinga の 2 箇所のモザンビーク国立農業試験場の圃場で実施した。ナカラ回廊地域は、その面積の約 8 割がモザンビークの農業生態ゾーニングによる分類 R7 および R10 で占められており、Nampula は R7, Lichinga は R10 に属している。農業生態ゾーン R7, R10 の特徴を表 2-1 に、Nampula, Lichinga の位置情報及び主な気象条件を表 2-2 に、土壌条件を表 2-3 に示す。

表 2-1 モザンビークにおける農業生態ゾーン R7, R10 の特徴

Zone	Characteristics
R7 (Nampula)	This area includes the land between 200 and 1,000 meters in elevation. Annual rainfall ranges between 800 and 1,000 mm and temperature range is 20 to 25°C. The texture of the soils varies from sandy to clay, consistent with the topography.
R10 (Lichinga)	The high altitude region of Zambezia and Niassa highlands. Annual rainfall is over 1,200 mm, and average temperature during the growing period is 15 to 22.5°C. The soils are principally ferralsols.

Source: Mozambique Agricultural Development Strategy, World Bank, February 2006

表 2-2 Nampula, Lichinga の位置情報および主な気象条件

Location	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Slope (%)	Rainy season	Rainfall* (mm)	Annual average temperature (°C) †
Nampula	15°17' S	39°19'E	381	4.2	Dec-Mar	800-1,000	24.7
Lichinga	13°20' S	35°15'E	1,384	3.5	Nov-Mar	1,000-1,200	19.1

*Source: Mozambique Seasonal (Nov to Apr) Rainfall Map, WFP, Jul 1996

†Source: climate data.eu: <https://www.climatedata.eu/>

表 2-3 Nampula, Lichinga の試験地の土壌条件

Location	Depth (cm)	pH*	Organic matter (g kg ⁻¹)	Available P† (mg kg ⁻¹)	Ex-K† (cmol _c kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Rock (%)	Bulk density (g cm ³)
Nampula	0-3	5.6	5.4	21.5	0.12	2.2	81.5	7.2	10.2	1.1	1.50
	3-20	5.7	7.5	19.6	0.15	2.4	82.9	3.7	13.1	1.2	1.46
	20-42	5.2	4.3	10.8	0.25	6.6	50.4	9.1	38.6	1.9	1.81
	42-68	5.5	4.1	3.2	0.21	4.4	40.8	5.8	30.3	23.1	1.67
	68-100	5.1	3.9	5.4	0.24	6.8	53.1	11.2	34.4	1.3	1.72
Lichinga	0-6	5.4	25.2	29.6	0.76	7.4	48.8	14.0	35.8	1.4	1.26
	6-30	5.2	26.3	27.4	0.66	7.0	46.5	20.9	31.4	1.2	1.18
	30-42	5.0	15.8	13.9	0.91	10.2	22.5	8.3	68.3	0.9	1.45
	42-66	5.2	10.7	10.6	0.98	12.4	24.5	9.8	64.6	1.1	1.57
	66-100	5.1	10.6	9.4	0.93	12.9	25.6	8.5	64.3	1.6	1.53

* Water extraction method (1:2.5)

† Mehlich 3 extraction method

Nampula は、標高の低い平地に位置し、気温が高い。降雨期間は12月から3月にかけての4カ月間だけである(表2-2)。土壌は、砂質で有機物含量が少ないため乾燥し易く(表2-3)、また、乾燥すると非常に硬くなる性質を持っている。このことが降雨前の耕起作業と降雨開始時の適期播種を困難にしており、降雨期間が限られていることから、播種の遅れは収量の低下を招く大きな原因の一つとなってい

る。また、2月下旬から3月上旬頃にかけて小乾期があり、土壌が砂質で水分保持力に乏しいことから、干ばつ害を受け安い。

Lichinga は、標高が Nampula より高いことから気候が比較的冷涼で、降雨期間も Nampula より1カ月ほど長く（表 2-2）、比較的安定した降雨がある。土壌は、Nampula より粘土質で有機物が多いため、干ばつ害は受け難い（表 2-3）。Nampula 同様、Lichinga の土壌も乾燥すると非常に硬くなる性質を持っている。

試験圃場の傾斜は、Nampula が 4.2%、Lichinga が 3.5%である（表 2-2）。Lichinga は Nampula より標高が高く、周辺地域も傾斜の大きい農地が多い。しかし、Lichinga の農業試験場には Nampula の農業試験場よりも傾斜の大きい圃場がなかったことから、傾斜が 3.5%の圃場で試験を実施した。

2.2.2 供試作物

供試作物はトウモロコシ、キャッサバ、キマメを用いた。モザンビークでは、トウモロコシとキャッサバはそれぞれモザンビークにおける栽培面積1位、2位に位置する主要作物となっている（FAOSTAT 2013-2016）。土壌侵食の防止において地表面被覆率は重要な要因の一つである。しかし、モザンビーク北部地域における主要な換金作物の一つであるキマメは、初期生育が遅いため、地表面が茎葉によって覆われるまでに時間を要することから土壌侵食の被害を受け易い。

Nampula では3年間でキマメ、トウモロコシ、キャッサバ、Lichinga では2年間でキマメ、トウモロコシの試験を行った。それぞれの作物の播種間隔および施肥量を表 2-4 に示す。キャッサバは Nampula では広く栽培されているが、Lichinga では気温が低く栽培されていないことから試験を実施しなかった。なお、各作物は全ての試験において等高線上に作付した。

表 2-4 供試験作物の播種間隔および施肥量

作物	株間 (cm)	条間 (cm)	施肥量
キマメ	50	80	無施肥
トウモロコシ	25	80	Nampula では 2014 年 1 月 2 日、Lichinga では 2015 年 1 月 20 日に尿素を N として 30kg ha ⁻¹ 施用した。
キャッサバ	100	105	2015 年 1 月 12 日に尿素を N として 30kg ha ⁻¹ 施用した。

2.2.3 処理区

処理については、Nampula と Lichinga の地域性の違いを考慮の上、それぞれで異なった処理を設定した。ナカラ回廊地域の農業生産者の多くは小規模農家であり、モザンビーク政府には十分な予算がないため、土木工事を伴うような土壌侵食対策を広範囲で実施することは困難である。そこで、農家が普段使用している農具や地域資源を用いて実施出来る土壌侵食対策技術として、最小耕起、作物残渣マルチ、キマメのアレイクロッピング、ベチベル草植生帯を選択し、その効果を検証した。試験実施年毎の処理の組み合わせを表 2-5、Nampula と Lichinga の試験における作物と圃場の管理記録を表 2-6 に示す。

表 2-5 試験実施場所と年毎の処理の組み合わせ

Location	Plot	Treatments		
		1 st year (Pigeon pea)	2nd year (Maize)	3rd year (Cassava)
Nampula	1	Tillage	Tillage	Tillage
	2	Tillage + Sorghum mulch	Tillage + Pigeon pea mulch	Tillage + Maize mulch
	3	Minimum tillage	Minimum tillage	Minimum tillage
	4	Minimum tillage + Sorghum mulch	Minimum tillage + Pigeon pea mulch	Minimum tillage + Vetiver grass hedgerow (each 2.1 m)
Lichinga	1	Contour ridge	Contour ridge	
	2	Contour ridge+ Maize incorporation (4 t ha ⁻¹)	Contour ridge + Pigeon pea incorporation (1.5 t ha ⁻¹)	
	3	Minimum tillage	Minimum tillage	
	4	Minimum tillage + Sun flower mulch	Minimum tillage + Pigeon pea mulch	
	5	Minimum tillage + Soy mulch	Minimum tillage + Pigeon pea alley cropping	
	6	Minimum tillage + Maize mulch	Minimum tillage + Vetiver grass hedgerow (at the lower end of the plot)	

表 2-6 作物・圃場管理記録

Location	Year	Crop	Tillage/ Ridging/ Weeding*	Sowing/ Planting	Mulching [†]	Pruning	Weeding ^{††}	Harvest
Nampula	1st year (2013)	Pigeon pea	3 Jan	7 Jan	7 Jan		16 Jan 1 Feb 14 Feb	13 Jul
	2nd year (2013/2014)	Maize	21 Dec	28 Dec	28 Dec		6 Jan 20 Jan 10 Feb	1 May
	3rd year (2014/2015)	Cassava	28 Nov	28 Nov	28 Nov	28 Nov ^V 30 Jun ^V 30 Mar ^V	12 Jan 16 Feb	28 Sep
Lichinga	1st year (2013/2014)	Pigeon pea	22 Nov	27 Nov	27 Nov		10 Dec 29 Dec 8 Jan 24 Jan 21 Feb 7 Mar 5 Apr	26 Jul
	2nd year (2014/2015)	Maize	3 Dec	10 Dec	10 Dec	10 Dec ^P 20 Jun ^P 8 Mar ^P 10 Dec ^V 16 Feb ^V 18 Mar ^V	2 Jan 14 Jan 30 Jan 20 Feb 20 Mar	27 May

*Weeding was conducted only in Minimum tillage plot

[†] Mulching was conducted only in Mulching plot

^{††}No difference in weeding frequency between the treatments

^PPigeonpea alley cropping pruning

^VVetiver grass hedgerow pruning

(1) 収量比較のための対照区

Nampula では、畝立てはあまり行われておらず、鋤で 10-15cm 程耕起後、播種を行う方法が一般的である。一方、Lichinga では、一般的に高さ 15-20cm の畝を等高線上に立てて栽培が行われている。そこで、収量比較のための対照区としては、農家慣行技術として、Nampula では耕起区を、Lichinga では畝立て区を、それぞれ対照区として設定した。

(2) 土壌侵食量比較のための対照区

土壌侵食量の比較のための対照区については、Nampula では、収量の比較の際と同様、耕起区を対照区として設定した。一方、Lichinga では、等高線上に多数の畝を立てる方法が普及しており、豪雨時の対策として排水路も設置されている。しかし、排水路は土水路のため、排水路から洗掘が進んでしまっている例も見受けられる。しかし、このような条件を今回の試験に用いた面積の限られた土壌侵食量を測定する区画で再現することは困難であったこと、また、3章で使用した WEPP モデルでは、このような圃場条件を設定してシミュレーションを行うことが不可能であることから、畝立て区は土壌侵食量を測定する区画の外に設置し、土壌侵食量の測定は行わなかった。そして、土壌侵食量の比較の際の対照区としては、最小耕起区を設定し、最小耕起に作物残渣マルチ、ベチベル草植生帯、キマメのアレイクロッピングをそれぞれ組み合わせた区と比較することで、それぞれの土壌侵食対策技術の効果を検証することとした。

(3) 等高線畝立て+作物残渣鋤き込み

Lichinga では、しばしば畝立ての際に前作の作物残渣を畝の中に鋤き込む手法が見られることから、処理の一つとして設定した。但し、畝立て区と同様に今回の試験に用いた面積の限られた区画内に排水路を再現することは困難であったことから、この処理区も土壌侵食量を測定する区画の外に設置し、土壌侵食量の測定は行わなかった。

(4) 最小耕起

最小耕起は、可能な限り土壌を攪乱しない土壌の管理方法で、不耕起や部分耕起などがあり、高い土壌侵食削減効果があるとされている (Lanzanova, 2013)。収量については耕起に比べ低下したという事例 (Sime, 2014; Pittelkow, 2015) がある一方、維持あるいは増加したという事例 (Dick, 1991; Sa, 2014) も確認されている。

最小耕起は、Nampula と Lichinga の 1 年目と 2 年目の試験では、播種前の耕起作業を行わず、除草時のみ表層を極力攪乱することのないように行った。Nampula の 3 年目の試験では、芋類であるキャッサバを耕起せずに栽培することは困難と考えたことから、キャッサバの植え付け位置を中心に周囲 30-40cm のみを 10-15cm 耕起した。30-40cm の長さは現地のキャッサバの芋のおよその長さであり、10-15cm は、現地で用いられている鋤の刃の長さに相当する。通常、農家は圃場全面を耕起することから、キャッサバの植え付け位置周辺だけを耕起することは労力の削減に繋がり、農家でも無理なく実施出来る内容である。

(5) 作物残渣マルチ

作物残渣マルチは、作物の残渣で地表面を被覆する方法で、最小耕起と並び、高い土壌侵食削減効果があるとされている技術である。一般に、地表面被覆率が高い程、土壌侵食は抑制されるとされており、Lal (1998) は、稲わらマルチによる土壌侵食対策試験を実施し、稲わらの量つまり地表面被覆率が高い程、土壌侵食防止効果が高かったことを報告している。

作物残渣マルチの材料としては、ダイズ、ソルガム、トウモロコシ、キマメ、ヒマワリの残渣を用い、播種後同日の内に圃場に敷設した。ダイズ残渣は機械による脱穀時に排出されるもので、茎・葉・莢から成る。脱穀作業は圃場外で行われるため、マルチとして使うには、残渣を圃場に戻すための労力が必要となる。一方、ソルガム、トウモロコシ、キマメ、ヒマワリの残渣については、収穫後残渣が圃場にそのまま残されるため、ダイズ残渣に比べ活用が容易である。ダイズ残渣は収穫後処理時に細断されてしまうため、設置方向は一定に出来なかったが、その他の残渣については、圃場からの流出水の速度を減少させ、土壌侵食削減効果を高めるため、幹が等高線に沿うように設置した。ソルガム、トウモロコシ、キマメ、ヒマワリの残渣（茎葉）は、幹が長いため、等高線上に刈り倒すことが容易である。

使用した残渣の乾物重および地表面被覆率は表 2-7 に示す通りである。マルチの材料の重さは、80℃の乾燥機で重量に変化がなくなるまで乾燥し、乾物重として算出した。また、マルチによる地表面被覆率は、デジタル画像解析により算出した。手順としては、マルチ材料を敷設後すぐに 1 処理区あたり 3 カ所で脚立を用いて地上から約 3m の位置から下に向けて写真を撮影。その後、ImageJ を用いてそれぞれ

れの写真のマルチによる地表面被覆率を算出し、平均値を各処理区のマルチによる地表面被覆率とした。なお、試験期間中に使用したマルチ資材が試験区外に風などで移動するという事はなかった。

表 2-7 残渣マルチを行った処理区の残渣使用量および地表面被覆率

Location	Year	Treatments*	Weight (t ha ⁻¹)	Ground cover ratio (%)
Nampula	1st year (2013)	Tillage + Sorghum mulch	2.0	25
		Minimum tillage + Sorghum mulch	2.0	25
	2nd year (2013/2014)	Tillage + Pigeon pea mulch	1.5	32
		Minimum tillage + Pigeon pea mulch	1.5	32
	3rd year (2014/2015)	Minimum tillage + Maize mulch	4.0	31
	Lichinga	1st year (2013/2014)	Minimum tillage + Sun flower mulch	4.0
Minimum tillage + Soy mulch			4.0	43
Minimum tillage + Maize mulch			4.0	35
2nd year (2014/2015)		Minimum tillage + Pigeon pea mulch	1.5	27

(6) ベチベル草植生帯

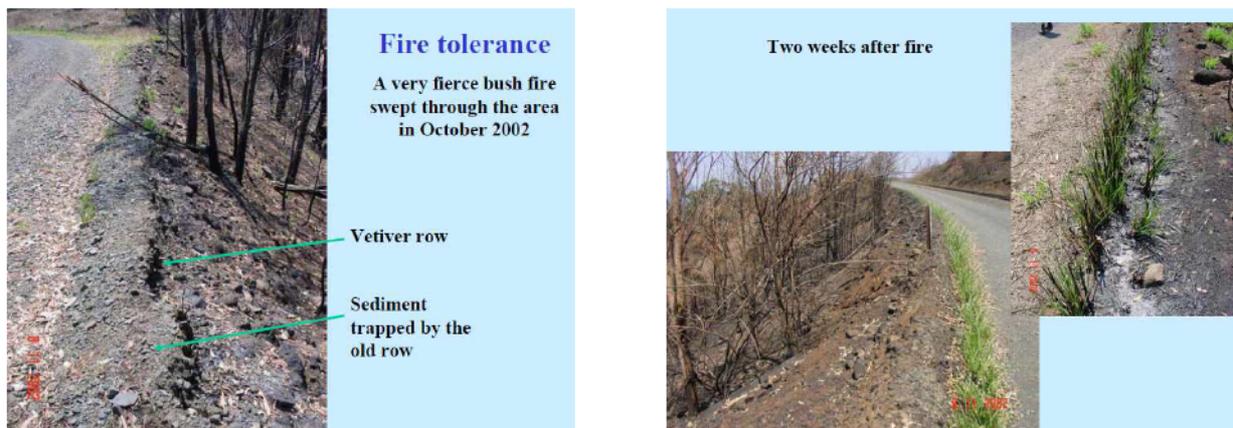
ベチベル草植生帯に用いたベチベル草の根は、シロアリに対し、毒性あるいは忌避性のある Nootkatone、や α -cedrene 等の物質を含み、シロアリの増やす危険が少ないとされている (Jayashree, 2013; Monica Verma, 2009)。作物残渣マルチをすると圃場にシロアリが増え、シロアリに栽培中の作物を食害される恐れがあるとして作物残渣の利用をためらう農家がみられたため、ベチベル草の植生帯を処理の1つとして設定した。

一般的に対象地域の小規模農家は焼畑移動耕作を行っている (図 2-1)。通常、数年間作付を行い、作物の生産力が低下してくると、植生が元の状態に回復するまで概ね 5-10 年程度の休閑期間を設け、植生が回復すると再度火入れを行い、作物を数年栽培する。休閑開始直後は地表面がほぼ裸地状態となるため、土壌侵食が起こり易くなる。しかし、ベチベル草は、地上部を焼かれても根が死なない限りは地上部が再生する。Truong et al., (2008) は、路肩に設置したベチベル草の植生帯が山火事で焼失した後、数週間で再生したことを報告している (図 2-2)。この様にベチベル草は一度圃場に植付れば、焼畑を行う度に再度植付をやり直す必要がなく、休閑に移行する際には作付中に地上部が成長しているため、休閑

開始直後の土壌侵食削減効果が期待出来、焼畑を行っている地域の土壌侵食防止に有望な技術と考えられる。



図 2-1 焼畑後の農地（ナカラ回廊中部地域）



森林火災によって焼失したベチベル草の地上部

森林火災から2週間後のベチベル草の回復状況

図 2-2 火災に対するベチベル草の耐性
(Source: Truong, 2008)

Nampula では、2.1m 置きに Vetiver 草を等高線上に植え付け、ベチベル草の条間に2条のキャッサバを間作した。この時、キャッサバとベチベル草の間隔は 52.5cm となる（図 2-3）。Nampula では、2月下旬から3月上旬頃に小乾期があり、作物は干ばつの害を受け易い。ベチベル草植生帯を 2.1m という密な間隔で植付けた理由は、剪定したベチベル草の葉をマルチとして圃場の被覆率を高めることで、土

壤侵食の削減だけでなく、干ばつの回避を期待してのことである。Lichinga では、圃場の下端にのみベチベル草の植生帯を設置した。

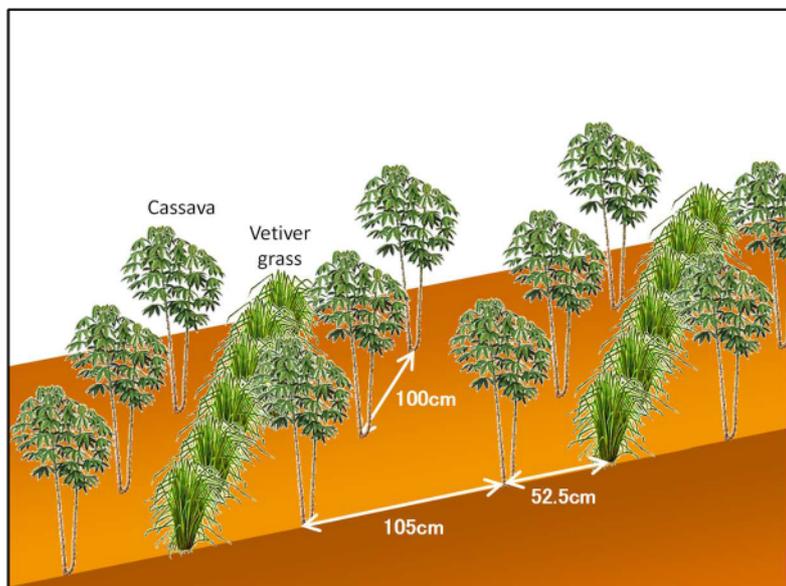


図 2-3 Nampula におけるベチベル草植生帯区のレイアウト

Nampula , Lichinga 共に、植え付け時には、草丈約 1.5m のベチベル草を用いた。植生帯の幅はベチベル草 1 株分のみである。また、Vetiver 草の植え付け間隔は 15cm 置きとし、植え付け直後に 1 回、草丈が約 1.5m に達した時点で 2 回、根本から 15 cm の高さで剪定した。よって栽培期間中の剪定回数は合計 3 回となる。剪定した葉は、Nampula では、小乾期の干ばつ害対策として、マルチの材料として圃場に広げて利用した。一方、Lichinga では、あまり干ばつ害のリスクがないことから、剪定した葉は Vetiver 草の植生帯の根元に等高線上に置き、ベチベル草の隙間を塞ぐ様に設置した（図 2-4）。

ベチベル草はナカラ回廊地域にも存在し、通常は土壌侵食対策目的ではなく、個人の土地の境界に生垣の様な用途で植え付けられている。種を着けるものの発芽しないことから、雑草化の心配がないことが長所であるが、分げつでしか増殖出来ないことから、苗の生産に時間がかかり、また、苗の運搬と植え付けにも労力がかかる。但し、一度植え付ければ長期に渡って高い土壌侵食削減効果が期待出来、以降は、作物栽培期間中に数回の葉の剪定作業だけが必要となる。本技術では、ベチベル草の植え付けと

剪定のための労力が増加することから、その労力に見合った作物の増収効果や土壌侵食削減効果が得られるかが課題となる。



作期初期のベチベル草
(Nampula)



マルチとして利用したベチベル草の葉
(Nampula)



根元に設置したベチベル草の葉
(Lichinga)



作期後半のベチベル草
(Lichinga)

図 2-4 試験圃場でのベチベル草の写真

(7) キマメのアレイクロッピング

キマメのアレイクロッピングは、他作物の条間に多年生のキマメを間作し、剪定したキマメの枝葉を作物残渣マルチの材料として用いる技術である。

キマメのアレイクロッピングでは、1年目に条間 80cm で栽培したキマメの条間にトウモロコシを栽培した(図 2-5)。T.O.FABUNMI (2010) らは、キマメのアレイクロッピングを行う際、高いバイオマ

ス生産と生存率を確保出来る剪定の高さを根元から 50cm と報告している。この結果を参考に、キマメは、トウモロコシの光合成を妨げぬよう、播種直後に 1 回、栽培期間中キマメが草丈約 1m まで成長した際に 2 回、根元から 50cm の高さで剪定した。よって栽培期間中の合計剪定回数は 3 回となる。本技術もベチベル草の植生帯同様、キマメの剪定のための労力が増加することから、その労力に見合った作物の増収効果や土壌侵食削減効果が得られるかが課題となる。



図 2-5 キマメのアレイクロッピング区において剪定されたキマメと残渣マルチとして用いられているキマメの茎葉

2.2.4 調査項目および方法

(1) 土壌侵食量

土壌侵食量の測定のため、圃場を幅 5m、長さ 24m にコンクリート枠で区切り、各区画の下端に降雨によって流出した土壌を捕捉するためのプラスチックタンクを Nampla では 200L のものを 4 つ（合計 800L）、Lichinga では 500L のものを 3 つ（合計 1500L）それぞれプラスチックパイプで連結して設置し

た(図2-6)。そして、圃場の下端に設置したタンクに溜まった土壌を降雨のあった翌日の朝8:00-10:00頃に採取・測定し、採取時の時間を記録した。なお、土壌侵食量の測定に反復は設けていない。土壌採取時には、まず、タンクに溜まった上澄み液を取り除き、湿潤状態の土壌の重さの全量を測定した。その後、湿潤状態の土壌の一部を105℃の乾燥機で24時間乾燥し、水分率を求め、湿潤土壌の重さと水分率から土壌の乾燥重量を測定した。

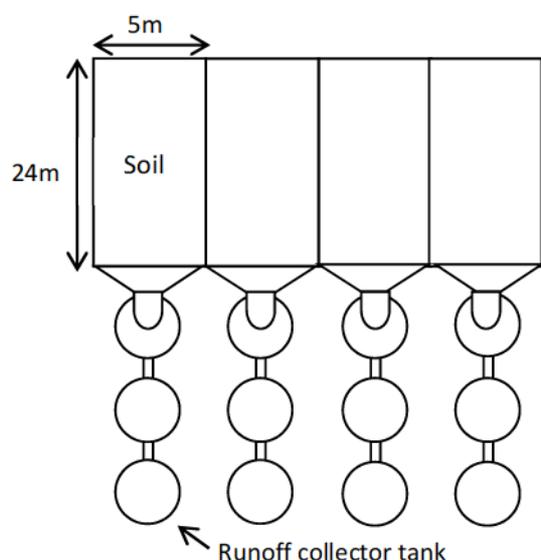


図 2-6 土壌侵食測定区画のレイアウトおよび写真

(2) 収量

作物収量は、区画を斜面の長さ8m毎に上中下の3つに区切り、それぞれの区画から外周部分の株を避けるようにして、キマメ、トウモロコシは10個体、キャッサバは5個体を採取し可食部の新鮮重を測定した。

(3) 気象データ

気象データは気象観測装置を Nampula と Lichinga の農業試験場内に設置し、最高・最低気温、雨量、日射量、風速、風向、露点温度を30分間隔で計測した。

2.3 結果および考察

全ての試験における収量および土壌侵食量の結果は表 2-8 に示す通りである。また、図 2-7 および 2-8 にそれぞれ、Nampula と Lichinga の試験における土壌侵食量の積算値の推移を示す。

表 2-8 処理毎の土壌侵食量と作物収量

Location	Year	Crop	Treatments*	Yield† (kg ha ⁻¹)	Soil loss (t ha ⁻¹)	R‡
Nampula	1st year (2013)	Pigeon pea	1. Tillage	866 ab	23.1	481
			2. Tillage + Sorghum mulch (25%)	1,376 b	8.7	
			3. Minimum tillage	564 a	33.7	
			4. Minimum tillage + Sorghum mulch (25%)	960 ab	3.4	
	2nd year (2013/2014)	Maize	1. Tillage	3,333	24.9	514
			2. Tillage + Pigeon pea mulch (32%)	2,949	7.5	
			3. Minimum tillage	3,657 NS	15.1	
			4. Minimum tillage + Pigeon pea mulch (32%)	2,510	0.7	
	3rd year (2014/2015)	Cassava	1. Tillage	15,200 a	21.3	672
			2. Minimum tillage + Maize mulch (31%)	14,273 a	0.8	
			3. Minimum tillage	10,844 ab	0.3	
			4. Minimum tillage + Vetiver grass hedgerow	8,044 b	0.5	
Lichinga	1st year (2013/2014)	Pigeon pea	1. Contour ridge	1,052 ab	-	253
			2. Contour ridge + Maize incorporation	1,452 ab	-	
			3. Minimum tillage	823 a	11.5	
			4. Minimum tillage + Sun flower mulch (17%)	1,328 ab	5.6	
			5. Minimum tillage + Soy mulch (43%)	1,678 b	11.4	
			6. Minimum tillage + Maize mulch (35%)	1,156 ab	3.4	
	2nd year (2014/2015)	Maize	1. Contour ridge	5,054	-	553
			2. Contour ridge + Pigeon pea incorporation	4,736	-	
			3. Minimum tillage	4,816	35.2	
			4. Minimum tillage + Pigeon pea mulch (27%)	4,662 NS	3.5	
			5. Minimum tillage + Pigeon pea alley cropping	4,835	4.6	
			6. Minimum tillage + Vetiver grass hedgerow	4,918	8.0	

* The percentage in parentheses indicates the area of ground surface covered by crop residue.

† Means followed by the same letter are not significantly different according to Tukey Test at $\alpha = 0.05$

‡ Rainfall factor of USLE

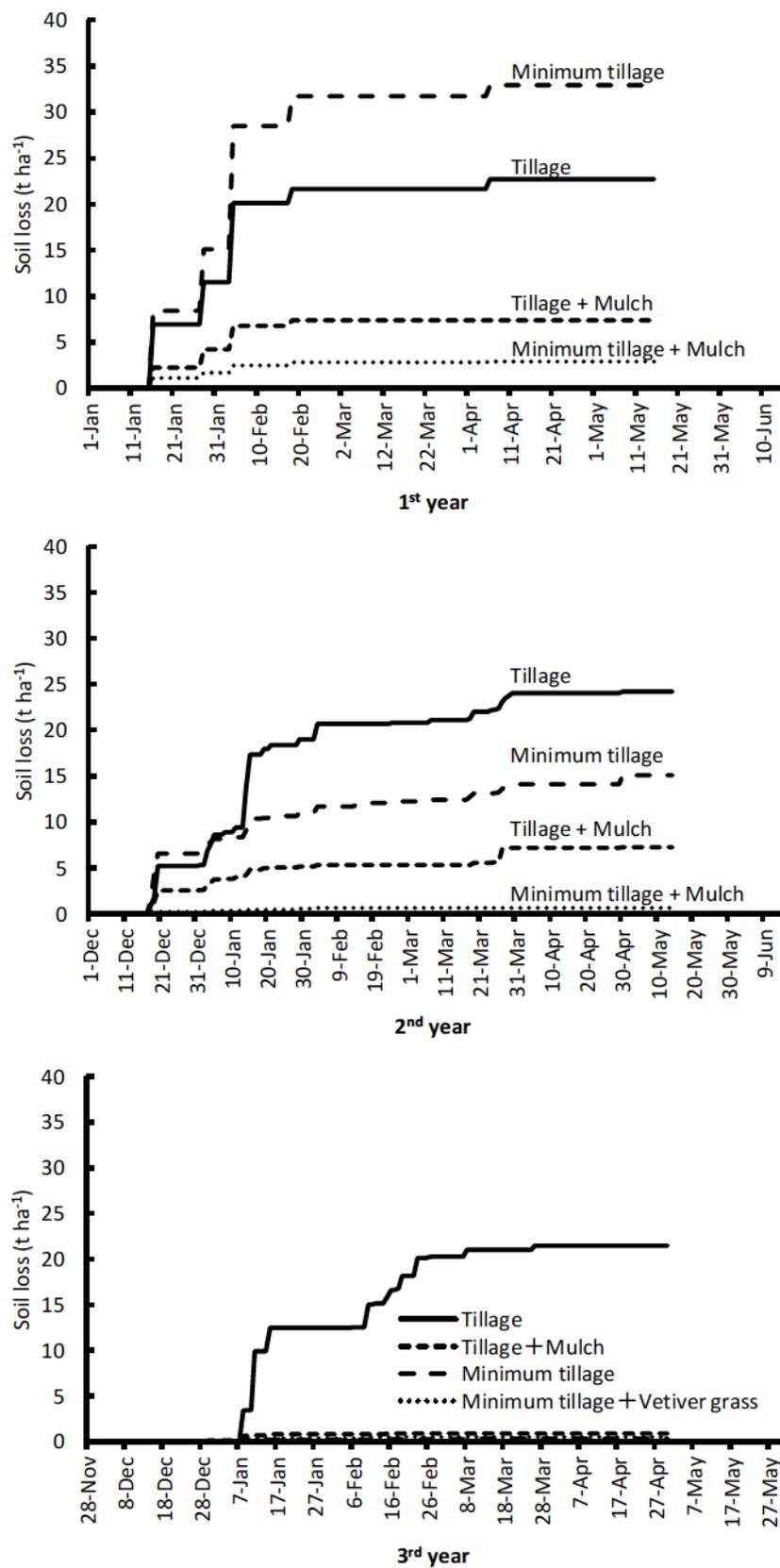


図 2-7 Nampula における土壌侵食の積算値の推移

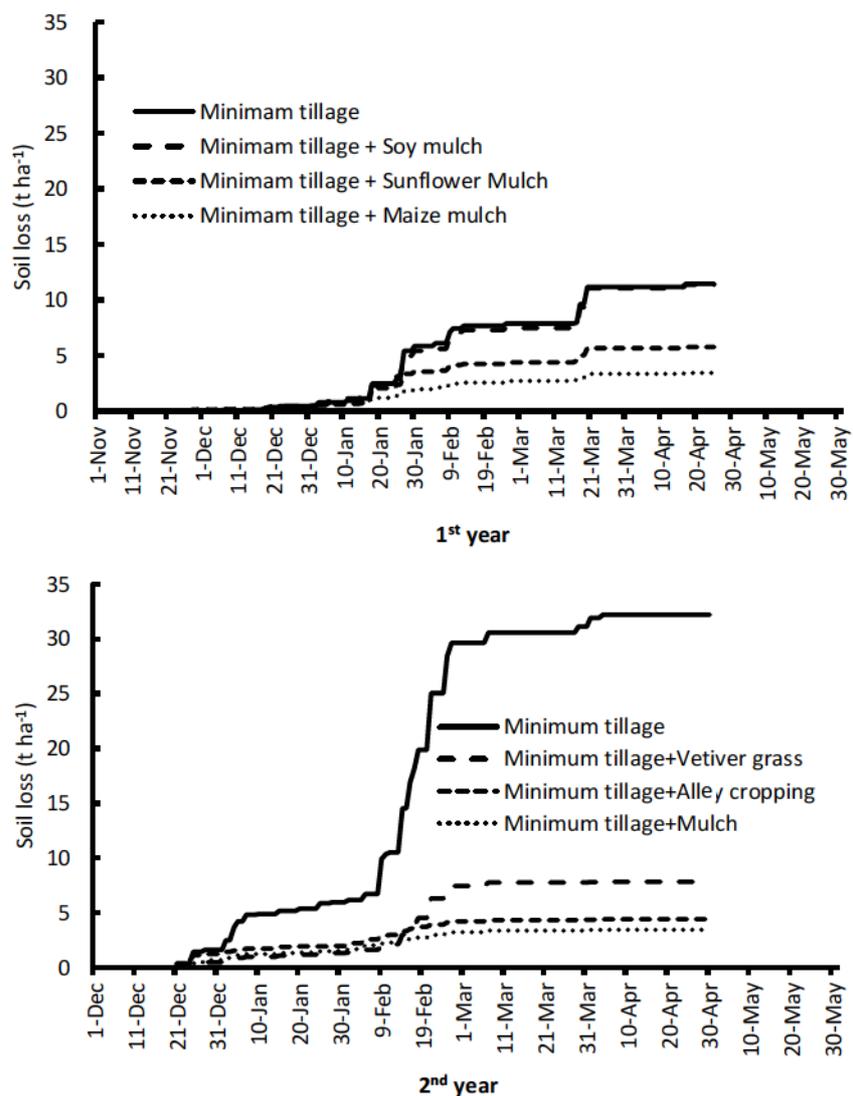


図 2-8 Lichinga における土壌侵食の積算値の推移

2.3.1 最小耕起

Nampula の1年目の試験では、最小耕起区で土壌侵食量が耕起区よりも増加するという結果となった(表 2-8)。Nampula の試験圃場はこの試験を開始する前までは毎年耕起作業が行われていた。また、圃場に高さ 10cm、幅 25cm 程の大きさの畝が等高線上に作成されたものが残っており、それを均して区画を設置したことから、1年目の最小耕起区は、耕起区に近い状態であった。1年目の試験において耕起区と比べ最小耕起区で土壌侵食量が増加したのは、このことにより、固い土壌の表面に数センチのかく乱

された土層が出来ており、それによって土壌侵食が助長されたものと推察される。そのため、Nampulaの1年目の試験においては、不耕起区の土壌侵食削減効果を評価することが出来なかった。

Nampulaの2年目の試験では、不耕起区では耕起区と比べ土壌侵食量が39%削減された(表2-8)。しかし、2年目の不耕起区の土壌侵食量の積算値の推移(図2-7)を見ると、2年目の初期のみ、土壌侵食量が耕起区より最小耕起区で高くなっている。これは、1年目に固い土壌の表面に形成されたかく乱された薄い土層がまだ残っており、土壌侵食量が耕起区より大きくなっているものと推察された。よって、2年目の12月上旬までの降雨イベントによって起きた土壌侵食の結果を除いて計算した場合、耕起区と最小耕起区の土壌侵食量は、それぞれ 19.7t ha^{-1} ($24.9-5.2=19.7$)、 8.5t ha^{-1} ($15.1-6.6=8.5$)となり、最小耕起による土壌侵食の削減率は57%となる。

Nampulaの3年目の試験では、最小耕起区では土壌侵食がほとんど起こらなかった(表2-8, 図2-7)。3年目の試験では、1回目の除草作業が遅れたため、不耕起区では雑草が著しく繁茂し、除草後も雑草がマルチのように地表面を覆っていた。そのため、栽培期間中地表面被覆率が非常に高い状態で推移した(図2-9)。一方、耕起区では、播種前に約10-15cm程度の深さまで土壌が耕起されたことから、最小耕起区のように急激に雑草が繁茂するということがなく、栽培期間を通じて地表面被覆率が最小耕起区に比べ低く推移した(図2-9)。

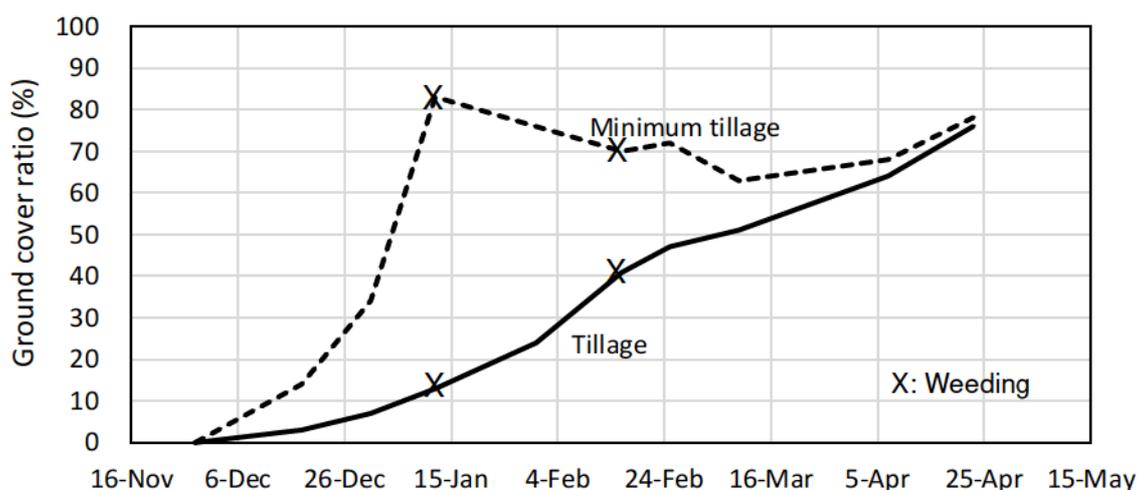


図 2-9 Nampula の3年目の試験における耕起区および最小耕起区での地表面被覆率の推移

また、最小耕起区では、1年目と2年目は栽培期間中に3回の除草が行われたが、3年目は除草が2回しか行われず、1回目の除草が行われるタイミングが遅かったために雑草が繁茂し、1年目と2年目に比べ地表面被覆率が2月16日頃まで極めて高い状態で推移した（図2-10）。この期間における各年のほぼ同時期かつ同程度の降雨係数： R の降雨イベントの際の土壌侵食量を比較してみると3年目の土壌侵食量が極めて低くなっている（表2-9）。以上の結果から、3年目の最小耕起区で土壌侵食がほとんど起こらなかった要因は雑草の繁茂によるものと考えられた（表2-9，図2-10）。そのため、Nampulaの3年目の試験では、最小耕起による土壌侵食削減効果を評価することが出来なかった。

表 2-9 Nampula における降雨係数： R が同程度の降雨時における土壌侵食量の比較

		1 st year	2 nd year	3 rd year
Rainfall event	Strat End	2013/1/26 20:30 2013/1/28 9:00	2014/1/18 3:30 2014/1/18 5:30	2015/1/11 2:00 2015/1/15 16:00
R		21.3	21.5	19.6
Soil loss (t ha ⁻¹)		4.62	1.70	0.01

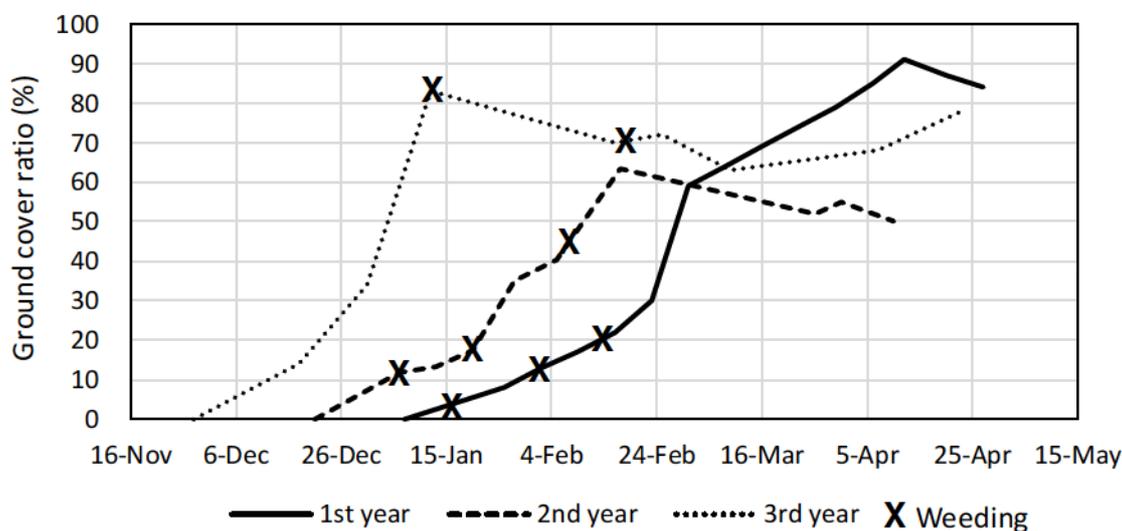


図 2-10 Nampula の最小耕起区における地表面被覆率の推移と除草作業実施時期

Lichinga では、2年目の最小耕起区の土壌侵食量が1年目の3倍以上となった。このことは、1年目より2年目の方が降雨係数： R の値が約3倍と大きかったことが主な理由であると考えられる（表2-8）。

収量については、Nampula で3年間、Lichinga で2年間にわたり試験を行ったが、耕起・畝立てと最小耕起の間には全ての試験において収量に有意差は認められなかった。Dick et al. (1991) や Sa (2014) は、不耕起と耕起の間には収量の差がほとんど認められなかったことを報告しており、本試験でも同様な結果が得られたこととなる。

農家は除草に1haあたり120時間、耕起に320時間、畝立てに400時間を費やしている。2015年時点における現地の1日（8時間労働）当たり労働者賃金は約1.6 US\$であるが、最小耕起に切り替えた場合、播種前の作業は除草のみで済むようになることから耕起から切り替えた場合1haあたり200時間（40 US\$ ha⁻¹）、畝立てから切り替えた場合1haあたり280時間（56 US\$ ha⁻¹）の労働時間を短縮出来る（表2-10）。

農家の栽培初期の労働はこの耕起・畝立てと播種作業に集約されるが、播種作業には、作物にもよるが、64-256時間を必要としている（表2-11）ことから、最小耕起によって耕起・畝立てにかかる労働時間が短縮されれば、播種時期の遅れによる減収の危険は少なくなり、収量は安定すると考えられる。また、耕起・畝立てを賃耕で行っていた場合、生産コストを大幅に削減することが可能となる。

表 2-10 耕起, 畝立て, 除草に必要な
1ヘクタール当たりの労働時間

Soil management	Working hours*
Tillage	320
Ridging	400
Weeding	120

*Calculated with man-day described in cassava cultivation manual, 2010, IIAM by multiplying by 8 hours.

表 2-11 播種/植付に必要な
1ヘクタール当たりの労働時間

Crop	Working hours*
Cassava	256
Groundnut	96
Soy	96
Pigeon pea	64

*Calculated with man-day described in each crop cultivation manual elaborated by IIAM by multiplying by 8 hours.

以上の結果から、最小耕起は従来の土壌管理法（耕起, 畝立て）と比べ、収量を落とさず、労働力/生産コストを抑えることができる点で優れていると言える。対象地域の雨期は短く、播種・植え付けが遅

れると、栽培期間の後半に雨量が不足し、収量の低下を招く。耕起作業を省略することで播種前の準備期間を短縮し、適期播種を可能に出来る最小耕起は対象地域において有用な技術である。

Lichinga において、最小耕起区は畝立て区や畝立て+作物残渣鋤き込み区と比べ収量を落とすことはなかった。しかし、土壌侵食については、1年目は 11.5t ha^{-1} 、2年目は 35.2t ha^{-1} と高い土壌侵食の発生が認められた(表 2-8)。本試験では、畝立て区および畝立て+作物残渣鋤き込み区では土壌侵食の測定を行わなかったが、降雨によって畝の高さは減少した。排水路が設置されている農家圃場では畝が削られた分の土壌はこの排水路を通じて圃場外に流出することとなる。そのため、畝立て区および畝立て+作物残渣鋤き込み区においても土壌侵食は発生していると考えられる。本試験では最小耕起を畝立てを代替する技術の1つとしてその効果を検証したが、最小耕起単独では十分な土壌侵食削減効果を得ることは出来なかった。このことから、最小耕起は単独で畝立てを代替することは出来ず、他の方法と組み合わせる必要があると言える。

2.3.2 作物残渣マルチ

Nampula の1年目の試験において最小耕起区の土壌侵食量は耕起区よりも大きい結果となった。しかし、ソルガム残渣マルチを使用した場合、土壌侵食量は最小耕起区の方が耕起区より小さくなった。(表 2-8)。3.2.1 で述べた様に、Nampula の1年目の試験では、試験開始前に圃場に存在していた10cm程度の高さの畝を均して圃場を造成したことから、数センチの厚さの攪乱された土壌の層が固い土層の上に形成されており、耕起区に近い条件となってしまっていたものと考えられる。そのため、Nampula の1年目の試験において最小耕起と最小耕起+ソルガム残渣マルチの効果を評価することは出来なかった。また、Nampula の3年目の試験では、除草が遅れたため、雑草が繁茂し、最小耕起区において土壌侵食がほとんど発生しなかった(表 2-8)。同様に、最小耕起+トウモロコシ残渣マルチ区でも雑草が繁茂してしまつたため、Nampula の3年目の試験では、最小耕起+トウモロコシ残渣マルチの土壌侵食削減効果を評価することは出来なかった。

しかし、本試験で検証した上記以外の作物残渣マルチ区の多くは、作物残渣マルチなしと比べ高い土壌侵食削減効果を示した（表 2-8, 図 2-7, 2-8）。Nampula では、1年目の試験において耕起+ソルガム残渣マルチ区は耕起区と比べ土壌侵食を 62%, 2年目の試験において耕起+キマメマルチ区は耕起区と比べ 70%, 最小耕起+キマメマルチ区は最小耕起区と比べ 95%土壌侵食を減少させた。また、Lichinga では、1年目の試験において最小耕起区と比べ最小耕起+ヒマワリ残渣マルチ区は 51%, 最小耕起+トウモロコシ残渣マルチ区は 70%, 2年目の試験において最小耕起+キマメ残渣マルチ区は 90%土壌侵食を減少させた（表 2-8）。ここで、最小耕起+ヒマワリ残渣マルチ区と最小耕起+トウモロコシ残渣マルチ区の地表面被覆率および土壌侵食削減効果を比較すると、ヒマワリ残渣マルチは 17%の被覆率で土壌侵食を 51%削減したが、トウモロコシ残渣マルチはヒマワリ残渣マルチの被覆率の約倍となる 35%の被覆率で土壌侵食量を 70%削減した。このことから、マルチによる土壌侵食削減効果は被覆率が高くなる程高くなるものの、その効果は被覆率が高くなるにつれて徐々に頭打ちになるものと考えられた。一方、Lichinga の 1年目の試験では、最小耕起+ダイズ残渣マルチ区の土壌侵食の積算値は最小耕起区とほぼ同様に推移し、土壌侵食削減効果は認められなかった（図 2-8）。ダイズ残渣は機械で脱穀する際、細かく裁断されてしまうため、圃場でマルチの材料として使用しても除草の際に土中に鋤き込まれてしまった（図 2-11）。そのため、土壌侵食削減効果が認められなかったものと推察される。

一方、ダイズ残渣マルチは、マルチの中で唯一、マルチ無しに比べ収量を有意に増加させ、マルチ無しの約 2 倍となった（表 2-8）。これは、除草時に土壌表面に鋤き込まれたダイズ残渣が分解し、土壌中に放出された窒素等の養分をキマメが吸収出来たことによるものと考えられる。

以上の結果から、作物残渣マルチは、材料によって土壌侵食削減効果に大きな差があり、ダイズ残渣の様に全く土壌侵食削減効果が期待できないものも存在することが明らかになった。ダイズ残渣の様に全く土壌侵食削減効果が期待できない資材を使用する場合、他の技術と組み合わせることが必要である。なお、マルチの材料を圃場外から持ってくることは、労力の増加に繋がり、また、材料を採取した場所の土壌侵食を助長することにも繋がる可能性があることから、基本的には、前作の残渣を同一の圃場で利用することが望ましい。



図 2-11 除草作業によって土壌中に鋤き込まれたダイズ残渣マルチ

2.3.3 ベチベル草植生帯

2.3.1 で述べた用に、Nampula の 3 年目の試験では、最小耕起区において初期の除草の遅れにより雑草が繁茂したことから土壌侵食がほとんど起こらなかった（表 2-8，図 2-7，2-9）。これと同様の理由で、最小耕起+ベチベル草植生帯区でも雑草が繁茂したことから最小耕起+ベチベル草植生帯区では土壌侵食がほとんど起こらなかった（表 2-8，図 2-7）。そのため、Nampula の 3 年目の試験ではベチベル草植生帯による土壌侵食削減効果を評価することは出来なかった。

QNRM (2001) によると、ベチベル草植生帯はベチベル草同士の株間がその分けげつによって閉じるまでにおよそ 18 から 24 か月の期間を必要とすることから、それまでは、土壌侵食削減効果は期待出来ないとしている。しかし、Lichinga の試験では、最小耕起+ベチベル草植生帯区は最小耕起区に比べ土壌侵食量を 77%減少させた。これは、ベチベル草の植生帯を設置するだけでなく、ベチベル草の植生帯の根元の隙間を埋める様に、剪定したベチベル草の葉を設置したことから、地表面を流れる雨水の流速を抑え、ベチベル草の植生帯の根元で多くの流出土壌を捕捉出来たものと考えられる。

Lichinga の最小耕起+ベチベル草植生帯区における土壌侵食量の積算値の推移を見ると、2 月上旬まではキマメマルチおよびキマメのアレイクロッピングと同程度に推移していたが、2 月中旬から下旬の降雨期間にこの 2 処理に比べ大きな土壌侵食の発生が認められた（図 2-8）。2 月上旬まで降雨イベント

の降雨係数： R の最大値は $20\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ であったが、2月中旬から下旬にかけて降雨係数： R が $20\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ の降雨イベントが3回、 $92\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ の降雨イベントが1回観測されたことから、傾斜3.5%で斜面長が24mの斜面の下端に1列だけのベチベル草の植生帯では強度の高い降雨イベントにおける土壌侵食削減効果はキマメマルチおよびキマメのアレイクロッピングに劣り、強度の高い降雨イベントにおいて土壌侵食を防止するには不十分であると考えられた。

ベチベル草植生帯を2.1mの間隔で設置したNampulaの試験では、耕起区に比べベチベル草植生帯区でキャッサバの収量が有意に低下した。これは、ベチベル草とキャッサバの間で養水分の競合があったものと推察される。Oshunsanya (2013) は、5m間隔の列状に植えたベチベル草の条間にキャッサバを1mごとに5条間作したところ、ベチベル草の有無に関わらずキャッサバの収量に有意差がなかったことを報告している。本試験とOshunsanya (2013) の試験結果から、キャッサバ栽培にベチベル草植生帯を利用する場合、ベチベル草植生帯の設置間隔は2.1mでは不適切で、キャッサバの収量低下を避けるためには5m程度の間隔をあけてベチベル草植生帯を設置する必要があると考えられた。

一方、試験区の下端にのみベチベル草の植生帯を設置したLichingaの試験では、無処理区とベチベル草植生帯区のトウモロコシの収量の間有意差は認められなかった(表2-8)。

ベチベル草の食害試験では、ゴマ残渣はシロアリに食害され、試験開始から3ヶ月後には完全に分解されてしまったが、ベチベル草の葉は、一切シロアリの食害を受けることはなかった(図2-12)。Jayashree (2013) は、ベチベル草の葉の粉末を土壌に混ぜたところ、シロアリの死亡率を増加させ、巣穴の拡大を抑制したことを報告している。このことからベチベル草の葉には、その根と同様、シロアリに対し毒性あるいは忌避性のある何等かの物質が含まれている可能性が考えられる。

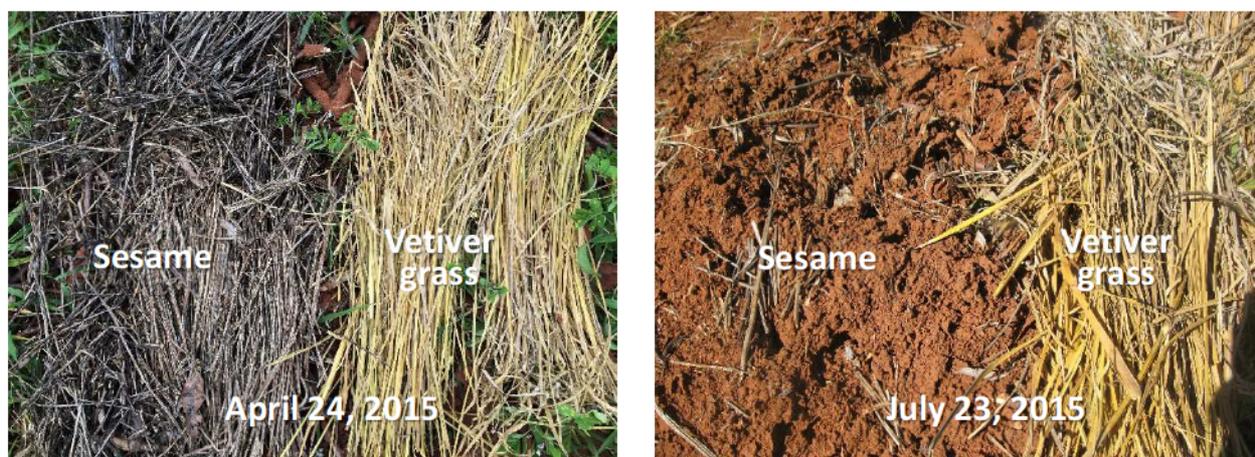


図 2-12 シロアリによるゴマ残渣とベチベル草への食害の程度の違い

2.3.4 キマメのアレイクロッピング

キマメのアレイクロッピング区はキマメ残渣マルチ区と比べ同程度の土壌侵食削減効果を示した（表 2-8，図 2-8）。一方で，キマメのアレイクロッピング区は，キマメマルチ区，無処理区と比べ収量に有意差が認められなかった（表 2-8）。キマメのアレイクロッピングは，他の処理区に比べキマメの剪定の労力が増えることから，労力に見合った収量の増加が伴わなければ農家は本技術を導入しないと考えられる。但し，キマメのアレイクロッピングは複数年に渡って，マルチや緑肥の材料となる枝葉を供給し続けることが出来ることから，複数年試験を継続した場合，土壌侵食をより削減すると共に収量も増加させる可能性が考えられる。

2.4 小括

モザンビーク国ナカラ回廊地域に位置する Nampula と Lichinga の国立農業試験場の圃場において，雨期の土壌侵食対策技術の効果を評価するための試験を実施した。

Nampula における 2 年目の試験において，最小耕起区は耕起区と比べ土壌侵食量を 57%削減した。一方，Lichinga の試験では最小耕起区から 1 年目の試験では 11.5 t ha^{-1} ，2 年目の試験では 35.2 t ha^{-1} の土壌

が流出し、十分な土壌侵食削減効果は認められなかった。しかし、最小耕起は、現地慣行技術である耕起あるいは畝立てと比べ、作物収量を低下させることはなく、また、その労働力削減効果は、耕起と比較した場合 1ha 当たり 200 時間（人件費換算：40US\$ ha⁻¹）、畝立てと比較した場合 1ha 当たり 280 時間（人件費換算：56US\$ ha⁻¹）と考えられた。

ソルガム、トウモロコシ、キマメ、ヒマワリによる残渣マルチは、残渣マルチなしと比べそれぞれ 62%、70%、90-95%、51%、土壌侵食量を減少させ、高い土壌侵食削減効果を示した。しかし、ダイズ残渣については、土壌侵食の削減効果が認められなかった。一方、ダイズ残渣マルチは、マルチの中で唯一、残渣マルチ無しに比べ作物収量を有意に増加させ、その収量はマルチ無しの約 2 倍となった。

ベチベル草植生帯は、ベチベル草植生帯なしと比べ土壌侵食量を 77% 減少させた。また、シロアリによる食害試験ではベチベル草の葉はシロアリの食害を一切受けず、シロアリの増加をまねく危険性がないことが示された。しかし、作物の収量はベチベル草植生帯なしと比べて差がなく、ベチベル草植生帯の設置は作物収量の増加には繋がらなかった。

キマメのアレイクロッピングはキマメ残渣マルチと同程度の土壌侵食削減効果を示したが、作物収量を増加させることは出来なかった。しかし、キマメのアレイクロッピングは複数年に渡って枝葉を作物残渣マルチあるいは緑肥として供給し続けられるため、試験を長期継続した場合、収量を増加させることが出来る可能性が考えられる。

上記の結果を踏まえると、今回検証した技術の中で最も導入が容易であると考えられるのは、特別な材料を一切必要とせず、労力/人件費の削減によって収益の増加にも繋がると考えられる最小耕起+作物残渣マルチである。但し、作物残渣マルチは、導入にあたって圃場のシロアリの有無に注意を要する。シロアリの多い圃場では、ベチベル草の植生帯を組み合わせることが推奨される。キマメのアレイクロッピングは剪定等の管理労力が増えることから最小耕起や作物残渣マルチと比べると農家に採用され難いと考えられるが、上記の技術だけでは土壌侵食削減効果が不十分な場合には、さらにキマメのアレイクロッピングを組み合わせることも検討に値すると考えられる。

モザンビークにおいて土壌侵食対策技術の効果を圃場レベルで定量的に評価した事例は見当たらないことから、今後も栽培作物や傾斜等の環境の異なった条件下で類似の試験を継続し、土壌侵食対策技術の効果を評価すると共にデータを蓄積していくことが重要である。

第3章 土壤侵食予測モデルの現地適合性の検証

3.1 緒言

3.1.1 土壤侵食予測モデルとは

これまでに多くの研究者によって降雨による土壤侵食を予測するためのモデルが提案されている。その中でもいくつかの代表的なモデルの特徴を表3-1に示す。土壤侵食モデルは、圃場試験で得られた結果を試験地の土地や気象データと関連付けて数式化した経験的モデルと土壤侵食の過程を表現したプロセスベースモデルに分類される。経験的モデルの利点は、1) 必要な入力データが少なく比較的扱いが簡単である、2) モデルが作成された地域と類似した気象や土地条件をもつ地域に対しては精度良く計算できる、という点である。一方で経験的モデルには、モデルが作成された地域とは気象や土地条件の異なる地域や、流域の条件変化による土壤流亡量の変化予測にはほぼ対応不可能という欠点がある。プロセスベースモデルは、物理的条件を変化させて土壤侵食量の予測を行うことが可能であり、土壤侵食の過程を表現していることからモデルが作成された地域と異なる条件を持つ地域に対してもある程度対応が可能である。但し、一般的に経験的モデルに比べ多くのデータ入力が必要とし、それらデータが揃っていない地域では予測が行えないあるいは予測精度が落ちるといった難点がある。土壤侵食モデルは経験的モデル、プロセスベースモデルともに多くのモデルが提案されており、モデルによって予測精度や計算対象領域（1 斜面から大流域）や時間解像度（年単位から分単位）、圃場の変化への対応の可否等が異なることから条件や目的に応じたモデルを選択することが重要である。

表 3-1 代表的な既往のモデルの特徴

モデル	種類	空間 スケール	時間的 解像度	圃場状態 の変化	実用性 (簡便性)
SLEMSA	経験的	圃場	年単位	極めて限定的	非常に シンプル
USLE / RUSLE	経験的	圃場	年単位	部分的に 評価可能	シンプル
AGNPS	半経験的 半プロセスベース	大流域	分単位 ~年単位	評価可能	複雑だがガリ 侵食も計算可能
WEPP	プロセスベース	小流域	降雨単位 ~日単位	評価可能	複雑だが ソフトウェア化
KINEROS	プロセスベース	小流域	分単位 ~降雨単位	評価不可能	複雑
EuroSEM	プロセスベース	小流域	分単位 ~降雨単位	評価不可能	複雑だが ソフトウェア化

Source: 大澤 (2004) に一部加筆

3.1.2 モザンビークにおける土壤侵食予測モデル活用の現状

モザンビークにおける既存の土壤侵食ハザードマップが作成された 1986 年時点では、土壤侵食の危険度評価に必要な情報が限られていたため、その様な条件下でも土壤侵食量の予測が可能な Soil Loss Estimation Model for South Africa (SLEMSA) が用いられた。SLEMSA モデルは、アフリカ地域の様に土壤侵食の危険度評価に必要な情報が限られた地域でも土壤侵食の予測を可能にするために Elwell (1978) によってジンバブエの高地で開発された経験的土壤侵食予測モデルである。SLEMSA モデルは、ジンバブエ、モザンビークの他、南アフリカ共和国 (Schulze, 1979)、ボツワナ (Abel & Stocking, 1987)、マラウィ (Paris, 1990) において土壤侵食ハザードマップの作成に利用された実績がある。一方で、SLEMSA モデルによる土壤侵食の予測精度が低いことを報告している事例もあり、Chakela and Stocking (1988) はレソトのガリ侵食が目立つ低地において SLEMSA モデルを用いたところ、土壤侵食のリスクが低く評価され、実情にそぐわない結果となったとしている。また、Hudson (1987) は、南アフリカ共和国の Drakensberg 山地で SLEMSA モデルの適合性を検証したところ、SLEMSA モデルによって予測された土壤侵食量は、実測値の 20 倍以上となったことを報告している。この様な経緯からか SLEMSA モデルの開発者である Elwell (1996) は、SLEMSA モデルはジンバブエの高地で開発された経験的モデルである

ため、他の地域に適用する場合には注意を要すること、また、必要に応じて適宜現地で得られたデータを用いてサブモデルを変更することを推奨している。しかし、Wambege (1986) によるとモザンビークでは SLEMSA モデルの適合性を検証するための圃場試験は行われないうまま土壤侵食ハザードマップが作成されている。

本研究の最終目的は、農家が自ら自身の農地に必要な土壤侵食対策技術を簡便に選択できる実用的な土壤侵食対策指針を作成することである。しかし、SLEMSA モデルでは、土壤侵食対策技術を含めた詳細な圃場管理状況に対応したシミュレーションを行うことが出来ない。既存の土壤侵食予測モデルで土壤侵食対策技術の効果を評価するためのシミュレーションを最も詳細に行うことが出来るのは、圃場の状態変化に対応可能なプロセスベースモデルである **Water Erosion Prediction Project (WEPP)** モデルと考えられる。しかし、SLEMSA モデル同様、WEPP モデルについてもモザンビーク国内でその適合性を検証した事例は見当たらない。

そこで、本章では第2章の圃場試験で得られた土壤侵食量の実測値および土壤と気象データを用いて、対象地域における SLEMSA モデルおよび WEPP モデルの対象地域への適合性の検証を行った。

3.2 SLEMSA モデルの検証

3.2.1 SLEMSA モデルの概要

SLEMSA モデルは Elwell (1978) によって開発された経験的モデルである。アフリカ地域の様な地域では土壤侵食量の予測に活用できる情報が限られていることから、SLEMSA モデルは限られた情報を用いて簡易に土壤侵食量を推定するためのモデルとして開発された。SLEMSA モデルは圃場スケールでの土壤侵食の予測が可能で、予測単位は年毎である。SLEMSA モデルの構成を図 3-1 に示す。

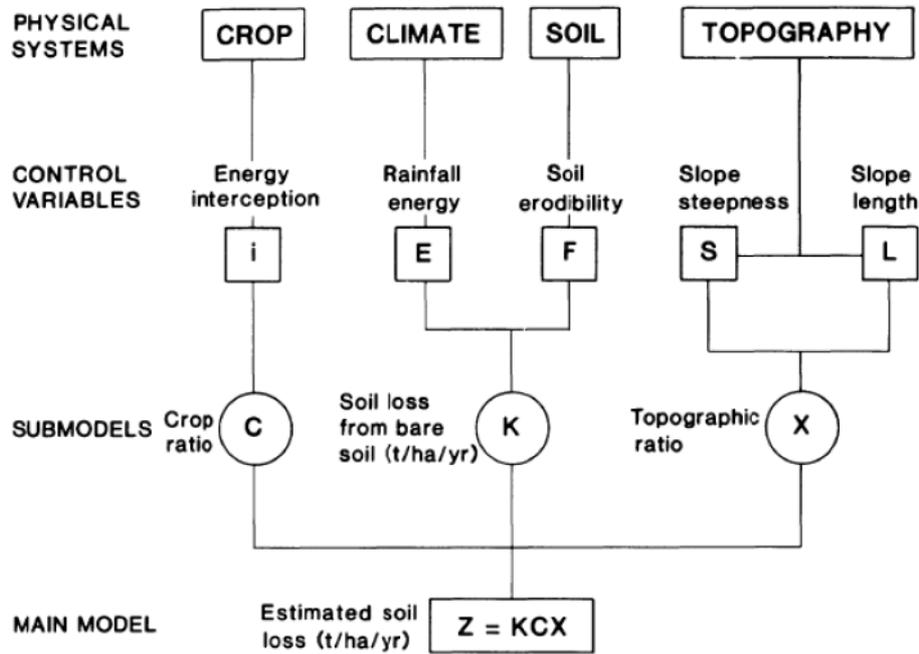


図 3-1 SLEMSA モデルの構成

(Source: Elwell and Stocking, 1982)

SLEMSA モデルのメインモデルは次式で表される。

$$Z = K C X$$

Z : 予測土壤侵食量 ($t\ ha^{-1}\ year^{-1}$)

K : 標準圃場 (斜面長 30 m, 幅 10m, 傾斜 4.5%, 裸地休閑地) における土壤侵食量 ($t\ ha^{-1}\ year^{-1}$)

C : 作付された区画における土壤侵食量と裸地休閑地における土壤侵食量の比

X : 斜面長 L m, 傾斜 $S\%$ の区画における土壤侵食量と標準圃場からの土壤侵食量の比

以下に SLEMSA モデルを構成するサブモデル K , C , X の計算式および変数の詳細を述べる。

(1) K : 標準圃場 (斜面長 30 m, 幅 10m, 傾斜 4.5%, 裸地) における土壌侵食量 ($t\ ha^{-1}\ year^{-1}$)

サブモデル K は次式で表される.

$$K = \exp((0.4681 + 0.7663 \times F) \times \ln(E) + 2.884 - 8.2109 \times F)$$

ここで, F : 土壌受食性インデックスは, 圃場の土性によって表 3-2 の値から選択される.

表 3-2 SLEMSA モデルの土壌受食性インデックス : F

Soil Texture	Soil Type	Erodibility Index, F
Light	Sands, Loamy Sands, Sandy Loam	4
Medium	Sandy Clay Loam, Clay Loam, Sandy Clay	5
Heavy	Clay, Heavy Clay	6

Source: Leeners, 1990

また, E : 降雨エネルギー (J/m^2) は次式で表される.

$$\text{霧雨になり易い地域の場合 : } E = 17.37 \times P_i$$

$$\text{一般的な気候の地域 : } E = 18.84 \times P_i$$

P_i : 年間雨量 (mm)

但し, Wambeke (1986) は, モザンビークの土壌侵食ハザードマップを作成する際, Reddy and Mussage (1985) によってモザンビークの降雨データを用いて作成された以下の計算式をオリジナルの計算式の代わりに採用している.

$$E = (5.45 + 0.017P_i) / 0.001$$

(2) C : 作付された区画における土壌侵食量と裸地休閑地における土壌侵食量の比

サブモデル C は次式で表される.

$$i < 50 \text{ の場合 : } C = \exp(-0.06 \times i)$$

$$i \geq 50 \text{ の場合 : } C = (2.3 - 0.01 \times i) / 30$$

ここで, i : 降雨エネルギー遮断率 (%) の値は表 3-3 から圃場の状況によって選択される.

表 3-3 5つの土地利用ごとの降雨エネルギー遮断率

Land use/vegetation	% energy interception for scenario*				
	I	II	III	IV	V
Forest	90	90	70	50	0
Woodland	70	70	50	30	0
Grassland	70	60/40	30/20	30/20	0
Cropland	-	36	20	20	0
Cropland/Natural mosaic	-	43	23	23	0

* I: Natural vegetation

II: Well-yielding crops, moderate grazing pressure

III: Poor-yielding crops, heavy grazing pasture, limited deforestation

IV: Moderate-yielding crops, heavy grazing pasture, intensive deforestation

V: Bare soil

Source: Leeners, 1990

(3) X : 斜面長 L m, 傾斜 $S\%$ の区画における土壌侵食量と標準圃場からの土壌侵食量の比サブモデル X は次式によって表される.

$$X = L \times (0.76 + 0.53 \times S + 0.076 \times S^2) / 25.65$$

3.2.2 SLEMSA モデルの適用方法

SLEMSA モデルは、土壌侵食対策技術の適用効果についてシミュレーションをすることが不可能であることから、Nampula では耕起区の実測値と SLEMSA モデルによる予測値を比較することとした。また、Lichinga では耕起区を設けていないため、最小耕起区の実測値と SLEMSA モデルによる予測値を比較することとした。SLEMSA モデルによるシミュレーションのために使用した各サブモデルの計算方法について以下に述べる。

(1) サブモデル K

サブモデル K の変数 E の計算式については、Elwell (1978) によって提案されたオリジナルの SLEMSA モデルの 2 つの式のうち、対象地域の降雨は霧雨にはなり難いことから、一般的な気候の地域に適用される式を用いて計算した。また、Wambike (1986) はモザンビークの土壌侵食ハザードマップを作成する際に Elwell (1978) のオリジナルの式とは異なる式を用いたことから、上記の Elwell (1978) のオリジナルの式と Wambike (1986) が用いた式の両方を用いて計算し、これらの式の違いによる予測

土壌侵食量の変化および実測値と予測値の整合性について比較・検討することとした。また、変数 E の計算に必要となる雨量については、各試験地における試験期間中の雨量の合計値を使用した。サブモデル K のもう一つの変数 F の値については、Nampula では表層土壌の土性が Loamy Sand, Lichinga では Sandy Clay であることから、表 3-3 に基づき、それぞれ 4 および 5 を適用した。サブモデル K の計算結果を下表に示す。

表 3-4 各試験期間のサブモデル K の値

試験地	年	変数 E の種類	雨量 (mm)	E (J/m^2)	F	K ($t\ ha^{-1}\ year^{-1}$)
Nampula	1年目	オリジナル	934	17597	4	97.5
		モザンビーク	934	21328	4	192
	2年目	オリジナル	1301	24511	4	314
		モザンビーク	1301	27567	4	476
	3年目	オリジナル	1516	28561	4	540
		モザンビーク	1516	31222	4	740
Lichinga	1年目	オリジナル	827	15581	5	28.1
		モザンビーク	827	23550	5	74.0
	2年目	オリジナル	1250	19509	5	166
		モザンビーク	1250	26700	5	285

(2) サブモデル C

サブモデル K の変数である降雨エネルギーの遮断率： i の値は作物ごとの値がないことから、全ての処理において表 3-3 の Cropland の II の値：36 を使用した。サブモデル C の計算結果を下表に示す。

表 3-5 各試験地のサブモデル C の値

試験地	i (%)	C
Nampula	36	0.115
Lichinga	36	0.115

(3) サブモデル X

サブモデル X の変数である傾斜： S および斜面長： L の値は、各試験地の実測値を使用した。サブモデル C の計算結果を下表に示す。

表 3-6 各試験地のサブモデル X の値

試験地	S (%)	L (m)	X
Nampula	4.2	24	3.09
Lichinga	3.5	24	2.70

3.2.3 SLEMSA モデルの検証結果および考察

第2章の圃場試験で得られた土壌侵食の実測値と SLEMSA モデルによる予測値を比較した。比較に用いた実測値および SLEMSA モデルによる予測値は、Nampula は耕起区の結果を用い、Lichinga は耕起区を設けなかったため最小耕起区の結果を用いた。また、SLEMSA モデルについては Elwell (1978) によって開発されたオリジナルの計算式を用いて算出した値の他、Wambike (1986) がモザンビークの土壌侵食ハザードマップ作製に用いた Reddy and Mussage (1985) の降雨エネルギー： E の計算式を適用したモザンビーク版 SLEMSA モデルを用いて計算した結果についても比較した (図 3-2)。

オリジナルの SLEMSA モデルによる予測値は Nampula の1年目と Lichinga の1年目・2年目の実測値と概ね一致した。但し、Lichinga の1年目と2年目については、最小耕起の値を用いているため、圃場を耕起していた場合は、土壌侵食量の実測値がより大きくなったと考えられる。第2章の試験で最小耕起区は耕起区に比べ 57%土壌侵食量を削減出来たことから、仮にこの削減率を用いて Lichinga の最小耕起区の土壌侵食量を耕起区の土壌侵食量に換算すると実測値の約 1.75 倍となり、SLEMSA モデルの予測値との関係は図 3-3 の様になる。図 3-3 で耕起区の土壌侵食量に換算した値と SLEMSA モデルの予測値を比べると、1年目はモザンビーク版 SLEMSA モデルによる予測値の方がオリジナルの SLEMSA モデルよりも耕起区に換算した値と近い値となり、2年目はオリジナルの SLEMSA モデルの方がモザンビーク版 SLEMSA モデルより耕起区に換算した値と近い値となった。一方、Nampula の2年目と3年目

のオリジナルの SLEMSA モデルの予測値は実測値の約 5-9 倍と大きくかけ離れた値を示した。また、モザンビーク版 SLEMSA モデルによる予測値はオリジナルの SLEMSA モデルによる予測値の約 1.4-2.6 倍となり、オリジナルの SLEMSA モデルよりもさらに土壤侵食量を過大評価する傾向が認められた（図 3-2）。本試験で SLEMSA モデルの入力に使用した値は、同じ試験地では、雨量以外は同じ値が用いられているため、同じ試験地におけるオリジナルの SLEMSA モデルとモザンビーク版 SLEMSA モデルによる予測値の差は、雨量の値のみが影響を及ぼしている。そこで、オリジナルの SLEMSA モデルとモザンビーク版 SLEMSA モデルによる降雨エネルギー： E の計算式に用いる雨量を 1-3000mm まで変化させて比較すると図 3-4 の様になり、モザンビークで用いられた計算式は雨量が少ない程、オリジナルの計算式と比べ降雨エネルギー： E を高く見積もっていた。このことから、モザンビーク版 SLEMSA モデルは雨量の値が小さい程、オリジナルの SLEMSA モデルに比べ、土壤侵食量を大きく評価していると言える。本試験に用いた値は同じ地域では雨量以外については同一であることから、図 3-2、3-3 に土壤侵食量の実測値・予測値と共に雨量を示した。この雨量データと土壤侵食量の実測値・予測値を見ると、SLEMSA モデルは 1,250mm 程度の雨量までは予測精度が高いが、雨量がそれ以上になると実測値より土壤侵食量を過大評価する傾向が認められた。

本試験では、オリジナルの SLEMSA モデルは実測値よりも土壤侵食量を過大評価する傾向が認められ、モザンビーク版 SLEMSA モデルはオリジナルの SLEMSA モデル以上に土壤侵食量を過大に評価してしまうことから、モザンビークにおける土壤侵食の予測には Wambike (1986) が用いたモザンビーク版 SLEMSA モデルよりもオリジナルの SLEMSA モデルの方が適していると考えられた。また、オリジナルの SLEMSA モデルも雨量が 1,250mm を超えてしまうと土壤侵食量を極端に過大評価してしまう傾向が認められたことから、モザンビークの雨量マップ(図 3-5)に示されている様な雨期の雨量が 1,200mm 以上となっている地域に SLEMSA モデルを適用する際には注意が必要である。

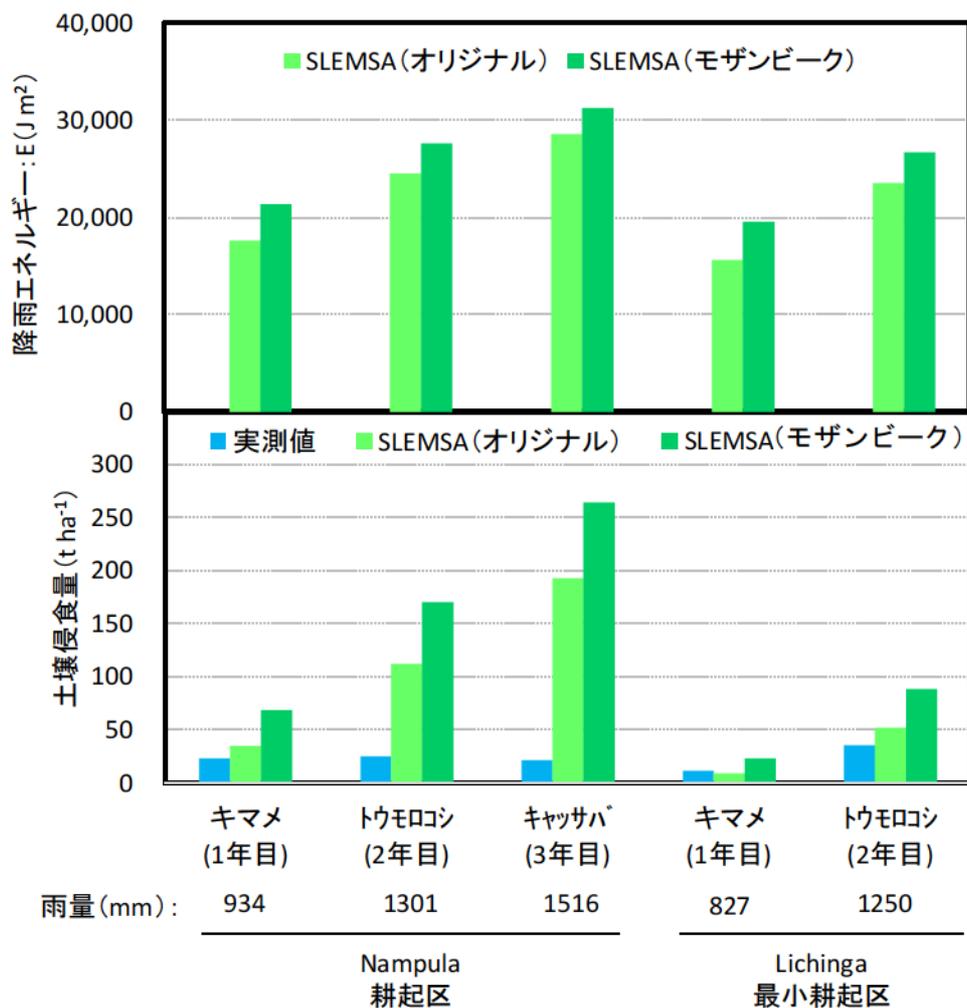


図 3-2 土壤侵食量の実測値と SLEMSA モデルによる予測値の比較

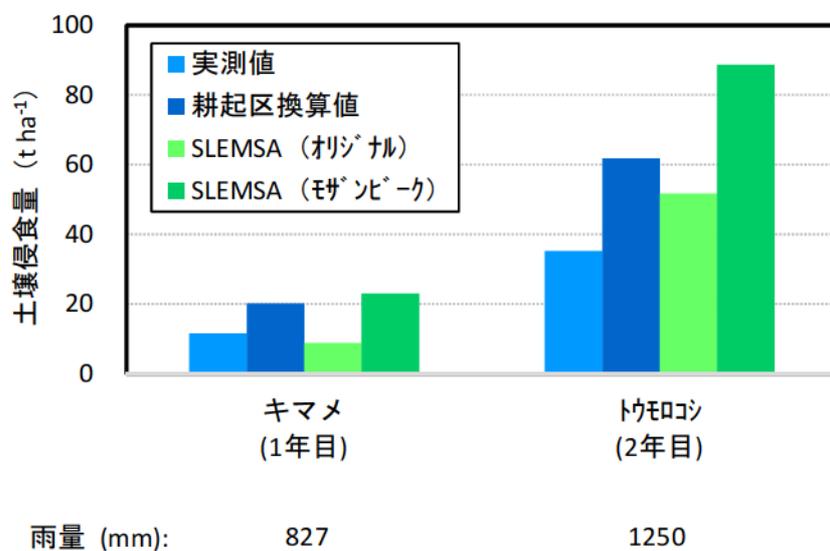


図 3-3 Lichinga における最小耕起区の土壌侵食量の実測値と耕起区換算値, SLEMSA モデルによる予測値の比較

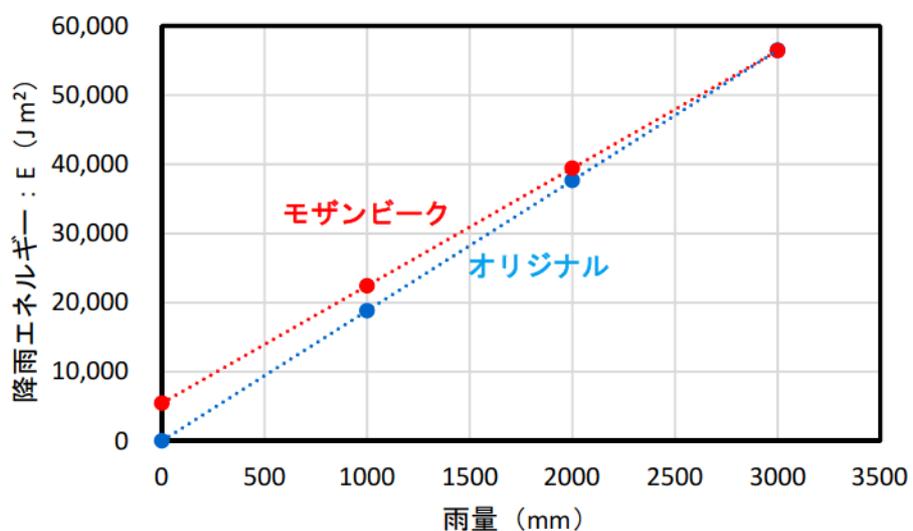


図 3-4 オリジナルの SLEMSA モデルとモザンビーク版 SLEMSA モデルによる降雨エネルギー : E の計算式の比較

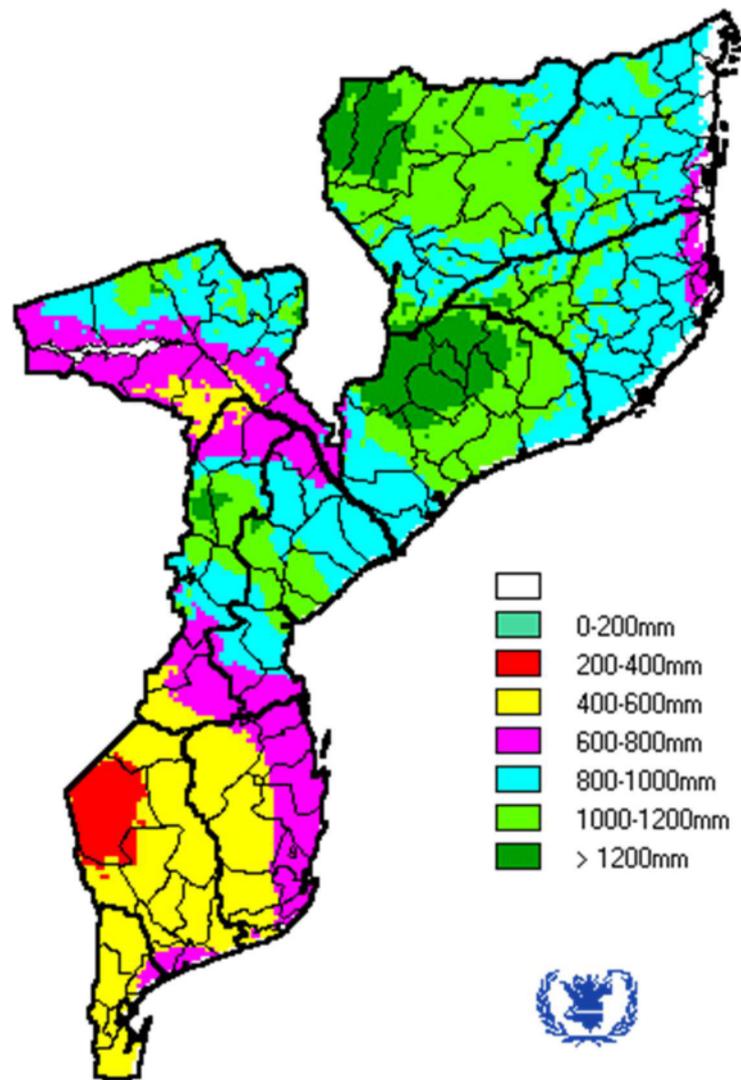


図 3-5 モザンビークにおける雨期（11月-4月）の雨量マップ

(Source: WFP, 1996)

3.3 WEPP モデルの検証

3.3.1 WEPP モデルの概要

Water Erosion Prediction Project (WEPP) モデルは Nearing ら (1989) によって開発されたプロセスベースモデルである。WEPP モデルは1斜面における土壌侵食だけでなく、小流域レベルで土壌侵食量を推定することが可能で、土木的対策や営農的対策の効果についても評価が可能であることから有力な土壌侵食モデルの1つとされている。現在、WEPP モデルはソフトウェア化され、米国農務省のホームページで無償配布されている。WEPP モデルは圃場、水路、貯水池の3つの大きな機構で構成されている。圃場のみで適用する場合には、一つの圃場における侵食量が算定される。また、それらの機構を組み合わせることによって流域スケールへの適用が可能となり、流域内における土砂動態を把握することも可能となる。

(1) 圃場における土壌侵食に関わる因子の概要

WEPP の構成因子として、①気候、②表面流、③水収支、④作物、⑤土壌、⑥圃場管理がある。これらと侵食モデルから侵食量を算定する。WEPP モデルの概要を図 3-6 に示す。

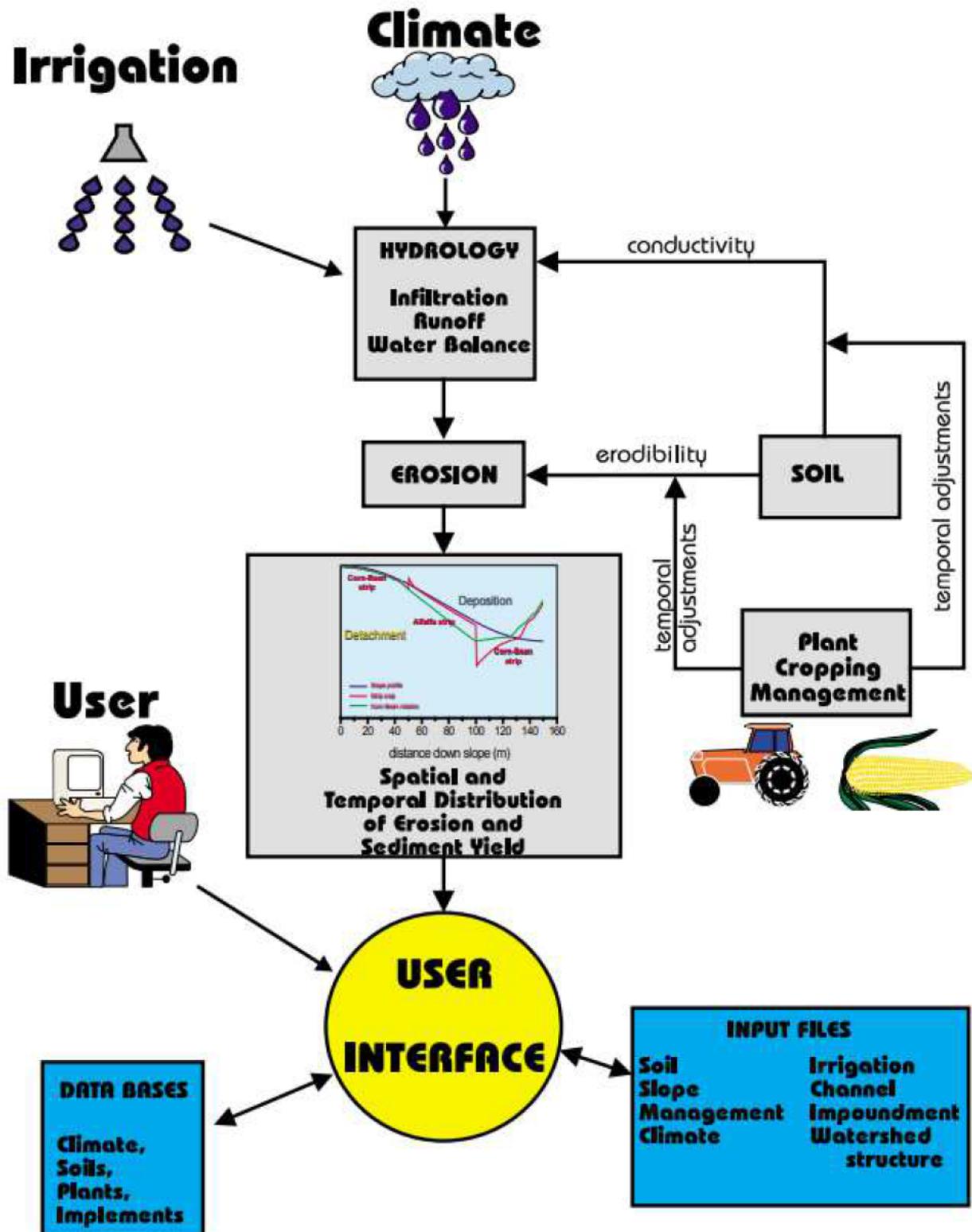


図 3-6 WEPP による土壤侵食予測の概要

(Source: 米国農務省, 1995)

1) 気候

任意の地域における降雨、蒸発散などの気象要素のシミュレータには WEPP に同梱されている CLIGEN (CLI-mate GENerator) を用いる。これは既存の気象観測値をもとにして仮想の気象データを作成するシミュレータである。出力される気候要素は日降水量（または一雨の降水量）、降雨継続時間、ピーク降雨強度、ピーク降雨強度の発生時刻、最低・最高気温、日射量、風速・風向、露点温度である。適用する地域を指定すればこれらの出力値が得られる。米国以外の地域では観測値をもとに、BPCDG (Breakpoint Climate Data Generator) という WEPP に同梱されているプログラムを用いて気象入力データを作成するのが一般的である。

2) 表面流

降雨に伴う表面流の解析は日単位または降雨イベント単位で行う。表面流はリル侵食量（流水による土粒子の剥離量）の算定や侵食された土粒子の運搬量を算定するための重要な要素の一つである。表面流の解析過程によって算出される変数は、表面流発生の継続時間、表面流発生時における降雨強度、イベントにおける総流量、そしてピーク流量である。また、これらの解析は同時に、雨水の浸入量を算定し、土壌の水分状態の変動を表現し、後述の水収支を解析する重要な要素となる。

表面流の発生は、実用的なモデルとして適用事例の多い Green-Ampt モデル (Green・Ampt, 1911) によって、算出された浸入速度を用いて判定される。累積浸入量の算定には Mein ら (1973) が開発した Green-Ampt Mein-Larson (GAML) モデルを用いる。そのモデルを用いて非定常な降雨時系列の場合における表面流発生時刻を求める方法は Chu (1978) によって紹介されている。これらの雨水の浸入過程によって、表面流発生の継続時間、表面流発生時における降雨強度、そしてイベントにおける総流量が算定される。

ピーク流量の計算には2通りの手法がある。WEPP を1つの降雨イベント期間のみで用いる場合（降雨イベントモード）には Stone (1992) らが考案した kinematic wave モデルの準理論解法 (semi-analytical solution of the kinematic wave model) を用いる。一方、WEPP を連続した降雨イベント期間に適用する場

合（長期連続解析モード）には kinematic wave モデルの近似解法（approximation of the kinematic wave model）を用いた方法を用いる。両方法とも基礎式として以下に示す連続式と運動式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = v \quad (3-6)$$

$$q = C S_0^{0.5} h^{1.5} \quad (3-7)$$

h : 表面流の水深(m)

q : 単位幅当たりの流量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

v : 表面流発生量($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

C : Chezy 係数($\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$)

S_0 : 勾配($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

3) 水収支

日単位の水収支として蒸発散量および浸透量を算定する。水収支によって土壤水分もまた日変動する。蒸発散位はペンマン式を用い、土壤水分の蒸発および蒸散量は Ritchie (1972) の方法を用いて算定する。Ritchie の方法は、土壤の蒸発の過程を2段階で表現し、第1段階では、降雨後から任意の積算蒸発量まで蒸発量を一定値とし、第2段階では、第1段階終了後からの経過日数によって、徐々に蒸発量が減少する。一方、蒸散量は LAI (Leaf Area Index) の関数として表現している。浸透は根圏土層をいくつかの層に分割し、それらの水分の再分配として表現される。再分配は蒸発量や圃場容水量を用いて算定される。なお、WEPP モデルでは根圏より深部への浸透量は水収支における損失として扱われる。

4) 作物

圃場における作物の生長は流出や侵食過程に大きな影響を与える因子である。WEPP モデルにおける作物生長モデルは Williams ら (1989) が開発した EPIC モデルに基づき構成されている。作物の生長は日単位で変動するものとして、日射量および LAI によってバイオマス量の増分が算定され、バイオ

マス量によって植生の被覆率、植生高さ、根重、胸高断面積が算定される。作物別に設定すべきパラメータが多くあるが、代表的な作物の値はデフォルト値として準備されている。

5) 土壤

土壤の状態は浸入および表面流に起因する流水による土粒子の剥離、雨滴侵食、そして侵食された土砂の運搬に大きく寄与する。代表的な土壤の変数として、ランダムラフネス（地表面の凹凸）、乾燥密度、そして有効透水係数がある。ランダムラフネスは耕起によって増大し、耕起後、降雨および耕起後の経過日数にともなって減少する。ランダムラフネスは日変動し、後述のインターリル侵食係数、有効透水係数、そして摩擦抵抗係数などに影響する変数である。乾燥密度は耕起によって減少し、降雨および耕起後の経過日数によって圧密によって増大する。乾燥密度は日変動し、後述の有効透水係数に影響する変数である。有効透水係数は、はじめに土壤の粒径区分や CEC（Cation Exchange Capacity, 陽イオン交換容量）によって、その土壤の飽和透水係数が定まる。そして、クラスト、ランダムラフネス、そして耕起後の累積降雨エネルギーから裸地状態の有効透水係数が定まる。また、これらの透水係数に植生や残渣の被覆率、降水量を取り入れて作物圃場における有効透水係数が算定される。有効透水係数に降水量が影響する理由として、マクロポアにおける流量の増大が挙げられている。

6) 圃場管理

圃場管理は耕起、植え付け、灌漑、収穫などの作業およびその実施時期から構成される営農スケジュールである。それぞれの作業において使用する器具、作付け品目、収穫方法などを各作業において設定する必要がある。特に、耕起は土壤を攪乱する要素として土壤侵食に与える影響が大きい。WEPPモデルでは、耕起をはじめとする各種作業におけるパラメータがすでに同定されており、デフォルト値として利用可能である。

(2) 圃場における土壌侵食過程の概要

侵食過程における土砂の連続式は次式で表現される。

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad (3-8)$$

G : 土砂流出量($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)

x : 流下方向距離(m)

D_f : リル侵食量($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

D_i : インターリルからの土砂流入量($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

ここで、リルは畝などの圃場内における流路を指す。また、インターリルは畝斜面などの流路以外の部分を指す。

インターリルからの土砂流入量は次式で表される。

$$D_i = K_{iadj} I_e \sigma_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} \left[\frac{R_s}{w} \right] \quad (3-9)$$

K_{iadj} : インターリル侵食係数($\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4}$)

I_e : 有効降雨強度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

σ_{ir} : インターリル流量($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

SDR_{RR} : 土砂運搬率

F_{nozzle} : スプリンクラー灌漑の地表面への衝撃に関する係数

R_s : リル間隔(m)

w : 圃場末端におけるリル幅(m)

式からもわかるように、インターリル侵食は雨滴侵食および表面流に伴う土粒子の剥離によって土砂生産が起こる。インターリル侵食係数 K_{iadj} は日単位で変動し、インターリル侵食における重要な変数として次式で表現される。

$$K_i = K_{ib} (CK_{ican})(CK_{igc})(CK_{idr})(CK_{ilr})(CK_{isc})(CK_{isl}) \quad (3-10)$$

K_{ib} : 定数 (土壌の粒径組成の関数)

- CK_{ican} : 作物被覆の効果
- CK_{igc} : 地表被覆の効果
- CK_{idr} : 地中の残渣の効果
- CK_{itr} : 作物の根の効果
- CK_{isc} : クラストの効果
- CK_{isl} : 勾配の効果

これらの変数によって、侵食量が作物、残渣、そして土壤などの影響を受ける構造となっている。なお、それぞれの効果の算定式は USDA-ARS (1995) に記されている。また、土砂運搬率 SDR_{RR} は、発生した土砂がリルへ運搬される割合をランダムラフネス (土壤の凹凸) によって表現した値であり、Foster (1982) によって定められている。

リル侵食量 D_f は流れの掃流力 τ_f がリルにおける限界掃流力 τ_c を超え、土砂流出量 G が運搬可能土砂量 T_c 以下の場合、つまり、 $\tau_f \geq \tau_c$ かつ $\leq T_c$ のとき、次式で表される。

$$D_f = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (3-11)$$

- D_f : リル侵食量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
- D_c : 流水による可能剥離量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)
- T_c : 運搬可能土砂量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

流水による可能剥離量 D_c は次式で表現される。

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (3-12)$$

- K_r : リル侵食係数($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)
- τ_f : 掃流力(Pa)
- τ_c : リルにおける限界掃流力(Pa).

リル侵食係数 K_r は次式で表現される。

$$K_r = K_{rb} (CK_{rbr})(CK_{rdr})(CK_{rlr})(CK_{rsc}) \quad (3-13)$$

- K_{rb} : 定数(土壤の粒径組成の関数)
- CK_{rbr} : 表層の残渣の効果
- CK_{rdr} : 地中の残渣の効果

CKrlr: 根の効果

CKrsc: クラストの効果

このようにリル侵食では残渣, 根, そして土壌の影響を受ける構造となっている. それぞれの効果の算定式は **USDA-ARS (1995)** に記されている. また, 掃流力 τ_f , 限界掃流力 τ_c , そして運搬可能土砂量 T_c は次式で表される.

$$\tau_f = \gamma R \sin(\alpha) \left(\frac{f_s}{f_t} \right) \quad (3-14)$$

$$\tau_c = \tau_{cb} (C\tau_{rr}) (C\tau_{sc}) \quad (3-15)$$

$$T_c = k_t \tau_f^{3/2} \quad (3-16)$$

τ_f : 掃流力(Pa)

γ : 水の比重($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$)

R : 径深(m)

α : 斜面勾配(radians)

f_s : 土壌の摩擦抵抗係数

f_t : リルにおける全摩擦抵抗係数

τ_c : 限界掃流力(Pa)

τ_{cb} : 定数(Pa) (土壌の粒径組成の関数)

$C\tau_{rr}$: ランダムラフネス (土壌の凹凸) の効果

$C\tau_{sc}$: クラストの効果

k_t : 運搬係数($\text{m}^{0.5}\cdot\text{s}^2\cdot\text{kg}^{-0.5}$)

一方, $\tau_f < \tau_c$ かつ $G \leq T_c$ の場合, リル侵食量 $D_f = 0$ となる. そして, $G > T_c$ の場合, リル侵食量 D_f は沈降量として次式で表される.

$$D_f = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (3-17)$$

β : 雨滴による乱流係数 (WEPP では通常 0.5 とする)

V_f : 土粒子の有効沈降速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

q : 単位リル幅あたりの流量($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

3.3.2 WEPP モデルの適用方法

WEPP モデルで土壌侵食量を予測するためには、表 3-7 に示すデータを全て入力することが求められる。

表 3-7 WEPP モデルの入力データ

項目	入力データ
斜面	傾斜 (%), 斜面長 (m)
気象	雨量 (mm), 最大気温 (°C), 最低気温 (°C), 日射量 (Ly), 風速 (m), 風向, 露点温度 (°C)
土壌	層毎の深さ (mm), 砂 (%), 粘土 (%), 礫 (%), 有機物含量 (%), 陽イオン交換容量 (meq 100g ⁻¹), アルベド, 初期含水率 (%), 畝斜面受食性 (kg s m ⁻⁴), 畝間受食性 (s m ⁻¹), 限界掃流力 (Pa), 有効透水係数 (mm h ⁻¹)
作物・圃場管理	作物・圃場管理スケジュール, 作物の成長に関するパラメーター群 (草丈, 根の伸長, 被覆率の上昇等の速度, 生育適温, 早魃耐性等), 営農作業に関するパラメーター群 (耕起, 播種, 収穫等)

本研究では、各データを以下の様に設定した。

1) 斜面データ

斜面データは試験圃場において水準測量を行った結果を用いた。但し、Lichinga のベチベル草植生帯区では、植生帯を設置した位置の幅 30cm の傾斜を 0.01% に設定し、WEPP モデルで Slope conditions の Top を Flat, Bottom を Flatter に設定し算出された値を用いた (表 3-8)。

表 3-8 WEPP モデルの適用に用いた斜面データ

試験地	処理区	パラメータ	数値				
Nampula	全体	傾斜 (%)	4.2				
		斜面長 (m)	24				
Lichinga	ベチベル草植生帯	傾斜 (%)	3.5	3.5	0.01	0.01	0.01
		斜面長 (m)	0.000	22.327	23.518	23.784	24.000
	その他	傾斜 (%)	3.5				
		斜面長 (m)	24				

2) 気象データ

Nampula および Lichinga の各試験地に設置した気象観測装置で観測したデータを用いた。降水量は30分間隔で計測していたものを10分間隔に換算して使用した。また、日最高・最低気温、風向、日平均風速、日平均気温、日平均湿度は1日間隔の値を使用した。これらの観測値をもとに、BPCDGを用いて気象入力データを作成した。

3) 土壌データ

層毎の深さ、砂、粘土、礫、有機物含量、陽イオン交換容量については、試験開始前に試験圃場から採取した土壌の分析値を用いた（表 3-9）。畝斜面受食性、畝間受食性、限界掃流力、有効透水係数は、これらの分析値を用いた WEPP モデルによる自動計算値を使用した。また、アルベドおよび初期含水率は WEPP のデフォルト値である 0.23 および 75%とした

表 3-9 Nampula, Lichinga の試験地の土壌条件

Location	Depth (cm)	Organic matter (%)	CEC (meq 100g ⁻¹)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Rock (%)	Bulk density (g cm ³)
Nampula	0-3	0.54	2.2	81.5	7.2	10.2	1.1	1.50
	3-20	0.75	2.4	82.9	3.7	13.1	1.2	1.46
	20-42	0.43	6.6	50.4	9.1	38.6	1.9	1.81
	42-68	0.41	4.4	40.8	5.8	30.3	23.1	1.67
	68-100	0.39	6.8	53.1	11.2	34.4	1.3	1.72
Lichinga	0-6	2.52	7.4	48.8	14.0	35.8	1.4	1.26
	6-30	2.63	7.0	46.5	20.9	31.4	1.2	1.18
	30-42	1.58	10.2	22.5	8.3	68.3	0.9	1.45
	42-66	1.07	12.4	24.5	9.8	64.6	1.1	1.57
	66-100	1.06	12.9	25.6	8.5	64.3	1.6	1.53

4) 作物・圃場管理データ

作物・圃場管理スケジュールは第2章の圃場試験で行った実際のスケジュールを元に入力した。設定した作物・圃場管理スケジュールを表 3-10, 3-11, 作物に関するパラメータを表 3-12, 3-13, 耕起に関する

るパラメータを表 3-14 に示す。各パラメータは既知のものはその値を入力し、未測定もしくは不明なものはデフォルト値を用いた。

作物の成長に関するパラメーター群については、トウモロコシは WEPP のデフォルトの値を基に WEPP による予測値が実際に現地で測定した草丈や植被率と概ね一致する様にパラメーターを微調整して用いた。キマメとキャッサバについてはデフォルト値がなかったため、WEPP による予測値が現地で測定した草丈や植被率と概ね一致するよう調整してパラメーターを作成した。営農作業に関するパラメーター群については、通常の耕起は作業後の土壤表面の凹凸 2cm で深さ 10cm、除草は作業後の土壤表面の凹凸 1cm で深さ 2cm まで耕起する設定とし、最小耕起区では播種前に耕起の代わりに除草作業を設定した。但し、Nampula の一年目の試験では試験開始前に高さ 10cm、幅 25cm 程の畝が残っており、これを崩し均してから試験を開始したことから、全ての処理区において前年に高さ 15cm の畝を 80cm 間隔で作成してトウモロコシを栽培した設定とした。なお、畝の高さを 15cm としたのは、降雨によって畝が小さくなることを考慮してのことである。そして、1 年目の最小耕起区および最小耕起+ソルガム残渣マルチ区では、1 年目の試験開始時に作業後の土壤表面の凹凸 1cm、深さ 5cm で耕起する設定とした。また、Nampula の 3 年目の最小耕起区および最小耕起+トウモロコシ残渣マルチ区では、キャッサバの植付位置の周囲約 40cm のみを耕起したことから、耕起面割合を以下の様に計算し、耕起面割合を 48%、深さを 10cm、作業後の土壤表面の凹凸を 2cm として設定した。

$$\text{耕起面割合 (\%)} = \frac{40\text{cm (耕起箇所の半径)} \times 40\text{cm (耕起箇所の半径)} \times 3.14 \text{ (円周率)}}{100\text{cm (キャッサバの株間)} \times 105\text{cm (キャッサバの畝間)}} \times 100$$

キマメのアレイクロッピングについては、1 年目に畝間 80 cm で栽培したキマメの畝間にトウモロコシを播種したことから、40cm ごとに斜面を区切り、キマメを栽培する区とトウモロコシを栽培する区を交互に設定した。但し、WEPP では、斜面を 10 カ所までしか区切ることが出来ないため、斜面長は実際の斜面長である 24m ではなく、3.2m でシミュレーションを行った。

表 3-10 WEPP に入力した Nampula における各処理区の作物・圃場管理スケジュール

Nampula 処理区① (1-3 年目 : 耕起)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2010	Initial Conditions	After harvest of peanut	
6/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
12/21/2011	Plant - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	Row Width: 80.00 cm
1/20/2012	Tillage	Ridge	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
3/10/2012	Tillage	Ridge	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	
4/26/2012	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
1/3/2013	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
1/6/2013	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
1/7/2013	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea 1	Row Width: 80.00 cm
2/1/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/13/2013	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea 1	
7/14/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/11/2013	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/17/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/18/2013	Plant - Annual	Nampula Maize	Row Width: 80.00 cm
1/5/2014	Residue Addition	Weed	
1/6/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/20/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/1/2014	Harvest - Annual	Nampula Maize	
5/2/2014	Residue Removal	Residue Removal	
6/1/2014	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/27/2014	Residue Removal	Residue Removal	
11/27/2014	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/28/2014	Plant - Annual	Cassava	Row Width: 105.00 cm
1/12/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/16/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
9/28/2015	Harvest - Annual	Cassava	

Nampula 処理区②

(1年目：耕起+ソルガムマルチ, 2年目：耕起+キママルチ, 年3目：耕起+トウモロコシマルチ)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2010	Initial Conditions	After harvest of peanut	
6/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
12/21/2011	Plant - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	Row Width: 75.00 cm
1/20/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
3/10/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	
1/3/2013	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
1/6/2013	Residue Removal	Residue Removal	
1/7/2013	Residue Addition	Sorghum mulch	
1/7/2013	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	Row Width: 80.00 cm
2/1/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/13/2013	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	
12/11/2013	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/17/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/18/2013	Residue Addition	Pigeonpea Mulch Nampula	
12/18/2013	Plant - Annual	Nampula Maize	Row Width: 80.00 cm
1/6/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/20/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/1/2014	Harvest - Annual	Nampula Maize	
6/1/2014	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
6/1/2014	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/25/2014	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
11/26/2014	Residue Addition	Weed 3	
11/27/2014	Residue Addition	Weed 3	
11/27/2014	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/28/2014	Residue Addition	Weed 2	
11/28/2014	Plant - Annual	Cassava	Row Width: 105.00 cm
12/10/2014	Residue Addition	Weed 3	
12/23/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/10/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/12/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2015	Residue Addition	Weed 2	
2/16/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
9/28/2015	Harvest - Annual	Cassava	

Nampula 処理区③ (1-3年目：最小耕起)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2010	Initial Conditions	After harvest of peanut	
6/20/2011	Tillage	Tillage 10cm Primary	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
12/21/2011	Plant - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	Row Width: 80.00 cm
1/20/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
3/15/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	
4/26/2012	Residue Removal	Residue Removal	
1/3/2013	Tillage	Leveling	Depth: 5.00 cm; Type: Pri
1/6/2013	Residue Removal	Residue Removal	
1/7/2013	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	Row Width: 80.00 cm
2/1/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/13/2013	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	
7/14/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/11/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/17/2013	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
12/18/2013	Plant - Annual	Nampula Milho	Row Width: 80.00 cm
12/20/2013	Residue Addition	Weed 1	
12/28/2013	Residue Addition	Weed 2	
1/2/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/6/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/10/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/20/2014	Tillage	Weeding incorporation	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/1/2014	Residue Addition	Weed	
2/10/2014	Tillage	Weeding incorporation	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/20/2014	Residue Addition	Weed 3	
5/1/2014	Harvest - Annual	Nampula Maize	
5/2/2014	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
11/27/2014	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
11/28/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/28/2014	Tillage	Conservation tillage	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/28/2014	Plant - Annual	Cassava	Row Width: 105.00 cm
12/6/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/8/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/10/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/12/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/14/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/18/2014	Residue Addition	Weed 2	
12/26/2014	Residue Addition	Weed 2	
1/1/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/3/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/5/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/7/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/8/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/9/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/10/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/11/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/12/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/16/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
9/28/2015	Harvest - Annual	Cassava	

Nampula 処理区④- 1

(1 年目 : 最小耕起+リガムマルチ, 2 年目 : 最小耕起+キママルチ, 3 年目 : 最小耕起+ベチヘル草植生帯なし)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2010	Initial Conditions	After harvest of peanut	
6/20/2011	Tillage	Tillage 10cm Primary	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
12/21/2011	Plant - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	Row Width: 75.00 cm
1/20/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
3/15/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	
4/26/2012	Residue Removal	Residue Removal	
1/3/2013	Tillage	Leveling	Depth: 5.00 cm; Type: Pri
1/6/2013	Residue Removal	Residue Removal	
1/7/2013	Residue Addition	Sorghum mulch	
1/7/2013	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea 3	Row Width: 80.00 cm
2/1/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/13/2013	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea 3	
7/14/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/11/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/11/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/12/2013	Residue Addition	Weed 3	
12/13/2013	Residue Addition	Weed 3	
12/18/2013	Plant - Annual	Nampula Maize	Row Width: 80.00 cm
12/20/2013	Residue Addition	Weed 3	
12/25/2013	Residue Addition	Weed 3	
1/1/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/5/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/6/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/10/2014	Residue Addition	Weed 2	
1/15/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/20/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/1/2014	Harvest - Annual	Nampula Maize	
5/2/2014	Plant - Perennial	Vetiver grass	Row Width: 30.00 cm; Does not senesce
5/3/2014	Residue Removal	Residue Removal	
11/27/2014	Residue Removal	Residue Removal	
11/27/2014	Tillage	Minimum Tillage Cassava	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/28/2014	Plant - Annual	Cassava	Row Width: 15.00 cm
12/1/2014	Residue Addition	Weed 1	
12/10/2014	Residue Addition	Weed 2	
12/20/2014	Residue Addition	Weed 3	
12/30/2014	Residue Addition	Weed 3	
1/10/2015	Residue Addition	Weed 3	
1/12/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/16/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
9/28/2015	Harvest - Annual	Cassava	

Nampula 処理区④-2

(1年目：最小耕起+ソルガムマルチ，2年目：最小耕起+キママルチ，3年目：最小耕起+ペパール草植生帯あり)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2010	Initial Conditions	After harvest of peanut	
6/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
12/21/2012	Plant - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	Row Width: 75.00 cm
1/20/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
3/15/2012	Tillage	Ridging	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Corn - Medium Fertilization Level	
4/26/2012	Residue Removal	Residue Removal	
1/3/2013	Tillage	Leveling	Depth: 5.00 cm; Type: Pri
1/6/2013	Residue Removal	Residue Removal	
1/7/2013	Residue Addition	Sorghum mulch	
1/7/2013	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	Row Width: 80.00 cm
2/1/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/14/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/13/2013	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea 2	
7/14/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/11/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/17/2013	Residue Removal	Residue Removal	
12/18/2013	Residue Addition	Pigeonpea Mulch Nampula	
12/18/2013	Plant - Annual	Nampula Maize	Row Width: 75.00 cm
1/5/2014	Residue Addition	Weed	
1/6/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/20/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/1/2014	Harvest - Annual	Nampula Maize	
5/2/2014	Plant - Perennial	Vetiver grass	Row Width: 80.00 cm; Does not senesce
5/2/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
5/10/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
5/20/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
5/30/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
6/10/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
6/30/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
11/27/2014	Residue Removal	Residue Removal	
11/27/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/28/2014	Cut - Perennial	Vetiver grass	
11/28/2014	Residue Addition	Vetiver grass	
1/30/2015	Cut - Perennial	Vetiver grass	
1/30/2015	Residue Addition	Vetiver grass	
3/30/2015	Cut - Perennial	Vetiver grass	
3/30/2015	Residue Addition	Vetiver grass	

表 3-11 WEPP に入力した Lichinga における各処理区の作物・圃場管理スケジュール

Lichinga 処理区①：畝立て，処理区②：畝立て+残渣鋤き込みについては，土壌侵食量を測定していないため，入力データなし。

Lichinga 処理区③（1-2 年目：最小耕起）

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Plant - Annual	Lichinga Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
12/10/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/25/2014	Harvest - Annual	Lichinga Pigeon Pea	
12/10/2014	Residue Removal	Residue Removal	
12/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/10/2014	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
1/2/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/14/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/30/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/27/2015	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

Lichinga 処理区④ (1年目：最小耕起+ヒマワリ残渣マルチ, 2年目：最小耕起+キマメ残渣マルチ)

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Residue Addition	Sunflower Mulch	
11/27/2013	Plant - Annual	Lichinga Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
12/10/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/25/2014	Harvest - Annual	Lichinga Pigeon Pea	
12/9/2014	Residue Removal	Residue Removal	
12/9/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/10/2014	Residue Addition	Pigeon pea mulch Lichinga	
12/10/2014	Plant - Annual	Lichinga Milho	Row Width: 80.00 cm
12/11/2014	Residue Addition	Pigeon pea mulch Lichinga	
1/2/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/14/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/30/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/1/2015	Residue Addition	Pigeon pea mulch Lichinga	
2/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/27/2015	Harvest - Annual	Lichinga Milho	

Lichinga 処理区⑤- 1 (1年目: 最小耕起+タグイスマルチ, 2年目: 最小耕起+キマメレイクロッピング)

キマメのアレイクロッピング: トウモロコシ

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 40.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Residue Addition	Soy bean Mulch	
11/27/2013	Plant - Annual	Lichinga Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
12/10/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/25/2014	Harvest - Annual	Lichinga Pigeon Pea	
12/8/2014	Residue Removal	Residue Removal Mozambique	
12/9/2014	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
12/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/10/2014	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
1/2/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/14/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/15/2015	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
1/30/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/1/2015	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
3/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/27/2015	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

Lichinga 処理区⑤-2 (1年目: 最小耕起+ダースマルチ, 2年目: 最小耕起+キマメアレクロッピング)

キマメのアレクロッピング: キマメ

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Residue Addition	Soy bean Mulch	
11/27/2013	Plant - Perennial	Lichinga Pigeon Pea Perennial	Row Width: 80.00 cm; Does not senesce
12/10/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding soy mulch	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/8/2014	Residue Removal	Residue Removal	
12/9/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/10/2014	Cut - Perennial	Lichinga Pigeon Pea Perennial	
12/10/2014	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
1/2/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/14/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/15/2015	Cut - Perennial	Lichinga Pigeon Pea Perennial	
1/15/2015	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
1/30/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/1/2015	Cut - Perennial	Lichinga Pigeon Pea Perennial	
3/1/2015	Residue Addition	Pigeon pea alley cropping	
3/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/27/2015	Kill - Perennial	Lichinga Pigeon Pea Perennial	

Lichinga 処理区⑥-1 (1年目: 最小耕起+トウモロコシ, 2年目: 最小耕起+ベチベル草植生帯)

ベチベル草植生帯: ベチベル草植生帯なし

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Residue Addition	Maize Mulch Lichinga	
11/27/2013	Plant - Annual	Lichinga Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
12/10/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/25/2014	Harvest - Annual	Lichinga Pigeon Pea	
12/10/2014	Residue Removal	Residue Removal	
12/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/10/2014	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
1/2/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/14/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/30/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/20/2015	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
5/27/2015	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

Lichinga 処理区⑥-2 (1年目: 最小耕起+トウモロコシ, 2年目: 最小耕起+ベチベル草植生帯)

ベチベル草植生帯: ベチベル草植生帯あり

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/2011	Initial Conditions	After harvest of maize	
5/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2011	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2011	Plant - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	Row Width: 40.00 cm
12/25/2011	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2012	Harvest - Annual	Soybeans - High Fertilization Level	
5/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
11/20/2012	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Sec
11/25/2012	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/25/2012	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/25/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/25/2013	Harvest - Annual	Lichinga Maize	
11/26/2013	Residue Removal	Residue Removal	
11/26/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
11/27/2013	Residue Addition	Maize Mulch Lichinga	
11/27/2013	Plant - Annual	Lichinga Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
12/10/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
12/29/2013	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/8/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
1/24/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
2/21/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
3/7/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
4/5/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Sec
7/25/2014	Harvest - Annual	Lichinga Pigeon Pea	
7/27/2014	Plant - Perennial	Vetiver grass	Row Width: 30.00 cm; Does not senesce
7/28/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
8/10/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
8/27/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
9/10/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
9/27/2014	Irrigate	Irrigate Vetiver	
12/9/2014	Residue Removal	Residue Removal	
12/10/2014	Tillage	Weeding	Depth: 2.00 cm; Type: Pri
12/11/2014	Cut - Perennial	Vetiver grass	
12/11/2014	Residue Addition	Vetiver grass	
2/16/2015	Cut - Perennial	Vetiver grass	
2/16/2015	Residue Addition	Vetiver grass	
3/18/2015	Cut - Perennial	Vetiver grass	
3/18/2015	Residue Addition	Vetiver grass	

表 3-12 WEPP に入力した Nampula における作物に関するパラメータ

Parameter	Pigeon Pea	Maize	Cassava	Unit
Plant Growth and Harvest Parameters				
Biomass energy ratio	24.5	24.5	21	kg/MJ
Growing degree days to emergence	60	60	60	Degrees C.days
Growing degree days for growing season	4050	4050	3850	Degrees C.days
In-row plant spacing	50	50	100	cm
Plant stem diameter at maturity	3	3	3.5	cm
Height of post-harvest standing residue; cutting height	50	50	0	cm
Harvest index (dry crop yield/total above ground dry biomass)	30	30	30	%
Temperature and Radiation Parameters				
Base daily air temperature	10	10	10	Degrees C
Optimal temperature for plant growth	25	25	25	Degrees C
Maximum temperature that stops the growth of a perennial crop	0	0	0	Degrees C
Critical freezing temperature for a perennial crop	0	0	0	Degrees C
Radiation extinction coefficient	0.3	0.3	0.25	
Canopy, LAI and Root Parameters				
Canopy cover coefficient	3	3	14	
Parameter value for canopy height equation	2.5	2.5	11	
Maximum canopy height	200	200	200	cm
Maximum leaf area index	3.5	3.5	3.5	
Maximum root depth	152	152	100	cm
Root to shoot ratio (% root growth/% above ground growth)	25	25	25	%
Maximum root mass for a perennial crop	0	0	0	kg/sq.m
Senescence Parameters				
Percent of growing season when leaf area index starts to decline (0-100%)	51	51	100	%
Period over which senescence occurs	45	45	0	days
Percent canopy remaining after senescence (0-100%)	80	80	100	%
Percent of biomass remaining after senescence (0-100%)	80	80	100	%
Residue Parameters				
Parameter for flat residue cover equation	2.53	1.1	2.1	sq.m/kg
Standing to flat residue adjustment factor (wind, snow, etc.)	99	99	99	%
Decomposition constant to calculate mass change of above-ground biomass	0.0015	0.001	0.013	
Decomposition constant to calculate mass change of root-biomass	0.0015	0.0015	0.013	
Use fragile or non-fragile mfo values	Non-Fragile	Non-Fragile	Non-Fragile	
Other Parameters				
Plant specific drought tolerance (% of soil porosity)	0	0	5	%
Critical live biomass value below which grazing is not allowed	0	0	0	kg/sq.m
Maximum Darcy Weisbach friction factor for living plant	0	0	0	
Harvest Units	WeppWillSet	WeppWillSet	WeppWillSet	
Optimum yield under no stress conditions	0.3	0.3	0.3	kg/sq.m

表 3-13 WEPP に入力した Lichinga における作物に関するパラメータ

Parameter	Pigeon Pea	Maize	Unit
Plant Growth and Harvest Parameters			
Biomass energy ratio	21	28	kg/MJ
Growing degree days to emergence	60	60	Degrees C.days
Growing degree days for growing season	4050	1700	Degrees C.days
In-row plant spacing	50	25	cm
Plant stem diameter at maturity	3	3.5	cm
Height of post-harvest standing residue; cutting height	50	0	cm
Harvest index (dry crop yield/total above ground dry biomass)	30	50	%
Temperature and Radiation Parameters			
Base daily air temperature	10	10	Degrees C
Optimal temperature for plant growth	25	25	Degrees C
Maximum temperature that stops the growth of a perennial crop	0	0	Degrees C
Critical freezing temperature for a perennial crop	0	0	Degrees C
Radiation extinction coefficient	0.3	0.65	
Canopy, LAI and Root Parameters			
Canopy cover coefficient	3	3.6	
Parameter value for canopy height equation	2.5	3	
Maximum canopy height	200	200	cm
Maximum leaf area index	3.5	3.5	
Maximum root depth	152	152	cm
Root to shoot ratio (% root growth/% above ground growth)	25	50	%
Maximum root mass for a perennial crop	0	0	kg/sq.m
Senescence Parameters			
Percent of growing season when leaf area index starts to decline (0-100%)	62	51	%
Period over which senescence occurs	45	30	days
Percent canopy remaining after senescence (0-100%)	80	65	%
Percent of biomass remaining after senescence (0-100%)	80	98	%
Residue Parameters			
Parameter for flat residue cover equation	2.1	1.1	sq.m/kg
Standing to flat residue adjustment factor (wind, snow, etc.)	99	99	%
Decomposition constant to calculate mass change of above-ground biomass	0.001	0.001	
Decomposition constant to calculate mass change of root-biomass	0.013	0.0025	
Use fragile or non-fragile mfo values	Non-Fragile	Non-Fragile	
Other Parameters			
Plant specific drought tolerance (% of soil porosity)	0	0	%
Critical live biomass value below which grazing is not allowed	0	0	kg/sq.m
Maximum Darcy Weisbach friction factor for living plant	0	0	
Harvest Units	WeppWillSet	WeppWillSet	
Optimum yield under no stress conditions	0.3	0	kg/sq.m

表 3-14 WEPP に入力した耕起に関するパラメータ

Parameter	Tillage 10cm	Minimum Tillage Cassava	Ridging	Leveling	Weeding	Weeding soy mulch	Unit
Percent residue buried on interrill areas for fragile crops	0	0	0	0	0	85	%
Percent residue buried on interrill areas for non- fragile crops	0	0	0	0	0	85	%
Number of rows of tillage implement	0	0	0	0	0	0	
Implement Code	Other	Other	Other	Other	Other	Other	
Cultivator Position	Rear mounted	Rear mounted	Rear mounted	Rear mounted	Rear mounted	Rear mounted	
Ridge height value after tillage	0	0	15	0	0	0	cm
Ridge interval	0	0	80	0	0	0	cm
Percent residue buried on rill areas for fragile crops	0	0	0	0	0	85	%
Percent residue buried on rill areas for non-fragile crops	0	0	0	0	0	85	%
Random roughness value after tillage	2	2	2	1	1	1	cm
Surface area disturbed (0- 100%)	100	48	60	100	100	100	%
Mean tillage depth	10	10	10	5	2	2	cm

3.3.3 WEPP モデルの検証結果および考察

(1) 耕起および最小耕起

耕起区および最小耕起区における作期ごとの土壌侵食量の実測値は WEPP モデルによる実測値と概ね一致し、Nampula の 1 年目の試験では最小耕起区で耕起区より土壌侵食量が大きく、2 年目、3 年目では耕起区と比べ最小耕起区で土壌侵食量が削減された傾向が再現された (図 3-7)。また、1 日ごとの土壌侵食量の実測値と予測値も概ね 1 対 1 で一致した (図 3-8, 3-9)。

Nampula では試験開始前に畝が残っており、その畝を崩し均して試験を開始したことから、WEPP モデルによるシミュレーションでは、前作に畝を立ててトウモロコシを栽培し、5cm の深さで耕起する条件を設定したところ、精度は他の最小耕起区に劣る結果にはなったものの、耕起区より土壌侵食量が

大きくなるという結果が再現された(図3-7)。この結果から、Nampulaの一年目の試験において最小耕起区の土壤侵食量が耕起区より大きくなったことは、第2章の考察の通り試験開始前に残っていた畝を崩し均して試験を開始したことから、固い土層の上に5cm程度の攪乱された層が形成されたため土壤侵食が助長されたものと考えられる。

Nampulaの3年目の最小耕起区では初期の除草の遅れにより雑草が繁茂してしまい、土壤侵食がほとんど起こらなかった。そのため、雑草による地表面被覆率の実測値と合うように雑草の代わりに作物残渣マルチを施す様にWEPPモデルの作物・圃場管理スケジュールを設定したところ、実測値に近い予測値を得ることが出来た(図3-8)。しかし、1日ごとの土壤侵食実測値と予測値はほとんど一致しなかった(図3-11)。WEPPによるシミュレーションでは圃場に繁茂した雑草による被覆率と同程度となるように残渣の施用によって被覆率を調整したが、残渣マルチでは雑草の根による土壤侵食軽減作用を再現することが出来なかったため、実測値と予測値がほとんど一致しなかったものと考えられる。また、Nampulaの3年目の最小耕起区では雑草の繁茂によりほとんど土壤侵食が発生せず、1日の土壤侵食量の実測値は $0.2t\ ha^{-1}$ と僅かであったことから、少量の土壤侵食量の推定にはWEPPモデルは適していない可能性が考えられた。

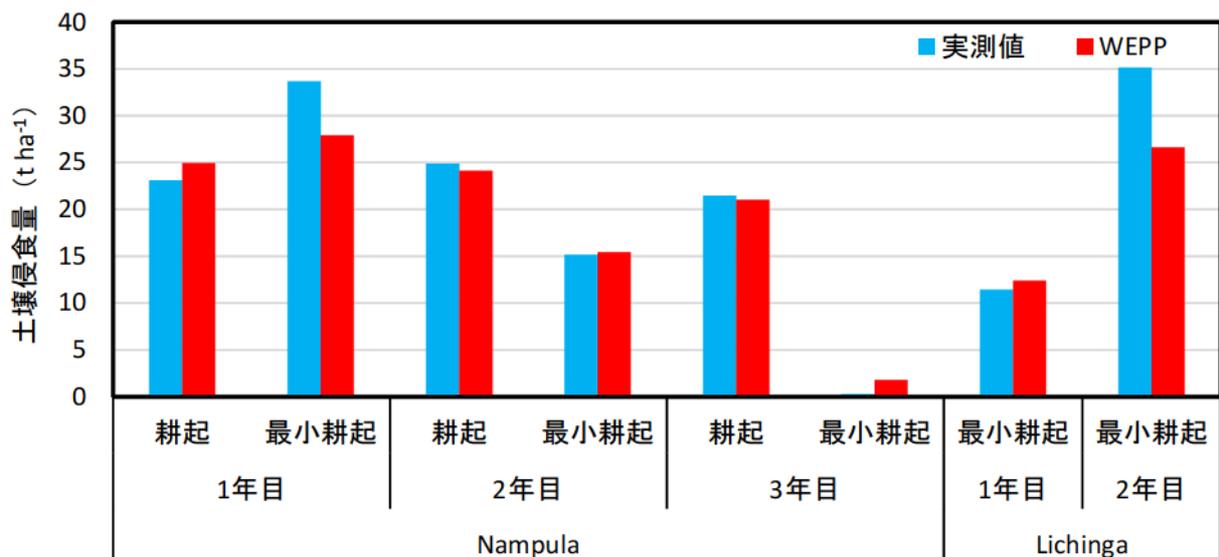


図 3-7 耕起区と最小耕起区の1作期ごとの土壤侵食実測値と予測値

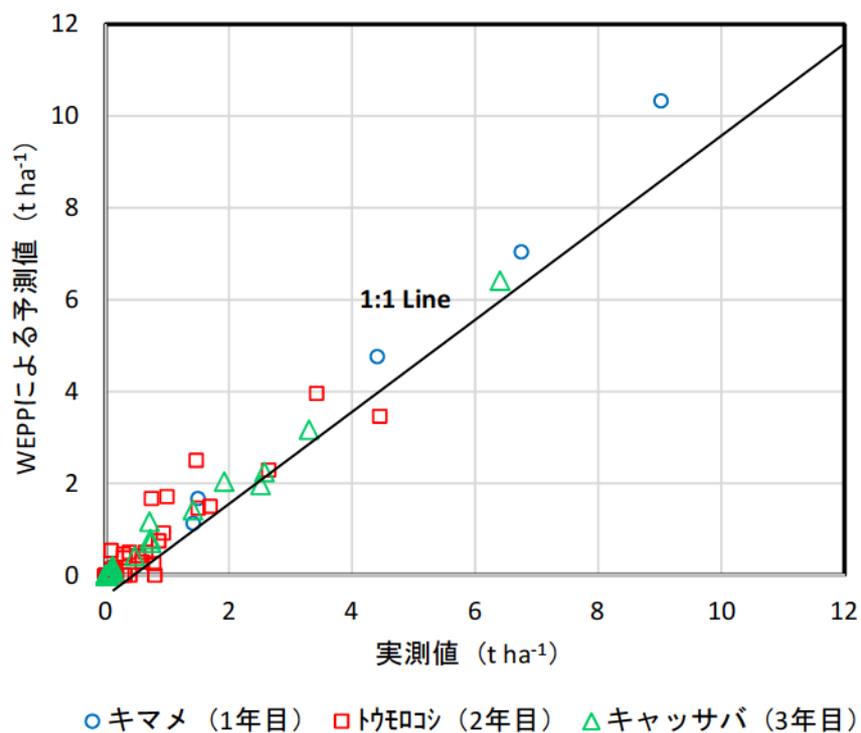


図 3-8 Nampula の耕起区における 1 日ごとの土壤侵食実測値と予測値の関係

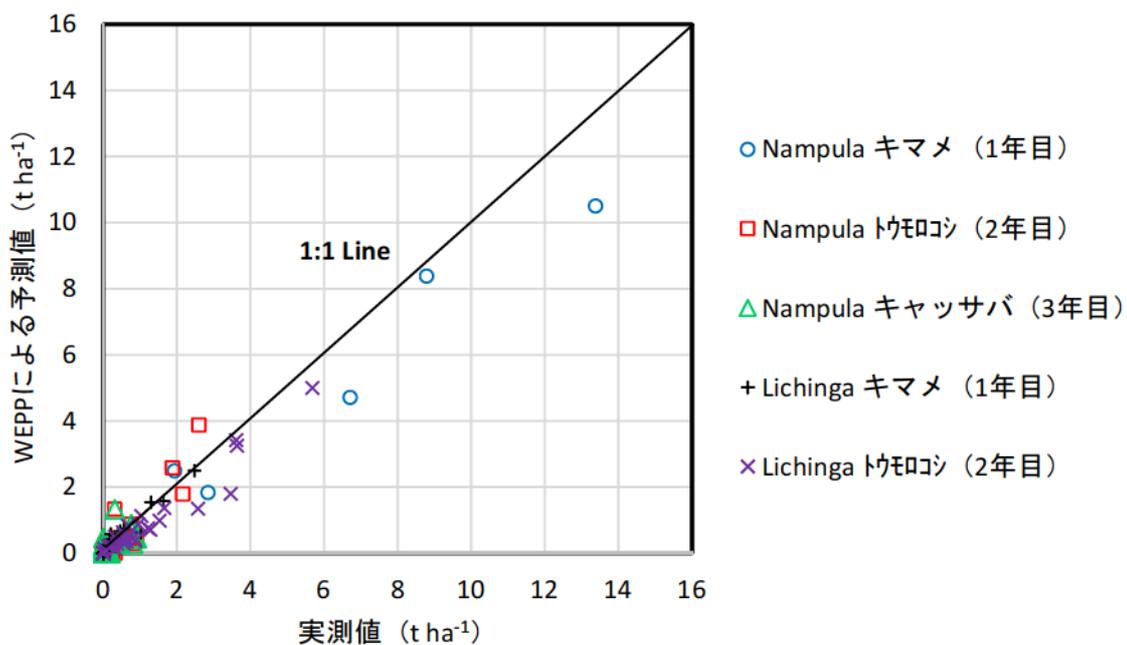


図 3-9 最小耕起区の土壤侵食実測値と予測値の関係

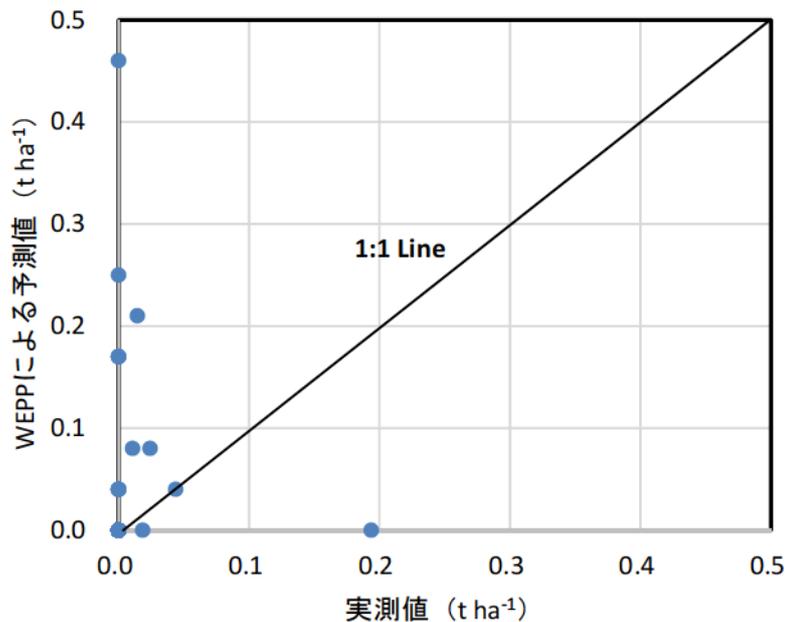


図 3-10 Nampula の 3 年目の試験における 1 日ごとの最小耕起区の土壤侵食実測値と予測値の関係

(2) 作物残渣マルチ

各作物残渣マルチ区における作期ごとの土壤侵食量の実測値は WEPP モデルによる実測値と概ね一致し、耕起区（マルチなし）と比べダイズ残渣マルチを除く作物残渣マルチ区で土壤侵食量が削減された傾向が再現された（図 3-11, 3-12）。また、1 日ごとの土壤侵食量の実測値と予測値も概ね 1 対 1 で一致した（図 3-13）。ダイズ残渣マルチについては除草の際に土中に鋤き込まれて消失してしまい、土壤侵食削減効果が得られなかったことから、WEPP によるシミュレーションにおいて 1 回の除草によって地表面の有機物の 85% が土中に鋤き込まれる設定としたところ、概ね実測値と同じ予測値を得ることが出来た。一方で、図 3-14 は図 3-13 から 1 日ごとの土壤侵食実測値と予測値がほとんど一致しなかった Nampula の 2 年目の最小耕起+キマメ残渣マルチ区と 3 年目の耕起+トウモロコシ残渣シマルチ区を抜き出したものであるが、これらの区では土壤侵食がほとんど起こらなかったことから、僅かな土壤侵食量の推定には WEPP モデルは適していない可能性が考えられた。

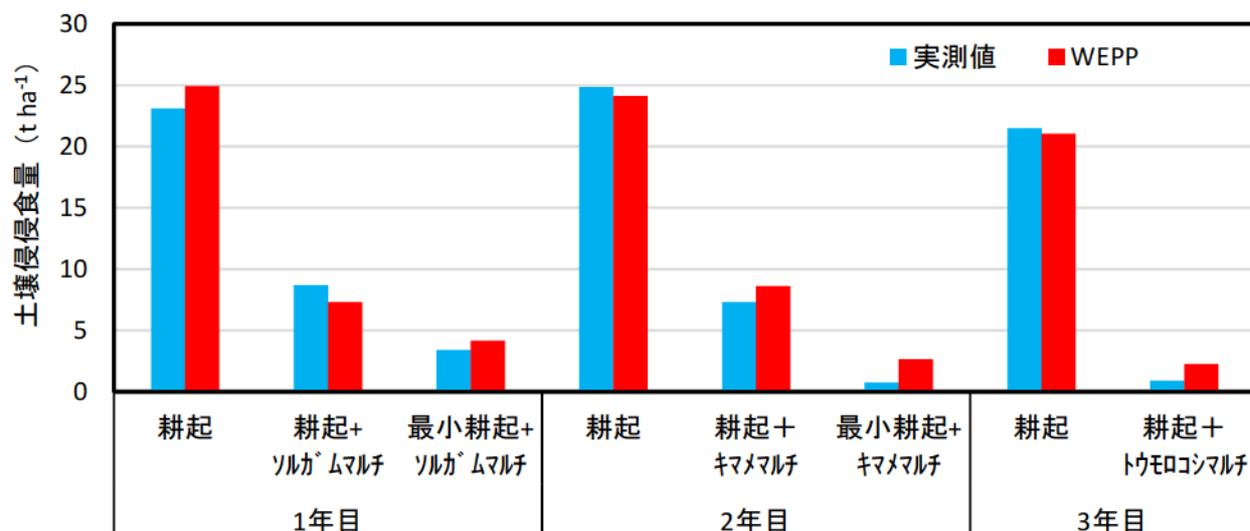


図 3-11 Nampula における作物残渣マルチ区の 1 作期ごとの土壤侵食実測値と予測値

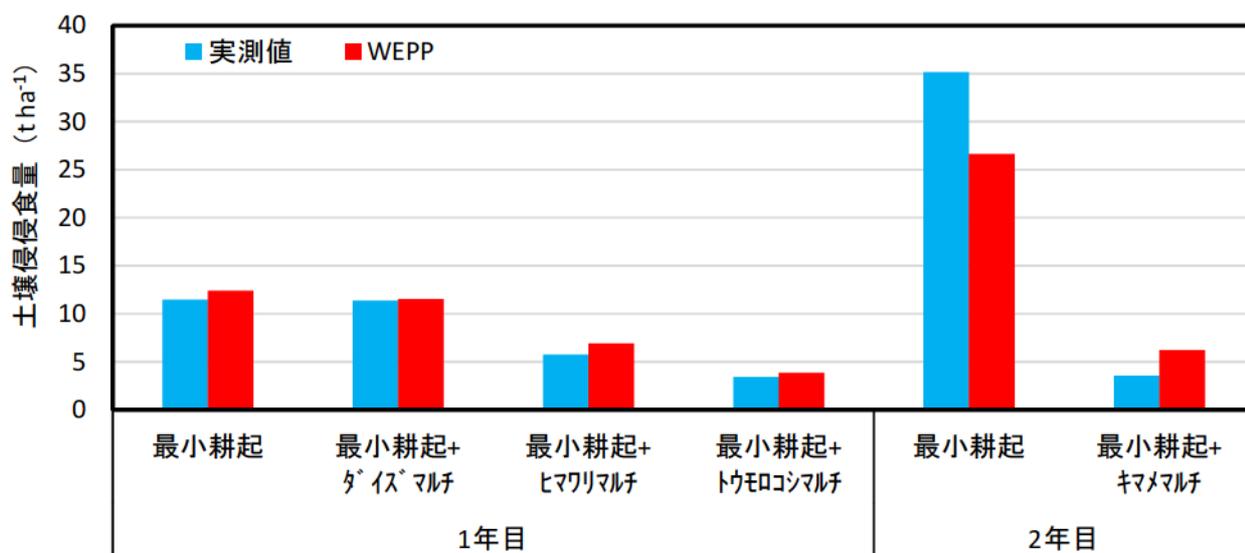


図 3-12 Lichinga における作物残渣マルチ区の 1 作期ごとの土壤侵食実測値と予測値

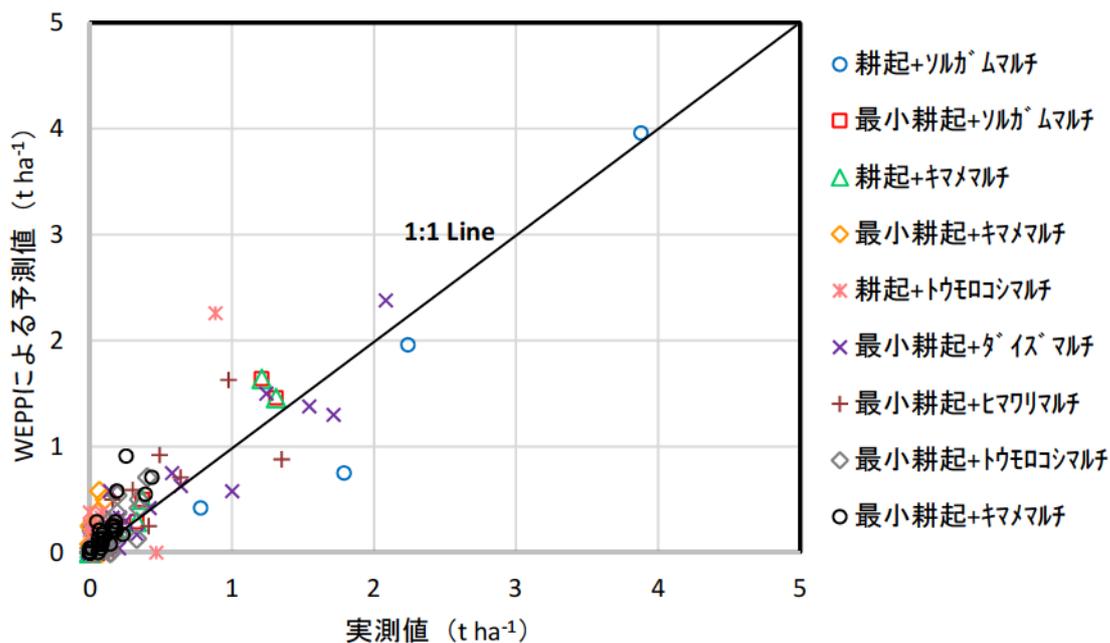


図 3-13 作物残渣マルチ区の土壤侵食実測値と予測値の関係

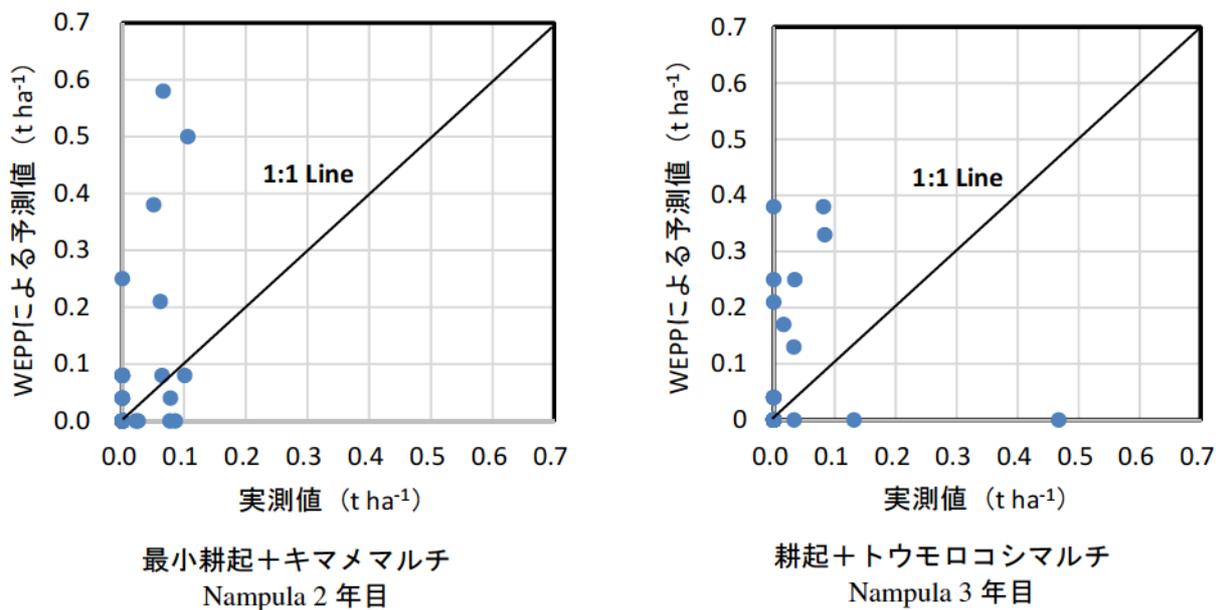


図 3-14 実測値と WEPP による予測値が一致しなかった処理区

(3) ベチベル草植生帯

ベチベル草植生帯ではベチベル草が成長すると分けつにより苗の間の隙間が埋まり、植生帯の手前に土壌が溜まる様になる。しかし、WEPPで斜面を直線にした状態でベチベル草の植生帯を設置してもその様な現象が再現されなかったことから、植生帯を設置した位置の幅30cmの傾斜を0.01%に設定したところ、Lichingaの試験では実測値と予測値が概ね一致した(図3-15)。しかし、最小耕起の予測値が実測値を下回っていることからベチベル草の植生帯の土壤侵食軽減効果はやや過小評価されていると言える。実測値から算出されるベチベル草植生帯による土壤侵食削減率は77%であるが、予測値から計算した削減率は62%であった。また、1日ごとの土壤侵食実測値と予測値の相関は最小耕起や残渣マルチ程良好ではなく、土壤侵食量を過大に評価する傾向が認められた(図3-16)。一方、Nampulaの試験では、雑草が繁茂したため、最小耕起区では土壤侵食がほとんど起こらなかったことから、同様に雑草が繁茂した最小耕起+ベチベル草植生帯区でも土壤侵食はほとんど起こらず、WEPPモデルによってその効果を評価することは出来なかった。

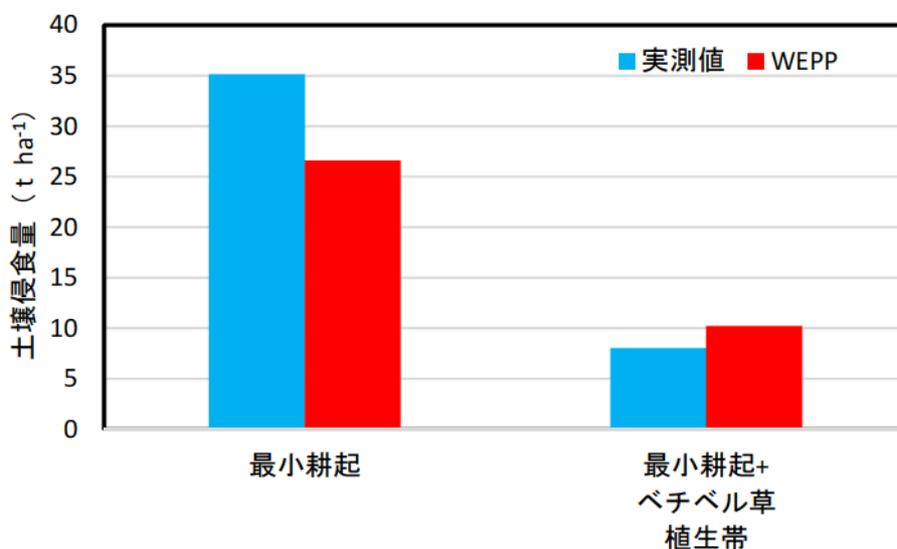


図 3-15 Lichinga におけるベチベル草植生帯区の土壤侵食実測値と予測値

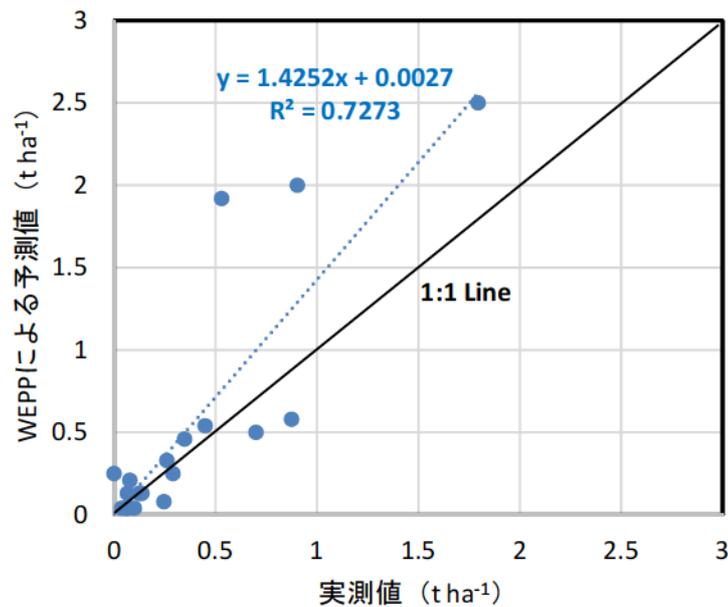


図 3-16 ベチベル草植生帯区の土壤侵食実測値と予測値の関係

(4) キマメのアレイクロッピング

キマメのアレイクロッピングは WEPP のシステムの制約上、斜面を 10 以上に区切ることが出来ないため、斜面長を 3.2m としてシミュレーションを行った。通常、斜面が長いほど斜面の下部で地表面を流れる水の流速が早くなり土壤侵食の量が大きくなることから、実際の斜面長が 24m であるところを斜面長 3.2m でシミュレーションしたした場合、土壤侵食量は過小評価されるものと考えられたが、結果はむしろ過大評価となった (図 3-17)。これは、土壤侵食量を実測した圃場の傾斜が 3.5% と緩やかであったことに加え、アレイクロッピングによって圃場に残されたキマメの植物体と選定されたキマメの枝葉により地表面を流れる水の流速が抑えられたことによるものではないかと推察される。また、シミュレーションを行う際の斜面長を 3.2m に設定したところ、WEPP モデルの 1 日ごとの土壤侵食量の予測結果が 0.31 t ha^{-1} 刻みとなってしまい予測精度が著しく低下してしまった (図 3-18)。このことから、WEPP モデルのシステムの制約上、斜面長を極端に短く設定せざるを得ない様な技術は WEPP でのシミュレーションに適さないと言える。一方、実測値による比較では、キマメのアレイクロッピングはキマ

メ残渣マルチとほぼ同程度の効果が得られたことから、WEPPでシミュレーションを行う際はキマメ残渣マルチとしてシミュレーションを行うことである程度代替が可能と考えられた。

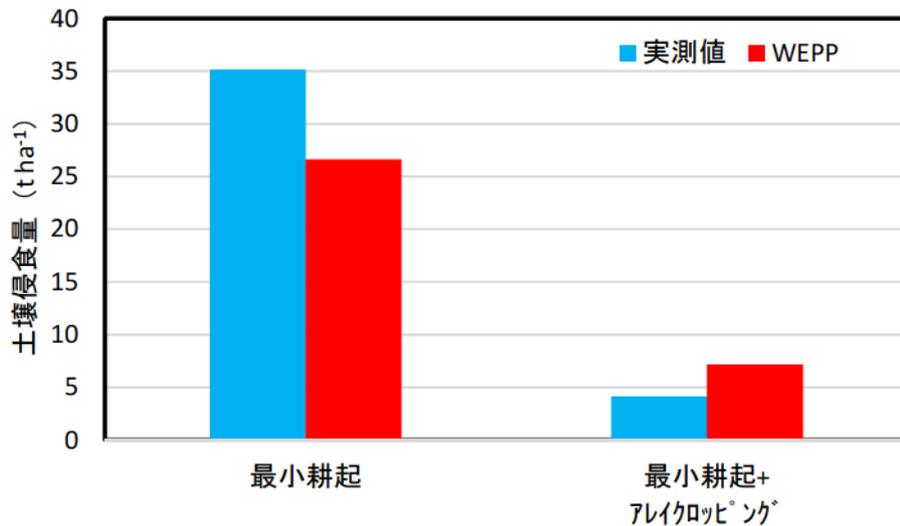


図 3-17 キマメのアレイクロッピング区の土壌侵食実測値と予測値

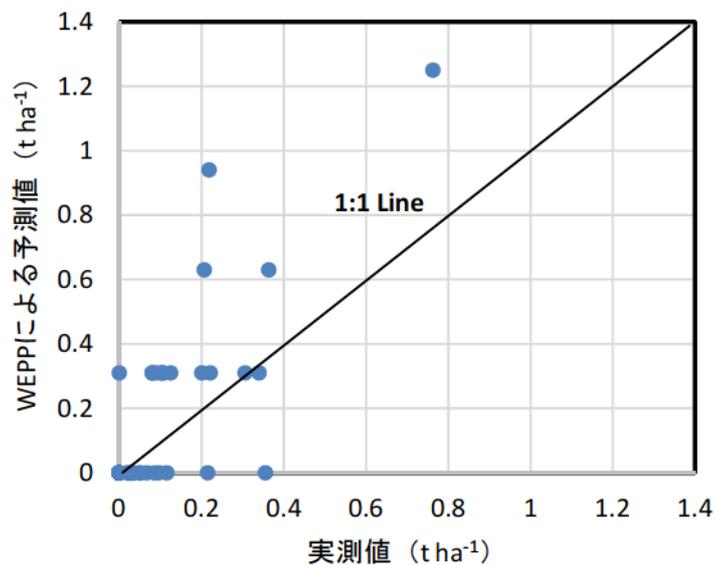


図 3-18 キマメのアレイクロッピング区における土壌侵食実測値と予測値の関係

(5) 全ての処理区の土壤侵食実測値と予測値の比較

全ての処理区の作期ごとの土壤侵食量の実測値と WEPP モデルによる予測値は図 3-19 の通り概ね一致した。実測値と予測値の関係性は $y=0.8651x+2.1253$ となり、土壤侵食量が 15t ha^{-1} 以下では若干過大評価、 15t ha^{-1} 以上では過少評価となる傾向が認められたが、その関係性は概ね 1 対 1 となった。また、1 日ごとの土壤侵食量の予測値についても図 3-20 の通り概ね一致した。実測値と予測値の関係性は $y=0.9134x+0.0082$ となり、全体的に若干過少評価となる傾向が認められたが、その関係性はほぼ 1 対 1 となった。このことから、WEPP モデルは対象地域における土壤侵食量の推定に適合可能と考えられる。

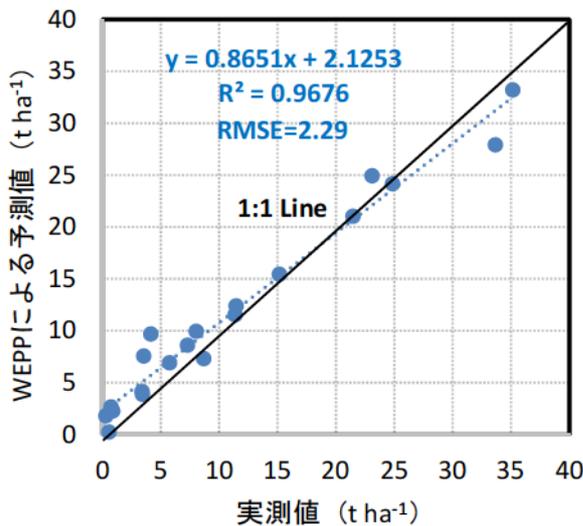


図 3-19 全ての処理区の作期ごとの土壤侵食の実測値と WEPP モデルによる予測値の関係

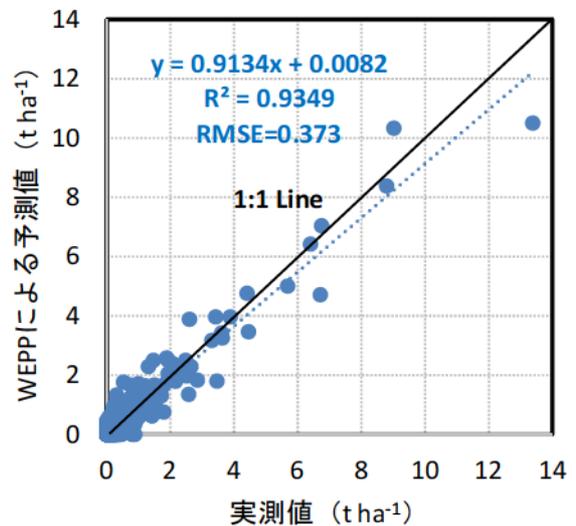


図 3-20 全ての降雨イベント毎の土壤侵食の実測値と WEPP による予測値の関係

3.4 WEPP モデルと SLEMSA モデルの比較

オリジナルの SLEMSA モデルとモザンビーク版の SLEMSA モデルではオリジナルの SLEMSA モデルの方が予測精度が良好であったことから、Nampula の耕起区および Lichinga の最小耕起区の土壤侵食実測値と WEPP モデルによる予測値、オリジナルの SLEMSA モデルによる予測値を比較した(図 3-21)。3.2.3 に記述したように SLEMSA モデルは雨量が $1,250\text{mm}$ 以上の場合、土壤侵食量を極端に過大評価す

る傾向があった。一方、WEPP モデルによる予測値は、雨量に関わらず SLEMSA モデルによる予測値よりも実測値とよく一致したことから、WEPP モデルは SLEMSA モデルより対象地域における土壌侵食量の予測に適したモデルであると言える。

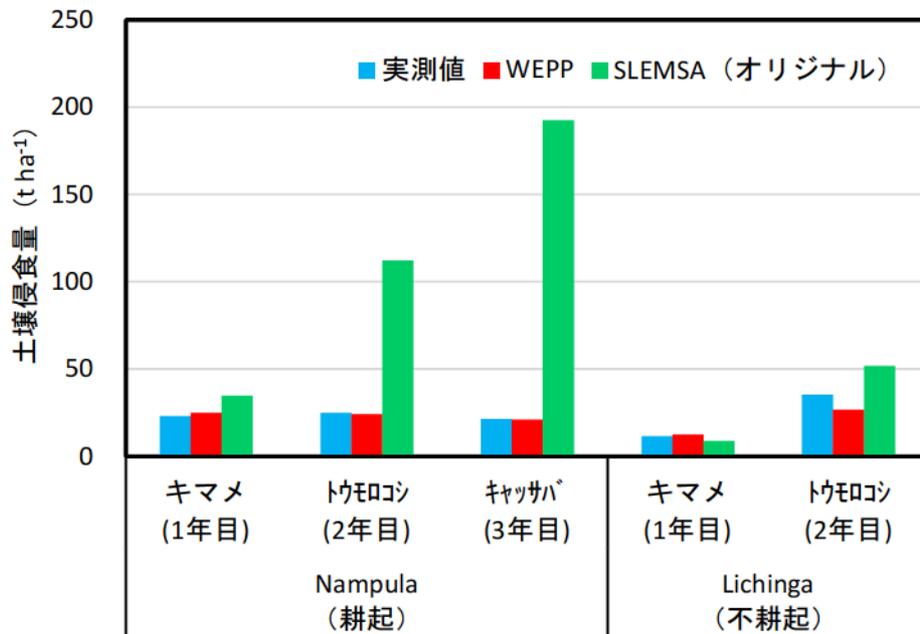


図 3-21 WEPP モデルと SLEMSA モデルの予測値の比較

3.5 小括

第3章では、第2章の圃場試験で得られたデータを用いて圃場試験で得られた実測値と SLEMSA モデルおよび WEPP モデルによる土壌侵食量の予測値の比較を行い、それぞれのモデルの現地適合性について検討を行った。

Elwell (1978) によって開発されたオリジナルのモデルについては、1,250mm 以下の降雨条件では予測値が実測値と概ね一致した。但し、雨量が 1,250mm 以上の条件では、土壌侵食量を過大に評価してしまう傾向が確認されたことから、使用にあたってはこの点に注意が必要である。モザンビークの雨量マップによると、雨期の雨量が 1,200mm を超える地域が 1 割程度存在するが、それ以外の地域であればオリジナルの SLEMSA モデルを用いて土壌侵食ハザードマップを作成することに大きな問題はないと考え

られる。しかし、既存の土壤侵食ハザードマップの作成に用いられたモザンビーク版 SLEMSA モデルは、降雨エネルギーを過大に評価していると考えられたことから、オリジナルの SLEMSA モデルを用いて既存の土壤侵食ハザードマップを更新した方が良いと考えられた。

WEPP モデルによる土壤侵食の予測精度は SLEMSA モデルよりも高く、WEPP モデルによる予測値は多くの処理区の実測値と概ね一致したことから対象地域に適合可能と考えられた。但し、WEPP モデルでは、かなり詳細に作物・圃場管理条件を設定できるものの、シミュレーションの際に圃場を最大 10 まですしか区切ることが出来ず、作物・圃場管理ファイルで複数の作物を設定し、同じ時間軸でシミュレーションすることも不可能である。そのため、間作や混作による土壤侵食のシミュレーションには不向きである。先進国では機械化や作業効率の関係から単作が主流となっているが、開発途上国では病虫害や気候変動によるリスクの分散・低減のために間作や混作が広く行われていることから、これらの技術の効果を適切に評価するための設定を可能にすることが出来れば、WEPP モデルは開発途上国においてより有効な土壤侵食予測モデルになると考えられる。

第4章 土壌侵食対策技術導入指針の作成

4.1 緒言

世界の土壌侵食が問題となっている地域では、土壌侵食対策マニュアルや土壌侵食防止のための行動計画等が作成されているが、土壌侵食対策マニュアルに各技術の土壌侵食削減効果効果の程度やどの様な技術をどの様な条件の農地に導入すればよいかといった目安を数値で示した農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を導入するための指針が記載されている事例は見当たらない。また、土壌侵食防止のための行動計画に地域ごとに推奨される対策技術が記載されていたとしても、個別の農家の圃場の状況はそれぞれで異なっていることから、どの技術を導入すれば十分な土壌侵食防止効果を得ることが出来るかを検討することは困難である。先進国であれば、普及員が土壌侵食対策技術の効果を評価可能な土壌侵食予測モデルを用いて、農家に対して適切な対策技術の導入を支援することも可能であるが、途上国の普及員はパソコンを使用できない環境にあることが多いことから、土壌侵食予測モデルを直接用いた支援を行うことは困難である。

モザンビークでは普及員の人数と普及員が担当地域まで足を運ぶための交通手段（公共交通機関や道路、普及員用バイク等）の整備が不十分なことから農業普及サービスが行き届いておらず、この問題を解決するため、政府は農民間普及を推進している（IFAD, 2016）。しかし、土壌侵食対策技術の普及のために農家にパソコンが必要な土壌侵食予測モデルの使用方法を教えることは非現実的である。技術を農民間普及を通じて広範囲の農家に伝えるためには、農家が現実的に利用可能なツールを作成する必要があり、そのためには、農家が間接的に土壌侵食予測モデルによる解析結果を活用できるよう、解析結果を取り纏め、簡易な圃場調査を通じて農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を選択できるような指針を作成することが有効であると考えられる。

そこで、本章では、第2章で実施した土壌侵食対策技術の評価結果と第3章で対象地域への適合性が確認された WEPP モデルを用いて、簡易な圃場調査を通じて農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対

策技術を導入するための土壤侵食対策技術導入指針を作成することを目的にシミュレーションを行った。

4.2 土壤侵食対策技術導入指針の作成方法

米国農務省（2006）は土壤生成の速度を考慮した場合、土壤の種類にもよるが、持続的な作物生産を維持するためには土壤侵食を年間 $4.9\text{--}12.4\text{ t ha}^{-1}$ に抑える必要があるとしている。また、SLEMSA モデルの土壤侵食量のカテゴリー分類では、年間 10 t ha^{-1} までが“低”に分類されている。そこで、本研究では、年間の土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑えられる土壤侵食対策技術の組み合わせを決定するためのシミュレーションを WEPP モデルを用いて行った。つまり、グラフの横軸に傾斜、縦軸に WEPP モデルで計算された土壤侵食予測値を入力し、得られた回帰式から土壤侵食予測値が 10 t ha^{-1} となる傾斜を算出した（図 4-1）。先ず、土壤侵食対策技術なし（耕起）で傾斜が何%を超えると土壤侵食量が 10 t ha^{-1} を超え、土壤侵食対策技術の導入が必要になるかを算出し、次いで各技術の効果を耕起区（Control）との比較で示した。そして最後に、検証した技術の効果の比較と技術の組み合わせ例を示す。

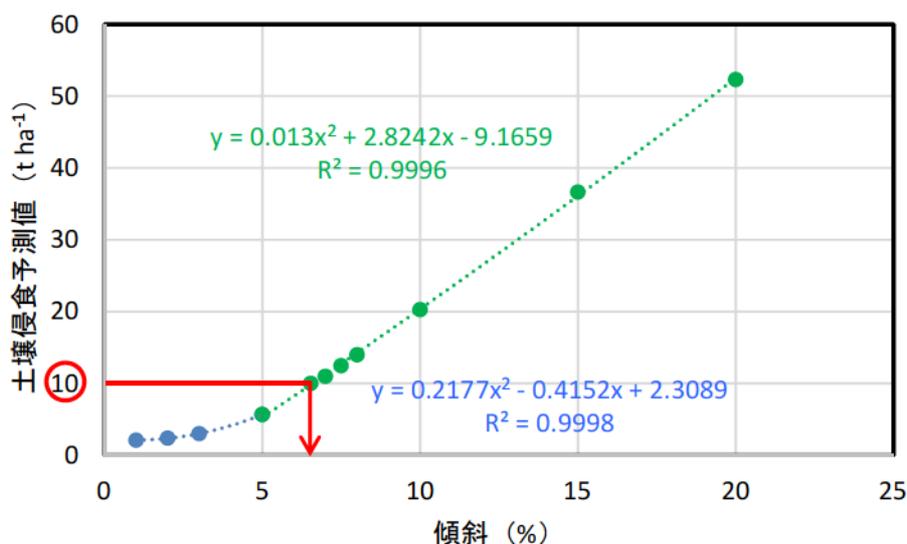


図 4-1 土壤侵食予測値が 10 t ha^{-1} となる傾斜の算定方法の例

WEPP モデルでのシミュレーションに使用したデータは以下の通りである。

(1) 斜面データ

対象地域の農家の99%以上は小規模農家である。小規模農家は1ha前後の農地で作付を行っており、1筆当たりの圃場面積は1haをさらに何等分化した小面積となる。そのため、斜面の大きさは、斜面50m、幅50mに設定し、傾斜を変化させて各技術によって土壤侵食を年間10t ha⁻¹以内に抑えることの出来る条件を検討した。また、ベチバル植生帯の設置場所は斜面末端の30cmとし、この部分のみ傾斜を0.01%に設定した。

(2) 気象データ

モザンビークでは、気象・地形によって図4-2、表4-1の様に農業生態ゾーニングマップが作成されている。対象地域は、その約9割がゾーンR7とR10に区分され、第2章で圃場試験を行ったNampulaとLichingaの国立農業試験場はそれぞれ、ゾーンR7、R10に相当することから、Nampulaの気象データをR7、Lichingaの気象データをR10の代表値として用いることとした。また、それぞれのゾーンの雨期の雨量は、R7は800-1000mm、R10は1200mm以上となっていることから、Nampulaでは雨量データがこの範囲にある1年目のデータを、Lichingaでは2年目のデータをそれぞれのゾーンの代表値として使用した。

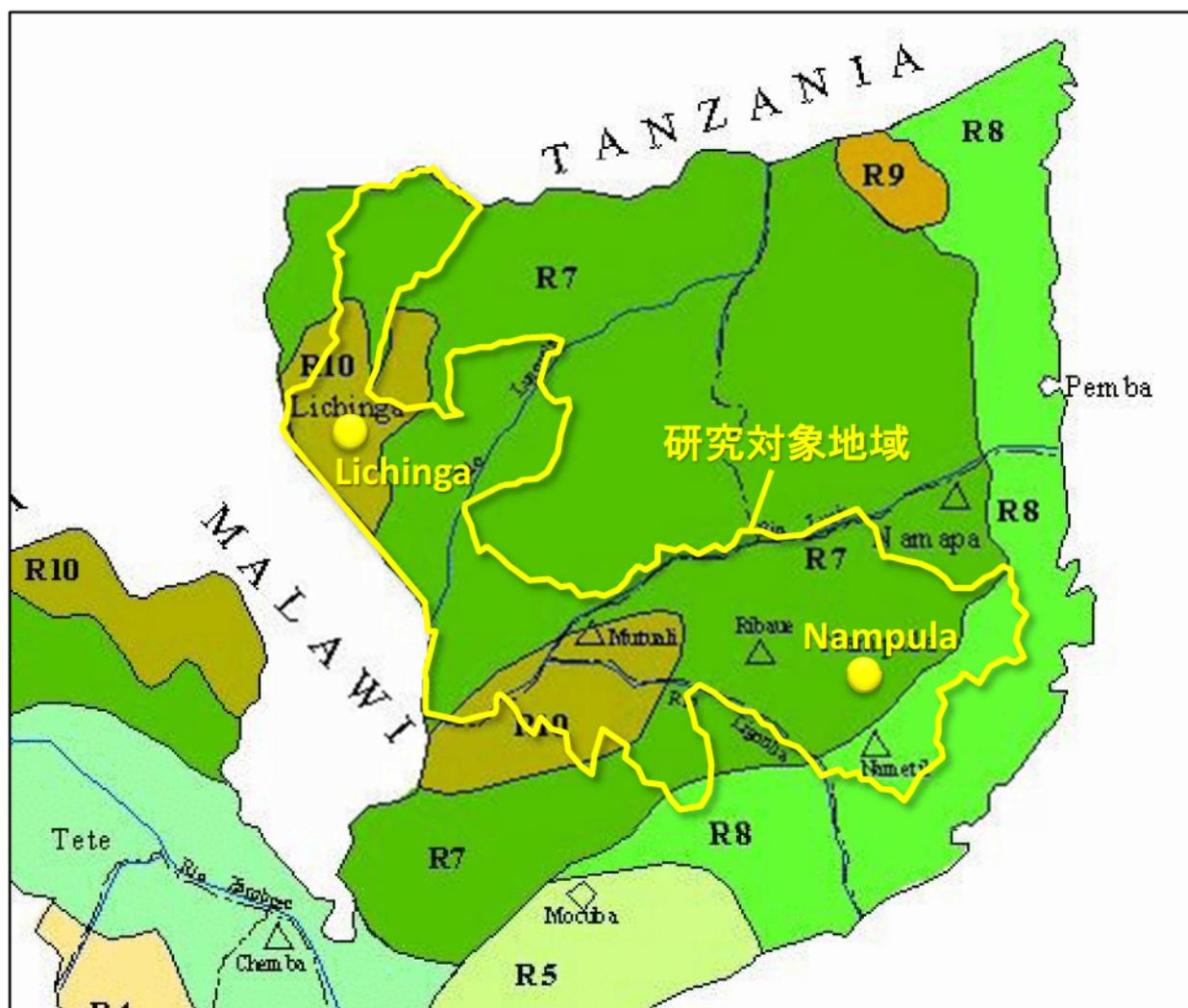


図 4-2 モザンビークの農業生態ゾーニングマップ

表 4-1 農業生態ゾーン R7 および R10 に属する地域

農業生態ゾーン	郡
R7	Sanga 北・中部, Ngauma 東部, Majune, Mandimba, Cuamba, Mecanhelas, Alto Molocue, Lalaua, Ribaue, Mecubri, Muecate, Murrupula, Monapo, Meconta, Mogovolias, Rapale
R10	Sanga 南部, Ngauma 西部, Lichinga, Chimbila, Gurue

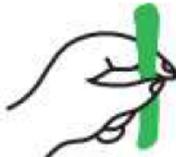
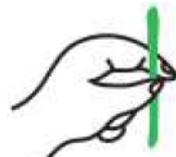
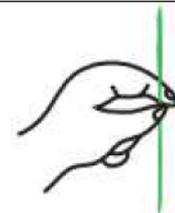
(3) 土壌データ

JICA モザンビーク国ナカラ回廊農業開発研究・技術移転能力向上プロジェクト業務進捗報告書（第3年次終了時）では、ゾーン R7 および R10 に相当する地域で2箇所ずつ土壌断面調査を行った結果、いずれの地域でも深さ約 20-40cm 以降の層が強粘質となっていたことが報告されている。また、本研究で試験を行った圃場も 20-30cm 以降の深さの層が強粘質となっていた。このことから、深さ 30cm 以下の下層土についてはゾーン R7, R10 共に強粘質に設定した。また、日本で用いられている土質区分と国際法による土性の判定基準から各土性区分の砂と粘土の範囲の中間値の平均値を算出し、その値を土質ごとの代表値として設定した（表4）。この土質区分は表4-3の方法によって農家でも圃場で容易に判別が可能であることから、この4つの土質区分ごとに土壌侵食対策指針を作成することとした。

表 4-2 土質ごとの代表値（平均値）

土質区分	土性区分	粘土 (%)			砂 (%)		
		範囲	中間値	平均値	範囲	中間値	平均値
砂質	S	0-5	2.5	5	85-100	92.5	91.3
	LS	0-15	7.5		85-95	90	
壤質	SL	0-15	7.5	7.5	65-85	75	51.7
	L	0-15	7.5		40-65	52.5	
	SiL	0-15	7.5		0-55	27.5	
粘質	SCL	15-25	20	20	5-85	45	37.5
	CL	15-25	20		30-65	47.5	
	SiCL	15-25	20		0-40	20	
強粘質	SC	25-45	35	44.4	55-75	65	35
	LC	25-45	35		10-55	32.5	
	SiC	25-45	35		0-30	15	
	HL	45-100	72.5		0-55	27.5	

表 4-3 触感による土性の判定方法

砂質	壤質	粘質	強粘質
ほとんど砂だけを感じる。 固めることが出来ない。	粘りが少なく、ザラザラした砂を強く感じる。 鉛筆くらいの太さに出来る。	ある程度砂を感じるが、 壤質程ではなく粘りもかなりある。 マッチ棒くらいの太さに出来る。	粘りが強く、ヌルヌルしている。 太さ 1mm 以下のコヨリ状に出来る。
			

Source: JA 全農 (2008), 新潟県農林水産部 (2001)

また、CEC と有機物含量の値については、対象地域から採取した土壌 173 点 (図 4-3) を分析して得られた粘土含量との回帰式 (図 4-4, 4-5) に表 4-1 に示した土質ごとの粘土の代表値を入力して算出した (表 4-4) .

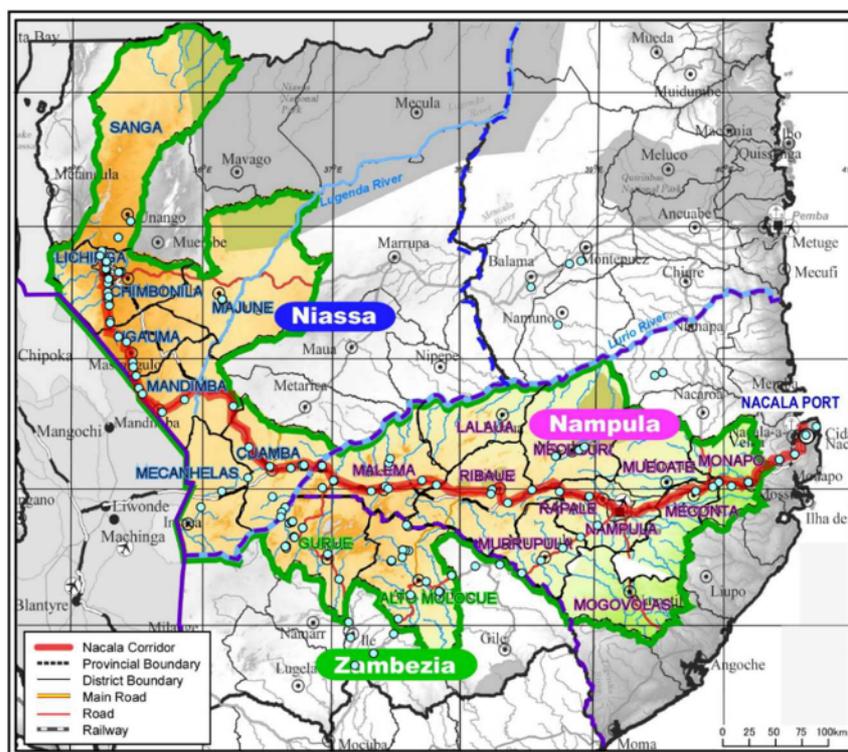


図 4-3 土壌サンプル採取位置図

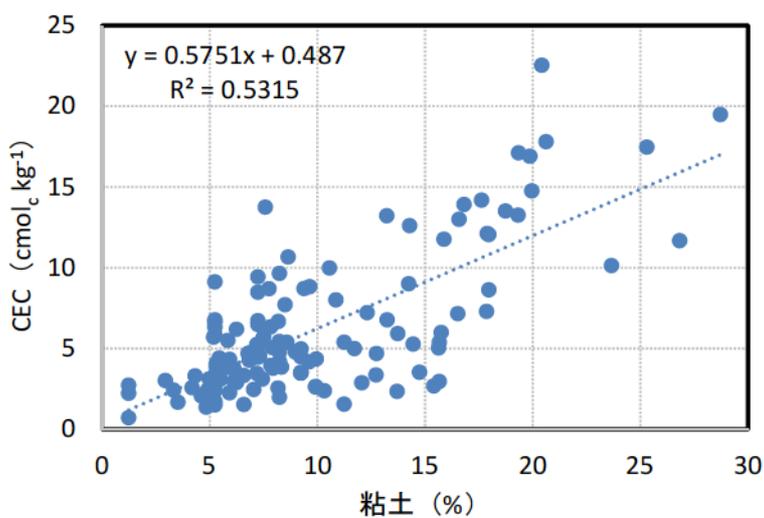


図 4-4 粘土含量と CEC の関係

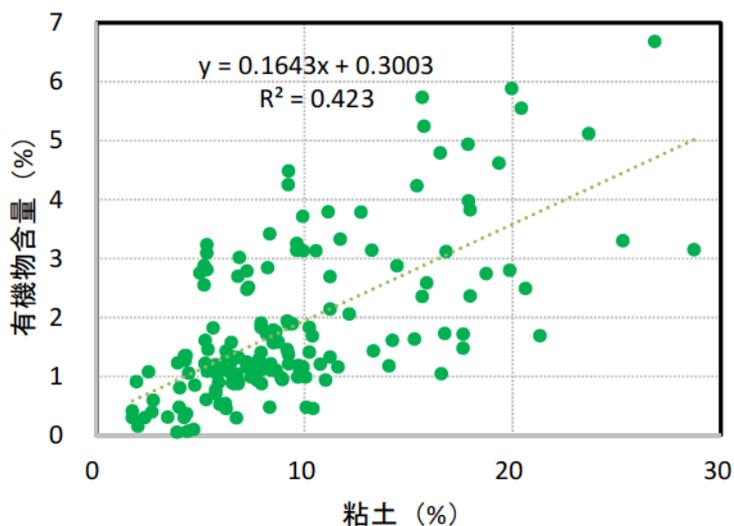


図 4-5 粘土含量と有機物含有量の関係

表 4-4 粘土との回帰式から求めた土質ごとの CEC と有機物含量

土質	CEC (meq 100g ⁻¹)	有機物含量 (%)
砂質	3.36	1.12
壤質	4.80	1.53
粘質	11.99	3.59
強粘質	26.02	7.53

(4) 土壤・作物管理データ

対象地域では様々な作物が栽培されており、輪作の順序も生産者によって異なるため、シミュレーションの対象作物はモザンビークで最も広く栽培されているトウモロコシとした。本章の WEPP モデルによるゾーン R 7 の土壤侵食量のシミュレーションに使用した作物・圃場管理スケジュールを表 4-5 に示す。なお、一般的にゾーン R10 は R7 より気温が低く、栽培期間が長くなることから、R10 の作物・圃場管理スケジュールでは、耕起/残渣除去を 12/19/3→11/22/3、播種を 12/20/3→11/21/3、収穫を 4/30/4→5/10/4 に変更している。また、作物パラメータについては表 3-12, 3-13, 耕起に関わるパラメータについては表 3-14 の値を使用した。

表 4-5 WEPP に入力したゾーン R7 における各処理区の作物・圃場管理スケジュール

耕起

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/20/2	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

耕起+マルチ（被覆率 25%）

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/20/2	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

耕起+マルチ（被覆率 50%）

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/20/2	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Tillage	Tillage 10cm	Depth: 10.00 cm; Type: Pri
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

耕起+ベチベル草植生帯

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/1/2	Plant - Perennial	Vetiver Lichinga	Row Width: 30.00 cm; Does not senesce
12/9/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/10/3	Cut - Perennial	Vetiver grass	
12/10/3	Residue Addition	Vetiver grass	
1/20/4	Cut - Perennial	Vetiver grass	
1/20/4	Residue Addition	Vetiver grass	
2/20/4	Cut - Perennial	Vetiver grass	
2/20/4	Residue Addition	Vetiver grass	

最小耕起

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	Nampula Tillage	
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

最小耕起+マルチ

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/20/3	Residue Addition	Pigeon pea Mulch 25%	
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

最小耕起+マルチ+ベチベル草植生帯

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	Nampula Tillage	
12/1/2	Plant - Perennial	Vetiver grass	Row Width: 30.00 cm; Does not senesce
12/9/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/10/3	Cut - Perennial	Vetiver grass	
12/10/3	Residue Addition	Vetiver grass	
1/20/4	Cut - Perennial	Vetiver grass	
1/20/4	Residue Addition	Vetiver grass	
2/20/4	Cut - Perennial	Vetiver grass	
2/20/4	Residue Addition	Vetiver grass	

最小耕起+マルチ+ベチベル草植生帯+キマメのアレイクロッピング

Date (M/D/Y)	Operation Type	Name	Comments
1/1/1	Initial Conditions	After harvest of Maize	
12/20/2	Plant - Annual	Nampula Pigeon Pea	Row Width: 80.00 cm
7/25/3	Harvest - Annual	Nampula Pigeon Pea	
12/19/3	Residue Removal	Residue Removal	
12/20/3	Plant - Annual	Lichinga Maize	Row Width: 80.00 cm
12/20/3	Residue Addition	Pigeon pea Mulch 50%	
4/30/4	Harvest - Annual	Lichinga Maize	

4.3 結果および考察

4.3.1 耕起および最小耕起

農業生態ゾーン R7 および R10 における耕起区と最小耕起区の土壤侵食量と傾斜の関係をそれぞれ図 4-6～4-9 に示す。耕起区ではゾーン R7, R10 共に、壤質土、粘質土、強粘質土の土壤侵食量は同程度となった。また、ゾーン R7 の砂質土では他の土質と比べ土壤侵食量が著しく少なかったが、ゾーン R10 の砂質土では他の土質と比べおよそ 8%以下の傾斜では土壤侵食がやや多く、8%以上の傾斜では著しく少ない結果となった(図 4-6, 4-8)。一般的には粘土が多い程土壤侵食は多くなるが、壤質土、粘質土、強粘質土の土壤侵食量が同程度となったことは、表 4-4 に示したように粘土が多い程有機物含量が高くなるよう設定したことによるものである。図 4-10, 4-11 は有機物含量以外の条件を図 4-8, 4-9 と同じ設定とし、有機物含量の設定のみを WEPP で設定出来る下限値: 0.0000001%として算出した結果で、図 4-10 では有機物含量がほとんど影響しない同一条件であれば、粘土が多いほど土壤侵食量が大きくなることわかる。図 4-11 では強粘質土の土壤侵食量が粘質土以下となっているが、これは、WEPP の透水係数に関する計算式が粘土含量 40%を境に変化することから、計算式の変化が影響しているものと考えられる。実際に計算された土壤侵食量の変化を強粘質土と他の土質で比べると、粘土含量が唯一 40%以上に設定されている強粘質土では常に土壤侵食量が二次式的に増加している一方、その他の土壤は傾斜が 5%を超えた辺りから土壤侵食量が直線的に増加する様になっていることがわかる。

図 4-7 と図 4-8 を比較すると R7 では耕起から最小耕起に切り替えることで、壤質土、粘質土、強粘質土では土壤侵食が大幅に削減されるが、砂質土では土壤侵食量がわずかに増加する結果となった。砂質土では耕起から最小耕起に切り替えることによる受食性の低下効果(図 4-12, 4-13)が他の土質より小さく、流出水量の変化は砂質土で大きく最小耕起では耕起の約 2 倍となった(図 4-14)。また、最小耕起では耕起に比べてトウモロコシの生育(植被率)が悪化した(図 4-15)。これらのことから、砂質土壤では耕起から最小耕起に切り替えることによる受食性の低下効果よりも流出水量の増加とトウモロコシの生育(植被率)の悪化が土壤侵食量の変化に大きく影響し、土壤侵食量がわずかに増加したものと考えられる。ゾーン R10 では、耕起から最小耕起に切り替えることで、壤質土、粘質土、強粘質土では土壤侵食が大幅に削減される結果となったが、砂質土では土壤侵食の削減効果は極わずかではほぼ変化が

なかった。(図4-8, 4-9)。この結果の要因については、流出水量(図4-16)、トウモロコシの生育(植被率)(図4-17)、受食性(図4-18, 4-19)の変化を確認したが、土壤侵食量との関連性を見出すことが出来なかったことから、その要因は不明である。

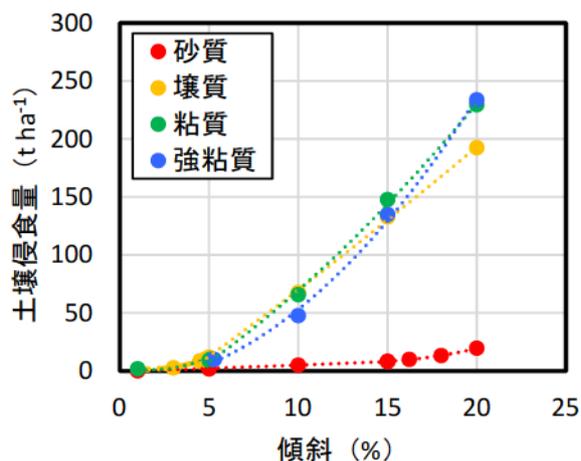


図 4-6 R7の耕起区における土質ごとの土壤侵食予測値と傾斜の関係

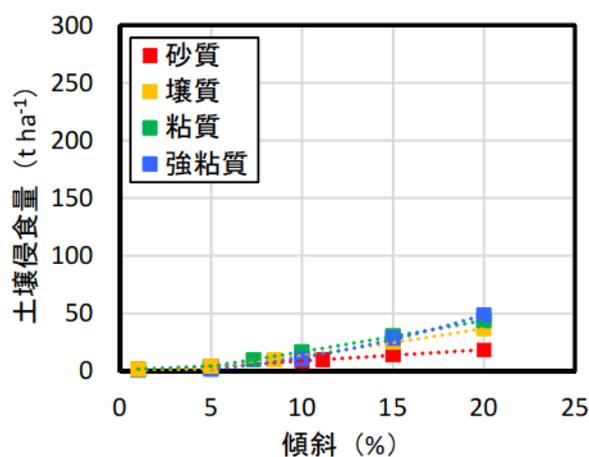


図 4-7 R7の最小耕起区における土質ごとの土壤侵食予測値と傾斜の関係

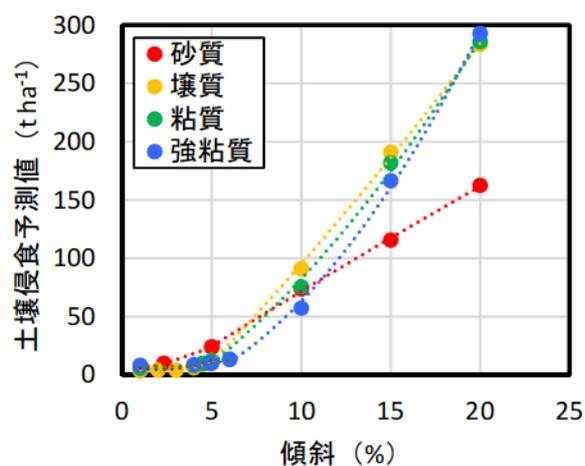


図 4-8 R10の耕起区における土質ごとの土壤侵食予測値と傾斜の関係

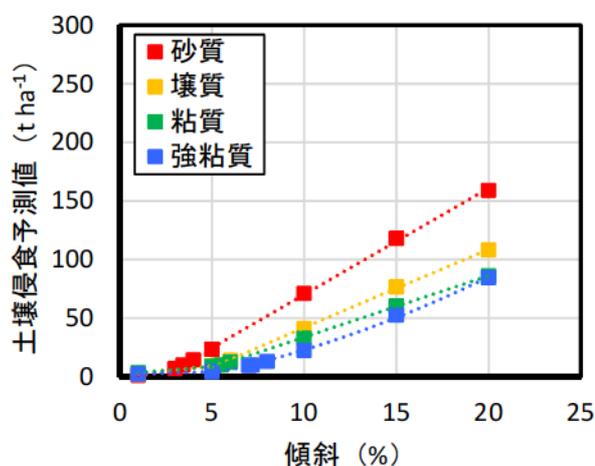


図 4-9 R10の最小耕起区における土質ごとの土壤侵食予測値と傾斜の関係

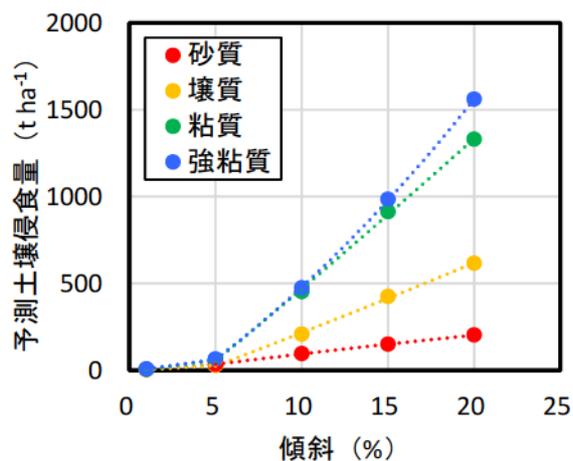


図 4-10 R10 の耕起区における有機物含量ゼロ条件での土質ごとの土壤侵食量と傾斜の関係

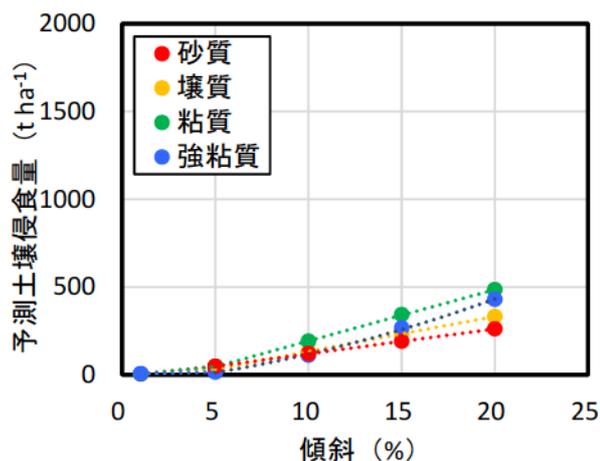


図 4-11 R10 の最小耕起区における有機物含量ゼロ条件での土質ごとの土壤侵食量と傾斜の関係

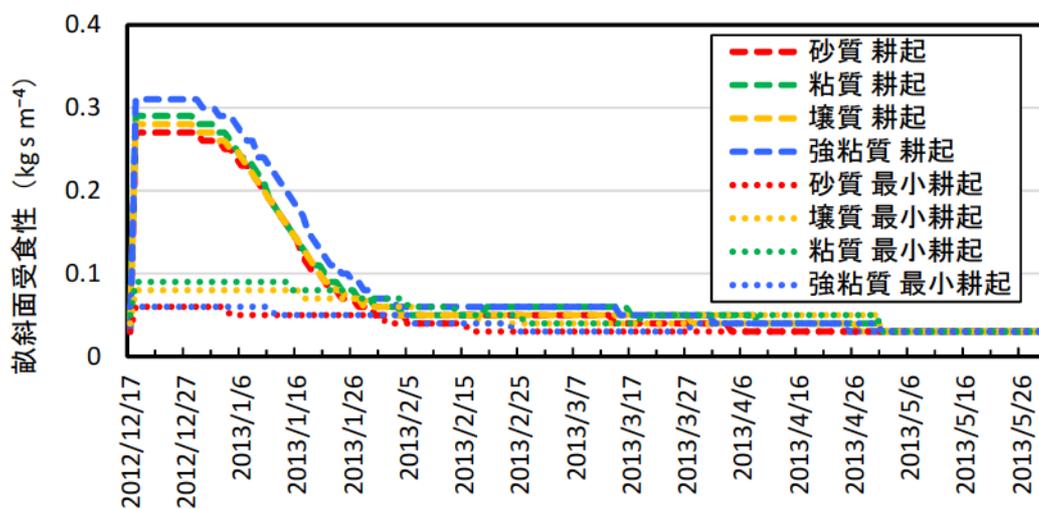


図 4-12 R7 における傾斜 15% 条件での畝斜面受食性

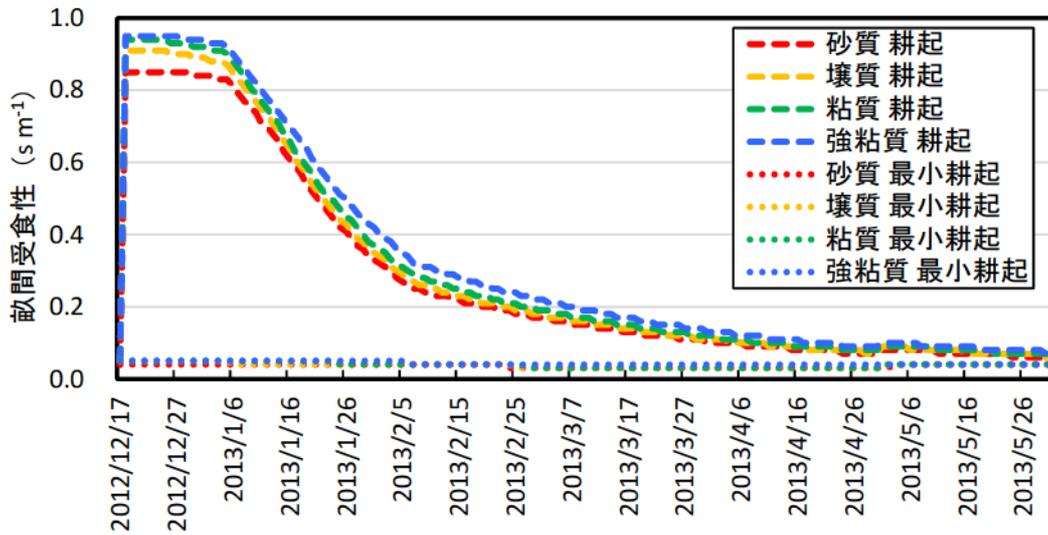


図 4-13 R7 における傾斜 15% 条件での畝間受食性

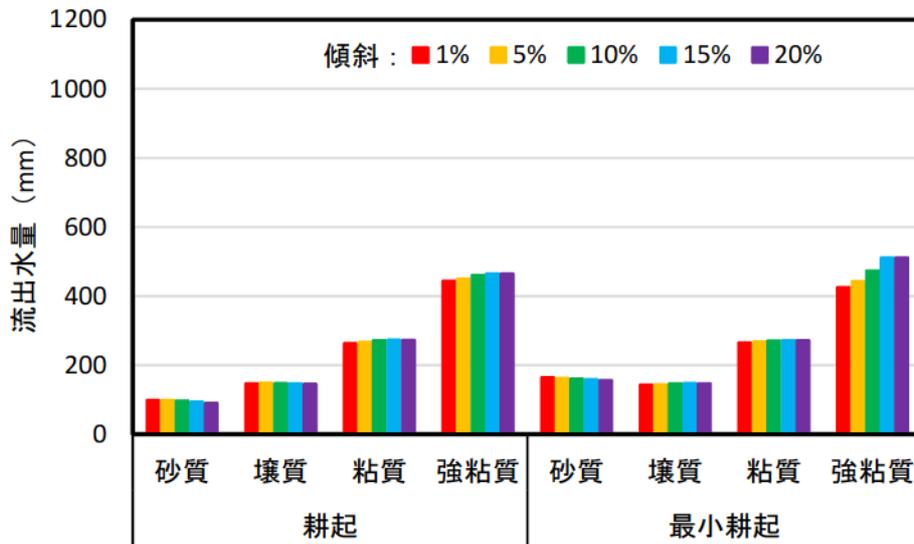


図 4-14 R7 における傾斜と流出水量の関係

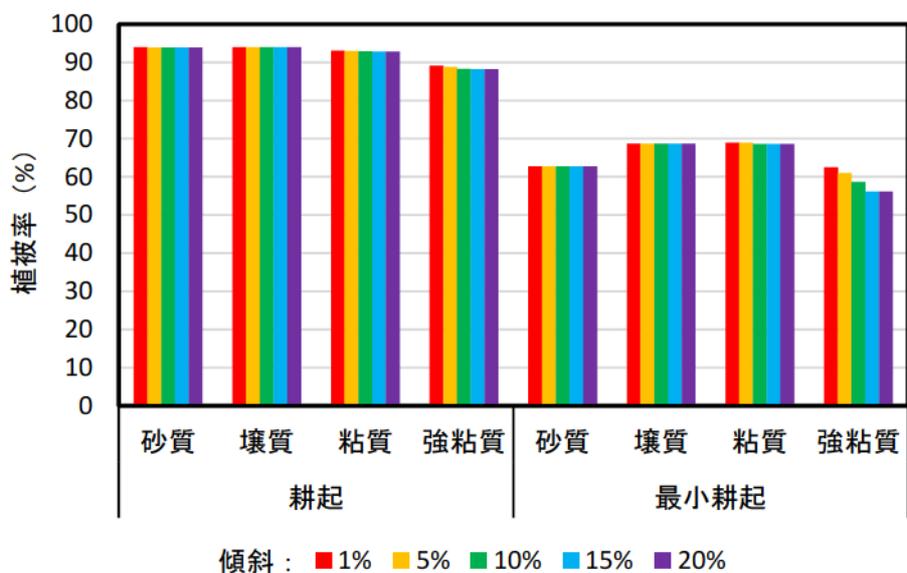


図 4-15 R7 における傾斜とトウモロコシの最大植被率の関係

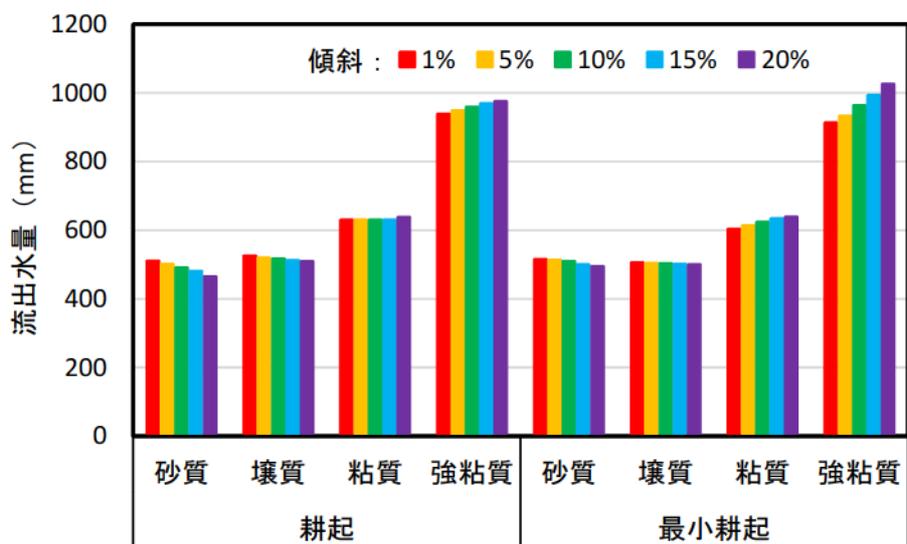


図 4-16 R10 における傾斜と流出水量の関係

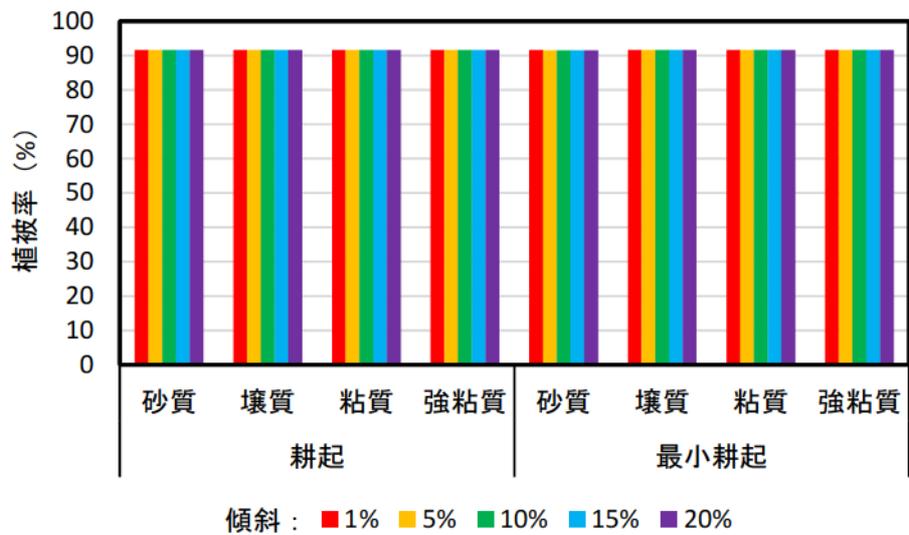


図 4-17 R10 における傾斜とトウモロコシの最大植被率の関係

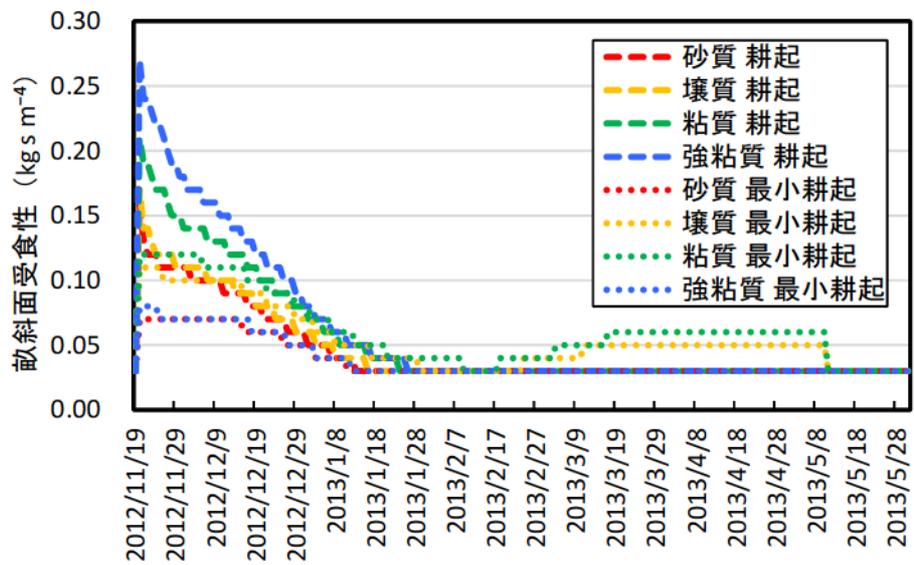


図 4-18 R10 における傾斜 15% 条件での畝斜面受食性

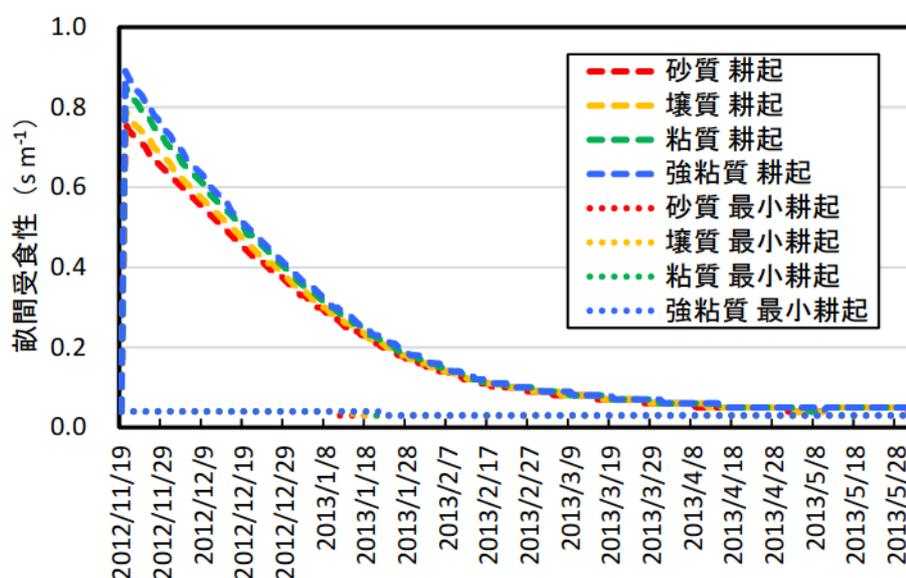


図 4-19 R10 における傾斜 15% 条件での畝間受食性

図 4-6～4-9 の傾斜と土壤侵食量の回帰式から求めた土壤侵食量を年間 10t ha^{-1} 以下に抑えられる傾斜を各ゾーン、土質、圃場管理ごとに表 4-6 に取り纏めた。この表中の傾斜の値を超えた場合、年間 10t ha^{-1} 以上の土壤侵食が発生すると考えられるため、他の対策技術と組み合わせることによって、土壤侵食量を削減する必要がある。また、この傾斜の値が高い程、土壤侵食が少ないことを意味している。

この結果を各農業生態ゾーンで比較するとゾーン R10 の方がゾーン R7 よりも傾斜の値が低くなっていることから、R7 よりも土壤侵食が起き易い地域であると言え、この結果はゾーン R10 の方が R7 より雨量が多いことを反映している。また、土質ごとの耕起と最小耕起の土壤侵食量を年間 10t ha^{-1} 以下に抑えられる傾斜の差は粘土の多い土質程高くなったことから、粘土の多い土質程、耕起から最小耕起に切り替えることによる土壤侵食削減効果が高いことが言える。

表 4-6 耕起および最小耕起によって土壤侵食量を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えることの出来る傾斜

農業生態ゾーン	土質	耕起	最小耕起	耕起と最小耕起の差
R7	砂質	16.2%	10.5%	-5.7%
	壤質	4.8%	7.3%	2.5%
	粘質	5.1%	8.5%	3.4%
	強粘質	5.3%	10.5%	5.2%
	平均	7.9%	9.2%	1.4%
R10	砂質	2.3%	3.4%	1.1%
	壤質	4.6%	5.3%	0.7%
	粘質	4.5%	5.5%	1.0%
	強粘質	4.9%	7.2%	2.3%
	平均	4.1%	5.4%	1.3%
全体平均		6.0%	7.3%	1.3%

※表中の数値は各圃場管理によって土壤侵食量を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えることの出来る傾斜を示す

4.3.2 作物残渣マルチおよびキマメのアレイクロッピング

作物残渣マルチは基本的に前作に栽培した作物の残渣を同じ圃場で用いることが労力/人件費削減の観点から推奨される。作物の種類にもよるが、一作で生産される作物残渣は比較的バイオマス生産量の多いトウモロコシでも $4t$ 程度（被覆率 35%相当）である。他に労力/人件費を増やさず圃場内で有機物残渣マルチの材料を得る方法としては、除草した雑草を持ち出さず、圃場内に残すことくらいであるが、収量を落とすことがないよう適切な時期に除草を行ってれば圃場内で多くの雑草をマルチの材料として得ることは困難であると考えられる。そのため、残渣による被覆率は、0%、25%、50%となるよう設定してシミュレーションを行った。また、残渣のパラメーターはキマメ残渣のものを用いた。キマメ残渣のパラメーターを用いてシミュレーションを行ったのは、2章の圃場試験において Lichnga における被覆率 27%のキマメ残渣マルチはキマメのアレイクロッピングとほぼ同等の効果を示したことから被覆率 25%のキマメ残渣マルチの効果は概ねキマメのアレイクロッピングによる効果に相当するものと考えられるからである。表 4-7 に以上の条件によるシミュレーションで得られた結果を示す。被覆率 25%のキマメ残渣マルチはマルチ無しに比べ、ゾーン R7 では平均 4.2%、R10 では 4.0%、土壤侵食を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えられる傾斜角度を増加させた。被覆率を 50%に増加させると土壤侵食を $10t\ ha^{-1}$ 以下

に抑えられる傾斜角度はさらに増加したが、その効果は単純に被覆率 25%の 2 倍とはならず、半分以下となった。Lal (1998) および Donjatee and Tingsanchali (2016) は稲わらやベチベル草のチップをマルチの材料とし、施用量を段階的に増やして土壤侵食量の削減効果を検証したところ、施用量を増やすほど土壤侵食量は減少したが、マルチの量が増えるにつれてその効果は漸減したことを報告しており、この WEPP によるシミュレーションでもその傾向が再現された。

表 4-7 残渣マルチによって土壤侵食量を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えることの出来る傾斜

農業生態 ゾーン	土質	マルチによる被覆率			被覆率 0% と 25%の差	被覆率 25% と 50%の差
		0%	25%	50%		
R7	砂質	16.2%	25.4%	29.4%	9.2%	4.0%
	壤質	4.8%	6.8%	7.7%	2.0%	0.9%
	粘質	5.1%	7.6%	8.8%	2.5%	1.2%
	強粘質	5.3%	8.5%	9.7%	3.2%	1.2%
	平均	7.9%	12.1%	13.9%	4.2%	1.8%
R10	砂質	2.3%	6.0%	6.4%	3.7%	0.4%
	壤質	4.6%	7.6%	8.0%	3.0%	0.4%
	粘質	4.5%	8.5%	9.1%	4.0%	0.6%
	強粘質	4.9%	10.2%	11.1%	5.3%	0.9%
	平均	4.1%	8.1%	8.7%	4.0%	0.6%
全体平均		6.0%	10.1%	11.3%	4.1%	1.2%

※表中の数値は各圃場管理によって土壤侵食量を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えることの出来る傾斜を示す

4.3.3 ベチベル草植生帯

ベチベル草植生帯の有無による土壤侵食量を $10t\ ha^{-1}$ 以下に抑えることの出来る傾斜を表 4-8 に示す。このシミュレーションは、ベチベル草植生帯を圃場の末端に一条のみ設置する条件で行った。土質ごとのベチベル草植生帯の有無による差は粘土の多い土質程含量の多い土質程大きくなったことから、ベチベル草植生帯を設置することによる土壤侵食削減効果は、粘土の多い土質程高いと言える。さらに農業生態ゾーンごとにベチベル草植生帯の有無による差の平均を比較すると、ゾーン R7 では 2.6%、R10 では 5.4%であることから、ベチベル草植生帯を設置することによる土壤侵食削減効果は R10 の方が高いと言える。

表 4-8 ベチベル草植生帯の有無による土壤侵食量を 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜の差

農業生態ゾーン	土質	耕起	耕起+ ベチベル草 植生帯	ベチベル草 植生帯の有無 による差
R7	砂質	16.2%	17.2%	1.0%
	壤質	4.8%	7.1%	2.3%
	粘質	5.1%	7.8%	2.7%
	強粘質	5.3%	9.5%	4.2%
	平均	7.9%	10.4%	2.6%
R10	砂質	2.3%	6.4%	3.8%
	壤質	4.6%	9.3%	4.7%
	粘質	4.5%	9.6%	5.1%
	強粘質	4.9%	12.7%	7.8%
	平均	4.1%	9.5%	5.4%
全体平均		6.0%	10.0%	4.0%

※表中の数値は各圃場管理によって土壤侵食量を年間 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜を示す

4.3.4 各土壤侵食対策技術の効果の比較

土壤侵食対策技術なしの区と各対策技術を適用した区の土壤侵食量を 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜の差を表 4-9 に示す。今回検証した技術を土壤侵食削減効果のみで評価すると作物残渣マルチ/キマメのアレイクロッピングとベチベル草植生帯の土壤侵食削減効果は同程度であり、最小耕起よりも高い結果となった。

表 4-9 土壤侵食対策技術なしの区と各対策技術を適用した区の土壤侵食量を 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜の差

マルチ (被覆率 25%) アレイクロッピング	ベチベル草 植生帯	最小耕起
4.1%	4.0%	1.3%

※表中の数値は各圃場管理によって土壤侵食量を年間 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜を示す

4.3.5 土壤侵食対策技術の組み合わせ効果

土壤侵食を十分なレベルまで軽減するためには、土地や気象条件によっては複数の技術を組み合わせることが必要となる。今回検証した対策技術は4つあるためその全ての組み合わせについて検討することは困難である。そのため、ここでは各技術に優先順位を付け、その優先順位に従って順に技術を導入した場合の効果を組み合わせの“一例”として示すこととした。以下に示す技術の組み合わせ順はあくまで一例であり、農家は自身の考え方や圃場の状況に応じて組み合わせの優先順位を決定することが出来る。

(1) 土壤侵食対策技術の導入優先順位付け

技術が農家に受け入れられ、実践されるためには、単に土壤侵食の軽減効果だけではなく、収益性や導入の難易度なども考慮する必要がある。しかし、これらについて客観的・定量的に並列比較・評価することは困難である。そこで、共通の尺度を持たない評価基準の比較に適している階層分析法（Analytic Hierarchy Process：AHP）を用いて優先順位付けを行った。

1) 評価項目及びその重みの設定

評価項目は、①土壤侵食抑制効果（土壤侵食対策技術なしの区と対策技術を適用した区の土壤侵食量を 10t ha^{-1} 以下に抑えることの出来る傾斜の差）、②導入の難易、③収益性の3つを設定した。導入の難易と土壤侵食抑制効果の比較では、多少導入が困難であっても土壤侵食抑制効果が得られるので農家は導入のための労を惜しまないであろうと考え、導入の難易に対する土壤侵食抑制効果の重要度を2とした。土壤侵食抑制効果と収益性の比較では、農家は土壤侵食抑制効果の得られる技術であっても収益性が悪化する場合、技術を導入しないと考えられることから、土壤侵食抑制効果に対する収益性の重要度を2に設定した。導入の難易と収益性の一対比較では、多少導入が困難であっても収益性が改善されるのであれば農家は導入のための労を惜しまないと考え、また、農家は土壤侵食抑制効果よりも収益性を優先するであろうとの考えから、導入の難易に対する収益性の重要度を3とした。表4-10に設定した評価項目の重要性尺度、表4-11に評価項目ごとの重みの計算結果を示す。

表 4-10 評価項目の重要性尺度

評価項目	左の評価項目と比較した際の右の評価項目の重要性					評価項目
	同程度	やや重要			重要	
	1	2	3	4	5	
導入の難易		○				侵食抑制効果
侵食抑制効果		○				収益性
導入の難易			○			収益性

表 4-11 評価項目ごとの重み

評価項目	侵食抑制効果	導入の難易	収益性	幾何平均	重み
侵食抑制効果	1	1/2	1/2	1.00	0.312
導入の難易	2	1	1/3	0.64	0.199
収益性	2	3	1	1.57	0.488
整合度：0.004					
整合比：0.007					

2) 土壌侵食対策技術の重みの設定

評価項目ごとに表 4-12 の通り基準を設定した。この基準に則り、各評価項目による土壌侵食対策技術の重みを算出した。

表 4-12 評価項目の基準

評価項目	土壌侵食抑制効果	導入の難易	収益性
基準	5：4%以上	5：容易	5：20%以上所得増
	4：3%以上, 4%未満	4：やや容易	4：10%以上 20%未満所得増
	3：2%以上, 3%未満	3：どちらでもない	3：所得変化±10%未満
	2：1%以上, 2%未満	2：やや困難	2：10%以上 20%未満所得減
	1：0%以上, 1%未満	1：困難	1：20%以上所得減

3) 土壤侵食抑制効果による重み付け

表 4-9 に記載の結果に則り，表 4-13 の通り，最小耕起：2，残渣マルチ：5 ベチベル草植生帯：5，アレクロッピング：5 とし重み付けを行った。

表 4-13 土壤侵食抑制効果による一対比較

	最小耕起	残渣マルチ	ベチベル草	アレクロッピング	幾何平均	重み
最小耕起	1	2/5	2/5	2/5	0.50	0.149
残渣マルチ	5/2	1	1	1	1.00	0.296
ベチベル草	5/2	1	1	1	1.00	0.296
アレクロッピング	5/2	1	1	1	1.00	0.296
整合度：0.000						
整合比：0.000						

4) 導入の難易による重み付け

表 4-14 の通り，各技術について導入の難易による重み付けを行った。最小耕起，作物残渣マルチは特別な道具や材料を必要とせず，技術的にも特別難しい内容ではないことから 5（容易）とした。ベチベル草植生帯については，最小耕起，作物残渣マルチと比べやや技術的に複雑で，ベチベル草が対象地域のどこでも簡単に入手できるものではないことから 1（困難）とした。また，キマメのアレクロッピングは，最小耕起，作物残渣マルチと比べやや技術的に複雑で，農家が一般的に所持しているナタでも剪定が出来ないことはないが，ナタでは作業性が悪く，大きめの剪定バサミがあった方が好ましいことから 2（やや困難）とした。

表 4-14 導入の難易による一対比較

	最小耕起	残渣マルチ	ベチベル草	アレクロッピング	幾何平均	重み
最小耕起	1	1	5/1	5/2	1.88	0.587
残渣マルチ	1	1	5/1	5/2	1.88	0.587
ベチベル草	1/5	2	1	1/2	0.56	0.176
アレクロッピング	2/5	2/5	2/1	1	1.05	0.327
整合度：0.000						
整合比：0.000						

5) 収益性による重み付け

表 4-15 の通り、各技術について収益性による重み付けを行った。山田ら (2014) は、ナカラ回廊地域において農家調査を行い、3ha 以下の小規模農家の所得を現地通貨で $6,954\text{MT ha}^{-1}$ (およそ $115\text{US\$ ha}^{-1}$) と試算している。最小耕起は栽培開始前の耕起作業を除草作業に置き換えることでヘクタール当たり労働時間を 200 時間短縮することが出来、これは $40\text{US\$ ha}^{-1}$ に相当する。この効果は、山田らの調査結果を参考にすると、35%の所得増となることから、最小耕起による労力/人件費削減効果は小規模農家にとって大きい。このことから最小耕起の収益性は 5 (20%以上所得増) とした。作物残渣マルチは増収効果があったダイズ残渣には土壤侵食削減効果が全くなく、その他の作物残渣マルチは土壤侵食削減効果があったものの、増収には結びつかなかったことから 3 (所得変化±10%未満) とした。ベチベル草植生帯は、収量の増加には結び付かず、初期の苗の植え付けとその後の剪定に労力/人件費を要する。苗の植え付けは植生帯を設置する初年時のみ発生することからベチベル草剪定の労力だけを評価することとし、 $100\text{m} \times 100\text{m}$ の圃場に 50m 置きにベチベル草植生帯を設置し、植生帯の幅を 30cm 、剪定回数 3 回/年と仮定すると、剪定する面積は、 $100\text{m} \times 0.3\text{m} \times 2 \text{条} \times 3 \text{回} = 180\text{m}^2$ となる。表 2-10 の 1 ヘクタール当たりの除草にかかる労働時間を参考に 180m^2 の面積ベチベル草植生帯の剪定にかかる労働時間を求めると、約 2 時間 ($0.4\text{US\$ ha}^{-1}$) となり、ベチベル草の剪定労力の発生による所得の減少割合は約 0.4%となる。このことからベチベル草植生帯の収益性は 3 (所得変化±10%未満) とした。また、キマメのアレイクロッピングは、収量の増加には結び付かず、作物の畝間全てにキマメを間作し、それを剪定することから労力/人件費を必要とする。圃場の面積の半分にキマメが植えられており、年に 3 回剪定を行うこととし、表 2-10 の 1 ヘクタール当たりの除草にかかる労働時間を参考にキマメの剪定にかかる労働時間を求めると、180 時間 ($36\text{US\$ ha}^{-1}$) となり、キマメの剪定労力の発生による所得の減少割合は約 31%となる。このことからキマメのアレイクロッピングの収益性は 1 (20%以上所得減) とした。

表 4-15 収益性による一対比較

	最小耕起	残渣マルチ	ベチベル草	アレイクロッピング	幾何平均	重み
最小耕起	1	5/3	5/3	5/1	1.93	0.417
残渣マルチ	3/5	1	3/3	3/1	1.16	0.250
ベチベル草	3/5	3/3	1	3/1	1.16	0.250
アレイクロッピング	1/5	1/3	1/3	1	0.39	0.083
整合度：0.000						
整合比：0.000						

6) 土壤侵食対策技術の導入優先順位

以上の結果を基に各評価項目による一対比較によって算出した重みに各評価項目の重みを乗じたものを合計して総合点を算出し、各技術の導入優先順位を決定した。表 4-16 に総合評価の結果と各技術の導入優先順位を示す。最も優先順位が高くなったのは最小耕起で、次いで作物残渣マルチ、ベチベル草植生帯、キマメのアレイクロッピングの順となった。但し、この優先順位はあくまで農家による受容性が高いと考えられる組み合わせの順の“一例”であり、必ずしもこの順で技術を導入することを強制するものではない。よって実際に技術を導入する優先順位は、各農家が置かれている状況やそれぞれの考え方に応じて自由に決定することが出来るものである。

表 4-16 技術の総合評価と優先順位

評価項目	土壤侵食 ①	導入の難易 ②	収益性 ③	総合点 ①+②+③	優先順位
最小耕起	0.049	0.117	0.204	0.370	1
残渣マルチ	0.097	0.117	0.122	0.337	2
ベチベル草	0.097	0.035	0.122	0.255	3
アレイクロッピング	0.097	0.065	0.041	0.203	4

(2) 土壤侵食対策技術の組み合わせ効果

上記の通り定めた順に各土壤侵食対策技術を組み合わせさせた結果を表 4-17 に示す。なお、作物残渣マルチはキマメ残渣(被覆率 25%)を用い、ベチベル草植生帯は圃場の末端に一条のみ設置する条件とした。

また、キマメのアレイクロッピングによる効果は、第2章の圃場試験でキマメ残渣マルチと効果がほぼ同程度であったことからキマメ残渣マルチと同じ設定で計算を行い、キマメ残渣マルチと併用する場合はキマメ残渣の施用量を2倍にして算出した。

WEPPモデルによるシミュレーションによって本研究で検証した技術を組み合わせた場合、その土壤侵食削減効果は、表4-9に示した単独の技術の土壤侵食削減効果の単純な足し算の様な増加ではなく、組み合わせる技術の数を増やすごとに効果は何倍にも高くなり、全ての技術を組み合わせた場合、19.7%以上の傾斜まで土壤侵食量を年間 10t ha^{-1} 以下に抑えることが出来る結果となった。日本の中山間地域等直接支払い制度（2018年度版）によると傾斜20%以上の畑地は超急傾斜地に区分されていることから、これらの技術を組み合わせれば、対象地域における農地の土壤侵食に十分対応出来ると考えられる。なお、ゾーンR7の砂質の最小耕起+マルチ+ベチベル草植生帯+キマメのアレイクロッピングでは85.9%とかなり大きな傾斜まで土壤侵食量を年間 10t ha^{-1} 以下に抑えることが出来る結果となったが、WEPPモデルによる予測土壤侵食量と傾斜の関係は図4-20の様に傾斜が大きくなると土壤侵食量の増加が頭打ちになる傾向となった。年間 10t ha^{-1} 程度の土壤侵食量では表土がほぼ全て流されたことにはならないことから、傾斜が大きくなることによって土壤侵食量の増加が頭打ちになるのは不自然なことである。そのため、このように極端に大きな傾斜における土壤侵食量の予測はWEPPモデルでは想定されていなかったものと考えられ、この結果の信頼性は低いと考えられる。

表 4-17 農業生態ゾーン，土質，傾斜による各条件において土壌侵食量を 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る技術の組み合わせ

農業生態ゾーン	土質	耕起	最小耕起	最小耕起+マルチ	最小耕起+マルチ+ベチベル草	最小耕起+マルチ+ベチベル草+アレクロッピング
R7	砂質	16.2%	10.5%	21.1%	33.4%	85.9%
	壤質	4.8%	7.3%	14.0%	24.2%	40.2%
	粘質	5.1%	8.5%	12.2%	22.1%	35.2%
	強粘質	5.3%	10.5%	16.6%	31.2%	51.4%
	平均	7.9%	9.2%	16.0%	27.7%	53.2%
R10	砂質	2.3%	3.4%	6.1%	14.6%	19.7%
	壤質	4.6%	5.3%	9.2%	20.4%	30.6%
	粘質	4.5%	5.5%	9.5%	30.3%	35.1%
	強粘質	4.9%	7.2%	12.7%	36.3%	55.7%
	平均	4.5%	5.4%	9.38%	25.40%	35.28%
全体平均		6.0%	7.3%	12.68%	26.56%	44.23%

※表中の数値は各圃場管理によって土壌侵食量を年間 10t ha⁻¹ 以下に抑えることの出来る傾斜を示す

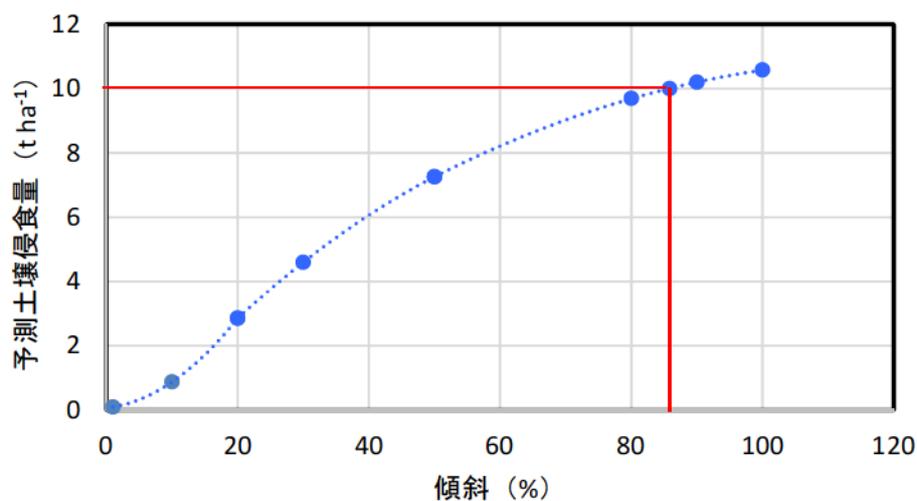


図 4-20 R7 における最小耕起+ベチベル草植生帯+アレクロッピングの予測土壌侵食量と傾斜の関係

4.4 小括

モザンビークでは、各技術の土壤侵食軽減効果の程度やどのような土地や気象条件においてどのような土壤侵食対策技術を導入すれば十分な土壤侵食削減効果が得られるかといった目安を数値で示す土壤侵食対策導入指針は作成されていない。そこで、本章では3章で対象地域への適合性が確認された WEPP モデルを使用して、先ず、対象地域の農業環境（農業生態ゾーン R7 および R10）において土壤侵食対策技術無し（耕起条件）で、土質ごとにどの程度の傾斜までであれば土壤侵食を持続的な作物生産が維持可能なレベルに抑えられるかをシミュレーションした。その結果、土壤侵食を持続的な作物生産が維持可能なレベルに抑えられるのはおよそ傾斜 6.0%までと算出されたことから、それ以上の傾斜では何らかの土壤侵食対策技術の導入が必要と考えられる。次いで、4つの土壤侵食対策技術（最小耕起、作物残渣マルチ/キマメのアレイクロッピング、ベチベル植生帯）について、単体での土壤侵食削減効果を評価したところ、それぞれ平均で最小耕起は 7.3%、マルチ（被覆率 25%）/キマメのアレイクロッピングは 10.1%、ベチベル植生帯は 10.0%の傾斜まで土壤侵食を持続的な作物生産が維持可能なレベルに抑えることが出来る結果となった。さらに全ての技術を組み合わせるとおよそ 20%を超える傾斜まで土壤侵食を持続的な作物生産が維持可能なレベルに抑えられることが出来るという結果が得られた。本章で作成した表を活用するためには、対象とする圃場の農業生態ゾーン、土質、傾斜を決定する必要があるが、農業生態ゾーンについては、表 4-1 から把握することができ、土質については表 4-3 の方法によって農家でも圃場で簡易に判別可能である。また、傾斜の測定については、安価な水準器も販売されている他、FAO (http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6707e/x6707e04.htm) によって特別な材料や道具を使用せずに傾斜を測定する方法が複数紹介されていることから、これらの方法を利用することによって農家でも傾斜を測定することが可能である。よって、これらの方法を用いて農業生態ゾーン、土質、傾斜を決定すれば、それらの数値と表 4-17 を基に土壤侵食を持続的な作物生産が維持可能なレベルに抑えられる土壤侵食対策技術の組み合わせを決定することが出来る。例えば、圃場の状況が、農業生態ゾーン：R7、土質：壤質、傾斜：10.3%であった場合、最小耕起+作物残渣マルチを導入することで、農業生産性を将来に渡って維持できるレベルに土壤侵食を抑えることが出来ると考えられる。このような手法は現地のマニュアルや土壤侵食防止のための行動計画（2008-2018）には記載

されておらず、土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）の内容はほとんど実行されていない。一方で、現地では（独）国際協力機構（JICA）による農業支援プロジェクトが実施されていることから、JICAによるプロジェクトを通じて本研究の内容が現地のマニュアル等に取り入れられ、土壌侵食対策技術の普及に資することが期待される。

第5章 総括

5.1 研究の背景

モザンビーク北部に位置するナカラ回廊地域では、雨期の降雨による土壌侵食が問題となっている。既存の土壌侵食ハザードマップ (Wambike, 1986) によると、面積の約7割が土壌侵食の危険度“中”から“高”に位置づけられており、この範囲の年間土壌侵食量は 11-30t ha に相当する。米国農務省 (2006) は土壌生成の速度を考慮した場合、持続的な作物生産を維持するためには土壌侵食を 4.9 to 12.4 t ha⁻¹ year⁻¹ に抑える必要があるとしていることから、同地域において持続的な作物生産を維持するためには土壌侵食対策技術の導入が必要である。

モザンビーク環境省が作成した土壌侵食防止のための行動計画 (2008-2018) では、モザンビーク国内において土壌侵食に関する科学的根拠に基づいた情報が不足していることが指摘されており、農業研究機関に対し、土壌侵食に関する研究を推し進めるよう求めている。しかし、モザンビーク国内において土壌侵食対策技術による土壌侵食削減効果を圃場レベルで定量的に比較検証した事例は見当たらない。

また、土壌侵食を効率的かつ効果的に削減するための土壌侵食対策技術の導入方法を検討するためには、土壌侵食予測モデルの利用が有効である。しかし、モザンビークにおいて土壌侵食予測モデルの現地適合性について検討された事例は見当たらない。既存の土壌侵食ハザードマップを作成する際に用いられた SLEMSA モデルでさえ、その現地適合性を確認しないまま土壌侵食ハザードマップの作成に使用されている。土壌侵食予測モデルの現地適合性について評価するためには、圃場において土壌侵食対策技術の適用の有無や土地、気象条件が異なる条件で得られた土壌侵食の実測値と土壌侵食予測モデルによる予測値を比較し、土壌侵食予測モデルによる予測精度を確認する必要がある。

世界の土壌侵食が問題となっている地域では、土壌侵食対策マニュアルや土壌侵食防止のための行動計画等が作成されているが、土壌侵食対策マニュアルに各技術の土壌侵食削減効果効果の程度やどのような技術をどのような条件の農地に導入すればよいかといった目安を数値で示した農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を導入するための指針が記載されている事例は見当たらない。先進国であれ

ば、普及員が土壌侵食対策技術の効果を評価可能な土壌侵食予測モデルを用いて、農家に対して適切な対策技術の導入を支援することも可能であるが、途上国の普及員はパソコンを使用できない環境にあることが多いことから、土壌侵食予測モデルを直接用いた支援を行うことは困難である。モザンビークでは農業普及のための予算や人的資源が不足していることから政府は農民間普及を推進している。しかし、土壌侵食対策技術の普及のために農家にパソコンが必要な土壌侵食予測モデルの使用方法を教えることは非現実的である。技術を農民間普及を通じて広範囲の農家に伝えるためには、農家が現実的に利用可能なツールを作成する必要がある。そのためには、農家が間接的に土壌侵食予測モデルによる解析結果を活用できるよう、解析結果を取り纏め、簡易な圃場調査を通じて農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を選択できるような指針を作成することが有効であると考えられる。

そこで、本研究では、先ず、複数の土壌侵食対策技術の適用の有無や土地、気象条件が異なる条件で土壌侵食量を定量的に測定し、土壌侵食対策技術の効果を評価すると共に、土壌侵食予測モデルの現地適合性を評価するための基礎データを収集した。次に、圃場試験で得られた圃場条件や気象条件のデータを用いて、SLEMSA モデルおよび WEPP モデルの 2 つの土壌侵食予測モデルで土壌侵食量の予測を行い、圃場での実測値とモデルによる予測値を比較することで、各モデルの現地適合性を検討した。そして、最後に農家が自ら自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を簡便に選択出来る実用的な指針を作成するために WEPP モデルによる解析を通じて、任意の地域、土性、傾斜の条件下で必要となる対策の種類や組み合わせを例示した。

5.2 圃場試験による土壌侵食対策技術の評価

ナカラ回廊地域の約 9 割の面積は、土地や気象条件によって分類された農業生態ゾーンの R7 と R10 で占められている。そこで、ゾーン R7 に位置する Nampula とゾーン R10 に位置する Lichinga の国立農業試験場において圃場試験を行い、最小耕起、作物残渣マルチ、ベチベル草植生帯、キマメのアレイク ロッピングの土壌侵食削減効果を定量的に評価した。

- ▶ 最小耕起は、耕起に比べ収量を低下させることなく土壌侵食を 57%削減した。また、播種前の耕起作業を除草作業に変更することから労力/人件費をヘクタール当たり 200 時間/40US\$削減することが出来る。
- ▶ 作物残渣マルチは、地表面被覆率が高い程土壌侵食削減効果が高くなるが、効果の伸びは被覆率が高くなるにつれて漸減する。一方、ダイズ残渣マルチは、脱穀時に裁断されてしまうことから、除草時に土中に容易に鋤き込まれてしまい、土壌侵食削減効果は期待出来ない。但し、ダイズ残渣マルチ区では、キマメの収量が 2 倍に増加したことから、土中に鋤き込まれたダイズ残渣は緑肥としての効果が期待出来ると考えられる。ダイズ残渣以外に用いたソルガム、トウモロコシ、キマメ、ヒマワリの残渣マルチでは作物の収量がマルチなしとの間で有意差が無く、増収効果は期待できないものと考えられた。
- ▶ ベチベル草植生帯は植え付けた苗の隙間が分けつの増加によって埋まるまで土壌侵食削減効果は期待できないとする報告もあるが、植え付け時に剪定した葉を根元の隙間を埋める様に配置したところ、植え付け 1 年目から 77%と高い土壌侵食削減効果が得られた。しかし、作物の増収効果は認められず、本技術は初期に苗の植え付け労力/人件費を必要とし、その後も葉の剪定に労力/人件費を必要とすることから、最小耕起や作物残渣マルチに比べると農家には受け入れられ難いと考えられた。但し、作物残渣は作物を食害するシロアリを増やしてしまう可能性があるのに対し、ベチベル草の葉はシロアリの食害を受けないことが確認されたことから、本技術はシロアリを増やしてしまう危険性がないと考えられた。
- ▶ キマメのアレイクロッピングは、87%と高い土壌侵食削減効果を示したがその効果はキマメ残渣マルチの土壌侵食削減効果 (90%) とほぼ同程度であり、どちらの技術も作物の増収効果は認められなかった。よって、単年でみれば、キマメの剪定の労力/人件費を必要とする本技術は、キマメ残渣マルチに経済性で劣ると言える。しかし、キマメのアレイクロッピングではキマメが複数年に渡り、枝葉をマルチの材料として供給し続けることから、ダイズのようにその残渣に土壌侵食削減効果が期待出来ない作物や、キャッサバのように栽培後に圃場にほとんど残渣を残さない作物を栽培する際は輪作にキマメのアレイクロッピングを取り入れることが推奨される。

5.3 SLEMSA モデルおよび WEPP モデルの現地適合用性の評価

モザンビークの既存の土壌侵食ハザードマップの作成にはジンバブエで開発されたオリジナルの SLEMSA モデルを一部変更し、サブモデルの変数である降雨エネルギーの計算式をモザンビークの気象データを基に作成した式に変更したモザンビーク版の SLEMSA モデルが使用されているが、モザンビークでの適合性を確認しないまま使用されていたことから SLEMSA モデルの現地適合性の確認を行った。また、SLEMSA モデルは、土壌侵食対策技術の導入による土壌侵食削減効果を評価出来ないことから、それが可能な WEPP モデルの現地適合性についても検証を行った。

- モザンビーク版の SLEMSA モデルによる土壌侵食予測値は、圃場試験で得られた実測値とほとんど一致せず、雨量が多い程、土壌侵食量を極端に過大評価する傾向が認められた。そこで、オリジナルの SLEMSA モデルから変更された降雨エネルギーの計算式をオリジナルの式とモザンビークの式を比較したところ、モザンビークの式はオリジナルの式より雨量が少ない程、降雨エネルギーを大きく評価していることが明らかとなった。また、このことから、オリジナルの SLEMSA モデルによる土壌侵食予測値は、モザンビーク版の SLEMSA モデルによる土壌侵食予測値より低くなり、雨量が 1,250mm までの場合は、予測値が実測値と概ね一致した。しかし、オリジナルの SLEMSA モデルであっても雨量が 1,250mm を超えると土壌侵食量を実測値の何倍も高く過大評価する結果となった。これらの結果から、モザンビークで土壌侵食ハザードマップの作成に使用されたモザンビーク版 SLEMSA モデルはモザンビークにおける土壌侵食の予測に適しておらず、オリジナルの SLEMSA モデルの方が適していると考えられた。しかし、モザンビークの雨期の雨量マップによると雨量が 1,200mm を超える地域が 1 割程度存在することから、雨量が 1,200mm を超える地域の土壌侵食量をオリジナルの SLEMSA モデルを用いて評価する場合は注意が必要である。
- WEPP モデルについては、栽培期間中の土壌侵食の合計量の実測値と予測値は全ての処理区で概ね一致した。一方、1 日ごとの土壌侵食量の実測値と予測値の比較では、1 日の土壌侵食量が $0.2t\ ha^{-1}$ 以下となるような降雨イベント時の土壌侵食の実測値は予測値とほとんど一致しなかったことから、WEPP モデルによる少量の土壌侵食の予測精度は低いと考えられた。しかし、少量の土

壤侵食の予測精度は栽培期間中の土壤侵食量の合計値の予測には大きく影響しないと考えられることから、WEPP モデルは対象地域における土壤侵食の予測に使用可能と考えられた。但し、キマメのアレイクロッピングについては、トウモロコシとキマメを1条ごとに交互に間作することとなるが、WEPP モデルでは斜面を区切れるのは最大10カ所までで、作物・土壤管理スケジュールの設定でも同じ時間軸で複数の作物を栽培した結果についてシミュレーションすることが出来ない。このことから斜面を3.2mに設定してシミュレーションを行ったところ、栽培期間中の土壤侵食の合計量の実測値と予測値は概ね一致したが、1日ごとの土壤侵食の予測値が 0.31t ha^{-1} の倍数となってしまい、予測精度が低下した。このことから、WEPP モデルは間作等斜面長を短く設定しなければならない様な土壤侵食対策技術の評価には不適と考えられた。

- SLEMSA モデルと WEPP モデルの比較では WEPP モデルの方が SLEMSA モデルよりも予測精度が高い結果となった。しかし、WEPP モデルによる土壤侵食量の予測には SLEMSA モデルより多くのデータを必要とし、それらのデータはモザンビークでは十分に整備されていない。そのため、今回試験を実施したゾーン R7 および R10 以外の地域で WEPP モデルを使用するためには、必要なデータの整備を進める必要がある。

5.4 土壤侵食対策技術導入指針の策定

米国農務省（2006）は土壤生成の速度を考慮した場合、土壤の種類にもよるが、持続的な作物生産を維持するためには土壤侵食を $4.9\text{ to }12.4\text{ t ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ に抑える必要があるとしている。この情報を参考に、土壤侵食量を $10\text{ t ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ 以下に抑えることの出来る条件を、ナカラ回廊地域における適合性が確認出来た WEPP モデルを用いて検討した。

- 先ず、ゾーン R7 および R10 の気象条件、土質の組み合わせごとに、土壤侵食対策が必要となる傾斜を算出した。その結果、各条件の平均値でみると傾斜が6.0%を超えると土壤侵食量が 10 t ha^{-1} を超え、それ以上傾斜が大きくなると土壤侵食量が急激に増加する傾向が認められたことから、

各条件で得られたその傾斜の値を超える圃場では何らかの土壤侵食対策技術の導入が必要と判断した。

- ▶ 次に、ゾーン R7 および R10 の気象条件，土質の組み合わせごとに，最小耕起，作物残渣マルチ/キマメのアレイクロッピング，ベチベル草植生帯のそれぞれの技術を単独で導入することによってどの程度の傾斜まで土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑制することが出来るかを算出した。その結果，各条件の平均値でみると，最小耕起では 7.3%，作物残渣マルチ/キマメのアレイクロッピングでは 10.1%，ベチベル草植生帯では 10.0%の傾斜まで，土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑制することが出来るという結果となった。
- ▶ 最後に全ての技術を組み合わせることによってどの程度の傾斜まで土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑制することが出来るかを算出した。その結果，約 20%以上とかなりの急傾斜まで土壤侵食量を 10 t ha^{-1} 以下に抑制することが出来るという結果が得られた。

5.5 研究結果の意義とその展望

モザンビークにおいて圃場レベルで土壤侵食対策技術の効果を定量的に評価した事例は見当たらないことから，本研究で実施した圃場試験の結果は，今後，WEPP等の土壤侵食予測モデルの検証を進めるための貴重なデータとなる。特に，モザンビークでは，試験場内試験であっても農作物や資機材の盗難が頻発することから，研究の内容に関わらず，データを取ることが困難で，圃場に複数の警備員を常時配置するなど細心の注意を要する。本研究で検証した土地や気象条件は極めて限られていることから，今後，類似の試験を異なる環境条件で行い，土壤侵食予測モデルの検証を進めるためのデータを蓄積する必要がある。例えば，本研究では，対象地域のモザンビーク国立農業試験場内により傾斜の大きい圃場が存在しなかったことから，3.5%と4.2%という似通った傾斜条件でしか試験を行っていない。また，モザンビークにおける農業生態ゾーンは10種類存在し，本研究ではその内の2種類の農業生態ゾーンでしか試験を行っていない。さらに，モザンビークでは，トウモロコシ，キャッサバ，キマメ以外にも多種多様な作物が栽培されている。これらの条件や本研究では検証していない土壤侵食対策技術の評価

に WEPP モデルが適合可能かについてはさらなる検証が必要である。本研究では、WEPP の問題点の 1 つとしてアレイクロッピングの様な間作技術や混作技術を適切に表現できないことが明らかとなった。先進国では機械化による作業の効率化のために単作が一般的となっているが、モザンビークを含む開発途上国では、病虫害や気象災害等のリスク分散・回避のために間作や混作が広く採用されている。そのため、開発途上国において使用するにあたっては間作や混作にも適合出来るよう、WEPP モデルを改良することが望まれる。この様に類似の試験を継続し、蓄積したデータを用いて土壌侵食予測モデルの適合性の検証を行い、予測精度が低いあるいは予測が不可能な条件が特定されれば、モデルの改良を行うか、他のモデルの適合性を検証して用いる必要がある。

本研究によって、既存の土壌侵食マップの作成に使用された SLEMSA モデルは土壌侵食の予測精度が低く、モザンビークにおける土壌侵食の予測には適していないことが明らかとなった。また、今回検証したモデルの内でもっとも予測精度が高いモデルは WEPP モデルであったが、WEPP モデルがモザンビーク全域に適合可能かどうかはさらなる検証が必要であり、何より WEPP モデルによる土壌侵食の予測に必要なデータがモザンビークでは整備されていないことから、必要なデータを収集・整備する必要がある。特に日射量と日単位より詳細な雨量データについては、本研究で気象観測装置を設置した北西（Lichnga）および北東（Nampula）地域国立農業試験場を除き、他の国立農業試験場やモザンビーク気象観測所では測定出来ていないため、測定機器の導入が望まれる。この様に現状では WEPP モデルをモザンビークの他の地域で利用することは不可能であるが、本研究によってモザンビークの既存の土壌侵食ハザードマップの作成に使用されたモザンビーク版の SLEMSA モデルよりオリジナルの SLEMSA モデルの方が予測精度が高いことが明らかとなった。既存の土壌侵食ハザードマップが作成された 1986 年には土地利用図が作成されていなかったため、既存の土壌侵食ハザードマップは裸地条件での土壌侵食量の予測値を用いて作成されている。今後、土地利用を反映し、既存の土壌侵食ハザードマップを改定する場合はモザンビーク版の SLEMSA モデルではなく、オリジナルの SLEMSA モデルを用いることが推奨される。

本研究では、農家が自ら簡易な方法で土質の判定と傾斜の測定を行うことで、自身の農地に必要な土壌侵食対策技術を選択するための指針を作成した。この様な手法は現地のマニュアルや土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）には記載されておらず、土壌侵食防止のための行動計画（2008-2018）の内

容はほとんど実行されていない。一方で、(独)国際協力機構(JICA)による農業支援プロジェクトが現地では実施されていることから、JICAによるプロジェクトを通じて本研究の内容が現地のマニュアル等に取り入れられ、土壌侵食対策技術の普及に資することが期待される。また、WEPPモデルはプロセスベースのモデルであることから、モデルが開発された地域と異なる地域・条件であっても精度良く土壌侵食量を予測出来る可能性が高いが、本研究では対象地域の急傾斜圃場ではWEPPモデルの検証を実施しておらず、4つの土壌侵食対策技術を全て組み合わせた際の土壌侵食削減効果についても実測値とWEPPモデルの予測値の比較による検証を実施していないことから、その効果を確認するための試験を実施することが望ましい。

謝 辞

私が東京農工大学 連合大学院 農学研究科に社会人特別選抜として入学してから6年が経とうとしています。この間、お世話になりました全ての方々にここに感謝の意を表します。

他大学出身で当初面識もなかった私を快く受け入れて下さり、入学試験の相談から論文作成まで6年間の長きに渡り終始全面的にご指導いただきました私の主指導教員である宇都宮大学 農学部の後藤章 特命教授および本論文の主査である宇都宮大学 農学部 農業環境工学科の大澤 和敏 准教授に心より感謝申し上げます。本研究は、私が従事した独立行政法人 国際協力機構 (JICA) によるモザンビーク国ナカラ回廊農業開発研究・技術移転能力向上プロジェクトの活動の一部として行っておりましたことから、先生方のご助言により活動をより良いものに出来たと感じております。また、本研究を通じて得られた知識と経験は今後の自身の業務に必ずや役立つものと確信しており、途上国においてより良い農業支援が出来るよう活かしていきたいと思えます。誠にありがとうございました。

本論文の副査としてご指導いただき、的確なご助言をいただきました宇都宮大学 農学部 農業環境工学科の松井 宏之 教授、東京農工大学 農学研究院の加藤 亮 教授、宇都宮大学 農学部 農業環境工学科の田村 孝浩 准教授、茨城大学 農学部 地域総合農学科の吉田 貢士 准教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の共同研究者として現地でのデータ取得・結果の考察にご協力いただいたモザンビーク国立農業試験場の Watemua A. Cássimo 研究員ならびに国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター 社会科学領域の小出 淳司 研究員に深く感謝致します。

本論文に用いられたデータの多くは、JICA の資金によって実施されたモザンビーク国ナカラ回廊農業開発研究・技術移転能力向上プロジェクトの活動を通じて得られたものです。本プロジェクトの円滑な実施にご協力をいただき、また、本論文の公開を承認いただきました JICA 関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

私が東京農工大学 連合大学院 農学研究科に社会人特別選抜として入学することにご理解・承認をいただきました NTC インターナショナル株式会社の岩本 彰 前代表取締役社長他、関係者の皆様に深く感謝致します。

岐阜大学 応用生物科学部の乃田 啓吾 助教には、自身にとって新しい分野での研究を行うにあたって進学先を迷っていた私の相談に親身に乘っていただき、宇都宮大学 農学部 農業環境工学科の大澤和敏 准教授をご紹介いただきました。私の研究内容に合った本当によい先生をご紹介いただき、誠にありがとうございました。

最後に、私の体調を支えてくれた両親およびベスリククリニックの田中 伸明 院長、つゆくさ医院の伊達 伯欣 院長、代々木上原健療院の神田 昌紀 先生に感謝致します。2013年に体調を崩して以来およそ5年間に渡り私の体調の回復のために様々なアドバイスや具体的な治療をしていただき、お陰様で何とか仕事と研究を両立させることが出来ました。皆様のご助力がなければ、研究どころか、仕事すら続けられていたかどうかわかりません。本当にありがとうございました。

引用文献

- Abel, N. & Stocking, MA, 1987. A rapid method for assessing rates of soil erosion from rangeland: an example from Botswana. *Journal of Range Management*, 40: 460-466.
- INE (Instituto Nacional de Estatística). 2012. Censo Agrícola 2010-2011 (in Portuguese)..
- MOP (Malaria Operational Plan). 2010. Pobreza e Bem-estar em Moçambique (in Portuguese).
- Chakela, Q. & Stocking, M., 1988. An improved methodology for erosion hazard mapping. Part II: Application to Lesotho. *Geografiska Annaler*, 70-A: 181-189
- Dick, W. A., E. L. McCoy, W. M. Edwards, and R Lal. 1991. Continuous Application of No-Tillage to Ohio Soils. *Agronomy Journal*, 83 (1): 65-73
- Donjadee, S. T. Tingsanchalib. 2016. Soil and water conservation on steep slopes by mulching using rice straw and vetiver grass clippings, *Agriculture and Natural Resources*, 50: 75-79.
- Ehrhart, C., and M. Twena, 2006. Background report CARE International Poverty-Climate Change Initiative. Chatelaine, Switzerland: CARE International
- Elwell, H.A., 1978. Modeling soil losses in southern Africa. 1. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23 (2): 117-127.
- Elwell, H.A., and M.A. Stocking. 1982. Developing a simple yet practical method of soil-loss estimation. *Tropical Agriculture*, 59: 43-48.
- Elwell, H.A., 1996. Environmental monitoring of land degradation and soil erosion methods and techniques. Guidelines for the SADC region. Compiled for SADC-ELMS, Maseru, third draft.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2013-2016. FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations statistics). Available at <http://faostat.fao.org/>.
- FAO. 2016. World soil day 2016 Panflet: Soil Erosion.
- Fabunmi, T.O., S.O. Adigbo, and J.N. Odedina. 2010. Effect of severity of pruning on growth, yield and survivability of pigeon pea (*cajanus cajan*) in pigeon pea/pepper alley cropping. *Journal of agricultural science and environment*, 10 (1): 18-26.

- HUDSON, e.A., 1987. A Regional Application of SLEMSA in the Cathedral Peak Area of the Drakensberg. M.Sc. Thesis, University of Cape Town.
- IFAD. 2016. PRONEA Support Project Supervision Report. Maputo, Mozambique: IFAD
- IIAM (Instituto de Investigação Agrária de Moçambique) (in Portuguese). 2010. Manual de Referência para a Produção de Mandioca em Moçambique (in Portuguese). Maputo, Mozambique: IIAM.
- IIAM. 2017. Práticas Culturais de Produção de Amendoim (in Portuguese). Maputo, Mozambique: IIAM.
- IIAM. 2017. Manual do cultivo de soja em sequeiro na região Norte de Moçambique (in Portuguese). Maputo, Mozambique: IIAM.
- IIAM. 2012. O cultivo do feijão boerfeijão boer (in Portuguese). Maputo, Mozambique: IIAM.
- INIA (Instituto Nacional de Investigação Agrária) (in Portuguese). 1994. Zonas agras ecológicas de Moçambique (Agro-ecological zones of Mozambique). Maputo, Mozambique: INIA.
- Jayashree, S., J. Rathinamala, and P. Lakshmanaperumalsamy. 2014. Anti-termite properties of root and leaf powder of Vetiver grass. *Journal of Environmental Biology*, 35: 193-196
- JA 全農, 肥料事業部. 2008. 土壌診断なるほどガイド.
- JICA. 2015. モザンビークナカラ回廊農業開発研究・技術移転能力向上プロジェクト業務進捗報告書 (第3年次終了時)
- JICA. 2016. モザンビーク国ナカラ回廊農業開発研究・技術移転プロジェクトファイナルレポート
- Kasseney, B.D., W.S. Nyamador, A.D. Mondedji, G.K. Ketoh, and I.A. Glitho. 2016. Termiticidal activities of few plant extracts against *Macrotermes subhyalinus* smethman and *Trinervitermes geminatus* wasmann Isoptera: Termitidae survival. *African Journal of Agricultural Research*, 11 (28): 2475 -2480
- Lal, R., and B.A. Stewart. 1990. Soil erosion and land degradation: The global risks. *Soil Degradation*. New York, Springer-Verlag 129-172
- Lal, R. 1998. Mulching effects on runoff, soil erosion, and crop response on alfisols in Western Nigeria. *Journal of Sustainable Agriculture*, 11 (2/3): 135-154.

- Lanzanova, M.E., F.L.F. Eltz, R.D.S. Nicoloso, E.A. Cassol, I. Bertol, T.J.C. Amado, and V.C. Girardello. 2013. Residual effect of soil tillage on water erosion from a Typic Paleudalf under long-term no-tillage and cropping systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (in Portuguese), 37 (6): 1689-1698.
- Leenaers, H., 1990. Estimating the Impact of Land Use Change on Soil Erosion Hazard in the Zambezi River Basin. IIASA Working Paper, WP-90-024.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15: 1409-1416
- Nearing, M.A., G.R. Foster, L.J. Lane, and S.C. Finkner (1989): A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology, *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1587-1593.
- 新潟県農林水産部. 2001. 新潟県における土づくりのすすめ方.
- Oshunsanya, S.O. 2013. Spacing effects of vetiver grass (*Vetiveria nigriflora* Stapf) hedgerows on soil accumulation and yields of maize–cassava intercropping system in Southwest Nigeria. *Catena*, 104: 120–126
- Paris, S., 1990. Erosion Hazard Model (modified SLEMSA). Field Document No. 13, second version, Land Resources Evaluation Project, Malawi, 17 pp
- Pimentel, D. 1993. *World Soil Erosion and Conservation*. Cambridge, UK. Cambridge University Press.
- Pimentel, D., C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Sphritz, L. Fitton, R. Saffouri. And R. Blair. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267: 1117-1123.
- Pimentel, D., and N. Kounang. 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*. 1: 416-426.
- Pimentel, D. 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, development and sustainability*, 8: 119-137
- Pittelkow, C.M., B.A. Linqvist, M.E. Lundy, X. Liang, K.J. Groenigen, J. Lee, N. Gestel, J. Six, R.T. Venterea, C. Kessel. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183:156-168.
- QNRM (The State of Queensland Department of Natural Resources and Mines). 2001. Vetiver grass for soil and water conservation. Queensland, Australia.

- Sa, J.C.M., F. Tivet, R. Lal, C. Briedis, D.C. Hartman, J.Z. Santos, J.B. Santos. 2014. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian oxisol. *Soil and Tillage Research*, 136: 38-50
- Sime, G., J.B. Aune, H. Mohammed. 2015. Agronomic and economic response of tillage and water conservation management in maize, central rift valley in Ethiopia. *Soil & Tillage Research*, 148: 20–30.
- Schulze, R.E., 1979. Soil Loss in the Key Area of the Drakensberg - a regional application of the 'Soil Loss Estimation Model for Southern Africa' (SLEMSA). In, *Hydrology and Water Resources of the Drakensberg*, 149-167. Natal Town and Regional Planning Commission, Pietermaritzburg, South Africa.
- Trung, P. T, T, Van. E, Pinners. 2008. *The Vetiver System Applications Technical Reference Manual*. The Vetiver Network International.
- USDA. 1978. Predicting rainfall erosion losses, A guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC.
- USDA-NRCS. 2006. NRCS (Natural Resources Conservation Service) National Resources Inventory - Soil erosion. Washington, DC: USDA-NRCS.
- USDA. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project, Hillslope Profile and Watershed Model Documentation NSERL Report #10.
- Verma, M., S. Sharma, R. Prasad. 2009. Biological alternatives for termite control: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63: 959–972
- Wambeke, J.V. 1986. Soil erosion mapping: Mozambique. SADCC (Southern African Development Coordination Conference) country reports on the erosion hazard mapping of the region. Gaborone, Botswana: SADCC.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith (1978): Predicting rainfall-erosion losses, Agricultural Handbook No. 537, USDA Washington D.C..
- World Bank. 2006. Mozambique Agricultural Development Strategy. Washington, DC: World Bank
- WFP. 1996. Mozambique Seasonal (Nov to Apr) Rainfall Map. Roma, Italy: WFP climate data.eu: <https://www.climatedata.eu/>.