

## 論文

熱帯モンスーン常緑林流域における水・土砂流出機構の解明 (IV)  
—侵食斜面プロット試験の結果—<sup>\*1</sup>壁谷直記<sup>\*2</sup>・清水 晃<sup>\*2</sup>・清水貴範<sup>\*3</sup>・飯田真一<sup>\*3</sup>・玉井幸治<sup>\*3</sup>・宮本麻子<sup>\*3</sup>

壁谷直記・清水 晃・清水貴範・飯田真一・玉井幸治・宮本麻子：熱帯モンスーン常緑林流域における水・土砂流出機構の解明 (IV) —侵食斜面プロット試験の結果— 九州森林研究 75 : 89 - 92, 2022 カンボジアは近隣諸国の中では比較的高い森林率を有していたが、近年の開発により急速に森林が減少している。森林伐採による土砂流出量の増加は、河床上昇を引き起こし、洪水氾濫のリスクを増大させる可能性がある。そこで、土地利用ごとの土砂生産量ポテンシャルを把握するために、プノンベンのカンボジア森林局森林野生生物研究所に侵食斜面プロットを作成した。この観測結果のうち本研究では、常緑林土壌を用いたプロット NO1 の斜面 (斜面長 2 m, 幅 1 m, 傾斜角 15 度) のデータについて解析した。その結果、第 1 期 (雨季後半 : 2018 年 9 月 ~ 11 月) と第 2 期 (雨季前半 : 2019 年 5 月 ~ 8 月) の土砂流出量はそれぞれ 13947.5 g と 8852.9 g であった。これらの二つの期間の流出土砂量の違いは、主に現地の降雨係数 R と被覆率の変化に起因するものと考えられた。

キーワード：キーワード：常緑林, 森林流域, 土砂流出, 熱帯モンスーン気候

## I. はじめに

世界では年間 5.2 万 km<sup>2</sup> の森林が消失しており、東南アジア諸国においても森林減少は深刻な問題である。カンボジアの森林率は 2000 年時点で、57% と、周辺のタイ、マレーシア、ベトナムなどに比べて高い値を維持していた (Food and Agriculture Organization (FAO), 2010)。しかし、貴重な熱帯モンスーン常緑林が多く分布するカンボジアの中央部においても、近年は人口増加に伴う開発により森林が急激に減少していることが明らかになっている (Kurashima *et al.*, 2015)。

一方で、東南アジア地域では気候変動に由来する豪雨が頻発しており、タイでは 2011 年の洪水が大きな問題となった。森林伐採による土砂流出量の増加は、豪雨の際に下流の河川の河床上昇や洪水氾濫のリスク増加を引き起こす可能性が非常に高い。斜面での土砂生産は、降雨強度などの気象条件と土壌、土地利用、地形改変などの立地環境条件により規定される。また、流域スケールでの土砂の移動プロセスを理解するためには、土砂の生産および輸送に深く関係する洪水流出の発生プロセスを明らかにする必要がある。

そこで、東南アジアで比較的豊かに森林が残っているカンボジアの熱帯モンスーン常緑林流域を対象に、土地利用の違いが水と土砂の移動特性に及ぼす影響を解明することを目的として、2016 年から 2021 年までの 5 年間の観測研究を実施した (壁谷ほか, 2018)。その結果、降雨強度が強いカンボジアにおいても斜面傾斜が非常に緩いという地形的特徴や森林植生による侵食防止機能により、土砂移動が抑制されているという実態が明らかとなった (壁谷ほか, 2019; 壁谷ほか, 2020)。

以上のように森林流域スケールおよび森林斜面スケールでの土砂移動の実態解明が進んだ。その一方で、そのような研究結果を

もとに、カンボジア国内の様々な土地利用における土砂流出を予測する必要があり、そのためには、汎用性と簡便性を有し世界各地での適用事例を多く有する USLE 式 (Universal Soil Loss Equation; Wischmeier and Smith, 1978) を用いた侵食推定モデルの利用が考えられる。カンボジアで USLE 式を用いた侵食推定モデルを適用する際に必要となる各種パラメータのうち降雨係数 R は、降雨の侵食エネルギーの入力量を示すものであり、侵食現象の理解には欠かせない。そこで、本研究では、観測で得られた降雨データから降雨係数 R を求めるとともに、侵食斜面プロット試験の観測結果との比較を行ったので報告する。

## II. 調査地および方法

## 1. 試験地概要

図-1 にカンボジア国内の試験地の位置を示した。当研究グループでは常緑林流域試験地 (コンポントム州) において継続的に水文観測を実施している (壁谷ほか, 2014; Kabeya *et al.*, 2020)。これらの水文観測に加えて、2016 年以降、森林からの土砂流出に関する観測を行うために、施設を追加した (壁谷ほか, 2018)。これらの観測施設のうち、侵食斜面プロットはプノンベンのカンボジア森林局森林野生生物研究所の敷地内に設置した。

## 2. 侵食斜面プロット

土地利用ごとの土砂生産量ポテンシャルを把握するために、プノンベンのカンボジア森林局森林野生生物研究所に侵食斜面プロットを作成した (図-2)。このプロットは斜面長 2 m, 幅 1 m, 傾斜角 15 度とした。この中に現地地で採取した森林土壌を配置し、裸地や A<sub>0</sub> 層被覆、植性被覆 (草本類) など異なる被覆条件を設定した。これにより自然降雨に対する斜面下端で土砂流出量を計

<sup>\*1</sup> Kabeya, N., Shimizu, A., Shimizu, T., Iida, S., Tamai, K., Miyamoto, A.: Research on water and sediment discharge mechanism in tropical monsoon evergreen forest catchments (IV): some results of a soil erosion plot

<sup>\*2</sup> 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Ctr. For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860 - 0862

<sup>\*3</sup> 森林総合研究所 For. & Forest Prod. Res. Inst., Ibaraki 305 - 8687

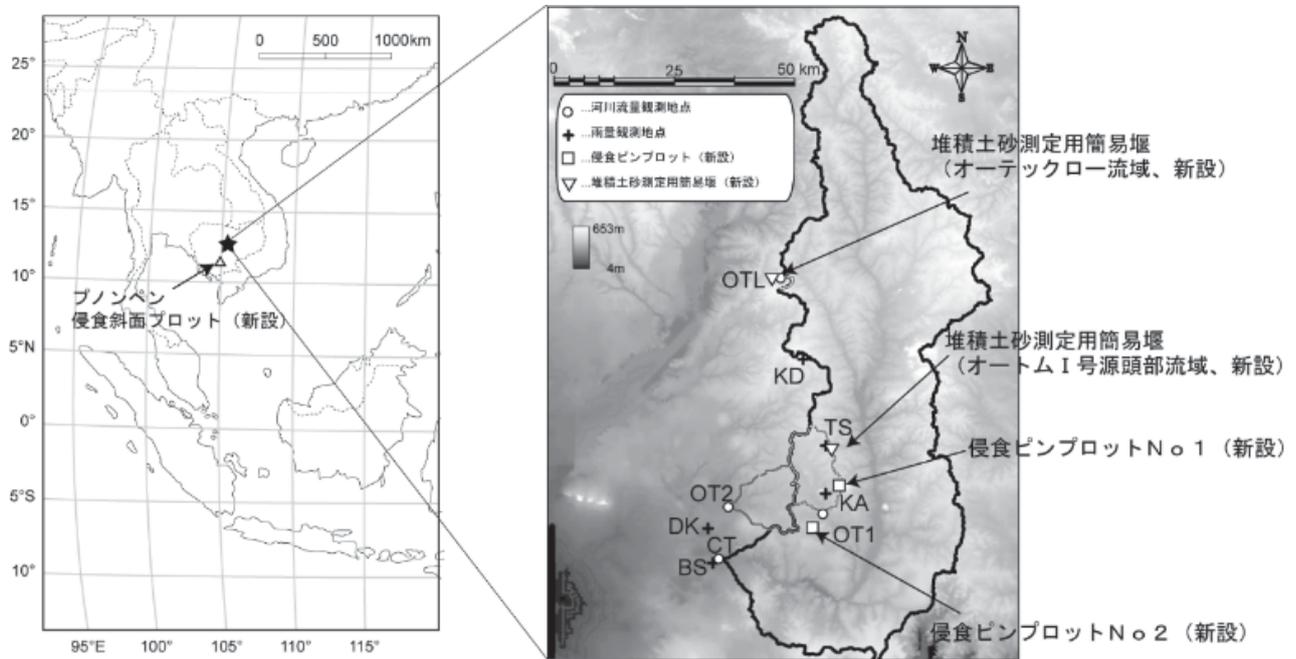


図-1 カンボジア国のプノンベンおよびコンポントム州常緑林流域試験地内に設置した土砂移動観測施設の位置図

斜面長 2 m × 斜面幅 1 m で被覆率 ( $A_0$  層被覆 + 植生被覆) など異なる条件の斜面を並行に配列

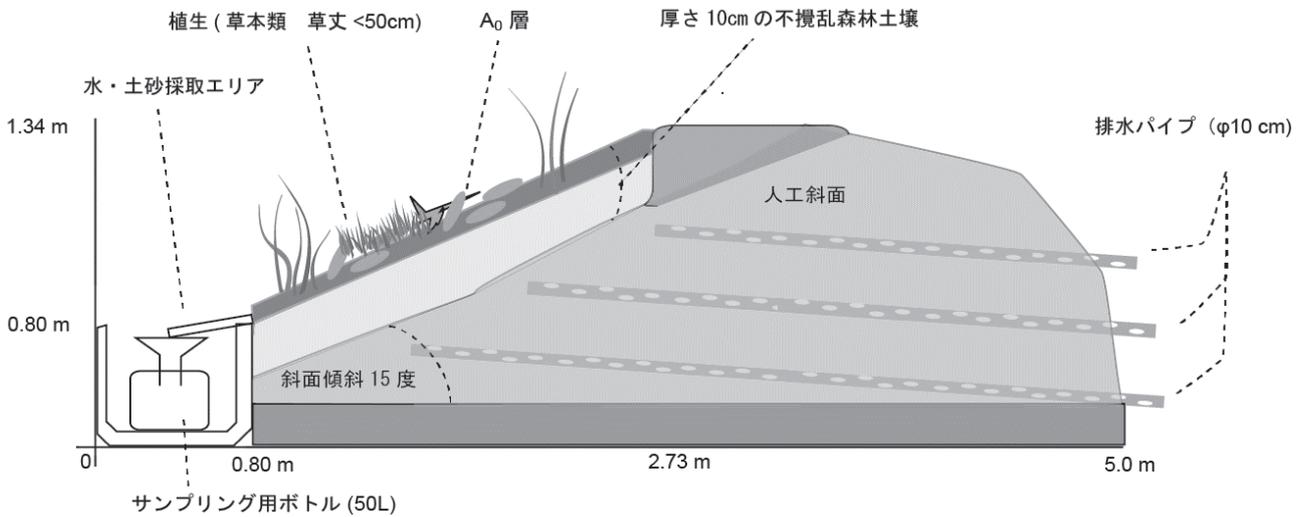


図-2 侵食斜面プロットの設置計画 (断面図)

測した。

侵食斜面プロットに用いた森林土壌は、木製合板とブリキ板により作成した矩形型枠(縦 50 cm, 横 50 cm, 深さ 10 cm)を用いて、なるべく土壌構造を保存した状態で矩形の土壌コアとしてサンプリングした。森林土壌は、コンポントム州のチニット川上流に位置する常緑林流域試験地内のタワーサイト (TS) 周辺の常緑林および混交林で採取した。2016年7月に土壌を採取し、2017年5月に1つの斜面プロットに8個の矩形の土壌コアを配置した(写真-1)。土壌コアは、現地で地表面だった方向が上面にくるようにし、土壌コア同士の間は、コアの間に隙間が生じな

いように密着させた。乾燥などで土壌の表面に亀裂が生じた箇所は、原位置で採取した同じ土壌で丁寧に埋めた。

その後、斜面プロットへの設置、設置後の攪乱影響を除くため、設置後、自然状態で放置した。プロットの土壌の状態が安定したとみられる2018年9月から本格的な観測を実施した。観測は2018年9月12日～11月27日までの雨期後半(第1期)と2019年5月1日～8月21日までの雨期前半(第2期)の2期行った。今回は、もっとも土砂移動が活発だった常緑林土壌を用いたプロット NO 1 の斜面のデータについて記載する。



写真-1 プノンペンに設置した侵食斜面プロットに矩形土塊コアを配置する様子 (2017年5月)

### 3. 降雨係数 R の計算

降雨係数 R は、土砂流出量推定のための USLE 式のパラメータの一つであり、一連続降雨ごとの降雨エネルギー E とその降雨の 30 分間ピーク降雨強度 (1 時間あたりに換算)  $I_{30}$  の積を観測期間で合計した値と定義される (Wischmeier and Smith, 1978 ; 原本は US 慣習単位なのでこれをメートル単位に換算して表記)。

$$R \equiv \sum E \cdot I_{30} \quad (1)$$

R : 降雨係数 ( $m^2 \text{ ton f/ha/hour}$ )

E : 1 cm の降雨の運動エネルギー

単位は ( $m \cdot \text{ton f/ha/cm}$ ) #ton f はメートルトン (= 1000 kg 重)

$I_{30}$  : 降雨強度 ( $\text{cm/hour}$ )

この時、一連の連続降雨は 12.7 mm 以上でかつ無降雨期間は 6 時間以内のものとした。ただし、降雨強度が 15 分間に 6.4 mm 以上あれば、一連続降雨とした。本研究では、計算はすべてメートル単位系で行っており、降雨エネルギー E の計算は次の式によった。

$$E = 210 + 89 \log_{10} I_{30} \quad (2)$$

細山田・藤原 (1984) によると降雨強度  $I_{30}$  を、60 分間ピーク降雨強度  $I_{60}$  で代用しても降雨係数 R の算出結果に差異はない。そのため、本研究では 30 分間ピーク降雨強度 (1 時間あたりに換算)  $I_{30}$  を、60 分間ピーク降雨強度  $I_{60}$  で代用した ( $R \equiv \sum E \cdot I_{30} \approx \sum E \cdot I_{60}$ )。

なお、一連の連続降雨の区切りに関して、細山田・藤原 (1984) は 1 mm/hour 以下の降雨が 1 時間以上継続する場合は、別の降雨として取り扱うという元来の定義とは異なる区分を簡便法として用いている。しかし、降雨後、しばらくは地表の影響が残っているものと考えられる。そのため、本研究では、元来の定義と同様の一連続雨量の区分方法を用いた。

雨量データは、侵食斜面プロットに設置した雨量計 (米国オンセット社 RG-3 M ; 1 転倒 0.2 mm) によるものを用いた。

### 4. 被覆率の計算

試験開始前後の各斜面プロットの斜面の画像データを米国

Wolfram Research 社数式処理ソフト Mathematica v 12.3 によって画像解析し、各プロットの被覆率をリターや落葉などの枯死した有機物からなるリター被覆と生存している植生からなる植生被覆と区別した。デジタルカメラ (Canon 社 EOS-M 及び富士フィルム社 F 770 EXR) を用いて、各プロットの斜面を垂直に撮影した画像を Adobe 社デジタル写真現像ソフト Photoshop Lightroom v 5.7 を用いて、レンズプロファイル補正を行ったのち、画像サイズ 500×1000 ピクセル、解像度 72 ピクセル/インチで出力した。この画像を Mathematica の組み込み関数を利用して処理した。なお、リター被覆の判別には、Morphological Binarize (モルフォロジカルな二値化) 関数を用い、植生被覆には、ColorSeparate (カラーの分離) 関数と Binarize (二値化) 関数を組み合わせて行った。これらの関数のパラメータは、画像とオーバーレイしながらトライアンドエラーにより決定した。

## Ⅲ. 侵食斜面プロットでの観測結果

### 1. 降雨係数 R の変化

降雨量は、第 1 期と第 2 期で、それぞれ 529.4 mm と 528.2 mm で、両者とも 530 mm 前後と変わらなかった (表-1)。一方、降雨係数 R は、第 1 期と第 2 期で、268.2  $m^2 \text{ ton f/ha/hour}$ 、199.2  $m^2 \text{ ton f/ha/hour}$  で第 2 期は、第 1 期の 75% 程度であった (表-1)。このことは、雨季の前半の方が雨季の後半よりも、降雨強度が弱かったということを示している。

表-1 観測期間中の降雨量と降雨係数の集計結果

	降雨量 mm	降雨係数(R) $m^2 \text{ ton f/ha/hour}$
第 1 期 (雨季後半 2018年 9 月~11 月)	529.4	268.2
第 2 期 (雨季前半 2019年 5 月~ 8 月)	528.2	199.2

### 2. 被覆率の変化

試験開始前後の侵食斜面プロット NO 1 における被覆状態の変化を図-3 に示した。試験開始時点では、植生被覆は存在せず、わずかにリターや小枝などが散在する状態であった。このため植被率はゼロで、被覆率 5.3% はすべてリター被覆によるものであった。試験終了後には、自然に侵入した草本類が生育しており、植被率は 10.3% であった。この時の被覆率 16.0% であったことから、試験前後の被覆率の上昇は、草本類の侵入による植被率の上昇が寄与したといえる。

### 3. 流出土砂量の変化

2 つの試験期間における侵食斜面プロット NO 1 の流出土砂量の変化を図-4 に示した。流出土砂量は第 1 期と第 2 期で、それぞれ 13947.5 g と 8852.9 g で第 2 期は、第 1 期の 63% であった。降雨係数 R が、小さかった第 2 期の方が、第 1 期よりも流出土砂量が少なかった。このことは、第 2 期の方が第 1 期よりも降雨係数 R が小さく降雨の侵食に作用するエネルギー量が少なかったことと合わせて、植生回復により被覆率が上昇しているということの両者が寄与しているものと考えられた。

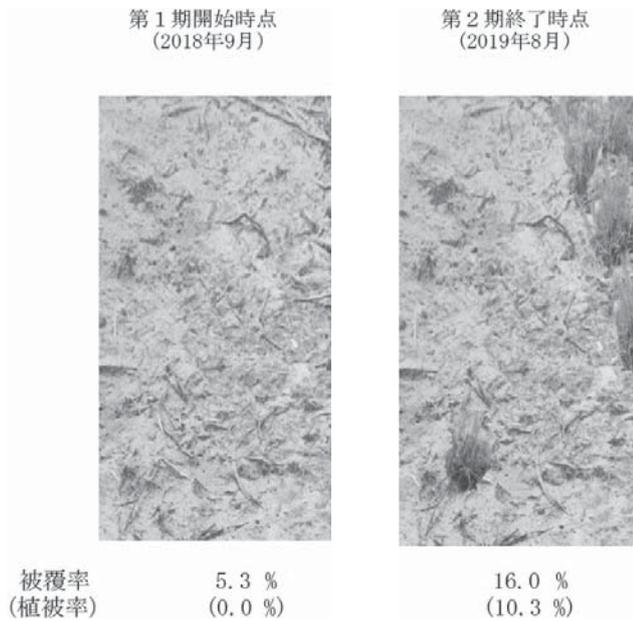


図-3 侵食斜面プロットNo1の試験開始前後の被覆状態の変化

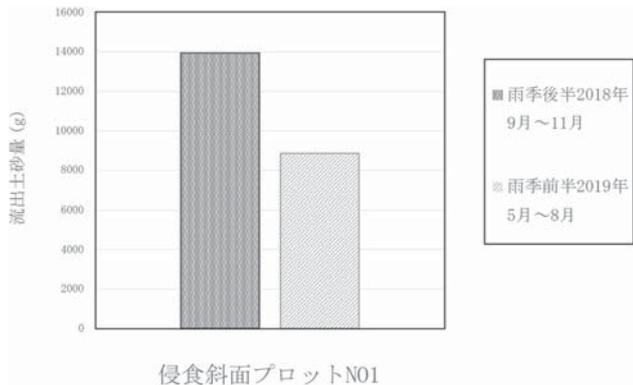


図-4 侵食斜面プロットNo1における流出土砂量の変化

#### IV. 結論

以上のように、本研究で作成した侵食斜面プロットにおける2期間の流出土砂量の違いは、現地の降雨係数Rと被覆率の変化に起因するものと考えられた。今回の解析から総雨量が同じでも降雨パターンが異なるために雨季前半よりも雨季後半の方が侵食に作用する降雨エネルギーが大きいことが明らかとなった。このことは、雨季の前半よりも小乾季を挟んだ雨季の後半に降雨規模の大きな降雨が発生しやすいというKabeya *et al.*, (2020) による現地での長期観測結果とも一致している。

一方、被覆率の上昇は、侵食防止に作用していると考えられたが、今回の試験ではデータが限られている。今後は、土壌タイプや被覆状態の異なる斜面プロットの観測データを追加して解析を進めるとともに、USLE式のパラメータの土壌係数Kなどの同定を行う予定である。

#### 謝辞

現地観測、測器の設置に関してカンボジア国森林局森林野生生物研究所の皆様にご多大なご協力を頂いた。本研究は、クリタ財団研究助成金および科研費(16K07799)の一部を用いて実施した。

#### 引用文献

FAO (2010) Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry paper No 163, 378 pp, FAO, Rome  
 細山田健三・藤原輝男 (1984) 農業土木学会誌 52 : 315 - 321  
 壁谷直記ほか (2014) 水利科学 338 : 1 - 16  
 壁谷直記ほか (2018) 九州森林研究 71 : 79 - 82  
 壁谷直記ほか (2019) 九州森林研究 72 : 51 - 55  
 壁谷直記ほか (2020) 九州森林研究 73 : 75 - 78  
 Kabeya N. *et al.* (2020) Japan Agricultural Research Quarterly 55 : 177 - 190  
 Kurashima T. *et al.* (2015) Forest 6 : 3087 - 3108  
 Wischmeier W. H., and Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation. United states Department of Agriculture (USDA), Agriculture Handbook No 537, 58 pp, USDA, Washington D.C.

(2021年11月12日受付; 2021年12月13日受理)