

学 位 論 文 題 名

Study on Cohesive Soil Erosion in Steeply Sloping Cultivated Field of Humid-Tropic Indonesia

(インドネシア国ジャワ島ムリチャダム上流域での
粘性土急勾配畑地を対象とした土壌浸食速度に関する研究)

学位論文内容の要旨

現在、多くの農業国においては、耕作・放牧・森林伐採などに起因する土壌浸食による土砂流出が大きな問題となっている。土壌浸食は、流域の水資源と土壌資源を適切に管理していくうえでの重要な課題として指摘されている。インドネシア国においても、非合法の森林伐採や人為的な土地改変、大規模で高頻度の焼き畑農業などにより、土壌浸食は加速的に進行しつつある。その結果、河川域や河口域での濁水問題、灌漑水路での土砂堆積による農業施設の損傷、貯水池での堆砂による洪水調節、水利用などへの支障が発生し、大きな社会問題となっている。

本研究で対象としているインドネシア国ジャワ島のムリチャダム上流域では、年間雨量が 3000～4000mm にも達するうえに、流域面積のほとんどが粘性土からなる。さらに、流域全体が急勾配の農地で占められ、年三回も行われる鋤きこみによって、大規模で定期的な地表攪乱がもたらされている。このような自然的・人為的条件のために、年間約 420 万 m³ に及ぶ土砂が流域から流出し、畑地の地表面が過去 20 年間に約 2m も低下した。その下流に位置するムリチャダムでは、年々堆砂が進行し、10～20 年後にはダムは満砂状態となり、洪水調節、水資源確保の機能を損失することが懸念され、国家的問題となっている。

今後、持続可能で合理的な流域管理を行っていくために、流域全体の土壌浸食が流域環境に与える影響の定量的評価が必要となるが、そのためには、土壌浸食の実態に基づいた精度の高い土壌浸食モデルを構築しなければならない。土壌浸食モデルは、これまでの過去 20 年間に、経験モデルから物理モデル、数値モデル(数値シミュレーション)へと発展してきたが、いずれのモデルもいまだにその適用性には多くの限界を有する。これらのモデルが欧米の地形や土壌特性を条件として開発されてきたこと、モデルを構成する多くのパラメータを適格に同定することが非常に困難であること、モデルの多くがインドネシア国のような東南アジア地域の降雨・地形・土壌特性を十分反映していないこと、発展途上国では基礎的な水文・土砂・土質データが十分蓄積されていないため土壌浸食モデルの適用が困難であること、などの問題が指摘されている。さらに、本研究が対象としたムリチャダム上流域の畑地のように、粘性土からなる急勾配畑地という条件の土砂生産場に適用できる土壌浸食モデルはこれまでほとんど提案されてこなかった。そこで、本研究は、インドネシア国ジャワ島のムリチャダム上流域を対象として、これらの問題点を解決するための基礎となる畑スケールでの土壌浸食モデル(浸食速度式)を提案することを目的とした。

まず始めに、ムリチャダム上流域全域を対象として、畑地から土壌サンプルを複数採取し、各種の土質試験によって粘性土の詳細な土質特性を明らかにした。また、畑地での浸食実態を詳細

に調べ、表面流による浸食と想定される畑地地表面でのリル、ガリーの分布、規模を計測し、表面流による浸食が主体であることを明らかにした。さらに、研究対象地の畑(200m²)において、2004年～2006年の雨期にかけて、水文、土砂流出観測を実施した。降雨、畑地地表面表層部の土壌水分変動、表面流のビデオ撮影、流出土砂の定時間間隔での直接採取による流出土砂量の変化(土砂ハイドログラフ)、採取した土砂の粒径分布などを明らかにした。

ムリチャダム上流域の畑地の土壌は、40～60%が粘土、シルトから構成され、平均乾燥密度は0.7g/cm³である。観測期間中に土砂流出を生じさせた降雨の継続時間は1時間～1時間半程度の短時間であるが、10分間雨量で約3mmと降雨強度は大きい。また、降雨初期には、雨滴の地表面衝突により、地表面表層部の土粒子が離脱する現象が確認され、一度、表面流が発生すると、土壌浸食は主に表面流の掃流力によって生じていることを観察できた。さらに、降雨による土壌水分の上昇から地表面表層部の飽和によって、表層部が著しく軟弱化することを確認した。

このような土壌浸食実態をもとに、粘性土の粘着力の含水率による変化と浸食速度との関係を明らかにするために、二種類の模型実験を実施した。まず、表面流の掃流力による畑地地表面表層部の浸食現象を再現するために、地表面表層部のみをせん断できる表層せん断試験機(共同実験者により開発された装置)を用いて、粘着力と含水率との関係を調べた。せん断試験用の供試体は、現地の畑地の土壌で製作した(乾燥密度を現地条件と同一とした)。その結果、畑地地表面表層部の粘着力は含水率の増加とともに指数関数的に減少することが明らかにされた。次いで、流路幅6.5cm、流路長165cmの直線流路模型を用いて、勾配、掃流力を調整し、粘着力と浸食速度との関係を調べた。流路底面は、せん断試験用供試体と同様に、現地の畑地の土壌で製作した(乾燥密度を現地条件と同一とした)。粘着力が減少すると、浸食速度が急増すること、表面流の摩擦速度が増大すると浸食速度も増大すること、浸食が生じる限界摩擦速度は約0.02m/sであること、などが明らかにされた。

以上の成果をもとに、浸食が生じる限界の粘着力と粘着力との比、表面流の摩擦速度と限界摩擦速度との差をパラメータとした基礎浸食速度式を開発した。この式によって計算された浸食速度値は実験による浸食速度の計測値に良く近似する結果となり、上記の直線流路模型のスケールの範囲においては、実験結果を相応の精度で再現することができた。

つぎに、基礎浸食速度式をもとに、上記の直線流路模型よりも幅広の斜面模型(幅75cm、斜面長100cm)を製作し、これを利用して表面流の流下による斜面地表面構成粒径の変化(アーマリング作用)にも対応できる浸食速度式への改良を行った。ここで、新たに斜面地表面構成粒径の変化を改良した。その理由は、直線流路模型では、表面流が流路全幅を流下するために地表面の粒径変化がほぼ均一に生じ、そのため流路全幅で浸食が発生するが、斜面模型では、斜面幅が広いいため、表面流が斜面全幅で均一の水深で流下することではなく、結果として浸食発生区域と非発生区域が偏在するためである。

インドネシア公共事業省砂防技術センターの保有する大型人工降雨実験装置を用いて、現地で観測できた降雨パターンを再現し、現地の畑地の土壌で製作した斜面(乾燥密度を現地条件と同一とした)の下端からの流出土砂量の変化と流出した土砂の粒径分布、斜面地表面での粘着力、表面流の流れと地表面構成粒径の変化などを計測した。地表面構成粒径の変化は、画像解析ソフト(Image J software)を用いてその経時変化を明らかにして、表面流の流下により浸食が発生した区域を抽出した。その結果を用いて、地表面構成粒径の変化した区域の面積が斜面全体の面積に占める割合を新たなパラメータとして、基礎浸食速度式に組み込んだ。その式を用いることによって、基礎浸食速度式では斜面模型のスケールにおいて十分表現し得なかった土砂流出ピーク近傍付近での浸食速度を高い精度で再現することができ、土砂流出時間全域にわたる浸食速度の再現が可能となった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 谷 知 己

副 査 教 授 長 澤 徹 明

副 査 准教授 山 田 孝

(三重大学大学院生物資源学研究科)

学 位 論 文 題 名

Study on Cohesive Soil Erosion in Steeply Sloping Cultivated Field of Humid-Tropic Indonesia

(インドネシア国ジャワ島ムリチャダム上流域での
粘性土急勾配畑地を対象とした土壌浸食速度に関する研究)

本論文は7章からなり、図30、表7、引用文献48を含む114ページの英文論文で、他に参考論文2編が添えられている。

世界の発展途上国では、耕作・放牧・森林伐採などに起因する土壌浸食が、流域の水資源と土壌資源の管理において大きな問題となっている。本研究で対象とするインドネシア国ジャワ島のムリチャダム上流域は、流域のほとんどが粘性土からなる急勾配の農地で占められ、高頻度の鋤きこみによって、深刻な土壌浸食がもたらされている。過去20年間に畑地表面が約2m低下し、毎年約420万 m^3 に及ぶ土砂がムリチャダムに流入している。今後、持続可能で合理的な流域管理を行うために、流域全体の土壌浸食の定量的評価が必要となる。しかし、これまで利用されてきた土壌浸食モデルは、急勾配・高粘性・多雨・土壌攪乱などの条件下にある熱帯畑作農業地域では適用困難であった。そこで、本研究では粘性土からなる急勾配畑地という条件で適用できる土壌浸食モデル(浸食速度式)を開発し、新たに提案することを目的とした。

まず、全流域の畑地から土壌サンプルを採取し、各種土質試験によって粘性土の土質特性を分析し、畑地に形成されたリル、ガリーの位置と規模から表面流による浸食が卓越することを明らかにした。さらに、畑地内に200 m^2 の試験プロットを作成し、2004年～2006年の雨期に水文及び土砂流出の観測を実施し、降雨量、畑地表層部の土壌水分変動、表面流発生状況、流出土砂量の変化、表層土の粒径分布などを調べた。その結果、ムリチャダム上流域の畑地の土壌は、40～60%が粘土・シルトから構成され、平均乾燥密度は0.7 g/cm^3 であった。観測期間中の降雨は継続時間1時間～1時間半と短時間であるが、降雨強度は10分間雨量約3mmと大きい。また、降雨時には畑地表層部の飽和により土壌が軟弱化し、土壌浸食は主に表面流発生とともに掃流力により生じていることを確認した。

そこで、粘生土の含水率変化による粘着力変化と浸食速度との関係を二種類の実験により求

めた。まず、掃流力による畑地表層部の浸食現象を再現するために、表層部のみせん断可能な表層せん断試験機を用いて、粘着力と含水率との関係を調べた。その結果、含水率の増加とともに畑地表層部の粘着力は指数関数的に減少することが明らかにされた。次に、直線流路模型（幅 6.5cm、流路長 165cm）を用いて、粘着力と浸食速度との関係を調べた。その結果、粘着力の減少に伴い浸食速度が急増し、表面流の摩擦速度増大に伴い浸食速度が増大し、その限界摩擦速度が約 0.02m/s であることが明らかになった。これより、浸食が生じる限界の粘着力と粘着力との比、表面流の摩擦速度と限界摩擦速度との差をパラメータとした基礎浸食速度式を開発した。この式によって計算された浸食速度は実験による計測された浸食速度に良く近似し、模型スケールでは実験結果を相応の精度で再現できたといえる。

さらに、直線流路模型よりも幅広の斜面模型(幅 75cm, 斜面長 100cm)を製作し、基礎浸食速度式を表面流の流下によるアーマリング作用にも対応できるように改良した。斜面模型実験においては、表面構成粒径の構成を改良した。その理由は、直線流路模型では表面流が流路全幅を流下するため地表面の粒径変化がほぼ均一に生じ、そのため流路全幅で浸食が発生するが、斜面模型では表面流が斜面全幅にわたり均一水深で流下することはなく、浸食発生区域と非発生区域とが偏在するためである。

最後に、インドネシア公共事業省砂防技術センターにおいて、乾燥密度を現地と同一にした現地の畑地土壌で斜面を製作し、大型人工降雨実験装置を用いて観測された降雨パターンを再現し、流出土砂量の変化と流出土砂の粒径分布、地表面の粘着力、表面流の流れと地表面構成粒径の変化などを計測した。地表面構成粒径の変化は、画像解析ソフト(Image J software)を用いてその経時変化をとらえ、表面流により浸食が発生した区域を抽出した。その結果を用いて、地表面構成粒径の変化した区域が斜面全体に占める面積割合を新たなパラメータとして、基礎浸食速度式に組み込んだ。この式を用いることによって、模型スケールでは十分表現し得なかった土砂流出ピーク近傍付近での浸食速度を高い精度で再現することができ、全降雨時間にわたる浸食速度の再現が可能となった。

この成果は、関連分野の国内外学会で高く評価され、今後インドネシア国の急勾配畑地における土壌浸食予測にも実用化されるものと考えられる。よって、審査員一同は、ニョマン スワルタが博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。