

学 位 論 文 題 名

Sediment transport and morphodynamics
in a mountainous bedrock stream

(山地岩盤河川における土砂移動及び地形動態に関する研究)

学位論文内容の要旨

土砂流出の抑止と水辺環境保全の調和のために、河川流域をひとつの土砂流出系として一貫して扱うことの重要性が近年強く指摘されている。それに伴い、これまで土砂生産源としてひとまとめに扱われてきた山地河川での土砂動態を解明することが下流河川にとっても重要な課題となってきた。とくに、日本や韓国のように、脆弱で急峻な山地地形をなす環太平洋造山帯と東アジアモンスーン気候の影響を受ける多雨地域に位置する国土では、急勾配の山地河川が扇状地や海浜に直接流れ込むことが多く、土砂災害の軽減・防止および流域環境保全にとって山地河川の土砂動態を解明することが急がれる。

本研究では、急勾配の山地岩盤河床を対象とし岩盤の起伏や散在する巨礫などの障害物の土砂移動に及ぼす影響を解析し、この過程で形成される地形特性として階段状（以下、ステップ・プール）構造の形成及び変形過程を明らかにし、山地岩盤河川における土砂及び地形動態の仕組みを解明することを目的としている。急勾配の山地河川は土砂流出速度が速いため岩盤河床となっているところが多く、これら岩盤の起伏や掃流限界を超えた巨礫などの河床微地形が土砂移動に及ぼす影響はとくに大きいと推測されるが、砂防学的にはこれまでほとんど無視されてきた。また、河川生物の生息場を提供するステップ・プール構造も岩盤起伏と巨礫の分布に強く支配されていると推測される。したがって、山地河川における土砂動態の仕組みを解明するためには、河床岩盤の起伏と巨礫の影響、それによりステップ・プール構造の形成過程を明らかにしなければならないのである。

本論文の第1章では、山地河川の地形学的な特徴より概観し、また関連分野の先行研究において山地岩盤河床での土砂動態がどのように理解されてきたか、そして岩盤河床に関する研究の重要性について詳述している。続く第2章で、とくに研究対象地として日本の代表的な急勾配岩盤河床である九州山地宮崎県椎葉村の一ッ瀬川源流大藪川の3 km区間を選び、この河川流域の地質、気象、土地利用とこれまでの先行研究について述べている。

本研究は、まず岩盤河床の起伏と河床に散在する巨礫の土砂移動に及ぼす影響を解析している。岩盤河床の起伏については、独自に障害物の規模と頻度を表す簡単な指標を考案し、これまで地形学で利用された Smith の指標との関係を整理したうえで適用した。また、巨礫については、同河川における過去12年間において最大水深を記録した1997年度の最大洪水流量をもとに限界掃流力を求め、これから移動最大礫径を求め、同様に起伏指標として評価した。さらに、土砂移動量は、1995年から2007年まで観測された河床横断面の変化をもとに平均35m間隔で河床変動量を算出した。これら起伏指標と河床変動量との関係を統計分析し、起伏の頻度よりも面積の規模がより強く影響すること、さらにこれらの

重相関分析より起伏が土砂の一時的滞留に大きな影響を与えていることを明らかにした。

つぎに、岩盤起伏によって一時的に滞留土砂がステップ・プールを形成することに着目し、ステップ・プールの幾何学形状（ステップの間隔、高さ、落差、プールの間隔と深さ）を分析し、これらと河床勾配との関係、ステップを構成する粒径組成、そして岩盤起伏の影響について解析した。その結果、既存研究と同様に、ステップ・プールの間隔は川幅の約 2 倍であることが確かめられた。しかし、ステップ・プールの幾何学形状と河床勾配との相関関係は低く、河床勾配がステップ・プール構造を支配する因子ではないことがわかった。ステップの安定条件として河床勾配に対するステップ勾配の値を分析し、大藪川では他の研究対象地とくらべ比較的緩やかな勾配でステップが安定することが示唆された。

また、ステップを構成する砂礫の粒径組成解析より、ステップの形成に支配的な key boulder とその他のステップ構成礫との間に高い相関関係があり、岩盤河床で巨礫の集積が石礫の滞留を促すことが明らかになった。最後に、河床岩盤形状のステップ・プール構造に及ぼす影響を分析した。その結果、ステップ・プールの幾何学形状（ステップとプールの間隔、プール深さ）と岩盤突起面積との相関関係は統計的に有意であり、岩盤突起面積のステップ・プール構造に及ぼす影響が確認された。以上より、岩盤河床では巨礫の集積がステップ・プール構造の形成に影響を及ぼし、河床勾配がほぼ一定であればステップ・プール構造は河床勾配よりも岩盤形状の影響を強く受けることが明らかになった。

さらに、上で示した 1995 年から 2006 年の間の時間経過に伴う河床低下プロセスとステップ・プール構造の関係について解析した。その結果、河床低下に伴ってステップ・プール幾何学形状は徐々に乱れて拡散し、やがてその規模が小さくなる傾向が見られた。特に、ステップ・プールの間隔と発生個数とは時間経過に伴って反比例の相関関係を示した。特に、ステップ・プールの幾何学形状が非常に乱れた 2002 年と 2006 年において礫の移動可能性を判定した結果、河床礫は移動してもステップ構成礫は動かず、結局河床礫の移動がステップ・プール構造の再形成に寄与することが示唆された。さらに、Kennedy の反砂堆モデルを用いてステップ・プール構造の変形過程を水理学的に検討した。その結果、ステップ・プールは、本計測を開始した 1995 年には上流域の河床形態である反砂堆領域にあったが、時間経過とともに下流域の河床形態である砂漣・砂堆領域へと徐々に変化していることがわかった。以上より、岩盤河床において形成されたステップ・プール構造は、河床低下に伴う土砂の分級移動によって分散・再形成され、結局、これらが安定化する過程で変化することが示唆された。

これらの結果より、過去 12 年間の土砂流出に関して、岩盤河床と巨礫からなる起伏が土砂の滞留を引き起こすプロセスとその際の水理機構について新たな知見を示した。これまでは、急勾配の山地河川流域は土砂生産源としてブラックボックスとみなされ、そこからの流出土砂量のみ治山・砂防計画の対象としていたが、実は河床岩盤や巨礫に支配された土砂滞留区間であることが実証的に示された。この研究成果を生かせば、計画土砂量のみを治山・砂防計画の基礎とすることなく、山地河川流域からの土砂流出の頻度や規模という質的な特徴を生かした多様な治山・砂防計画を立案することが可能となる。今日、災害の防止軽減と環境保全の両立が強く求められており、多様な治山・砂防計画への足がかりを実証的に提供したことは非常に重要な成果である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 谷 知 己

副 査 教 授 中 村 太 士

副 査 准教授 黒 木 幹 男 (工学研究科)

副 査 教 授 全 槿 雨

(韓国・江原大学校山林科学大学)

学 位 論 文 題 名

Sediment transport and morphodynamics in a mountainous bedrock stream

(山地岩盤河川における土砂移動及び地形動態に関する研究)

本論文は6章からなり、図4、表8、引用文献176を含む115ページの英文論文で、他に参考論文3編が添えられている。

日本や韓国などのプレート境界に位置する地域では、急勾配の山地河川が扇状地や海浜に直接流れ込む。このような河川流域では、土砂災害の軽減・防止および流域環境の保全のために、土砂生産源である山地河川の土砂動態を解明することは重要な課題となる。本研究では、急勾配の山地河川に特有の岩盤起伏や巨礫などが河床障害物として土砂移動に及ぼす影響を解明し、土砂移動に伴って形成される階段状河床地形（以下、ステップ・プール）の構造解析より、山地河川における土砂及び地形動態を明らかにすることを目的としている。

本研究では、まず山地岩盤河川での土砂動態に関するこれまでの研究成果から岩盤起伏の土砂移動に対する役割について詳述し、代表的な急勾配岩盤河川である九州山地の一ツ瀬川源流にあたる大藪川を取り上げる研究上の意義を述べている。3章以下の本論では、河床岩盤の起伏と河床に散在する巨礫とが土砂移動に及ぼす影響を統計的に解析した。河床岩盤の起伏と巨礫とを河床障害物とみなし、その規模と頻度によって表した。巨礫については、過去12年間の最大洪水流量によって移動した最大礫径以上の礫とした。土砂移動量については、1995年から2007年までの12年間にわたる河床横断測量から算出した河床変動量と滞留土砂量により表した。これらの関係を統計分析した結果、河床障害物の頻度よりも規模のほうが河床変動により強く影響し、移動土砂の一時的滞留をもたらしていることを明らかにした。

つぎに、ステップ・プール（ステップの間隔、高さ、落差、プールの間隔と深さ）の構造を分析し、河床勾配、ステップの構成礫径、河床岩盤の起伏などとステッププールとの関係を調べた。その結果、現在のステップ・プールの間隔は川幅の約2倍であったが、その幾何形状と河床勾配との関係は明瞭ではなかった。そこで、ステップの安定条件として河床勾配に対す

るステップ勾配の比に着目したところ、本研究では既存研究より低い値でステップ・プールの形状が安定していることがわかった。また、ステップ構成礫の粒度組成を解析した結果、ステップの形成に支配的な巨礫 (key boulder) とその他のステップ構成礫の粒径に高い相関関係があり、巨礫の集積により小径の石礫の滞留が促されることがわかった。最後に、岩盤起伏がステップ・プールの形成に及ぼす影響を分析したところ、岩盤起伏の規模と統計的に有意な相関関係が見られた。以上より、急勾配岩盤河川でのステップ・プールの形成は集積した巨礫に影響を受け、巨礫の集積は河床勾配よりも岩盤起伏に依存することが明らかになった。

また、河床低下に伴うステップ・プールの変化について分析した結果、ステップ・プールの幾何形状は河床低下とともに徐々に乱れて、その規模が小さくなる傾向が見られた。ステップ・プールの間隔と発生個数とは時間経過に伴って反比例した。さらに、Kennedy の反砂堆モデルを用いてステップ・プールの変形を水理学的に検討した。その結果、ステップ・プールは、滞留土砂量が比較的多い時期には反砂堆領域にあり、時間経過とともに砂漣・砂堆領域へと変化することがわかった。以上より、岩盤河川において形成されたステップ・プールは、河床低下に伴って分散・再形成され、構造的に安定化に向かうことが示された。

これらの結果より、岩盤起伏や巨礫が土砂の滞留を引き起こすプロセスとその水理機構について新たな知見を示した。土砂生産源である急勾配の山地岩盤河川は、土砂動態においてはこれまでブラックボックスとみなされ、流出土砂量のみを治山・砂防計画の対象としてきた。しかし、本研究により岩盤起伏や巨礫に支配された土砂滞留プロセスが実証的に示された。この研究成果を生かせば、計画土砂量のみを治山・砂防計画の基礎とすることなく、土砂生産源からの土砂流出の頻度や規模という質的な特徴を生かした多様な治山・砂防計画を立案することが可能となる。今日、災害の防止軽減と環境保全の両立が強く求められており、多様な治山・砂防計画への足がかりを実証的に提供したことは非常に重要な成果である。この成果は、国内外の関連学会で高く評価されている。よって、審査員一同は、金 錫宇が博士 (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。