

学 位 論 文 題 名

ENVIRONMENTAL - GEOMORPHOLOGICAL STUDIES  
ON EROSION AND DEBRIS TRANSPORT

（侵食と砂礫の輸送に関する環境地形学的研究）

学位論文内容の要旨

本論文では、流域の水路における土砂の主な輸送形式である混相流、浮流、掃流について、それらの発生要因、出現頻度、土砂濃度と流れとの関係を流域斜面の侵食過程および水路における運動形態の解明を通して明らかにした。本論文は以下の5章からなる。

第1章は序論であり、本研究の環境科学的意義づけを行い、研究目的および対象とした地域・施設を述べている。人間や動植物の立地基盤となっている流域の地形は、斜面で侵食された土砂が混相流、浮流、掃流といった様式で輸送されることで形成されている。そこで、これらの輸送様式ごとのプロセスを、流域斜面の侵食過程および水路における運動形態の解明を通して明らかにすることを目的とした。調査地には、大規模な噴火活動により不安定土砂が大量に堆積したために、混相流としての泥流が頻発した有珠山麓の流域と、固結した細粒な赤黄色土壌が厚いために、浮流による土砂移動が継続して発生しやすい沖縄島の流域を選んだ。より粗粒な岩屑が輸送される掃流形式については、これらの流域の水路で生じているが、水路床近くの運動を観察することはきわめて困難であるので、掃流時の粒子の運動を明らかにするために室内実験を行った。

第2章は、1977-1978年の噴火活動により降下火砕物質に覆われた有珠山麓の流域で生じた泥流について論じている。調査は溪床において地形変化および、流動堆積物の堆積量、粒径、粒子密度を調べ、斜面上では基準のピンを埋設して侵食量、および小流域からの表面流出量を測定した。

その結果、細粒火山灰の降下後、2ヶ月間（1978年9～10月）に、3回の泥流が発生した。このときの降雨状況から、最小5mm/10minの降雨により表面水流が発生していることがわかった。表面水流は、地表面を覆った火山灰層の透水性が低いために生じたもので、斜面ではこの水流によりリル間地、リルのいずれの微地形上でも侵食が進行した。このときの侵食深は、ピンを用いた測定により、それぞれ深さ34mm、56mmに達したことが明らかとなった。それに伴って、多

量の土砂が溪床に供給されており、これと支流の溪床付近の侵食による土砂が泥流の流出土砂を形成した。すなわち、泥流による流出土砂量は、堆積土量からみると3回それぞれ1,200 m<sup>3</sup>, 17,200 m<sup>3</sup>, 103,000 m<sup>3</sup>であり、そのときの流出水量は降雨状況と斜面堆積物の含水状況から3,000 m<sup>3</sup>, 3,900 m<sup>3</sup>, 12,600 m<sup>3</sup>と求められた、その結果、泥流は5～21 mm/minの降雨によって体積濃度0.3～0.9の高濃度の混相流として流動したことが明らかとなった。

第3章では、流域からの浮流土砂流出の典型例として、赤黄色土壌で構成される沖縄島北部の事例を論じた。調査は裸地において、降雨による表面流出の発生、リルとリル間地の微地形ごとの侵食量、また流域の河川において流量と浮流土砂量を測定した。

その結果、裸地化した斜面では、最小2 mm/10 minの降雨により水流出が生じる。この表面流出と雨滴の作用により、リル間地では地表面がほぼ一様に侵食されるが、リルの水路内ではリル水流の集中により、裸地化した斜面のリル流域面積・地点勾配とともに侵食量が増加する。また、土壌は粒径0.1 mm以下の細粒分で構成されるので、ほとんどがこの侵食により流出し、浮流土砂を形成する。このことは小流域において確認された。すなわち、浮流土砂の流出は裸地斜面からの出水と同時に濃度が増加し、降雨が停止して裸地での侵食が止まると濃度が急減した。また浮流土砂の粒径が土壌の細粒分と一致した。さらに、河川水路に流出した土砂は、シアーの大きな水路底近くから水面付近にまでまき上がり、浮遊して輸送されることが水路断面における土砂濃度の分布の直接測定から明らかとなった。

第4章では、掃流輸送について水路実験から掃流時の粒子の運動形態を明らかにした。実験では、まず流域水路の状態を模して人工水路を造成し、粒径5.5 mmの礫を1.5 g/sずつ0.0019～0.0035 m<sup>3</sup>/sの流量中に供給して掃流状態を出現させた。さらにその状態において水路側面から2台のビデオカメラを用いて運動礫を撮影し、その映像の立体画像解析により礫の運動形態を詳しく調べた。

その結果、流れは水深が上下流に一定な等流状態であり、レイノルズ数は12,600～17,900で乱流、フルード数は1.8で射流の状態であった。流量の増加とともに水路床の勾配は小さくなり、礫はその水路床の底部に限って分布し、水路中の礫の平均濃度は(1.6～3.2)/10000と低い状態であった。礫粒子の運動は、1/60秒の時間間隔でその軌道を追跡してみると、水路底部から飛び上がりながら、横断方向の右岸側に移動し、下がりながら左岸方向にもどる螺旋状の軌道をとる躍動をすることが明らかとなった。さらに、礫は径深に比例する横幅をもつ輸送帯のなかを移動しつつ輸送されることをとらえることができた。

第5章では本研究の成果を総括している。混相流、浮流、掃流の発生には土砂礫の供給量、粒

子の特性、流れの状態が関与することを示した。すなわち、泥流をもたらす混相流は多量の不安定土砂の存在と降雨の発生とが合わさったときに発生する。浮流は、斜面の細粒土層が降雨にともなうリル流によって侵食され、流出した細粒物質が水流の上面にたつる浮遊状態を形成することによって出現する。降雨強度によって比較すると、浮流の発生は、混相流の発生より弱い降雨強度でも可能である。さらに、掃流は粗粒の砂礫が低濃度で輸送されるときに出現し、それぞれの礫粒子は水路底に近接する部分で螺旋運動をしながら、躍動をくり返して運搬されているといえる。

## 学位論文審査の要旨

|    |    |       |
|----|----|-------|
| 主査 | 教授 | 小野有五  |
| 副査 | 教授 | 菊地勝弘  |
| 副査 | 教授 | 中尾欣四郎 |
| 副査 | 教授 | 福田正己  |

本論文は流域における砂礫の主要な輸送形式である混相流・浮流・掃流について、それらの発生要因・出現頻度・土砂濃度と流れとの関係を、流域斜面での侵食過程および水路における砂礫粒子の運動形態の解析を通じて明らかにしたものである。

論文は5章からなり、第一章では、序論として本研究の環境地形学的意義づけを述べるとともに、研究の目的および野外観測を行った二地域の概観を述べている。第二章以下が本論にあたる。

第二章では、混相流の典型例として、1977-78年の噴火活動により、厚い降下火砕物質に覆われた有珠山麓の流域で、細粒火山灰の降下後、2ヶ月間に発生した泥流についての分析を行った。流域斜面に多数埋設した侵食ピンによる測定によって、降灰後の斜面での侵食と堆積の過程を詳細に明らかにし、降雨強度との関係を調べることによって、泥流の発生条件と発生プロセスを解明することができた。すなわち、(1) 表面流出は、透水性の低い細粒火山灰層が斜面上を一樣に覆ったあと、最小5 mm/minの降雨強度の雨によって生じ、(2) この水流によって斜面上にはリルおよびガリーなどの侵食地形が形成され、(3) 溪床に供給された土砂は、降雨強度5~21 mm/10 minの降雨によって、高濃度の混相流として移動し、泥流を発生させたことを明らかにした。

このほか、降下火山灰に覆われた流域斜面では、クリープや表層崩壊による土砂移動も発生した。火山灰の降下時期、火山灰の粒径、降雨強度などとの関係においてこれらの斜面侵食プロセスを整理し、斜面侵食の総量に対する各プロセスの割合の時間的変化を明らかにすることができた。この結果、対象とした流域斜面では、リル・ガリーでの侵食プロセスと、リル間地での侵食プロセスの卓越が認められた。

第三章では、流域からの浮流土砂流出の典型例として、赤黄色土壌に覆われた沖縄島北部の事例を解析した。扱った流域は一次から三次の流域にわたっており、いずれも流域内にはパイナップル畑や宅地造成のために森林が伐採され、表層土壌が侵食を受けて裸地化した斜面が広がっている。ここでは（１）最小  $2\text{ mm}/10\text{ min}$  の降雨強度の雨によって表面流出が始まり、（２）リル間地では地表面がほぼ一様に侵食されるが、リルではリル流域の面積・地点勾配とともに侵食量が増加することが明らかになった。

赤黄色土壌は粒径  $0.1\text{ mm}$  以下の細粒物質で構成されているため、ほとんどが侵食によって流出し、水路断面内では、強いシアーをもつ底面付近から、水面近くまで巻き上げられながら浮流土砂として輸送される。

より高次の流域では、流量の増加にともなう浮流土砂濃度の上昇が認められ、流域の形状による差において論じられた。

第四章では、掃流時の砂礫粒子の運動形態を水路実験により解析した。すなわち、流域水路の状態を模した人工水路をつくり、粒径  $5.0\text{ mm}$  の礫を  $1.5\text{ g/s}$  ずつ  $0.0019\sim 0.0035\text{ m}^3/\text{s}$  の流量をもつ流水中に供給して掃流状態を出現させ、輸送中の砂礫粒子の軌道をビデオ画像によって解析した。この結果（１）砂礫粒子は水路床の底部をラセン状に運動し、かつ（２）径深に比例する横幅をもつクラスターのなかを移動しながら輸送されることが明らかになった。

第五章では本研究の成果を総括している。混相流・浮流・掃流の発生条件を整理すると、土砂礫の供給量、粒子の特性、および流れの状態が関与していることが明らかとなった。

本論文は流域からの土砂流出を、典型的な事例をとりあげることによって、混相流・浮流・掃流という広い範囲にわたって解析したものであり、とくにこれまで個別に論じられてきた斜面での侵食過程と水路での流送過程を結びつけて扱った点で、従来の研究にない新しい視点を提示していると言える。とくに混相流と浮流については、長期にわたる詳細な野外観測をもとに、これまでになく精度で、流域斜面での侵食過程と、泥流や浮流による土砂流出の発生条件を明らかにすることができた。これは、環境地形学に対する大きな貢献であり、審査員一同は申請者が博士（環境科学）の学位を受けるにふさわしいものと判断した。