

[ 別紙 2 ]

## 論文審査の結果の要旨

申請者氏名 堀田 紀文

本研究では、多様な土石流の流動を同じ枠組みの中で統一的に理解することを目的として、構成則に基づく指標を用いた土石流の分類を行った。

第1章では、土石流災害及び対策の実態と、これまでの土石流研究を概観した上で研究課題の整理を行い、本研究の目的と方向性を述べた。1970年代に土石流の現地観測が積極的に実施されるようになって以降、土石流の実態が次々に明らかになった。その結果として、「現象としての土石流の分類」が進み、石礫型土石流、掃流状集合流動、乱流型泥流等、流れの構造に着目して分類されているが、その分類について構成則に基づいた理解が必要である。

第2章では、土石流における間隙水圧の測定を行い、構成則の妥当性について確認した。間隙水圧の測定により、既に実験的に確認されている粒子の非弾性衝突による剪断応力と合わせて、土石流の構成則における剪断応力の三成分のうち二成分が既知となり、流れにかかる全剪断力に対して構成則による推定値が実験的に確認できることとなる。回転円筒水路を用いた間隙水圧に成功し、回転円筒水路特有のメカニズムで発生すると考えられる間隙水圧を評価した上で、粒径6mm以上の粒子の実験ではレイノルズ応力に起因する間隙水圧が他の要因によって生じる間隙水圧に卓越することを明らかにした。

第3章では、既存の水路実験の結果を整理し、土石流における流れの遷移（層流～乱流）が抵抗係数と相対水深（流動深／土砂粒径）によって整理できることを示した。相対水深が20程度までの流れでは、実験値が石礫型土石流の構成則から導かれる抵抗係数の理論線によく一致すること、相対水深の大きな（1000～10000程度）流れでは、清水乱流の抵抗係数の理論線におおよそ一致することが確認された。遷移域にあると考えられる実験ケースにおいて、掃流状集合流動での報告例と同様に、流れ内部にインターフェースを有する場合があった。土砂流れにおける層流～乱流の連続的な遷移が生じるとしてモデル化により、層流～乱流の連続的な遷移がこのようなインターフェースを考慮することによって説明できる可能性が示唆した。

第4章では、土石流におけるレイノルズ数を提示した上で様々な条件下で土石流を模した水路実験を実施し、レイノルズ数によって流れの遷移（層流～乱流）が記述出来ることを示した。土石流のレイノルズ数として、 Buckingham の  $\pi$  定理から求められるレイノルズ数  $Re_1$  と、運動方程式中の慣性項と粘性項の比から求まる  $Re_2$  の2つを示した。 $Re_1$  が4000未満の実験では間隙水圧は静水圧及び層流状態での土石流間隙水圧の理論値に近い値を取る一方、 $Re_1$  が10000を越える実験では、間隙水圧の測定値は全圧と同程度の値を取って

た。乱流状態では間隙水圧がほぼ全圧に等しくなると考えられることから、両者の関係は、土石流においてもレイノルズ数を用いた層流～乱流の区分が可能であることを示した。実験結果に基づき、流れの遷移が生じる限界レイノルズ数として  $Re_{lc}=4000\sim 10000$  を定めて、遷移時の流れの条件について検討し、それぞれの  $Re_{lc}$  において、土石流の濃度と関係なく、相対水深（流動深／土砂粒径）が 40～60 の間で概ね一定値に近い値になることが明らかになった。また、第 3 章で示唆された土石流における連続的な流れの遷移を表現可能な指標を得た。

第 5 章では、前章までの結果を総括し、結論とした。本研究によって、土石流における層流～乱流への遷移が、構成則に基づいた指標（抵抗係数、レイノルズ数）で整理できることが明らかになった。このような相似則を整理した上で流れの分類を行った結果、土石流の流動状態が主に相対水深だけで整理されることの理論的背景を提示した。また、流れの連続的な遷移（層流～乱流）に関する検討の結果、土石流を壁面境界層における粘性底層とのアナロジーで理解することが可能であることを明らかにした。第 3 章と第 4 章で、流れの遷移が生じていたと考えられる相対水深の領域が異なったことから、応力構造と乱流構造の遷移域にそれぞれ違いがあると考えられることも、境界層とのアナロジーで解釈可能である。これらのことは、土石流が本質的に底面の境界条件の影響を強く受けることを意味している。

以上のように、本研究は学術上のみならず応用上も価値が高い。よって審査委員一同は、本論文が博士（農学）の学位を授与するにふさわしいと判断した。