

学 位 論 文 題 名

斜面における浅層地下水および土砂の流出特性と
地下侵食機構に関する研究

学位論文内容の要旨

流域からの水流出とこれに伴う土砂流出は、水利用、防災、生態系保全等、さまざまな側面から人間を取り巻く環境に直接的な影響を与える。そのため、流域に及ぼされる人為的インパクト（作用）に対する破壊的現象の発現（反作用）を緩和させる目的から、流域上流域の森林に対して水土保持機能の発揮が期待されている。とくに近年多様な流域利用が森林の水土保持機能を低下させつつあることから、この水土保持機能強化手法の開発とこれによる流域管理手法の構築が求められている。このためにはまず、森林流域で実際に生起している水文・地形学的諸現象のなかでもとくに水流出と土砂移動の相互作用を解明することが緊急課題となる。

そこで本研究では、森林流域谷頭部斜面における水流出の主要形態である浅層地下水の流出現象とこれに起因する土砂の流出現象について実態観測を行い、それらの流出プロセスの定量的解析と水流出・土砂流出の相互作用の検討とから、地下侵食機構の解明を試みることにした。

第1章では、流域または斜面における浅層地下水と土砂の流出に関する研究史から、森林流域谷頭部を研究対象として扱うことの重要性を指摘するとともに、研究対象地の設定および観測・解析方法について述べた。

第2章では、谷頭部における浅層地下水と土砂の流出実態についての検討を行った。斜面からの浅層地下水流出の実態を解明するために、冷温帯少降雨森林流域試験地（札幌市定山溪・1次谷流域谷頭堆積地）において、地下水位と浅層地下水流出量の継続的観測を行った。その結果、土砂の侵食が発生するような洪水流出時には Darcy 則では説明できないようなパイプを媒介とした浅層地下水流出が支配的であることを明らかにした。

つぎに、パイプの形成過程における浅層地下水流出に伴う土砂流出（地下侵食）の実態については、暖温帯多雨森林流域試験地（愛知県瀬戸市・北谷流域谷頭部）で生じた粗粒土砂の流出とそれに伴う林地の荒廃の実態解析から、パイピングに伴う土砂の流動化により土砂流出が生じ、その結果、地形変化（地表面陥没）が発生した事実を確認した。さらに、土砂流出（地下侵食）に及ぼすパイプの機能を明らかにするために行った札幌試験地の浅層地下水と細粒土砂（粒径 0.106 ～ 0.001 mm）の流出実態解析から、観測されたすべての流出において細粒土砂流出量のピークが浅層地下水流出量のピークに先行し、浅層地下水流出と細粒土砂流出の変動が一致しないことを明らかにした。

第3章では、斜面における浅層地下水の流出過程解析によって地下水流出に及ぼすパイプの機能を定量的に把握するために、パイプ流出に関する室内モデル実験を行い、斜面での浅層地下水の流出形態を明らかにすることを試みた。その結

果、パイプ経由の流出水が斜面での浅層地下水流出に大きく影響しており、その流出形態はパイプ排水能力の大小により決定されていること、すなわち、土砂流出が発生するような出水時においては、パイプ経由の浅層地下水流が流出の主成分を占めることが確かめられた。流域谷頭部の土層底部には透水性の高い層が形成されることが既往研究で指摘されていることから、ここで明らかにされた浅層地下水の流出特性は一般流域に適用できる普遍的な現象であると位置づけられた。

第4章では、浅層地下水流出に伴う粗粒土砂流出（パイプの形成と地下侵食）過程の定量的把握を試みた。まず、浅層地下水流出に伴う土砂移動（流動化とセン断破壊）に関する既往理論式に基づいて、動水勾配と流動方向の変化に焦点をあて、土砂移動の発生に関する力学的条件を検討した。

次に、有限要素法を用いた数値実験によって、パイピングに伴う粗粒土砂の流出発生時における斜面内浅層地下水の動水勾配を計算した結果、パイピング発生地点である斜面脚部では、降雨時に動水勾配が0.8程度まで上昇すること、浅層地下水流の流向が斜面傾斜に対して 72° まで上向きになること、を明らかにした。さらに、流動化実験により、実際に平面において流動化による土砂移動が生じるときの動水勾配を算出した結果、1.0以上の限界動水勾配が必要であることがわかり、このとき様々な土砂移動形態を示すことを明らかにした。そして、これら数値実験値および流動化実験値と実際の水文観測データとの整合性を基に、粗粒土砂の流出機構の理論的検討を行った。その結果、動水勾配の変化に伴うセン断破壊や流動化により粗粒土砂の移動が発生しパイプが形成される可能性、および粘着力の差による土砂移動形態の違い、などの説明が可能となった。

第5章では、土砂流出に及ぼすパイプの機能の解明のために、谷頭部斜面における細粒土砂を対象とした地下侵食機構を明らかにすることを試みた。その結果、加速度的増水過程（ハイドログラフが下に凸の形態を示す期間）では、地下水流水量変化率と細粒土砂フラックスの関係が一次近似できることが明らかになった。そこで、両者の関係に基づいて出水時における「侵食」、「運搬」という過程を微視的に捉え、加速度的増水過程では侵食と運搬が行われること、減速度的増水過程（ハイドログラフが上に凸の形態を示す期間）では侵食力が小さくなること、減水過程では侵食が生じないこと、などを明らかにした。これにより、浅層地下水流出と細粒土砂流出の関係において時計回りのヒステリシスが生じる原因について、定量的データを基に説明し得ることが明らかとなった。

第6章では、浅層地下水流出と細粒土砂流出の相互作用を検討するとともに、地下侵食が斜面崩壊等の地形変化に及ぼす影響や流域環境に与える影響について論じ、侵食抑制・水質形成に対する技術的可能性について考察した。

浅層地下水と細粒土砂の相互作用では、細粒土砂の流出と谷頭部斜面土層の排水能力の変動が極めてよく一致し、細粒土砂流出が谷頭部の浅層地下水流出システムに大きく影響してくることが明らかになった。すなわち浅層地下水の作用に支配された細粒土砂の流出過程だけでなく、細粒土砂の流出自体が浅層地下水の流出形態に影響を与えていることを指摘した。

地下侵食が地形変化に及ぼす影響については、細粒土砂の流出が粗粒土砂の流出に密接に関わること、すなわち細粒土砂流出が地下侵食の初期段階として細粒部の脱落・運搬という物理的風化を促進する現象であるため、その後続く粗粒土砂流出に大きく影響するものと考察した。また、浅層地下水流の動水勾配と加速度が比例することから、粗粒土砂の移動は、動水勾配が増加することにより加速度が大きくなり浸出水力（侵食力）が増大して生じるもの、と規定した。したがって、パイプの形成時に発生したパイピングが、浅層地下水流出が徐々に進行したときのセン断破壊によるものではなく、動水勾配が増大したときの土層の流

動化により発生した可能性が高いことを指摘した。

最後に、地下侵食による土砂流出が流域環境の変化に及ぼす影響について考察するとともに、侵食抑制や水質形成に対する技術的提言を行った。

学位論文審査の要旨

主査	教授	新谷	融
副査	教授	波多野	隆介
副査	教授	笹	賀一郎
副査	助教授	中村	太士

学位論文題名

斜面における浅層地下水および土砂の流出特性と 地下侵食機構に関する研究

本論文は、表 9、図 40 を含む総頁数 111 の和文論文である。別に参考論文 33 編が添えられている。

わが国のように湿潤気候下の森林被覆流域では、斜面に供給された降水のほとんどが地表下に浸透し、自然的な地表変動あるいは人為的な地表改変がない限り地表流が発生することは希であるため、土砂流出に起因する地形変化や河川の水質形成は、山地斜面の水流出過程において行われることとなる。しかし、斜面の地下水流出による地形変化への影響や、水流出と地形変化の相互作用については殆ど解明されていない。したがって森林の水土保持機能の定量的解明には、まず、斜面における地下水流の挙動とその作用による土砂流出（地下侵食）の関係を明らかにしなければならない。本研究は、森林流域谷頭部斜面での水流出の主要形態である浅層地下水流出とこれに起因する土砂の流出プロセスの定量的解明とこれら相互作用の検討を行い、浅層地下水流による地下侵食機構を明らかにし、流域管理技術に係る基礎的知見を得ることを目的としたものである。

第 1 章では、流域および山地斜面における浅層地下水と土砂の流出に関する研究史から、森林流域谷頭部における浅層地下水および土砂の流出特性解明の意義を指摘するとともに研究対象地の設定および観測・解析方法の概要を述べている。

第 2 章では、土砂流出には細粒土砂流出と粗粒土砂流出の 2 形態が見られることを現地観測に基づいて明らかにしている。森林保全域の札幌市定山溪試験地では、地下水位と浅層地下水流出量、土砂流出の継続観測の結果から、浅層地下水流出は土壌下層にあるパイプを通る選択的な流出であることを認め、洪水流出時に細粒土砂流出が水流出より早く生じることを示している。一方、森林荒廃域の愛知県瀬戸市北谷試験地においては粗粒土砂流出を観察している。これは札幌市定山溪の事例と異なり、むしろ浅層地下水流出に伴ってパイプが形成されるパイピングによって土砂が噴出したことに起因するものとしている。

第 3 章では、斜面での浅層地下水の流出形態を明らかにするためパイプ流出に関する室内モデル実験を行った結果、パイプを経由する流出水は斜面浅層地下水流出に大きく支配されており、その流出形態はパイプの排水能力の大小により決

定されていること、さらに、土砂流出を起生する出水時にはパイプ経由の地下水流が流出の主成分を占めることなどを明らかにしている。

第4章では、浅層地下水流出に伴う土砂移動の発生に関する力学的条件を検討している。まずモデル斜面における有限要素法を用いた数値実験により、パイピングに伴う粗粒土砂の流出発生時における斜面浅層地下水の動水勾配と流動方向を求めたところ、パイピング発生地点の斜面脚部における動水勾配は降雨時に0.8程度に上昇すること、さらに流動方向は斜面傾斜に対して 72° まで上向きになることを明らかにした。つぎに、土壌パイプ斜面土層サンプリング試料を用いた流動化実験により土砂移動発生限界の動水勾配は1.0以上と算出された。これらの数値実験値および流動化実験値と水文観測値との整合性を基に粗粒土砂流出機構の理論的検討を行った結果、セン断破壊や流動化によって粗粒土砂の移動が発生する可能性や、粘着力の差による土砂移動形態の違い、などについての理論的説明を展開している。

第5章では、谷頭部斜面における細粒土砂流出を対象とした地下侵食機構の解析を行い、加速度的増水過程では地下水流出量変化率と細粒土砂フラックスの関係が一次近似できるとの知見を得ている。この結果から、浅層地下水流出と細粒土砂流出の関係において時計回りのヒステリシスが生じる原因を明らかにしている。

第6章では、浅層地下水流出と細粒土砂流出の相互作用について検討を行い、細粒土砂の流出と谷頭部斜面土層の排水能力の変動が極めてよく対応すること、また細粒土砂流出が浅層地下水流に支配されるばかりでなく、谷頭部の浅層地下水流システムそのものに大きく影響しているという、水と土の相互作用についての新知見を提示している。

さらに、浅層地下水流の動水勾配と加速度が比例することから、パイピングによる粗粒土砂の移動は動水勾配の急増・加速度増大に伴う浸出水力（侵食力）の増大すなわち流動化によるものとの指摘を行っている。

そして最後に、地下侵食による土砂流出が流域環境の変化に及ぼす影響について考察し、森林流域斜面の侵食抑制や水質形成に対する技術的提言を行っている。

以上のように本研究は、森林流域斜面の浅層地下水流出とこれに伴う土砂流出の現象実態解析と理論的検討とによって、これらの流出特性ならびに相互作用に基づく地下侵食機構を明らかにし、流域管理技術構築に係る重要な新知見を提示したものであり、この成果は学術面および応用面から高く評価される。

よって審査員一同は、別に行った学力確認試験の結果と合わせて、本論文の提出者寺嶋智巳は博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認定した。