

学位論文題名

土砂収支解析による流域土砂輸送の時空間特性に関する研究

学位論文内容の要旨

流域で生ずる土砂の輸送現象を、人間生活に損失を与えないように制御する砂防事業は、我が国の社会情勢の変化に応じて進められてきた。明治期以降は一貫して、水源山地からの土砂流出を抑制して河川の洪水流下能力を保全する治水対策が目的とされてきたが、高度経済成長期以降、土地利用の拡大に伴って頻発した直接的な土砂災害に対処するため、事業の焦点は局所的土砂災害対策に移行している。山地流域の土砂輸送に関する我が国の研究も、砂防事業と同じ変遷を辿っており、1950年代以降活発に行われた流域の土砂生産・流出の研究はマクロ的な要因解析の段階にとどまり、かわって最近の20年程度においては、斜面崩壊・土石流など個別の輸送プロセスの研究が主流となっている。しかし近年、ダム貯水池の土砂埋没、河床低下、海岸侵食の激化など、水系における土砂配分の不均衡が問題となり、さらに最近の自然環境保全に対する社会の要請もあって、土砂輸送現象の時空間特性の理解に基づく水系的な土砂管理が求められている。そこで本論文では、斜面から河道を経て流域外へと至る、流域を通した土砂輸送過程を対象として、異なった時間スケールでの比較によりその時系列推移と、流域の構造に着目してその空間的変異について解析し、流域土砂輸送の時間的・空間的な特性を検討することを目的とした。

第1章では、本研究の目的と方法を述べた。研究方法として用いた土砂収支解析は、流域における土砂の移動・滞留・流出の程度を定量的に明示し、それらを土砂輸送経路に沿って統合して、移動・滞留・流出の相互の関係を時空間スケールを考慮した土砂量収支として解析することである。研究対象流域は北海道日高地方の沙流川流域であり、ここでは過去一万年間に噴出した降下テフラが広域に分布するため、これを用いて斜面崩壊の長期発生履歴を検討できる

こと、また過去 35 年間にわたって堆砂量計測が続けられている岩知志ダムがあり、土砂流出の時系列資料が得られること、が研究上の利点である。

第 2 章では、沙流川流域の 4 つの支流域（面積約 2 km²、水流次数 3 次）を土砂収支解析の試験流域として設定し、過去 30 年間で最大規模に匹敵する雨量となった 1992 年豪雨時の土砂輸送の実態を、豪雨前後の詳細な現地計測に基づいて述べた。2 つの試験流域では 30 年間で最大規模の土砂輸送が生じ、斜面においては 100 箇所近い表層崩壊、低次（0,1 次）流路では相対的に小規模な河床洗掘、高次（2,3 次）流路では河床が長区間にわたって厚さ 1 m 以上埋積される大規模な土砂堆積が発生した。

第 3 章では、上記の土砂輸送量の計測結果から単一イベントでの土砂収支を組み立て、個々の輸送プロセスの土砂収支に対する寄与を量的に評価した。すなわち、移動土砂の 70～80 % は斜面崩壊、10～30 % は低次流路洗掘によって供給され、一方、滞留土砂の 70～80 % は高次流路堆積、20 % 弱は斜面崩壊残土として分布していた。また、流域を構成する地形要素の土砂輸送における挙動を、地形要素の構成割合が異なる小流域単位の土砂収支の比較によって検討した結果、斜面が最大の、低次流路も少量ながら侵食場として機能し、両者での侵食がある面積で確率的に発生していること、高次流路は緩勾配の幅広い河床空間によって滞留場として効果的に機能すること、が判明した。

第 4 章では、樹木年代編年を用いた現地痕跡計測と空中写真判読によって、試験流域での過去 30 年間の土砂輸送履歴を復元し、期間土砂収支を組み立てた。そして、期間土砂輸送量に基づいて土砂の輸送速度を推定し、さらに輸送過程に介在する土砂滞留現象を分析した。崩壊速度は 3 流域において 30 年間の平均で約 1000 m³/km²/yr であり、また治山ダム堆砂量から推定した 2 流域の土砂流出速度は、8～9 年間の平均で 450 および 2300 m³/km²/yr であった。このような崩壊速度と流出速度の不均衡が、流域内での滞留土砂の増減であり、最大の滞留場である高次流路の土砂滞留時間を、滞留土砂の容量と洗掘速度から計算した結果、イベント発生が低頻度・大規模の流域において約 60 年、高頻度・中規模の流域で約 10 年であった。また他の滞留要素について、低次流路の滞留土砂は、崩壊による供給・蓄積と河床洗掘による大量排出という挙動を示し、その滞留時間は数 10 年オーダーと推測されること、さら

に斜面崩壊残土は再崩壊によって排出すること、を述べた。

第5章では、流域内での101年オーダーの土砂滞留によって、短期的に変動を示す流域土砂輸送の長期間の推定を行うために、輸送の初期過程である斜面崩壊の長期発生履歴を2つの試験流域において調査した。斜面を覆うテフラが崩壊によって除去される観察事実に基づき、320, 3000, 8000年前の各テフラの斜面残存分布から過去の崩壊発生域を判別し、その面積を計測した。320年間の平均崩壊速度は2流域ともに約 $1000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ で、30年間での崩壊速度と一致した。また、崩壊再現期間と同一斜面での8000年間の崩壊反復回数は、新第三系流域で365年、22回、白亜系流域で641年、12回と計算され、地質と調和的な崩壊頻度の相違が認められたが、崩壊発生1回あたりの斜面削剥深の違いによって、8000年間の平均崩壊速度は両流域で同等であった。さらに、過去8000年間の崩壊速度は現在の速度と同等であり、斜面崩壊が長期間にわたり定常的に発生していることが判明した。

第6章では、流域土砂輸送の空間特性を検討するために、輸送の最終過程である土砂流出に注目し、新たに提案した小規模ダムの堆砂を計測する簡便な方法によって、土砂流出の広域調査を沙流川水系の42流域で行った。そして、土砂流出の水系内での変異や流域サイズに伴う変化など、その空間的な変異特性を解析した。まず、岩知志ダム（集水面積 567 km^2 ）の堆砂経過の分析から、短期的な流出速度は期間ごとの大雨頻度を反映して $60\sim 200 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ と時系列的に変動することが確認され、また大面積流域の特徴として源流域の侵食場からの土砂流送時間が想定された。面積 10 km^2 以下の流域が大多数を占める広域調査の結果は、流出速度が $20\sim 2600 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ ときわめて多様であった。流出速度には流域面積の増大に応じて低減する関係が認められ、これは源流域ほど活発な侵食と下流域ほど多い滞留空間の反映とみなされた。また地質の観点では、流出速度が新第三系流域で $10^3 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ オーダー、白亜系流域で $10^2 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{yr}$ オーダーと明確に異なり、このことは大雨累計雨量に対する土砂流出応答性の解析でも確認され、岩質ごとの受食性、具体的には30年未満の短期間における崩壊速度の違いが反映した結果と判断された。

第7章では、斜面侵食の支配的なプロセスが長期間においても崩壊であることを述べるとともに、土砂輸送の初期過程である崩壊侵食の8000年間にわた

る定常性によって、流域内での土砂滞留時間を超える数 100 年の時間スケールでは、流域土砂輸送は定常状態にあり、流出速度は崩壊速度とほぼ均衡すると推察した。そして、流域を通した土砂輸送過程のモデルを、流域内の地形要素の空間系列に沿って、土砂輸送の時間的特性値とともに提示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 新 谷 融
副 査 教 授 笹 賀 一 郎
副 査 教 授 松 田 豊
副 査 助 教 授 中 村 太 士

学 位 論 文 題 名

土砂収支解析による流域土砂輸送の時空間特性に関する研究

本論文は、表15、図21を含む総頁数129の和文論文である。別に参考論文14編が添えられている。

近年、ダム貯水池の土砂埋没、河床の異常低下、海岸侵食の激化など、水系における土砂輸送の不均衡が顕在化するとともに、最近の自然生態系保全に対する社会的要請もあり、流域環境動態の時空間特性に対応した水系的土砂管理手法の確立が求められつつある。しかし、流域で生じている土砂輸送現象は多様な時空間スケールと地域性を持ち、かつそれらに関する実測データの集積が乏しいために水系的土砂動態の解析手法は未確立である。そこで本研究は、山地上流の斜面から河道を経て、本川河道・海域といった流域外へ至る水系的土砂輸送過程を対象に、異なった時間・空間スケールでの比較解析によって、その時系列推移と流域時空間特性の解明を行ったものである。研究成果の概要は以下のようである。

1. 研究対象流域とした北海道日高地方沙流川流域において、4つの小試験流域（面積約2km²、水流次数3次）を設定し、過去30年間で最大規模の豪雨に伴う土砂輸送の水系的実態について土砂収支解析を行っている。土砂輸送における挙動特質の違いに基づいて、流域を斜面、低次流路（0,1次）、高次流路（2,3次）の3つの地形要素に区分し、土砂生産では斜面新規崩壊が70~80%、低次流路洗掘が10~30%、また土砂滞留では斜面残土が20%弱、高次流路堆積が70~80%と、各地形要素で生じた輸送プロセスの流域土砂収支に対する寄与を評価するとともに、流域内における地形要素の分布特性を明らかにしている。

2. 樹木年代編年を用いた現地痕跡計測と空中写真判読によって、試験流域における過去30年間の土砂輸送履歴と期間土砂収支を復元し、土砂輸送速度の推定と、輸送過程に介在する土砂滞留現象の分析を行っている。30年間の平均崩壊速度が約1000m³/km²/yrであるのに対し、治山ダム堆砂量から推定した平均流出速度は450および2300m³

/km²/yrであり、崩壊速度と流出速度の不均衡が流域内での土砂滞留現象の反映であると位置づけた。そして、流域内での最大の土砂滞留場となる高次流路の土砂滞留時間は、イベント発生が低頻度・大規模の流域において約60年、高頻度・中規模の流域で約10年であること、また低次流路の土砂滞留時間は数10年オーダーであることを明らかにしている。

3. 上記の 10³年オーダーの土砂滞留によって短期的に変動する、流域土砂輸送の長期間の推移を検討するために、320、3000、8000 年前の降下火山灰層序解析によって、斜面崩壊の長期発生履歴を復元している。斜面を覆うテフラが崩壊によって消失している観察結果に基づき、斜面のテフラ残存分布によって判別した崩壊発生域の面積と年代を用いて、崩壊発生量とその長期推移について解析した。その結果、長期間（320年間）の平均崩壊速度は約1000m³/km²/yr となり、中期間（30年間）の平均崩壊速度と一致した。さらに、崩壊再現期間と崩壊発生頻度から求めた過去8000年間の平均崩壊速度は現在の崩壊速度と同等であり、斜面崩壊が長期間にわたって定常的に発生しているものと結論している。

4. 小規模ダムの堆砂を用いた簡便で汎用性の高い土砂流出調査手法を新たに開発し、この方法によって土砂流出広域調査（42流域）を行い、流域土砂輸送の空間特性を検討している。流出土砂量と流域面積との解析から、土砂流出の多い流域群においては流域面積の増大に応じて流出土砂量が減少する傾向が認められ、これは侵食場と滞留場の空間分布様式が流域規模に応じて変化することによるものであることを明らかにしている。また流域構成地質については、短期間（10年間）平均流出速度（単位：m³/km²/yr）が新第三系流域で10³、白亜系流域で10²オーダーと明確に異なった。このことは大雨累積雨量に対する土砂流出応答の差異としても確認され、流域構成地質ごとの受食性が崩壊発生頻度の違いに反映したものと論じている。

5. 以上の結果について総合考察を行い、崩壊侵食の長期間にわたる定常性によって、土砂滞留時間を超える数100年の時間スケールでは、流域土砂輸送が定常的現象であることを解明し、水系的土砂輸送過程について、流域内の地形要素の空間分布に沿った、土砂輸送の時間的特性値の提示とともにモデル構築を行っている。

以上のように本研究は、水系的土砂輸送過程を対象に、その時系列推移と空間的変異の検討によって、土砂輸送現象の時空間特性の解明に係る認識手法と解析方法を提示したものであり、その成果は学術面ならびに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、本論文の提出者清水収は博士（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。